

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

На правах рукописи

ПРИТЧИН СЕРГЕЙ ЭМИЛЬЕВИЧ

УДК 621.317.799+621.315.5

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОДЛОЖЕК АРСЕНИДА  
ГАЛЛИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.**

05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук

Научный консультант

Оксанич Анатолий Петрович

доктор технических наук,

профессор

Кременчуг - 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Раздел 1 ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА, МЕТОДЫ И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ В ПОДЛОЖКАХ GaAs.....	18
1.1 Технология выращивания слитков арсенида галлия. Влияние технологических параметров выращивания на параметры подложек. Технологические процессы подготовки подложек.....	18
1.2. Факторы, влияющие на структурные нарушения и отклонение от плоскостности подложек GaAs. ....	28
1.3. Методы и аппаратура контроля величины и распределения остаточных напряжений в подложках GaAs.....	35
1.4. Методы и аппаратура контроля отклонение от плоскостности в подложках GaAs.....	39
1.5. Методы и аппаратура контроля плотности дислокаций в подложках GaAs.....	43
1.6. Цель и задачи исследования. ....	47
Выводы по разделу.....	50
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА ПОДЛОЖЕК АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ .....	52
2.1. Усовершенствование математической модели зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона от кристаллографической ориентации подложек GaAs.....	52
2.2. Разработка математической модели влияния остаточных напряжений на механические свойства подложек GaAs.....	71
2.3. Разработка математической модели влияния кристаллографической ориентации подложек GaAs на плотность дислокаций.....	85

	2
Выводы по разделу.....	104
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ В ПОДЛОЖКАХ GaAs.....	105
3.1. Разработка методики контроля остаточных напряжений в подложках GaAs.....	105
3.2. Разработка методики контроля плотности дислокаций в подложках GaAs.....	118
3.3. Разработка методики контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs.....	124
Выводы по разделу.....	131
РАЗДЕЛ 4 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ ПОДЛОЖЕК GaAs.....	133
4.1. Усовершенствование метода и разработка устройства неразрушающего контроля остаточных напряжений.....	133
4.2. Усовершенствование метода и разработка устройства неразрушающего контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs.....	166
4.3. Усовершенствование метода и разработка устройства контроля плотно- сти дислокаций в подложках GaAs.....	174
4.4. Определение метрологических характеристик разработанных устройств.....	194
4.4.1. Определение метрологических характеристик устройства «Полярон – 4» .....	194
4.4.2. Определение метрологических характеристик устройства «АКИДП – 1» .....	202
4.4.3. Определение метрологических характеристик устройства «ТВ-Дислок 1» .....	207
Выводы по разделу.....	210
РАЗДЕЛ 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОДЛОЖЕК GaAs ДИАМЕТРОМ 4//. ....	212

5.1 Разработка, устройства контроля диаметра выращиваемого слитка GaAs. ....	212
5.2. Разработка технологии отжига слитка GaAs. ....	233
5.3. Разработка технологии шлифовки подложек GaAs. ....	244
5.4. Разработка устройства для шлифовки подложек GaAs.....	254
Выводы по разделу.....	266
РАЗДЕЛ 6 ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЛОЖЕК GaAs ИЗГОТОВ- ЛЕННЫХ ПО РАЗРАБОТАНОЙ ТЕХНОЛОГИИ. ....	267
6.1. Исследование остаточных напряжений в подложках GaAs возникаю- щих в процессе их производства. ....	267
6.2. Исследование отклонения от плоскотности в подложках GaAs .....	271
6.3. Исследование влияния режимов технологических параметров процесса производства подложек GaAs на плотность дислокаций. ....	276
6.4. Исследование влияния качества подложек GaAs на элементы ИК- оптики.....	279
Выводы по разделу. ....	287
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	288
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	293
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ТРУДОВ.....	314
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	321
Приложение А.....	324
Приложение Б.....	326
Приложение В.....	328
Приложение Г.....	330

## СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

$c$	константа упругой жесткости
$G$	модуль сдвига.
GaAs	арсенид галлия
$s$	константа упругой податливости
$S$	тензор констант упругой податливости
$\nu$	коэффициент Пуассона
$\gamma$	сдвиговая деформация
$\delta$	относительное замедление вызванное напряжением
$\varepsilon$	деформация
$\Theta$	угол между осью поляризатора и осью главного направления напряжений
$\sigma$	напряжение
$\tau$	касательное напряжение
$E$	модуль Юнга
$C_{ijkl}$	тензор упругих постоянных
$C$	скорость звука
$\tau_{eff}$	эффективное напряжение
$Q$	потенциал Пайерлса
$k$	постоянная Больцмана
$\psi$	угол двулучепреломления
$\chi$	угол поворота анализатора
$\varphi$	угол поворота поляризатора
$\delta_s$	средняя систематическая погрешность

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Высокочистый монокристаллический арсенид галлия (GaAs) является одним из основных полупроводниковых материалов, который используется в современной электронной промышленности. Широкое применение этого соединения обуславливается его уникальными свойствами. Характеристики приборов, которые изготавливаются на основе GaAs, во многом превышают параметры приборов изготавливаемых на основе кремния и германия.

Начиная с 1954 года, когда впервые было синтезировано это соединение, и было обнаружено что оно является полупроводником, интерес к изучению его свойств продолжает оставаться довольно большим. Постоянно совершенствуются технология и оборудование выращивания слитков арсенида галлия направленные на увеличение диаметра выращиваемых слитков и улучшение их структурного совершенства.

Изучением свойств и разработкой технологии выращивания арсенида галлия, разработкой устройств на его основе занимались и занимаются достаточно большое число как зарубежных, так и отечественных ученых. Можно назвать такие известные имена как Ямамото, Стилман, ДиКарло, Бюрнер, Ж.И. Алферов, М.Г. Мильвидский, В.Г. Литовченко, А.Е. Беляев, Р.В. Конакова, М.К. Шейнкман, Г.П. Ковтун, А.П. Оксанич, М.Л. Дмитрук, И.Е. Марончук и другие.

Не смотря на то, что в начале 2000 – х годов наблюдался спад производства, с 2010 года состояние рынков продуктов на основе арсенида галлия значительно улучшилось [1]. Эта тенденция роста будет сохраняться и в дальнейшем.

Одним из направлений применения электронных приборов GaAs являются СВЧ элетроника (создание приборов с частотами свыше 250 ГГц.), в частности радиомодули смартфонов, объем продаж, которых будет расти на 15 -25% в год и силовая электроника в виде быстродействующих высокомоощных ключей.

Другим сегментом рынка арсенида галлия является сектор производства светодиодов с высокой яркостью излучения. Обеспечение задней подсветки экранов ноутбуков, плоско панельных экранов компьютерных мониторов и телевизоров яви-

лось движущей силой роста потребления высоко яркостных светодиодов в 2015 году.

Активно развивающейся областью применения арсенида галлия является рынок альтернативных источников энергии. Не смотря на то, что в настоящее время основной объем производства фотоэлектронных преобразователей для солнечных электростанций основывается на кремниевых элементах, арсенид галлия с каждым годом занимает все более широкий сектор.

Большую роль GaAs играет в производстве датчиков радиационного излучения и в изделиях ИК - оптики.

Для ряда применений необходимы подложки больших диаметров, 100 и более миллиметров. К подложкам GaAs предъявляются жесткие требования, в том числе по содержанию дислокаций, остаточным напряжениям и отклонению от плоскотности, так например подложки диаметром 4'' (метод LEC) выпускаемые компанией Sumitomo Electric (Япония) имеют уровень остаточных напряжений менее 50 МПа, плотность дислокаций для подложек выпускаемых Wafer Technology Ltd (Англия) и Freiburger Compound Materials GmbH (Германия) находится в пределах  $1,5 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ , и отклонение от плоскостности менее 2,5 мкм.

Параметры кристаллической решетки GaAs тесно взаимосвязаны с характеристиками полупроводниковых приборов [2]. Дефекты, играют важную роль в отклонениях параметров кристаллической решетки GaAs [3]. Нарушение кристаллической решетки приводит к изменению механических свойств подложки, а именно: упругих постоянных, модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

В связи с этим к совершенству кристаллической структуры подложек на основе GaAs предъявляются исключительно высокие требования.

Если влияние дислокаций на электрические параметры GaAs исследовались достаточно полно [4], то влияние этих дефектов на механические свойства исследовано не достаточно.

Для измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия (GaAs) широко используются методы поляриметрии, в основе которых лежит измерение двойного лучепреломления (двулучепреломление) [5].

В том случае если двулучепреломление является незначительным необходимо подготавливать образцы толщиной в несколько миллиметров, чтобы увеличить сдвиг фазы, которая пропорциональна толщине образца. Подложки арсенида галлия изготавливаются толщиной 650 мкм для подложек диаметром 100,0 мм. Измерение уровня остаточных напряжений для таких толщин требует усовершенствования метода измерения, модернизации аппаратуры с целью увеличения чувствительности измерительного тракта, разработки нового программного обеспечения включающего в себя цифровую обработку.

Метод Чохральского с жидкостной герметизацией (ЛЕС-метод), остается одним из основных в производстве GaAs уже более 40 лет. Основным вариантом технологии ЛЕС — совмещенный процесс синтеза GaAs и выращивания монокристалла в установках высокого давления. Типичные значения диаметров выращиваемых слитков составляют 100—150 мм, появились также коммерческие кристаллы диаметром 200 мм [6].

При выращивании слитков методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида. При выращивании слитков арсенида галлия этим методом процесс осуществляется при достаточно больших осевых и радиальных градиентах температуры вблизи фронта кристаллизации. Это приводит к высокой плотности дислокаций, которая лежит в диапазоне от  $1 \times 10^4$  до  $3 \times 10^5$  см<sup>-2</sup> в зависимости от диаметра слитка. В тоже время сущность ЛЕС метода не позволяет использовать традиционные и хорошо зарекомендовавшие себя при выращивании слитков кремния методом Чохральского способы измерения диаметра слитка [7], что оказывает влияние на изменение температурных градиентов. Измерение диаметра слитков GaAs при их выращивании методом ЛЕС производится методом прямого измерения веса слитка с использованием датчика веса.

С увеличением диаметра выращиваемого слитка уровень термоупругих напряжений возрастает [8]. Отжиг слитка - обязательный технологический процесс производства подложек GaAs. Во время отжига снимаются термоупругие напряжения и как следствие улучшаются механические свойства слитка и электрические характеристики подложек.

Решение задачи усовершенствования технологии и аппаратуры для отжига слитка арсенида галлия является актуальной задачей, как с научной так и с практической точки зрения.

Электрические параметры микроэлектронных приборов в основном определяются структурным совершенством подложек (плотность дислокаций, уровень остаточных напряжений) на которые наносится эпитаксиальный слой. Однако применение подложек с малой плотностью исходных дефектов еще недостаточно, так как дефекты могут быть введены в процессе операций подготовки, которые включают в себя резку пластин, шлифование, полировку.

При механической шлифовке, вследствие воздействия шлифовального материала на подложку, возникают дефекты, связанные с процессом обработки в виде микрорельефа, микротрещин и областей скопления дислокаций [9].

Пластическая деформация подложек во время высокотемпературной обработки возникает вследствие температурного градиента между краем и центром пластины [10]. В работах [11–13] показано влияние дислокаций на величину механической прочности. Деформация подложек приводит к искажению формы и размеров элементов топологии ИС на кремниевой структуре и влияет на один из важных параметров – суммарное отклонение от параллельности и плоскостности.

Таким образом, можно утверждать, что отклонение от плоскостности подложки может усложнить технологические стадии, такие как фотолитография, диффузия, эпитаксия, и т.д., а также может изменить электрические характеристики готовых полупроводниковых устройств и микросхем.

В тоже время вопросы, связанные с задачей контроля отклонения от плоскостности полупроводниковых пластин и улучшения производственной технологии полупроводниковых устройств, все еще остаются актуальными и должны быть далее исследованы.

Таким образом, решение важной научно-практической проблемы повышения качества подложек для приборов на основе арсенида галлия, конкурентно способных на мировом рынке, возможно путем разработки технологии производства арсенид галлиевых подложек для изделий микроэлектроники имеющих уровень оста-

точных напряжений не более 40 МПа, плотность дислокаций не более  $1.3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$  и отклонение от плоскостности не более  $\pm 2 \text{ мкм}$ .

Для решения этой задачи необходимо провести целый ряд исследований и решить вопросы, которые в настоящее время решены не полностью. В частности необходима разработка ряда математических моделей, описывающих формирование внутренних напряжений и дислокаций, требуется разработка теоретических основ, методик и инженерно-технических решений для создания ряда устройств контроля, структурного совершенства подложек арсенида галлия, разработка технологических цепочек и операций изготовления подложек.

Решение этих задач является актуальным как с научной, так и с практической точки зрения. Результатом будет, увеличение выхода годных изделий, в частности эпитаксиальных структур, а также увеличение объемов производства и расширение рынков сбыта.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнялась автором на кафедре информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, в соответствии с государственной целевой научно-технической программой «Нанотехнологии и наноматериалы на 2010-2014 года». Работа связана с реализацией следующих научно-исследовательских работ: НИР «Разработка способов и методов экспресс-контроля структурных несовершенств в слитках монокристаллического кремния и арсенида галлия» ГР №0106V000055; НИР «Исследования механизма формирования термоупругих напряжений в пластинах кремния, германия и арсенида галлия методом ИК-поляриметрии» ГР № 0109U002281; НИР «Исследование влияния процессов тепломассопереноса на электрофизические и структурные свойства монокристаллического кремния и арсенида галлия в процессе их выращивания» ГР № 0106V000056; НИР – «Создание совершенных технологий выращивания структурно-совершенного арсенида галлия» ГР № 0114U003986; НИР – «Создание автоматизированных комплексов контроля параметров полупроводников» ГР № 0114U003987; хозяйственной НИР «Разработка автоматизированной системы управления группой технологических установок выращивания монокристаллов ар-

сенида галлия», хоздоговор № 214/11-«ИУС-Галар» от 12.12.2011 г., заказчик ЧП «Галар», г. Светловодск.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертации является решение актуальной научно-практической проблемы – повышение качества подложек арсенида галлия применяющихся для изделий микроэлектроники путем разработки и внедрения новой технологии изготовления подложек, а также усовершенствование методов, методик и оборудования для неразрушающего контроля качества подложек.

Основные задачи диссертационной работы, которые определены поставленной целью:

– провести анализ состояния и тенденций развития технологии выращивания слитков GaAs и производства подложек, обосновать необходимость разработки новых или модернизации существующих технологических процессов производства подложек GaAs;

– определить влияние механических свойств GaAs на остаточные напряжения в зависимости от кристаллографической ориентации;

– усовершенствовать метод, методику и разработать аппаратуру неразрушающего контроля уровня остаточных напряжений, отклонение от плоскостности и плотности дислокаций в подложках GaAs;

– усовершенствовать метод измерения диаметра слитка GaAs в процессе выращивания, для обеспечения измерения диаметра с точностью не менее  $\pm 1,5$  мм на участке с постоянно заданным диаметром и плотность дислокаций не более  $1.3 \times 10^5$  см<sup>-2</sup>;

– разработать технологию для отжига слитков, обеспечивающую уровень остаточных напряжений не более 40 МПа по краю подложки;

– разработать технологию и оборудование для шлифовки подложек, обеспечивающих уровень нарушенного слоя не более 10 мкм;

– определить влияние технологических обработок подложек на их деградационную стойкость в ИК области.

**Объектом исследования** является технологический процесс изготовления подложек арсенида галлия.

**Предмет исследования** – остаточные напряжения, отклонение от плоскостности и дислокации в подложках GaAs.

**Методы исследования.** Диссертационное исследование базируется на системном анализе результатов современных теоретических и прикладных разработок отечественных и зарубежных ученых в области физики полупроводников и технологических процессов производства объемных монокристаллов. При решении поставленных задач использована теория функционала плотности для построения моделей механических свойств подложек GaAs, а также следующие хорошо апробированные методы:

- метод фотоупругости для исследования внутренних напряжений в подложках GaAs;
- метод селективного травления для контроля плотности дислокаций;
- метод световой интерферометрии для контроля отклонения от плоскостности подложек;
- метод рентгеноструктурного анализа для определения параметров кристаллической решетки подложки;
- рентгенодифракционный метод для определения качества механической обработки;
- метод электронной микроскопии для определения глубины нарушенного слоя подложек;
- методы математической статистики для обработки экспериментальных данных.

**Научная новизна полученных результатов.** Основной научный результат диссертации состоит в разработке новой технологии производства подложек GaAs, усовершенствовании методов, методик и аппаратуры неразрушающего контроля качества подложек.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

- 1). Усовершенствована математическая модель, описывающая влияние

кристаллографической ориентации на механические свойства подложки GaAs в которой в отличие от существующих, с целью повышения точности расчетов значений механических параметров подложки GaAs для произвольного кристаллографического направления было использовано вычисление тензора упругой податливости в повернутой относительно базовой системе координат, что обеспечивает отклонение между расчетными значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона и экспериментальными данными, такое, что не превышает 4,7%.

2). Усовершенствована математическая модель, позволяющая определить влияние остаточных напряжений на константы упругости  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  подложек GaAs, в которой, в отличие от существующих, учитывается геометрическое искажение кристаллической решетки, что позволяет определить условия обеспечения механической устойчивости подложки GaAs. Впервые установлено, что в диапазоне остаточных напряжений до 60 МПа подложки GaAs остаются механически стабильными, при значении остаточного напряжения более 100 МПа происходит нарушение устойчивости с последующим разрушением подложки.

3). Усовершенствована математическая модель, учитывающая влияние кристаллографической ориентации подложек GaAs на плотность дислокаций, которая, в отличие от существующих, описывает механизм размножения дислокаций пятью системами скольжения в кристалле. Рассчитана ожидаемая плотность дислокаций для подложек GaAs кристаллографической ориентации (100) по кристаллографическим направлениям [010] и [100].

4). Усовершенствован метод ИК–поляриметрии для контроля остаточных напряжений в подложках GaAs, в котором для уменьшения погрешности измерения впервые учитывается несоосность элементов оптической системы и анизотропия подложки. Метод обеспечивает абсолютную погрешность неразрушающего контроля остаточных напряжений подложек GaAs толщиной до 1 мм с абсолютной погрешностью, не превышающей  $\pm 2$  МПа.

5). Усовершенствован метод контроля плотности дислокаций в подложках GaAs в котором впервые обеспечивается контроль как скопления дислокаций так и

отдельных дислокаций. Метод обеспечивает проведение контроля плотности дислокаций подложек GaAs кристаллографической ориентации (100) и (111) с относительной погрешностью 30% для подложек с плотностью дислокации в  $1 \times 10^6$  см<sup>-2</sup>. Установлено, что наибольшую плотность дислокаций имеют подложки которые изготовлены из верхней части слитка, а самую низкую из нижней части.

6). Получил дальнейшее развитие весовой метод измерения диаметра слитка GaAs в процессе его выращивания, в котором для уменьшения погрешности измерения диаметра впервые методом полнофакторного эксперимента определены возбуждающие факторы, влияющие на точность измерения веса слитка, что позволило обеспечить абсолютную погрешность измерения диаметра не более  $\pm 1,5$  мм для слитка диаметром 100 мм и уменьшить колебания скорости выращивания на 15% и как следствие, уменьшить уровень остаточных напряжений в верхней части слитка на 25% и уменьшить плотность дислокаций в верхней части слитка на 10 %.

7). Уточнены научные данные о механизме отжига подложек GaAs и установлено, что значительную роль в процессе релаксации остаточных напряжений при отжиге играют температурные градиенты, а температура отжига имеет менее значимое влияние. Обоснованные параметры отжига, которые составили: нагрев с температурным градиентом 100 °С/ч. до температуры 920 °С, выдержка при температуре 920 °С в течение 5 часов, охлаждения с температурным градиентом 100 °С/ч., что позволило снизить уровень остаточных напряжений до такого, что не превышает 40 МПа.

8). Уточнены научные данные о механизме шлифовки подложек GaAs, и определены ограничения на режимы шлифования в зависимости от толщины подложки и отклонения от плоскостности подложки, что позволило снизить уровень нарушенного слоя в подложке GaAs до 10 мкм.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в:

- разработке промышленных методик контроля остаточных напряжений и плотности дислокаций в подложках GaAs;
- разработке промышленных методик контроля отклонения от плоскостности подложек;
- разработке устройства измерения остаточных напряжений «Полярон 4», разработке устройства измерения отклонения от плоскостности подложек «АКИДП 1», разработке устройства определения плотности дислокаций в подложках «ТВ-Дислок 1», разработке устройства шлифования подложек «САШ-АМ».

Внедрение этих подсистем на ЧП «Галлар» (г. Светловодск) позволило получить экономический эффект 200 тыс. грн. в год (акт внедрения от 20.02.2013г.).

Результаты диссертационного исследования были использованы в:

- Институте физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева при выполнении НИР по теме «Разработка современных полупроводниковых материалов и структур для опто – микро – и сенсорной электроники» (акт использования от 20.05 .2013 г.);
- НИИ Особенно чистых материалов (проведение измерений уровня остаточных напряжений в НИИ Материаловедения им. А.Ю. Малинина, проведение измерений плотности дислокаций и изготовление эпитаксиальных структур ОАО «Малахит») (акт использования от 03.03.2013 г.).

Научные и научно-методические разработки диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры информационно - управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, в дисциплинах «Основы технологии выращивания монокристаллов полупроводников» и «Физика и контроль параметров полупроводниковых материалов» (акт внедрения в учебный процесс от 20.02.2013г.)

**Личный вклад соискателя.** Автор самостоятельно сформулировал цель и задачи исследования, выполнил теоретическую и практическую часть работы, принимал участие в промышленных испытаниях. Сформулированные в диссертации научные результаты, выводы и рекомендации принадлежат лично автору, и есть его научным вкладом.

В работах опубликованных вместе с соавторами, диссертанту принадлежат: [1,2,19,21,29,32] – анализ существующего и обоснование требований к новому процессу подготовки подложек GaAs, разработка структурной схемы, алгоритмов и программного обеспечения для усовершенствованного станка алмазной шлифовки, усовершенствование технологии подготовки подложек; [3,8,20] – разработка концепции построения устройства измерения плотности дислокаций в подложках GaAs, разработка метода и методики измерения плотности дислокаций, разработка алгоритмического обеспечения устройства; [4,5,6,13,26,34,35,52-55] – концепция построения устройства измерения остаточных напряжений в подложках GaAs, определение путей повышения точности измерения остаточных напряжений, разработка структурных схем и программного обеспечения; [27,37,38,39,50,51] – разработка метода и методики измерения остаточных напряжений в подложках GaAs; [7,33,34,36,40, 42] – разработка концепции и процедуры определения, температурных полей и термоупругих напряжений в слитках GaAs; [9,17,25,48] – разработка технологии отжига слитков и подложек GaAs, определение режимов отжига слитков и подложек, синтез функциональной схемы и программного обеспечения установки для отжига, анализ влияния режимов отжига на оптические свойства подложек; [10,14,18,44,45,48] – усовершенствование метода измерения диаметра слитка GaAs в процессе роста, синтез структурной схемы модернизированной ростовой установки выращивания слитков GaAs; [11] – усовершенствование метода и разработка методики контроля деформации подложек GaAs; [12,28,30,31] – изготовление опытных образцов, участие в экспериментах и анализ полученных данных по увеличению деградационной стойкости и улучшению ИК пропускания; [15,16,22,23,24,43,46,47] – разработка математической модели и определение влияний кристаллографической ориентации на механические свойства подложки GaAs.

**Апробация результатов работы.** Основные научные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отечественных конференциях: III Международная научно-техническая конференция „Информационная техника и электромеханика – ИТЭМ-2005” (19-21 апреля 2005 г., Луганск, Украи-

на); Ювілейна X Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок (МКФТТП-Х).– (16-21 травня 2005р. Івано-Франківськ, Україна); III міжнародна науково-практична конференція „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології – МЕТІТ-3” (21-23 травня 2008 р., Кременчук, Україна); IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників – УНКФН-4 (16 – 20 серпня 2009 р., Запоріжжя, Україна); III-я Международная научная конференция «Функциональная компонентная база микро-, опто- и нанoeлектроники» (28 сентября по 2 октября 2010 г. Харьков-Кацивели, Украина); VI міжнародна науково-практична конференція “Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” – МЕТІТ-4 (19-21 травня 2010 р., Кременчук, Україна); VI міжнародна науково-практична конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” – СЕМСТ-4 (28 червня - 2 липня 2010 р., Одеса, Україна); V Украинская научная конференция по физике полупроводников (9-15 октября 2011 г., Ужгород, Украина); IV-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» – МРФ – 2011 (18 – 21 октября 2011 г. Харьков-Кацивели, Украина); I міжнародна науково-практична конференція “Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка” – НМІТФ-2011.– (5 – 7 травня 2011 р., Кременчук, Україна); X міжнародна науково-практична конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. (7–9 листопада 2011 р. Кременчук, Україна); 18-я Международная научно-техническая конференция “Силовая электроника и энергоэффективность” (17 – 21 сентября 2012 г., Алушта, Украина); III міжнародна науково-практична конференція «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (14-16 березня 2012 р., Запоріжжя, Україна); V Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники», (30 сентября – 5 октября 2012 г., Харьков-Кацивели, Украина); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів»: (2-4 листопада 2012 р. м. Кременчук, Україна); IV Міжнародна науково-практична конференція «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (13-16 березня 2013 р., Запоріжжя, Україна); II Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та

фотовольтаїка» (22 - 24 травня 2013 р., м. Кременчук, Україна); VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (23-27 вересня, 2013 р., Чернівці, Україна); VI Международная научная конференция «Функциональная база наноэлектроники» (30 сентября — 4 октября 2013 г., г. Алушта, Украина); VIII Міжнародна науково-практична конференції «Розвиток наукових досліджень 2013» (25–27 листопада 2013 р., м. Полтава, Україна); III Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» ( 20–23 травня 2014 р., м. Кременчук, Україна); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (7-9 листопада 2014 р., м. Кременчук, Україна); I Міжнародний форум «ІТ-Тренди: великі дані, штучний інтелект, соціальні медіа» (21-22 листопада 2014 р., м. Кременчук, Україна);

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 56 печатных работах, в том числе 26 статей в специальных научных изданиях, которые входят в перечень ГАК Украины, из которых 23 статьи в журналах, входящих в различные международные наукометрические базы (из них 6 без соавторов), 3 патента на изобретение, 27 работ – в сборниках трудов конференций.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, шести разделов, пять из которых оригинальные, выводов, списка литературы из 209 наименований и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 332 страниц, основного текста 273 страниц включающего 145 рисунков и 26 таблиц.

## Раздел 1

# ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА, МЕТОДЫ И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СТРУКТУР- НЫХ НАРУШЕНИЙ В ПОДЛОЖКАХ GaAs

### 1.1. Технология выращивания слитков арсенида галлия. Влияние технологических параметров выращивания на параметры подложек. Технологические процессы изготовления подложек.

Впервые систематично исследовать арсенид галлия начал Н. Уэлкер, который с 1951 по 1953 года исследовал арсенид галлия и установил, что соединения III-V группы могут конкурировать и / или дополнять кремний [14]. В СССР первым изучением свойств и производством начал заниматься М.Г. Мельвидский под руководством которого в октябре 1963 для разработки технологии получения монокристаллического арсенида галлия была создана лаборатория состоящая из 5 групп: группа получения GaAs методом Чохральского, группа направленной кристаллизации, группа бестигельной зонной плавки, группа жидкофазной эпитаксии и группа структурного исследования. Период детальных исследований электронных и структурных свойств GaAs наступил в связи с разработкой и реализацией опто - и микроэлектронных устройств характеристики, которых превосходили кремний.

В промышленности применяется три основных метода выращивания монокристаллов GaAs:

— метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski— LEC);

— метод горизонтальной направленной кристаллизации в вариантах «по Бриджмену» (Horizontal Bridgman—HB);

— метод вертикальной направленной кристаллизации в тех же двух

модификациях (Vertical Bridgman — VB, Vertical Gradient Freeze — VGF).

Выращивание монокристаллов GaAs методом вытягивания из расплавов (LEC метод) является в настоящее время наиболее распространенным при промышленном производстве больших монокристаллов с контролируемыми и воспроизводимыми свойствами [15-21]. Подробно метод описан в [22,23].

На рис. 1.1. представлена технологическая схема получения монокристаллов GaAs по методу Чохральского. Условно технологический маршрут можно разбить на два этапа: синтез поликристаллического GaAs и выращивание монокристаллов GaAs. В основу этапа синтеза поликристаллического арсенида галлия положен метод прямого сплавления компонентов [24]. Выращивание монокристаллов производится по методу Чохральского с жидкостной герметизацией. Известно, что формирование электрофизических свойств, производится на различных этапах технологического маршрута.

Как показано в работе [25], полуизолирующий арсенид галлия (ПИН GaAs) с удельным сопротивлением  $>10^7$  Ом  $\times$  см является наиболее перспективным материалом, используемым в микроэлектронике при производстве подложек. На сегодняшний день рынок монокристаллов ПИН GaAs составляет примерно 50% от всего объема производства слитков GaAs.

Для изготовления подложек с высокими характеристиками необходимы монокристаллы GaAs большого диаметра с низкой плотностью дислокаций и равномерным их распределением в радиальном направлении. Использование арсенида галлия в виде подложек большого диаметра значительно расширяет функциональные возможности устройств и снижает их стоимость.

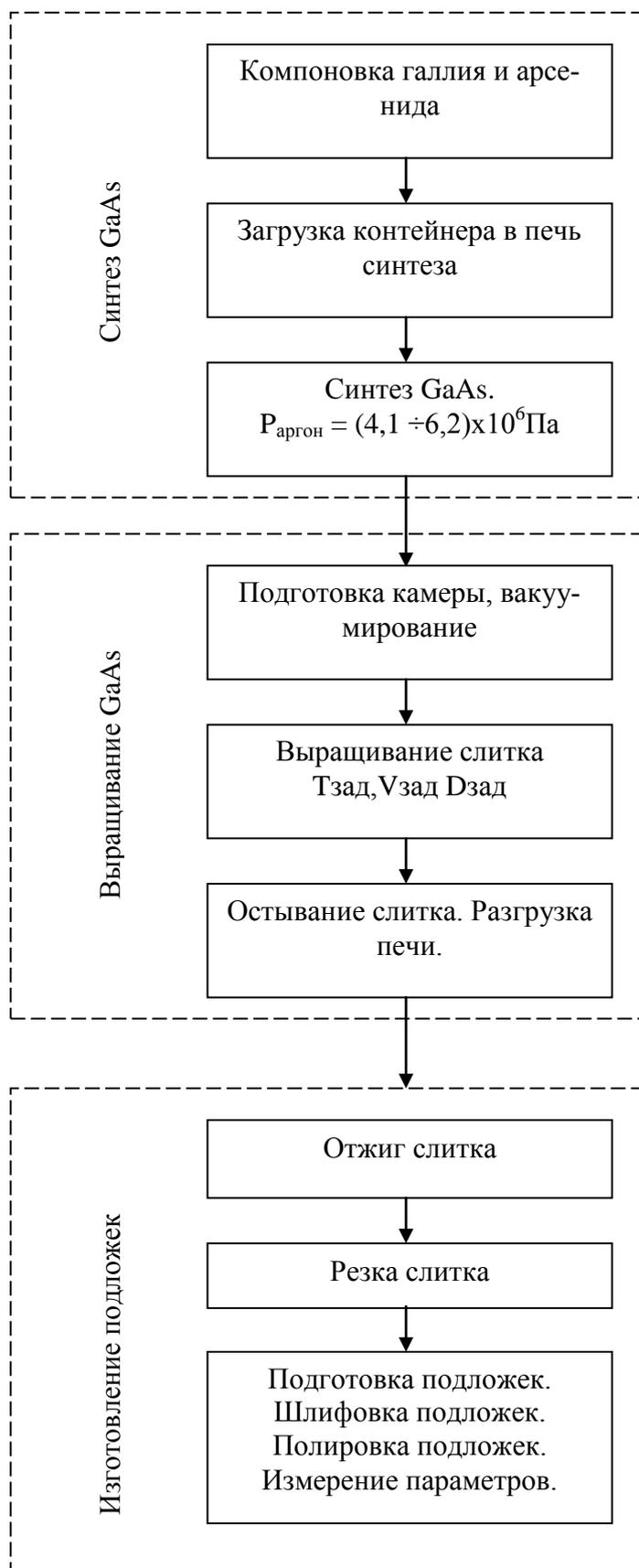


Рисунок 1.1 – Типичная схема технологического маршрута получения слитков и подложек GaAs по методу Чохральского (LEC) в промышленных условиях.

Снижение дислокаций и уровня остаточных напряжений можно добиться путем введения датчика контроля диаметра слитка, что позволит уменьшить колебания скорости вытягивания и как следствие уменьшить температурные градиенты.

К настоящему времени накоплен уже достаточно обширный экспериментальный материал, который позволяет с общих позиций подойти к проблеме дефектообразования в кристаллах GaAs. Однако, в связи с наличием методических трудностей в исследовании условий отклонения от стехиометрии непосредственно в процессе выращивания и термообработки, а также в определении концентрации дефектов в кристаллах, надежные количественные данные по этим вопросам в литературе весьма ограничены.

Простейшими собственными дефектами в кристаллической решетке GaAs являются вакансии, междоузельные атомы и антиструктурные дефекты. Все эти дефекты могут образовывать комплексы между собой, а также с атомами легирующих и остаточных примесей.

До недавнего времени считалось, что преобладающим типом дефектов в GaAs являются вакансии в обеих подрешетках и именно с ними связывались основные изменения свойств кристаллов при отклонении от стехиометрического состава. При этом отмечалось, что концентрация вакансий в соединениях может достигать значений  $10^{18}$ – $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, поскольку эти соединения обладают определенной протяженностью области гомогенности, а избыточные сверхстехиометрические атомы составляющих компонентов растворяются в решетке по типу вычитания. С помощью прецизионных методов измерения периодов решетки и плотности было показано, что в кристаллах GaAs избыточные основные компоненты третьей группы (галлий) действительно образуют растворы вычитания, т.е. преобладающим типом точечных дефектов являются вакансии  $V_{As}$ . В то же время компоненты пятой группы (мышьяк) растворяются как по типу внедрения, так и по типу вычитания (при этом преобладающим типом точечных дефектов

являются междоузельные атомы мышьяка). Таким образом, в этом случае в реальных кристаллах соединений могут одновременно присутствовать как вакансии элемента III группы, так и междоузельные атомы мышьяка.

Однозначные экспериментальные данные о влиянии тех или иных собственных точечных дефектов на электрофизические свойства соединений  $A^{III}B^V$  в литературе отсутствуют. Как правило, предполагается, что вакансии в подрешетке элемента III группы являются акцепторами, а в подрешетке элемента V группы – донорами.

Как следует из общих термодинамических соображений, из-за разности свободных энергий образования вакансий в различных подрешетках соединения, максимальная температура плавления в данной системе может не отвечать соединению строго стехиометрического состава. Действительно, на основе термодинамических расчетов, выполненных для GaAs, максимальная температура плавления для GaAs сдвинута в сторону избытка галлия. Аналогичный вывод следует и из результатов экспериментальных исследований. По данным работы [26], в системе Ga–As соединение с максимальной температурой плавления содержит 49,996 % мышьяка.

Оценки показывают, что при постоянстве всех остальных параметров изменение средней температуры расплава всего на  $1^{\circ}\text{C}$  приводит к изменению средней концентрации мышьяка в расплаве на 0,003 % (ат.), а концентрация его у фронта кристаллизации изменяется при этом на 0,06 % (ат.). В реальных условиях направленной кристаллизации происходит закономерное изменение температуры ампулы и расплава, что приводит к существенному изменению состава расплава по мере его затвердевания.

В случае выращивания по методу Чохральского дополнительным источником отклонения состава расплава от заданного значения являются потери летучего компонента, обусловленные образованием и удалением из расплава в процессе вытягивания газовых пузырьков. Анализ условий образования таких пузырьков при выращивании монокристаллов GaAs [27] показывает, что при реальных перегревах расплава давления паров мышья-

яка недостаточно для существования пузырька, поскольку достигаемое при этом равновесное давление пара мышьяка существенно ниже давления инертного газа в рабочей камере. Значительная часть давления паров в пузырьках обеспечивается газовыделениями из флюса и загрузки.

Другим источником нарушения стехиометрии при выращивании монокристаллов разлагающихся соединений по методу Чохральского из-под слоя флюса, является их частичное поверхностное разложение, за счет испарения летучего компонента с нагретой до высокой температуры боковой поверхности при выходе слитка из-под слоя флюса. Как показывают исследования [28], поверхность GaAs, например, интенсивно разлагается уже при температуре выше  $450^{\circ}\text{C}$ , что приводит к образованию приповерхностного слоя соединения, обогащенного галлием. При  $650^{\circ}\text{C}$  на поверхности уже наблюдаются мелкие включения жидкой фазы на основе галлия.

Отклонение от стехиометрии оказывает существенное влияние на совершенство кристаллической структуры выращиваемого монокристалла. Отклонение состава расплава от заданного является основным источником генерации собственных дефектов в объеме кристалла. Эти дефекты в большинстве случаев распределены в объеме кристалла достаточно неравномерно.

Периодические колебания скорости кристаллизации, обусловленные колебаниями температуры расплава вблизи границы раздела фаз, должны приводить к появлению в монокристаллах периодической неоднородности в распределении компонентов соединения (полосы роста). Качественное подтверждение этого было получено при исследовании слоистой неоднородности в монокристаллах GaAs, легированных теллуром [29].

Еще одним источником образования дислокаций в кристаллах являются скопления собственных точечных дефектов, образующиеся уже в процессе охлаждения кристалла от температуры плавления в результате распада пересыщенного по избыточному компоненту соединения твердого раствора и также обязанные своим появлением отклонению от стехиомет-

рии. Иллюстрацией последнего служат результаты [30], полученные для кристаллов GaAs, выращенных по методу Чохральского из-под слоя флюса, а также кристаллов, прошедших термообработку в различных атмосферах, которые убедительно показывают, что отклонение состава от стехиометрии в поверхностных слоях в сторону избытка галлия увеличивает интенсивность генерации дислокаций при данном уровне термических напряжений.

В то же время надо иметь в виду, что присутствующие в кристалле «ростовые» дислокации являются эффективными внутренними стоками для собственных точечных дефектов. Взаимодействуя с дислокациями, собственные точечные дефекты могут вызывать их миграцию, а также образовывать на них выделения, затрудняющие перемещение термических дислокаций под действием термических напряжений. Интенсивная миграция дислокаций в монокристаллах GaAs за счет взаимодействия с избыточными междоузельными атомами галлия отмечается в работе [31]. Взаимодействие ростовых дислокаций с собственными дефектами является одной из причин микронеоднородного распределения последних (а соответственно и электрофизических свойств) в объеме кристалла.

В большинстве практических случаев выращивание объемных кристаллов GaAs сопровождается возникновением внутренних макронапряжений, которые не только определяют формирование дислокационной структуры в процессе роста, но и в значительной мере влияют на механические и физические свойства выращенных кристаллов. Анализ явлений, происходящих при росте кристаллов, основанном на теории внутренних напряжений и теории дислокаций, не только способствовал прогрессу в технологии получения кристаллов полупроводников с совершенной структурой, но и оказал плодотворное влияние на развитие технологии реальных кристаллов.

Наибольший вклад в возникновение напряжений при росте кристаллов вносят неоднородное поле температурных деформаций, обуславлива-

ющее термоупругие напряжения, а также дислокации и примесные неоднородности, вызывающие остаточные напряжения.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что основным технологическим фактором, приводящим к появлению дислокаций в слитках арсенида галлия и как следствие в подложках, являются термопластические напряжения, возникающие в результате высоких температурных градиентов. Анализ метода выращивания арсенида галлия позволяет утверждать, что снижения температурных градиентов можно добиться путем улучшения качества регулирования процесса выращивания [32 - 35], и в частности применения высокоточных датчиков диаметра слитка в процессе выращивания.

В настоящее время производство полупроводниковых изделий быстро развивается. Характерными тенденциями современного полупроводникового производства являются повышение степени интеграции элементов на кристалле, увеличение диаметра подложек с соответствующим уменьшением топологических норм [36]. При производстве микроэлектронных изделий осуществляется прохождение подложек по технологическому маршруту, показанному на рисунке 1.2.

После различных технологических процессов проводится химическая обработка подложек для очистки поверхности от различных загрязнений и подготовки подложек к последующим технологическим операциям (ионному легированию, нанесению эпитаксиальных слоев, высокотемпературным диффузионным операциям) [37,37]. Химическая обработка проводится также при изготовлении структур без проведения предварительных операций, например, при подготовке подложек к соединению (сращиванию) при изготовлении структур "кремний на изоляторе" [39].

Для механической обработки полупроводниковых материалов не могут быть использованы обычные токарные, фрезерные, строгальные и сверлильные станки, которые широко применяются для обработки различных материалов. Это связано с высокой хрупкостью полупроводниковых

материалов. Поэтому основным способом их механической обработки является обработка с использованием абразивов как в связанном состоянии (алмазные диски и шлифовальники), так и в свободном (абразивные суспензии и алмазные пасты).

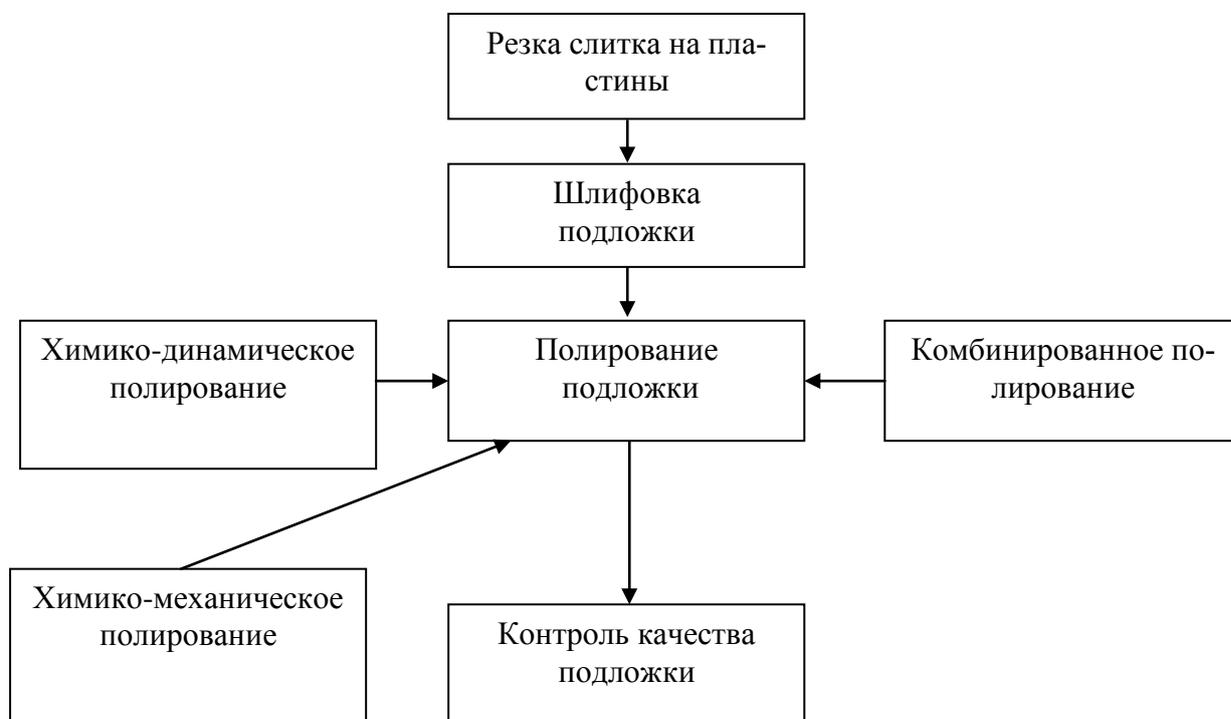


Рисунок 1.2 – Технологический маршрут изготовления подложек.

Зарождение микротрещин при абразивной обработке происходит в местах скопления дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Особое значение имеют краевые дислокации. В месте расположения краевой дислокации наиболее вероятно возникновение микротрещин.

Физическая сущность процесса механической обработки связанным абразивом несколько отличается от обработки свободным абразивом. При обработке связанным абразивом к разрушению под действием нормальной силы, направленной перпендикулярно поверхности (случай обработки свободным абразивом), добавляется разрушение обрабатываемого материала за счет срезания микровыступов поверхности закрепленным зерном

абразива под действием сдвигающей силы, направленной вдоль поверхности пластины.

При обработке свободным абразивом ударное усилие направлено внутрь обрабатываемого полупроводникового материала и абразивные зерна вызывают сильное разрушение поверхностного слоя. При обработке связанным абразивом основная часть усилий направлена не внутрь образца, а вдоль его поверхности, что вызывает меньшую глубину разрушения исходного материала при той же толщине удаленного слоя. Жидкость при обработке связанным абразивом используется лишь для охлаждения режущего инструмента и обрабатываемого полупроводникового материала.

Изложению общих вопросов современной теории шлифовки материалов посвящена работа [40].

В [41] исследовалось влияние зернистости алмазного круга и концентрации. При увеличении концентрации от 25 до 100 %, силы резания уменьшаются в 4-6 раз, дальнейшее увеличение концентрации приводит к незначительному снижению сил резания.

Специфические свойства алмаза как абразивного материала резко снижают мощность, необходимую для шлифовки, уменьшают количество выделяемого тепла и температуру. Высокая теплопроводность алмазов позволяет рассматривать их как мощные каналы отвода тепла из зоны резания, увеличение концентрации алмазов от 50 до 100 % в органической связке повышает площадь контакта с алмазами в 10 раз и теплопроводность алмазного слоя в 1,5-2 раза [42]. Доля тепла уходящего в круг составляет: 13 % для керамической связки, 15 % для органической, 50 % для металлической и соответственно снижается количество тепла уходящего в КС.

Процесс шлифовки приводит к возникновению остаточных напряжений, которые зависят от свойств обрабатываемого материала, характеристик круга и параметров режима шлифовки [43, 44]. При алмазной шлифовке эти напряжения являются сжимающими.

При обработке сторон подложки GaAs абразивом различной зернистости имеет место эффект Тваймана, заключающийся в том, что на пластине появляется изогнутость – более грубо обработанная сторона становится выпуклой [45]. Величина изогнутости от эффекта Тваймана находится в обратной зависимости от исходной толщины пластины и в прямой от размера зерна абразива [46]. По имеющимся данным глубина нарушенного слоя составляет 10-20 мкм, убывает с увеличением скорости резания и уменьшением зернистости, максимальные напряжения достигаются на поверхности и резко убывают.

Подавляющее большинство результатов получено экспериментальным путем, теоретические методы практически не используются ввиду сложности процесса.

Для получения экспериментальных данных и оптимизации процесса шлифовки структур в промышленных условиях возникла необходимость разработки промышленного оборудования, позволяющего в автоматизированном (программируемом) режиме осуществлять процесс шлифовки арсенид галлиевых структур различной конфигурации.

Выполненный критический анализ существующих методов подготовки подложек позволил сделать вывод о том, что не до конца решены вопросы механической обработки подложек, и в частности шлифования. Не полностью исследован вопрос влияния механической и механико-химической подготовки подложек на глубину нарушенного слоя.

## **1.2. Факторы, влияющие на структурные нарушения и отклонение от плоскостности подложек GaAs.**

Сопоставление результатов полученных разными исследователями для арсенида галлия [47] показывает, что, несмотря на наличие четко выраженных общих закономерностей дефектообразования в монокристаллах при отклонении от стехиометрического состава, конкретные данные по величинам плотности, периода решетки и концентрации электрически и оп-

тически активных центров в них, как правило, заметно различаются. И обусловлено это, в первую очередь, не разной точностью используемых методов исследования, а особенностями самих объектов. Исследуемые кристаллы выращиваются с конечной (в ряде случаев достаточно большой) скоростью. Это уже само по себе определяет некоторое отклонение от равновесия на границе раздела фаз. Кроме того, скорость охлаждения кристалла от температуры затвердевания также является конечной величиной. В процессе охлаждения концентрация собственных точечных дефектов структуры, вводимых в кристаллах при кристаллизации, может существенно изменяться как из-за значительной температурной зависимости их растворимости, так и за счет их взаимодействия между собой, а также с сопутствующими структурными дефектами и примесями. Поэтому общая окончательная дефектность выращенного монокристалла, связанная с отклонением от стехиометрического состава, при прочих равных условиях должна зависеть от конкретных параметров его получения, в частности от скорости роста и охлаждения, от температуры кристаллизации, а также от концентрации сопутствующих остаточных примесей; плотности дислокаций, являющихся эффективными внутренними стоками для собственных точечных дефектов; геометрических размеров слитка, определяющих роль поверхности в стоке точечных дефектов из объема и т.д. Более объективную информацию о высокотемпературных равновесиях с участием собственных точечных структурных дефектов дают эксперименты по отжигу с последующей закалкой образцов.

Как показано в работе [48], высокотемпературный ( $\sim 1000^\circ\text{C}$ ) отжиг выращенных монокристаллов арсенида галлия с последующим резким охлаждением приводит к существенному увеличению периода решетки по сравнению с исходным состоянием. При последующей выдержке при комнатной температуре период решетки уменьшается и по истечении 60 ч возвращается к первоначальному значению. Этот процесс происходит в две стадии: на первой стадии (первые 30 ч) период решетки уменьшается до-

статочно быстро, вторая стадия характеризуется существенно более низкой скоростью протекания процесса. Кинетика процесса на второй стадии достаточно хорошо описывается соотношениями, характерными для реакции первого порядка с энергией активации 1,0 эВ. Анализ этих данных подтверждает сложный характер твердых растворов в арсениде галлия при отклонении от стехиометрии, установленный при исследовании выращенных кристаллов. В частности, в работе [49] отмечается возможность одновременного присутствия в кристаллах пар Френкеля в подрешетке мышьяка и мышьяковых вакансий. Определенные ими на основе данных по температурной зависимости изменения периода решетки при отжиге энтальпия, образования мышьяковых вакансий составляет 2,0-2,1 эВ, что хорошо согласуется с данными других авторов; полученными из независимых экспериментов. Полученные результаты, приведенные в работе [50], свидетельствуют о том, что из-за высокой подвижности собственных точечных структурных дефектов процессы взаимодействия с их участием протекают с достаточно высокой скоростью уже при сравнительно невысоких температурах. Это приводит к существенным изменениям концентрации этих дефектов в кристаллах и создает серьезные трудности в фиксации высокотемпературного состояния даже в условиях достаточно резкого охлаждения.

Выполненный анализ позволил выявить тенденцию образования комплексов между собственными структурными дефектами и атомами остаточных и легирующих примесей, что сопровождается изменением спектра энергетических уровней дефектов в кристаллах. Так, в работе [51] при исследовании влияния термообработки на свойства монокристаллов арсенида галлия, легированных теллуром, убедительно показано, что атомы легирующей примеси образуют устойчивые комплексы с собственными дефектами. С этими комплексами авторы связывают появление в кристаллах акцепторного уровня ( $E_v+0.18$  эВ) и полосы излучения 1,30 эВ при 77 К.

Если в вопросе генерации дополнительных акцепторных центров, связанных с наличием в кристаллах галлиевых вакансий, большинство исследователей единодушны, то в оценке природы дефектов, обусловленных присутствием вакансий мышьяка, имеются существенные расхождения. Так, изучая влияние отжига в контролируемой атмосфере при 700 – 1000°C на электрические свойства монокристаллов GaAs, авторы работы [52] приходят к выводу о том, что мышьяковые вакансии являются донорами. При этом коэффициент диффузии их в GaAs существенно ниже, чем для галлиевых вакансий:  $D_{V_{Ga}} = 2,1 \cdot 10^{-3} \exp(-2,1/kT)$ ,  $D_{V_{As}} = 7,9 \cdot 10^3 \exp(-4,0/kT)$ . На основе данных фотолюминесцентных исследований делается вывод, что оба типа вакансий являются центрами безизлучательной рекомбинации.

Следует отметить достаточное многообразие уровней дефектов, присутствующих в термообработанных образцах. Несмотря на некоторую спорность в трактовке полученных результатов, связанную с рядом упрощающих предположений, сделанных авторами (не учет междоузельных собственных точечных дефектов и сложных комплексов), факт существенного влияния отклонения от стехиометрического состава на спектр энергетических уровней дефектов в исследованных слитках и подложках не вызывает сомнений. Заслуживает внимания то, что с наличием собственных точечных дефектов может быть связано появление нескольких уровней в запрещенной зоне, в том числе и глубоких. При этом далеко не все эти уровни обусловлены образованием комплексов с сопутствующими примесями. В слитках и подложках могут одновременно сосуществовать дефектные центры, связанные как с вакансиями мышьяка, так и с вакансиями галлия. При повышении температуры преобладающими становятся дефекты, связанные с вакансиями галлия, что является косвенным подтверждением асимметрии области гомогенности в арсениде галлия.

Как показано в работе [53] при низкотемпературном отжиге, до 700 °C, точечные дефекты объединяются в центры, проявляющие себя как дис-

локации, и обнаруживаемые в виде ямок травления. С увеличением температуры образование центров становится более интенсивным и их размер увеличивается (см.рис. 1.3). В тоже время влияние высокотемпературного отжига при температурах близких к  $1000^{\circ}\text{C}$  исследовано не полностью.

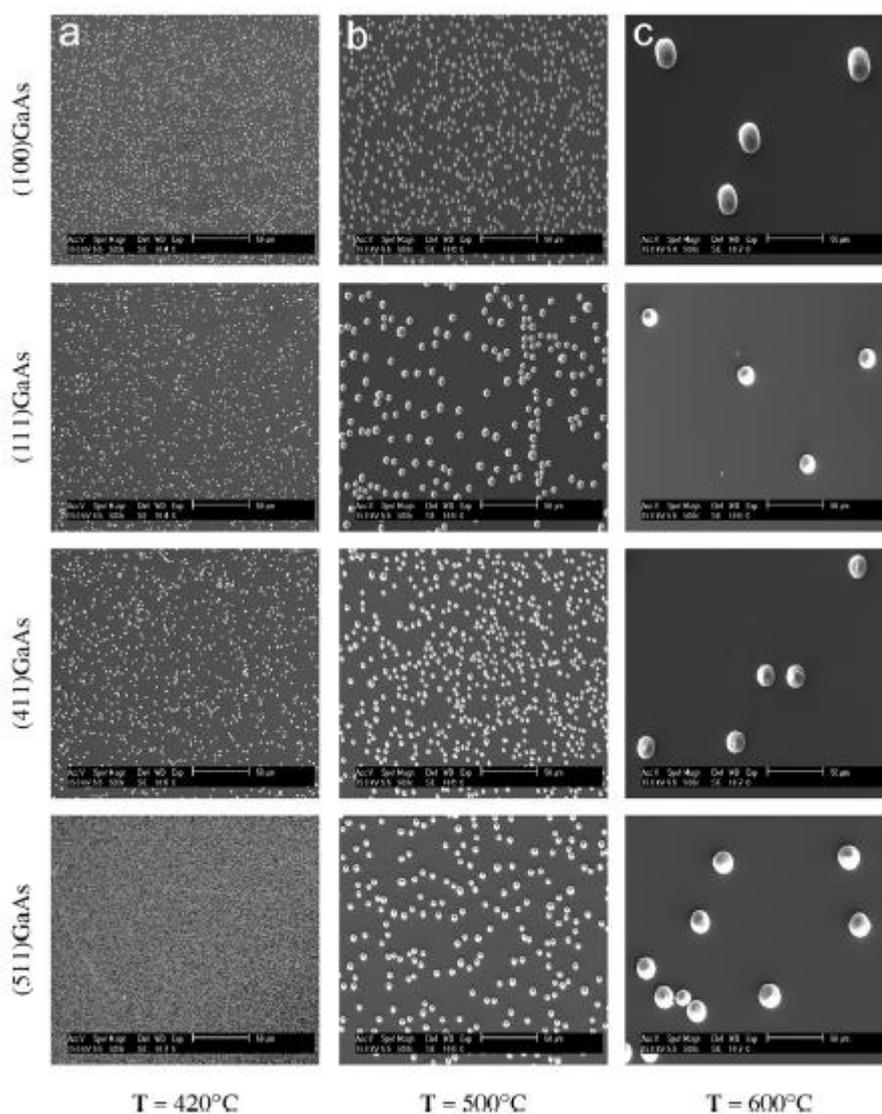


Рисунок 1.3 – Изображения дислокаций в подложках арсенида галлия для подложек различной ориентации при различных режимах отжига. По данным работы [53].

В работе [54] термообработка была использована для получения монокристаллов GaP с повышенными значениями фотолуминесцентной способности и времени жизни неосновных носителей тока. Время жизни неосновных носителей тока в таких монокристаллах также примерно на два

порядка ниже. Основной причиной этого является повышенная концентрация в монокристаллах собственных точечных дефектов, в первую очередь галлиевых вакансий и комплексов с их участием, являющихся центрами безизлучательной рекомбинации. Термообработка монокристаллов при  $1200 - 1300^\circ\text{C}$  с последующим медленным охлаждением ( $2 - 50^\circ\text{C}/\text{ч}$ ) до  $500^\circ\text{C}$  привела к существенному снижению в них концентрации центров безизлучательной рекомбинации и к значительному увеличению времени жизни и люминесцентной способности. По мнению авторов, в процессе высокотемпературной термообработки ( $> 1000^\circ\text{C}$ ) происходит разрушение различного рода комплексов, являющихся эффективными центрами безизлучательной рекомбинации (комплексы типа  $V_{\text{Ga}} - 0$ ). Последующее медленное охлаждение способствует установлению равновесной концентрации собственных точечных дефектов в объеме кристалла за счет их стока на сопутствующие дефекты, например дислокации.

Технологический маршрут подготовки подложек (см. рис. 1.2) приводит к тому, что подложки арсенида галлия подвергаются действию различных механических, химико-механических и термических факторов, приводящих к возникновению в них остаточных внутренних напряжений. Остаточные напряжения вызывают упругую деформацию (изгиб) подложек, что заметно снижает процент выхода годной продукции [55]. Кроме того, остаточные напряжения влияют на прочность подложек, а также на электрические свойства и долговечность приборов, изготовленных на основе указанных пластин и структур.

Вопросам изучения деформаций и внутренних напряжений в подложках арсенида галлия посвящено достаточно большое количество работ [56,58]. Однако в большинстве работ расчет напряжений, действующих в подложках, проводится на основании экспериментально определяемых деформаций по формулам, выражающим закон Гука для плоской задачи теории упругости в чрезмерно упрощенной форме. В частности, обычно предполагается, что изгиб пластин сферически симметричен, а внутренние

напряжения, действующие в поверхностных слоях пластин, изотропны. При этом, как правило, не учитывают анизотропию упругих характеристик (модуля Юнга, коэффициента Пуассона) кристалла кремния.

В то же время известно, что форма подложки отличается от сферически симметричной уже после начальных стадий механической обработки и на дальнейших стадиях технологического цикла. Ясно, что при этом не только величина, но и знак деформаций зависит от кристаллографического направления в плоскости подложки. Указанная анизотропия изгиба пластин резко снижает процент выхода годной продукции. Для подложек с кристаллографическими ориентациями, отличными от (111), расчет компонента тензора внутренних напряжений должен производиться с учетом зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона от кристаллографического направления в плоскости пластин.

Необходимо отметить также, что у большинства рассмотренных, в [57], подложек и структур деформация происходит по поверхностям сложного профиля, форма которых весьма далека от сферической. Подложки, как правило, изгибаются таким образом, что два направления, отвечающие максимальным и минимальным изгибам, взаимно перпендикулярны и близки к кристаллографическим направлениям  $\langle 100 \rangle$ .

Следует отметить, что при последовательном полировании нарушенного слоя (для пластин после механической обработки) подложки уменьшают свой изгиб, что говорит о преимущественно упругом характере деформации.

Построение кругов Мора [59] для всех исследованных пластин позволило установить, что направление главных деформаций в них близко к двум взаимно перпендикулярным направлениям  $\langle 100 \rangle$  (средний угол отклонения направлений главных деформаций отличается от указанного кристаллографического направления на  $9^\circ$ ). Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [57,58], где было показано, что «слабые» направления, в которых реализуются экстремальные значения изгибов

пластин, прошедших механическую шлифовку или механическую обработку и последующее термоокисление для пластин ориентации (100), практически совпадают с двумя направлениями  $\langle 100 \rangle$ .

### **1.3. Методы и аппаратура контроля величины и распределения остаточных напряжений в подложках GaAs.**

Задача определения остаточных напряжений в полупроводниковых материалах существует на протяжении всего времени развития полупроводниковой техники. Развитие технологии производства полупроводников, создание новых электронных приборов делают необходимым поиск новых методов измерения остаточных напряжений, разработки новых методик для существующих методов, повышения точности измерения аппаратуры, проведение целого ряда исследований в области разработки новых методов и методик определения остаточных напряжений.

В целом методы определения остаточных напряжений можно разделить на два [59]: способ воздействия на объект, нацеленный на проявление внутренних напряжений и способ получения данных, являющихся исходными при расчете напряжений.

Специфика распределения остаточных напряжений в полупроводниковых материалах требует разработки экспериментальных методов их определения с минимальным усреднением по базе измерения, при минимальном воздействии на объект, без специальной подготовки поверхности, бесконтактно.

Остаточные напряжения могут быть измерены неразрушающими или разрушающими методами. Малоразрушающие и неразрушающие методы в большинстве случаев предназначены для исследования напряженного состояния поверхности, к ним относятся такие как рентгеновская дифракция, метод теневого муара, ультразвуковая микроскопия и так далее.

Смысл неразрушающих механических методов состоит в фиксации

имеющегося в данном конкретном образце предела текучести при растяжении или сжатии и сравнении полученных результатов с истинными величинами, характеризующими данный материал. Полученное отличие характеризует имеющиеся в данном образце остаточные напряжения. К недостаткам данной группы методов можно отнести сложности, связанные с определением начала нелинейной диаграммы, а также с необходимостью высокочувствительных регистрирующих систем, способных уловить начало течения в точке.

Рентгеновский метод [60] основан на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Сутью метода является явление дифракции рентгеновских лучей при прохождении через кристаллическую решетку.

Рентгеновский метод позволяет определять напряжения в полупроводниковых приборах сложной геометрической формы, неограниченных размеров, исследовать напряжения на весьма малых участках поверхности образца, измерять градиенты напряжений, определять мгновенные напряжения в пластинах, подвергающихся периодическим нагрузкам.

Метод обнаруживает изменения напряжения, индуцированные кристаллической решеткой, которые могут измерить для получения остаточных напряжений. Чувствительность этого метода составляет около 10 МПа [61,62]. Рентгеновский метод позволяет исследовать только напряжения в верхнем слое, толщиной порядка 30  $\mu\text{m}$ , так как рентгеновское излучение сильно поглощается с увеличением толщины образца.

Недостатками рентгеновского метода являются пониженная точность при работе с полупроводниковыми материалами, невозможность одновременного измерения в нескольких точках. Есть ограничения по геометрии исследуемых образцов. Значительное влияние на результат может оказать состояние поверхностного слоя (влияние шлифовки, резки и так далее).

Ультразвуковой метод [63, 64] основывается на зависимости скоро-

сти распространения ультразвуковой волны от напряженного состояния. Это неразрушающий метод, что позволяет применять его при исследовании полупроводниковых приборов. Однако неоднородность механических свойств оказывает существенное влияние на скорость упругих волн, что ограничивает применение метода при исследовании полупроводников.

Метод позволяет измерять как поверхностные, так и внутренние напряжения. Чаще всего применяется для изучения одноосных остаточных напряжений. На основе нелинейной теории упругости получены соотношения, описывающие волновую скорость как функцию внутренних напряжений [65].

Наиболее распространенным методом экспериментального определения внутренних напряжений является метод фотоупругости [66]. Применение этого метода для полупроводников, прозрачных в инфракрасной области спектра, возможно благодаря использованию электронно-оптических преобразователей или других приемников излучения, в зависимости от спектрального диапазона прозрачности кристалла. Теория и практика метода подробно изложена в основных трудах [67, 68]. Полученные распределение в работе [69] показаны на рис.1.4.

Напряжения, возникающие в процессе роста и охлаждения слитка, при механической обработке слитков и заготовок, при изготовлении омических контактов и т. д., существенно влияют на качество полупроводниковых кристаллов и приборов. Один из методов измерения макронапряжений в кристаллах с кубическими решетками – метод фотоупругости, который заключается в анализе оптической анизотропии, возникающей при приложении к ним напряжений. Как правило, исследованию подвергают пластины толщиной 1– 2 мм; напряжения, нормальные к большой грани образца, при резке уравниваются, и состояние этих пластин с достаточной степенью точности можно считать плосконапряженным.

Фотоупругость измеряют на поляризационных микроскопах с малым увеличением, в систему которых вводится компенсатор с переменной кон-

тролируемой разностью хода. Направления главных напряжений в каждой точке образца, параллельные направлениям поляризации света в кристалле, определяют с помощью изоклин при вращении образца вокруг оптической оси прибора.

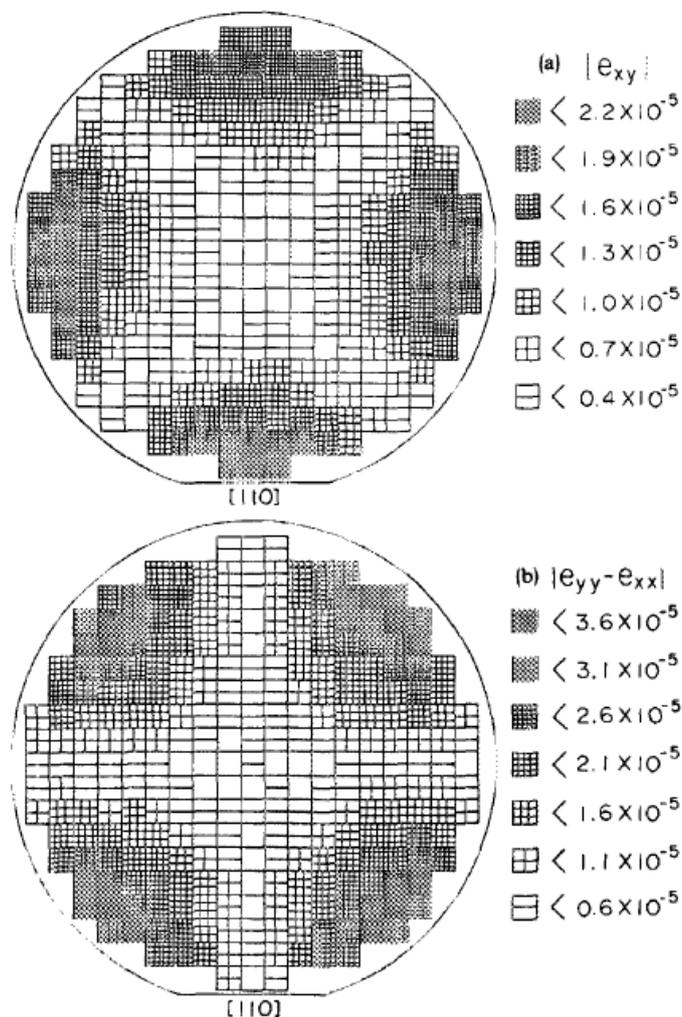


Рисунок 1.4 – Напряжение и разность главных напряжений в пластине арсенида галлия [69].

Величину разности главных напряжений измеряют с помощью компенсатора разности хода, который устанавливается в положении гашения интерференционной картины в рассматриваемой точке.

При исследовании полупроводников и диэлектриков даже при значительных внутренних напряжениях разность хода не превышает  $\lambda/2$ . При заданных граничных условиях по известным главным напряжениям могут быть рассчитаны нормальные и тангенциальные напряжения в каждой

точке.

Существующие методы определения внутренних напряжений в подложках арсенида галлия дают большую погрешность. В том случае если двулучепреломление является маленьким необходимо подготавливать образцы толщиной в несколько миллиметров, чтобы увеличить сдвиг фазы, которая пропорциональна толщине образца. Подложки арсенида галлия для промышленного применения изготавливаются толщиной 400 мкм для диаметра подложки 50.8 мм, 600 мкм для подложек диаметром 76.2 и 650 мкм для подложек диаметром 100 мм.

Измерение уровня остаточных напряжений для таких толщин требует усовершенствования метода измерения, модернизации аппаратуры с целью увеличения чувствительности измерительного тракта, разработки нового программного обеспечения, включающего в себя цифровую обработку.

#### **1.4. Методы и аппаратура контроля отклонения от плоскостности в подложках GaAs.**

В процессе изготовления, подложки арсенида галлия подвергаются различным механическим и температурным операциям. В результате этого происходит отклонение от плоскостности подложек (см. рис. 1.5). Отклонение от плоскостности крайне отрицательно влияет на финишные операции изготовления электронных приборов, такие как эпитаксия и фотолитография. Вопросу изучения деформаций в эпитаксиальных структурах и подложках посвящено достаточно большое количество работ. Основные положения представлены в работе [70].

Исходя из этого к разработчикам методик контроля отклонения от плоскостности (геометрических параметров) готовой продукции предъявляются очень жесткие требования.

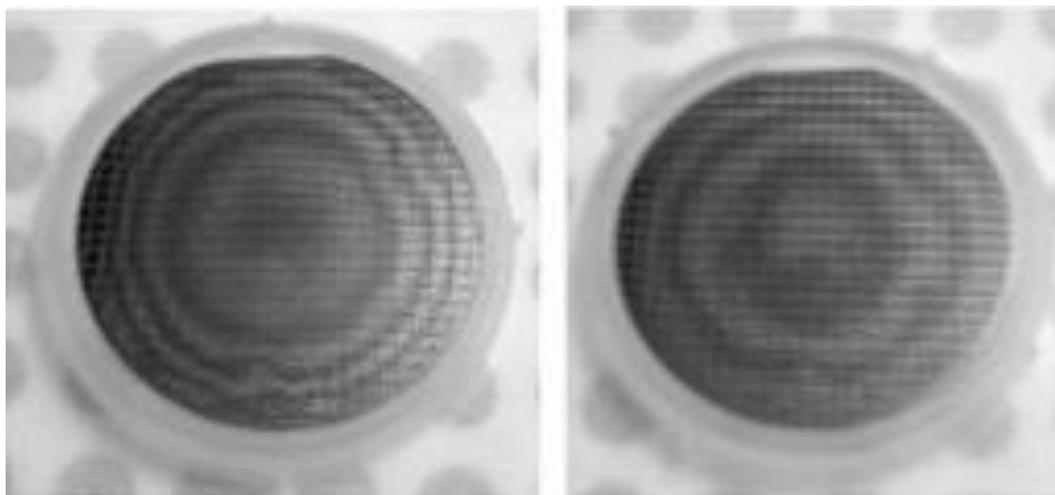


Рисунок 1.5 – Отклонение от плоскостности подложки кремния после операции полировки. По данным работы [71].

С одной стороны, учитывая требования процессов фотолитографии, точность контроля геометрических параметров не должна превышать 2-5 мкм, а с другой стороны в методиках должна быть учтена зависимость геометрических параметров от кристаллографических направлений. Так как в дальнейшем кремниевые пластины и структуры участвуют в процессах фотолитографии, находясь на плоском вакуумном столике, то геометрическими параметрами принято называть следующие параметры:

а) отклонение от плоскостности – это максимальное геометрическое отклонение поверхности пластины от базовой плоскости в свободном состоянии;

б) отклонение от параллельности – это разница между максимальной и минимальной толщиной пластины при вакуумном нагружении на базовой поверхности.

К основным группам методов контроля отклонения от плоскостности относят следующие: электротензометрию, оптико-геометрические, поляризационно-оптические, интерференционно-оптические, проникающих излучений. Ко второй группе экспериментальных методов относят методы измерения отклонения от плоскостности по отдельным точкам, использующие преобразователи различного типа, основные из которых механиче-

ские, оптико-механические, оптические, (линзовые и растровые) потенциометрические, емкостные, индукционно-трансформаторные, пьезоэлектрические, магнитоупругие (магнитострикционные), фотоэлектрические, струнные, пневматические, электроакустические, ультразвуковые, механотронные, вихретоковые, оптоэлектронные.

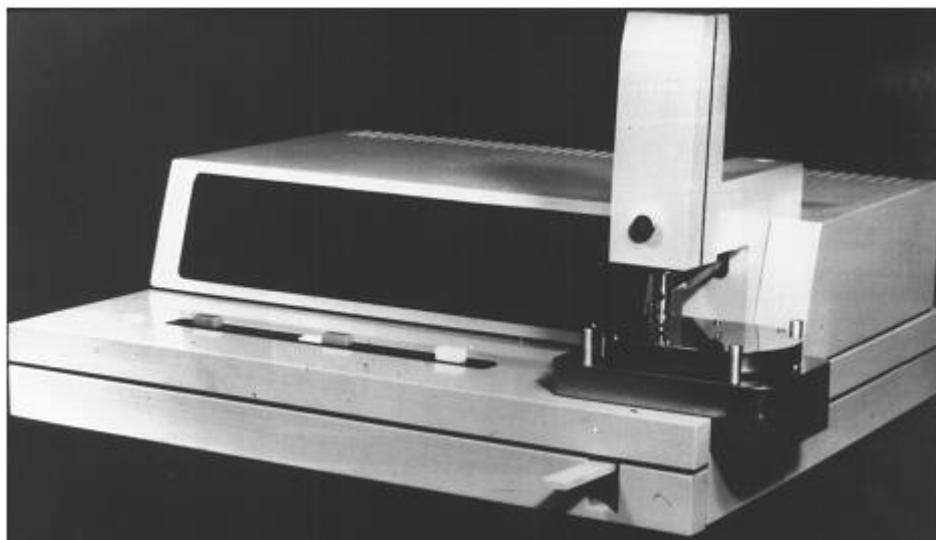


Рисунок 1.6 – Установка «Номинал-1».



Рисунок 1.7 – Установка «Номинал-2» [74]:

1. Электронный блок. 2. Индуктивный преобразователь перемещения. 3. Измерительная головка. 4. Предметный столик. 5. Толкатель. 6. Рычаг перемещений.

Для измерения геометрических параметров полупроводниковых пластин произвольной формы авторами работ [72, 73] была разработана серия устройств «Номинал-1», «Номинал-2», общий вид которых показан на рис. 1.6 и рис. 1.7.

Установки типа «Номинал» позволяют контролировать геометрические параметры полупроводниковых пластин произвольной формы, легкодеформируемых (например, твердых растворов CdHgTe) в диапазоне 0-1000 мкм. Минимальное измерительное усилие  $\approx 10$  мЛгр дает возможность контролировать толщину весьма хрупких пластинок CdHgTe, предназначенных для производства приборов ночного видения и имеющих жесткие требования к геометрическим параметрам.

Весьма широкое распространение в полупроводниковой промышленности получила установка «Экспресс-4» (рис.1.8), предназначенная для контроля геометрических параметров подложек и структур в полуавтоматическом режиме.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что существующее оборудование и методы измерения отклонения от плоскостности в полупроводниковых пластинах в основном ориентированы на изделия из кремния. Измерение отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия имеет ряд особенностей, которые связаны, прежде всего, с большим уровнем внутренних напряжений. В результате этого, толщина пластины GaAs значительно почти в два раза, превышает толщину пластины кремния, что приводит к необходимости использовать высокоточные неразрушающие методы.

Можно сделать вывод о необходимости разработки новых или модернизации существующих устройств, методик и методов измерения отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия.



Рисунок 1.8 – Полуавтоматическая установка «Экспресс-4» для контроля геометрических параметров КС.

### **1.5. Методы и аппаратура контроля плотности дислокаций в подложках GaAs.**

Высокий уровень современной микроэлектроники, достижения последних лет в области субмикронной технологии во многом связаны с применением новых структурно совершенных полупроводниковых материалов. Широкое применение в полупроводниковом производстве получили малодислокационные и бездислокационные материалы. Наличие в активной области приборов и микросхем или вблизи её даже одного дефекта может привести к браку, к нестабильности параметров и характеристик, к деградационным процессам, т.е. существенно снижает надежность как самих приборов и микросхем, так и изделий микроэлектроники на их основе. Поэтому актуальной задачей на сегодняшний день является как разработка

прямых, неразрушающих, высокочувствительных и высокоразрешающих методов и методик регистрации, так и надежная идентификация дефектов структуры основных полупроводниковых материалов, применяемых в технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

На электрические свойства полупроводниковых приборов сильное влияние оказывают структурные дефекты материала такие, как дислокации, дефекты упаковки, линии скольжения, и др. Эти дефекты стимулируют неравномерную диффузию примесей по объему кристалла, служат местами преимущественного скопления примесей и выделений второй фазы, приводят к ухудшению вольт-амперных характеристик р-п переходов. Поэтому контроль плотности дефектов структуры играет особо важную роль в производстве полупроводниковых материалов. Для этих целей широкое применение нашли методы визуализации структурных дефектов путем их декорирования примесями и методы селективного химического травления.

Сущность эффекта декорирования заключается в следующем. Известно, что под действием локальных упругих полей, возникающих вокруг структурных несовершенств кристаллической решетки, примесные атомы концентрируются преимущественно вблизи дефектов структуры, образуя на них так называемую примесную атмосферу. Если примесь вводится в исследуемый образец при высокой температуре, когда растворимость ее в кристаллической решетке велика, при охлаждении твердый раствор примеси в кристалле становится пересыщенным и возникает процесс осаждения избыточных примесных атомов с образованием частиц второй фазы. Этот процесс наиболее интенсивно протекает вблизи дефектов структуры, так как примесная атмосфера вокруг них приводит к более сильному пересыщению твердого раствора декорирующей примеси и возникновение частиц второй фазы в этих областях кристалла становится энергетически более выгодным.

Впервые метод декорирования был использован [74] для наблюде-

ния дислокаций в кремнии. Декорирование проводилось примесью меди. Для этого исследуемые образцы смачивались в растворе  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ , после чего отжигались примерно в течение часа в атмосфере водорода при  $900^\circ\text{C}$ . После отжига образцы извлекались из печи и охлаждались до комнатной температуры в течение нескольких минут. На практике диффузию меди в кремний с целью декорирования дефектов структуры проводят в более широком диапазоне температур  $900\dots 1200^\circ\text{C}$ . Длительность диффузии выбирают такой, чтобы диффундирующая медь равномерно распределялась по объему кристалла.

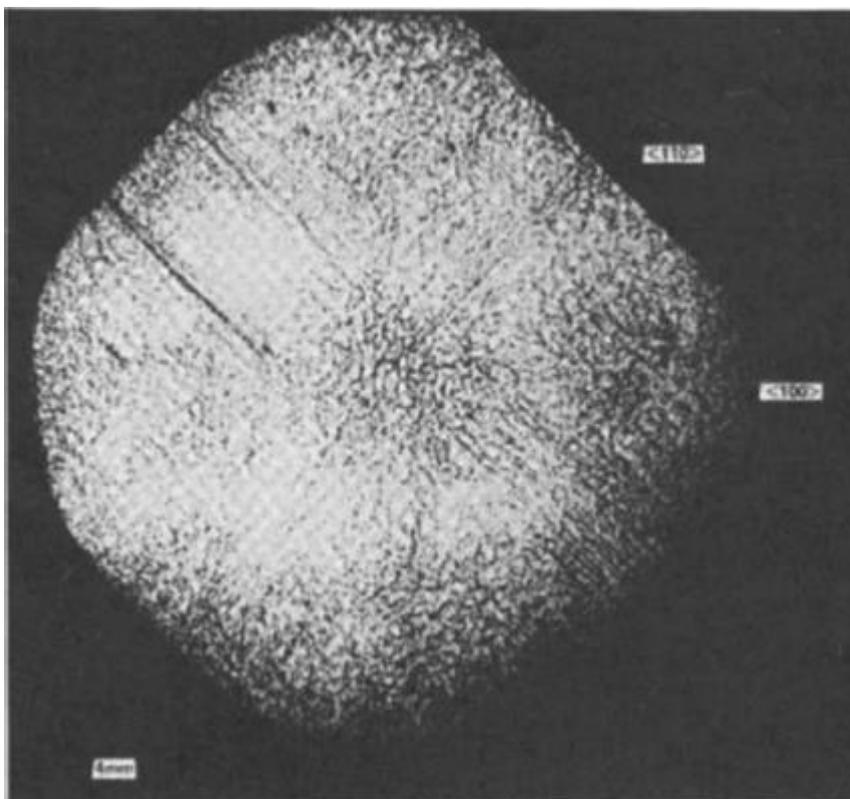


Рисунок 1.9 – Дефекты в арсениде галлия декорированные медью. По данным работы [75].

Скорость охлаждения кристалла после окончания диффузии не должна быть слишком малой. При очень медленном охлаждении большое количество меди может выходить из объема, вследствие обратной диффузии к поверхности, в результате чего уменьшается контрастность декори-

рования (см. рис. 1.9). С другой стороны, резкое уменьшение температуры не дает возможности развиваться процессу осаждения пересыщенного твердого раствора меди на дефектах структуры, так как интенсивность этого процесса ограничивается диффузионным перемещением атомов меди к центрам осаждения.

В местах пересечения структурного дефекта с поверхностью образца возникает локальное изменение поверхностной энергии. В химических травителях эти участки поверхности растворяются с большей скоростью, в результате чего дефект структуры выявляется в виде ямки (рис. 1.10). Форма ямки травления зависит от типа дефекта, кристаллографической ориентации плоскости, на которой он выявляется, а также от режимов химического травления. Например, дислокации на плоскости (111) в полупроводниках с кубической решеткой типа алмаза (таких, как германий, кремний) характеризуются треугольной ямкой травления. Фигура травления дефекта упаковки на плоскости (111) имеет вид замкнутого или незамкнутого треугольника, либо отрезка линии, ориентированного в направлении (110).

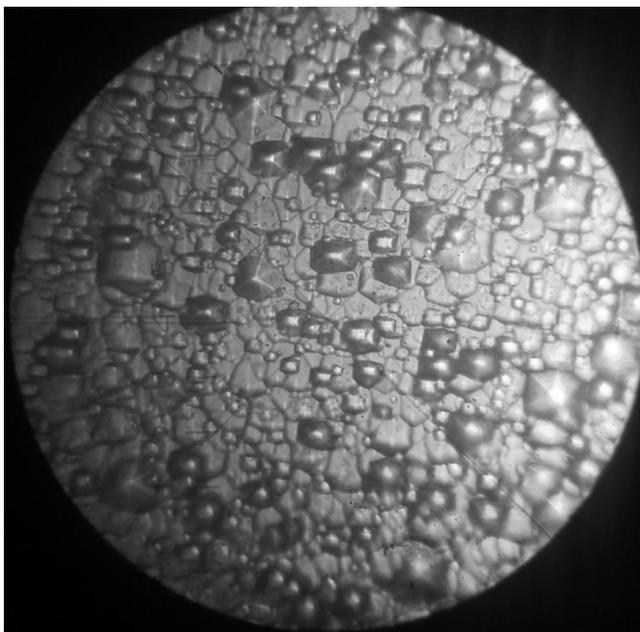


Рисунок 1.10 – Дислокации в пластине GaAs после химического травления.

Линия скольжения представляет собой ряд дислокационных ямок травления с линейной плотностью более чем 25 ямок/мм, ориентированный на плоскости (111) вдоль направления (110).

Для выявления рассмотренных дефектов структуры на разных материалах рекомендовано большое количество различных химических составов.

С помощью подходящих травителей можно выявить дислокационную структуру в кристаллах, определить положение двойниковых границ, определить реальную симметрию кристаллов, которую можно выявить по фигурам растворения (травления).

Анализируя методы и способы определения плотности дислокаций и микродефектов в подложках GaAs можно сделать вывод, что существующие методы и методики предполагают «ручное» измерение этого параметра. Для увеличения точности измерения необходима разработка устройств измерения плотности дислокаций и других структурных нарушений.

### **1.6. Цель и задачи исследования.**

Анализ существующих подходов к производству подложек арсенида галлия и решению задач усовершенствования технологии изготовления подложек показал, что производство подложек арсенида галлия имеет ряд особенностей, которые отличают это производство от изготовления подложек кремния. Арсенид галлия более сложный в выращивании материал, что вызвано его природой как соединения  $A_3B_6$ . Плотность дислокаций в арсениде галлия гораздо выше, чем в кремнии и уровень внутренних напряжений также выше. В результате этого в процессе механико-химических обработок подложек высокий процент брака, как самих подложек, так и изделий на основе GaAs.

Оценка современного состояния технологии производства подложек

GaAs позволила сделать вывод, что основными проблемами технологии изготовления подложек арсенида галлия в условиях промышленного производства являются высокий уровень остаточных напряжений и высокая плотность дислокаций, которые переходят в подложки из слитка. Отсутствие контроля ряда параметров подложек, в частности уровня остаточных напряжений, плотности дислокаций и отклонение от плоскостности, вызванное несовершенством методов и методик измерения параметров подложек арсенида галлия.

Выполненный обзор литературы позволяет отметить, что на сегодня в технологии изготовления подложек арсенида галлия диаметром 82 – 101 мм сложилась следующая ситуация:

- качество подложки арсенида галлия определяется качеством слитка, из которого производится подложка. Основным технологическим фактором, приводящим к появлению дислокаций в слитках арсенида галлия, являются термопластические напряжения, возникающие в результате высоких температурных градиентов, которые в свою очередь зависят от параметров процесса выращивания;

- не до конца решена задача моделирования процесса формирования дефектов, остаточных напряжений и отклонения от плоскостности в подложках арсенида галлия и влияния на эти параметры технологии производства подложек;

- существующие методы подготовки подложек приводят к большой величине нарушенного слоя, что является источником брака конечного продукта и механического разрушения подложек на этапе эпитаксии. Наиболее не решенной задачей процесса подготовки является шлифовка;

- не решена задача влияния процесса отжига на структурное совершенство и остаточные напряжения в подложках арсенида галлия, что не позволяет прогнозировать изменение свойств подложек после процесса отжига;

- отсутствуют аппаратура и методики для экспресс – измерений в

условиях промышленного производства плотности дислокаций, уровня остаточных напряжений и отклонения от плоскостности в подложках арсенида галлия с требуемой точностью.

В связи с этим целью диссертационной работы является решение актуальной научно-практической проблемы – повышение качества подложек арсенида галлия применяющихся для изделий микроэлектроники путем разработки и внедрения новой технологии изготовления подложек, а также внедрения методов и аппаратуры неразрушающего контроля структурного совершенства подложек.

Исходя из этого, определены основные задачи диссертационной работы:

1) провести анализ состояния и тенденций развития технологии выращивания слитков GaAs и производства подложек, обосновать необходимость разработки новых или модернизации существующих технологических процессов производства подложек GaAs;

2) усовершенствовать математические модели, описывающие влияние механических свойств GaAs на качество подложек;

3) определить влияние механических свойств GaAs на остаточные напряжения в подложках в зависимости от кристаллографической ориентации;

4) определить влияние анизотропии подложек GaAs на плотность дислокаций;

5) усовершенствовать метод, методику и разработать аппаратуру неразрушающего контроля уровня остаточного напряжения, отклонение от плоскостности и плотности дислокаций в подложках GaAs;

6) усовершенствовать метод измерения диаметра слитка GaAs в процессе выращивания, что обеспечивает измерение диаметра с точностью не

менее  $\pm 1,5$  мм на участке с постоянно заданным диаметром и плотность дислокаций не более  $1.3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ ;

7) разработать технологию для отжига слитков, обеспечивающих уровень остаточных напряжений не более 40 МПа на краях подложки;

8) разработать технологию и оборудование для шлифовки подложек, обеспечивающих уровень нарушенного слоя не более 10 мкм;

### **Выводы по разделу.**

Мировое производство полупроводникового арсенида галлия постоянно увеличивается. Бурное развитие средств мобильной связи на основе смартфонов, снижение цен на планшетные устройства, постоянно расширяющееся использование высокоскоростных беспроводных телекоммуникационных средств, приводят к необходимости резко увеличивать долю электронных приборов СВЧ диапазона, которые изготавливаются на основе электронного арсенида галлия.

Необходимость повышения конкурентоспособности подложек арсенида галлия, обуславливает в свою очередь необходимость повышения экономической эффективности их производства.

Существующие математические модели не полностью описывают зависимость структурного совершенства и остаточных напряжений от технологических факторов для подложек арсенида галлия в различной кристаллографической ориентации.

Технология отжига и подготовки подложек не позволяет обеспечить требуемое в современных условиях структурное совершенство подложек. Это приводит к большому проценту брака подложек и конечных изделий. Разработка новых технологий отжига и шлифовки подложек позволит привести их качество к требованиям современного производства.

Отсутствие экспресс-методов, аппаратуры и автоматизации измерений уровня остаточных напряжений, плотности дислокаций и отклонение от плоскостности, не позволяет производить оперативную корректировку процесса, производства подложек арсенида галлия.

Проблема повышения, эффективности производства подложек арсенида галлия может быть решена путем разработки и внедрения новых технологий и измерительных комплексов.

## Раздел 2

# РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА ПОДЛОЖЕК АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ.

### 2.1. Усовершенствование математической модели зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона от кристаллографической ориентации подложек GaAs.

Как известно, арсенид галлия является анизотропным кристаллом. Рассмотрим влияние анизотропии на механические свойства GaAs. В общем случае константы упругости и модули упругости анизотропного материала являются компонентами тензора 4-го порядка, который связывает два тензора второго ранга.

Запишем закон Гука, определяющий соотношение между напряжением и деформацией:

$$\varepsilon = s\sigma \quad (2.1)$$

где  $s$  – константа упругой податливости.

В тоже время можно записать (2.1) в следующем виде:

$$\sigma = c\varepsilon \quad c = \frac{1}{s} \quad (2.2)$$

где  $c$  – константа упругой жесткости.

В общем случае при воздействии усилия на кристалл однородное напряжение и однородная деформация определяются тензорами второго ранга. Для произвольного однородного напряжения можно установить связь между компонентами деформации и напряжения как [76]:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= s_{xxxx} \sigma_{xx} + s_{xyxy} \sigma_{yy} + s_{xzxx} \sigma_{zz} + s_{xxzy} \sigma_{zy} + s_{xxzx} \sigma_{zx} + s_{xxyy} \sigma_{xy} \\
\varepsilon_{yy} &= s_{yyxx} \sigma_{xx} + s_{yyyy} \sigma_{yy} + s_{yyzz} \sigma_{zz} + s_{yyzy} \sigma_{zy} + s_{yyzx} \sigma_{zx} + s_{yyxy} \sigma_{xy} \\
\varepsilon_{zz} &= s_{zzxx} \sigma_{xx} + s_{zzyy} \sigma_{yy} + s_{zzzz} \sigma_{zz} + s_{zzzy} \sigma_{zy} + s_{zzzx} \sigma_{zx} + s_{zzxy} \sigma_{xy} \\
\varepsilon_{zy} &= s_{zyxx} \sigma_{xx} + s_{zyyy} \sigma_{yy} + s_{zyzz} \sigma_{zz} + s_{zxxz} \sigma_{zy} + s_{zyzx} \sigma_{zx} + s_{zxyy} \sigma_{xy} \\
\varepsilon_{zx} &= s_{zxxx} \sigma_{xx} + s_{zxyy} \sigma_{yy} + s_{zxxz} \sigma_{zz} + s_{zxxz} \sigma_{zy} + s_{zxxz} \sigma_{zx} + s_{zxyy} \sigma_{xy} \\
\varepsilon_{xy} &= s_{xyxx} \sigma_{xx} + s_{xyyy} \sigma_{yy} + s_{xyzz} \sigma_{zz} + s_{xyzy} \sigma_{zy} + s_{xyzx} \sigma_{zx} + s_{xyxy} \sigma_{xy}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Таким образом, можно записать обобщенный закон Гука с учетом суммирования в виде:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl}, \tag{2.4}$$

или в виде:

$$\sigma_{kl} = c_{ijkl} \varepsilon_{ij}, \tag{2.5}$$

при этом справедливо следующее равенство для симметричных кристаллов:

$$c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk}, \tag{2.6}$$

Константы упругой податливости  $s_{ijkl}$  и константы упругой жесткости  $c_{klij}$  представляют собой тензор 4-го ранга. Для этого тензора полное число констант равно 81 ( $3^4 = 81$ ). С учетом того, что тензор напряжения и тензор деформации симметричны, тензоры упругой податливости и упругой жесткости также симметричны. Следовательно, допустима перестановка  $i$  и  $j$ , а также  $k$  и  $l$ . Таким образом, можно утверждать, что в нашем случае тензор четвертого ранга  $c$  имеет в общем 21 независимый компонент. С учетом симметрии кристалла цинковой обманки, которую представляет собой арсенида галлия, это число снижается до 3 ( $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$ ).

Используя нотацию Фойгта тензорное представление можно заменить матричным, в виде матрицы  $6 \times 6$ , применив подстановку индексов, в которой пары первых и последних индексов заменяют одним индексом значение, которого изменяется от 1 до 6. Замена индексов приводится в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Индексы для тензорного и матричного обозначения.

Тензорное обозначение	11	22	33	32,32	31,13	12,21
Матричное обозначение	1	2	3	4	5	6

С учетом того, что арсенид галлия анизотропный, упругие константы также являются анизотропными. Они являются функциями упругих констант в требуемой ориентации. При этом компоненты тензора упругих констант в произвольной ориентации могут быть получены из известного тензора путем поворота вдоль одной из кристаллических осей.

В декартовой системе координат тензор упругой податливости арсенида галлия представляется следующей матрицей:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

где константы упругой податливости вычисляются как:

$$s_{11} = \frac{c_{11} + c_{12}}{(c_{11} - c_{12}) \times (c_{11} + 2c_{12})} \quad (2.7a)$$

$$s_{12} = -\frac{c_{11}}{(c_{11} - c_{12}) \times (c_{11} + 2c_{12})} \quad (2.7б)$$

$$s_{44} = \frac{1}{c_{44}} \quad (2.7в)$$

для арсенида галлия  $s_{11} = 1.17 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ ,  $s_{12} = -0.37 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ ,  $s_{44} = 1.68 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$  [77].

Рассмотрим две системы координат  $(x, y, z)$  и  $(x', y', z')$  с общим началом в точке 0. Направление каждой оси системы  $(x', y', z')$  можно охарактеризовать тремя углами с тремя осями системы  $(x, y, z)$ . Следовательно, для поворота осей координат необходимо 9 углов называемых направляющими косинусами,  $l_i, m_i, n_i$ , при  $i = 1, 2, 3$ .

В декартовой системе для произвольного направления при повороте осей тензор упругой податливости может быть записан в виде:

$$S' = \begin{bmatrix} s'_{11} & s'_{12} & s'_{13} & s'_{14} & s'_{15} & s'_{16} \\ s'_{21} & s'_{22} & s'_{23} & s'_{24} & s'_{25} & s'_{26} \\ s'_{31} & s'_{32} & s'_{33} & s'_{34} & s'_{35} & s'_{36} \\ s'_{41} & s'_{42} & s'_{43} & s'_{44} & s'_{45} & s'_{46} \\ s'_{51} & s'_{52} & s'_{53} & s'_{54} & s'_{55} & s'_{56} \\ s'_{61} & s'_{62} & s'_{63} & s'_{64} & s'_{65} & s'_{66} \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

где

$$s'_{11} = s'_{22} = s'_{33} = s_{11} + s_0(l_i^4 + m_i^4 + n_i^4 - 1); \quad (2.9)$$

$$s'_{44} = s'_{55} = s'_{66} = s_{44} + 4s_0(l_p^2 l_q^2 + m_p^2 m_q^2 + n_p^2 n_q^2); \quad (2.10)$$

$$s'_{ij} = s_{12} + s_0(l_i^2 l_j^2 + m_i^2 m_j^2 + n_i^2 n_j^2) \text{ при } i, j = 1, 2, 3; \quad (2.11)$$

$$s'_{ij} = 2s_0(l_i^2 l_r l_s + m_i^2 m_r m_s + n_i^2 n_r n_s) \text{ при } i=1, 2, 3; j=4, 5, 6; \quad (2.12)$$

$$s'_{ij} = 4s_0(l_p l_q l_r l_s + m_p m_q m_r m_s + n_p n_q n_r n_s) \text{ при } i, j = 4, 5, 6; \quad (2.13)$$

$$s_0 = s_{12} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44}. \quad (2.14)$$

Подстрочные индексы  $p$  и  $q$  соотносятся с индексом  $i$ , а подстрочные индексы  $r$  и  $s$  соотносятся с индексом  $j$  как показано в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Соотношение индексов для тензора упругой податливости.

Индексы	i=4	j=4	i=5	j=5	i=6	j=6
p	2	2	1	1	1	1
r	2	2	1	1	1	1
q	3	3	3	3	2	2
s	3	3	3	3	2	2

С учетом (2.8) ÷ (2.14) можно записать выражения для определения модуля Юнга ( $E'_i$ ), коэффициента Пуассона ( $\nu'_{ij}$ ), и модуля сдвига ( $G'_{rs}$ ) для произвольного направления следующим образом:

$$E'_i = \frac{\sigma'_i}{\varepsilon'_i} = \frac{1}{s'_{ii}}, \quad (2.15)$$

где  $i$  может принимать значения  $i=1,2,3$ ,

$$\nu'_{ij} = -\frac{\varepsilon'_j}{\varepsilon'_i} = -\frac{s'_{ij}}{s'_{ii}} = -\frac{s'_{ji}}{s'_{ii}}, \quad (2.16)$$

где  $i,j$  может принимать значения  $i,j=1,2,3$

$$G'_{rs} = \frac{\tau'_{rs}}{\gamma'_{rs}} = \frac{1}{s'_{rr}}, \quad (2.17)$$

где  $\tau_{rs}$  – касательное напряжение,  $\gamma_{rs}$  – сдвиговая деформация, а индексы  $r,s$  могут принимать значения 4,5,6.

Следовательно, закон Гука для произвольного направления может быть записан в виде:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon'_1 \\ \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_3 \\ \gamma'_{23} \\ \gamma'_{31} \\ \gamma'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E'_1} & -\frac{\nu'_{21}}{E'_2} & -\frac{\nu'_{31}}{E'_3} & s'_{14} & s'_{15} & s'_{16} \\ -\frac{\nu'_{12}}{E'_1} & \frac{1}{E'_2} & -\frac{\nu'_{32}}{E'_3} & s'_{24} & s'_{25} & s'_{26} \\ -\frac{\nu'_{13}}{E'_1} & -\frac{\nu'_{23}}{E'_2} & \frac{1}{E'_3} & s'_{34} & s'_{35} & s'_{36} \\ s'_{41} & s'_{42} & s'_{43} & \frac{1}{G'_{23}} & s'_{45} & s'_{46} \\ s'_{51} & s'_{52} & s'_{53} & s'_{54} & \frac{1}{G'_{31}} & s'_{56} \\ s'_{61} & s'_{62} & s'_{63} & s'_{64} & s'_{65} & \frac{1}{G'_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \\ \tau'_{23} \\ \tau'_{31} \\ \tau'_{12} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

где  $s'_{4i} = s'_{i4} = s'_{6j} = s'_{j6} = 0$  при значениях подстрочных индексов  $i=1,2,3,5,6$  и  $j=1,2,3,4,5$ , а также  $\sigma'_3 = \tau'_{23} = \tau'_{31} = 0$

$$\varepsilon'_1 = \frac{\sigma'_1}{E'_1} - \nu'_{21} \frac{\sigma'_2}{E'_2}, \quad (2.19)$$

$$\varepsilon'_2 = \frac{\sigma'_1}{E'_2} - \nu'_{12} \frac{\sigma'_2}{E'_1}, \quad (2.20)$$

$$\varepsilon'_3 = -\nu'_{13} \frac{\sigma'_1}{E'_1} - \nu'_{23} \frac{\sigma'_2}{E'_2}, \quad (2.21)$$

$$\gamma'_{23} = 0, \quad (2.22)$$

$$\gamma'_{31} = s'_{51} \sigma'_1 + s'_{52} \sigma'_2, \quad (2.23)$$

$$\gamma'_{12} = \frac{\tau'_{12}}{G'_{12}}, \quad (2.24)$$

Как принято в кристаллографии, в декартовой системе координат оси, обозначенные X, Y, Z соответствуют главным кристаллографическим направлениям. Для арсенида галлия ориентации (100) и (111) такое соответствие показано на рисунке 2.1.

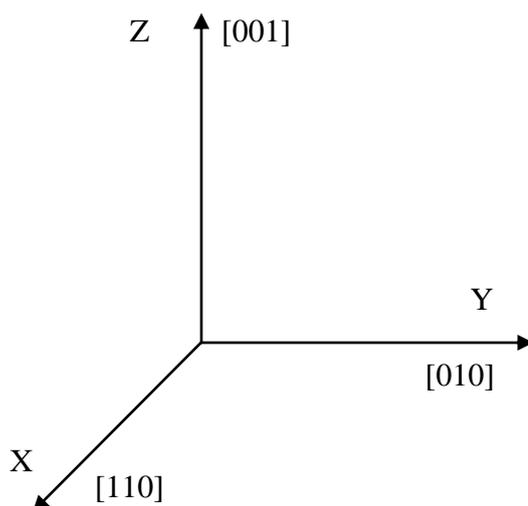


Рисунок 2.1 – Совмещение декартовых осей и главных кристаллографических направлений для GaAs ориентации (100).

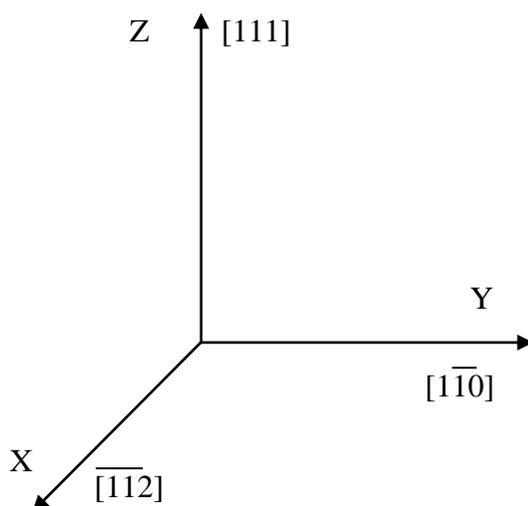


Рисунок 2.2 – Совмещение декартовых осей и главных кристаллографических направлений для GaAs ориентации (111).

Рассмотрим поворот осей координат системы для определения матрицы направляющих косинусов. Возьмем декартовую систему координат с осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . В качестве начала координат примем точку, которая остается неподвижной при всех вращениях. Совместим оси системы  $XYZ$  с кристаллографическими направлениями, как показано на рисунке 2.3.

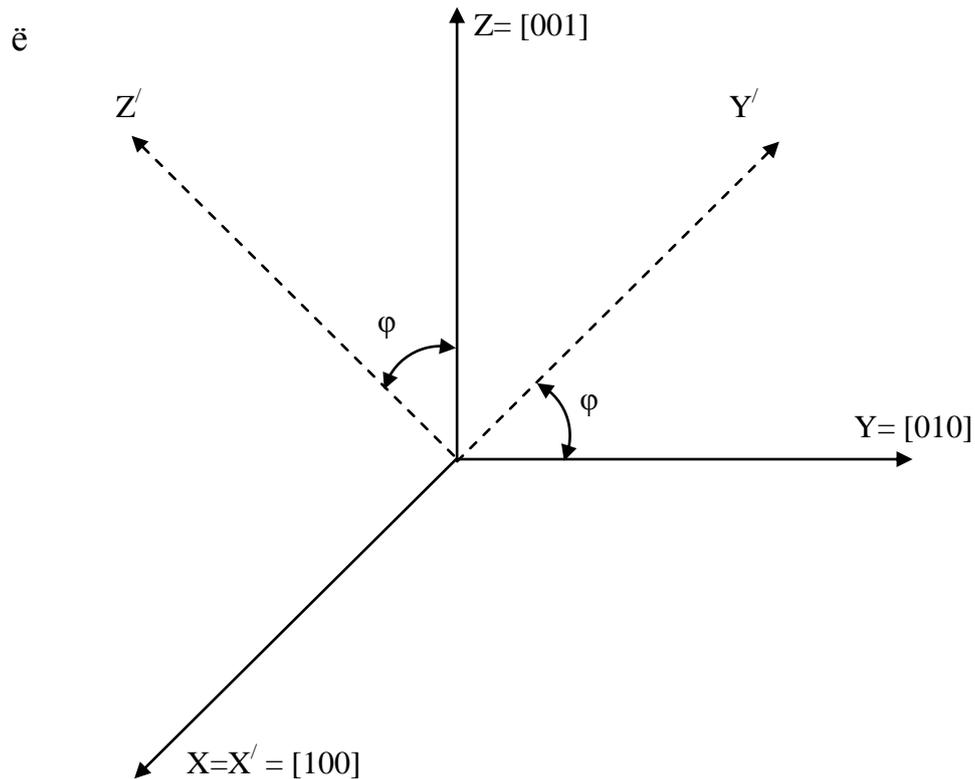


Рисунок 2.3 – Поворот кристаллографических осей для определения механических свойств GaAs в произвольном направлении.

Как известно, матрица тождественного преобразования в трехмерном пространстве записывается в виде [76]:

$$c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда для заданного поворота осей на произвольный угол  $\varphi$  можно записать матрицу абсолютных углов между осями:

$$\varphi_{ij} = \begin{bmatrix} \varphi & \frac{\pi}{2} - \varphi & \frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} + \varphi & \varphi & \frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} & \frac{\pi}{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

где  $\varphi_{ij}$  – угол между базовой и новой системой координат.

При повороте системы относительно оси X ( $[100]$ ), координаты любой точки в новой системе будут определяться уравнениями:

$$\begin{aligned} X' &= X \\ Y' &= Y \cos \varphi - Z \sin \varphi . \\ Z' &= Y \sin \varphi + Z \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.26)$$

На основании (2.25) можно записать матрицу направляющих косинусов при вращении оси относительно кристаллографического направления  $[100]$  в виде:

$$q_{ij[100]} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Соответственно, для двух оставшихся направлений можно записать следующие матрицы:

$$q_{ij[010]} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}; \quad (2.28)$$

$$q_{ij[001]} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

В частном случае при угле  $\varphi$  равном 0, значения модуля Юнга можно определить по следующим выражениям:

$$E_{[100]} = c_{11} - 2 \times \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} c_{12}; \quad (2.30)$$

$$E_{[110]} = 4 \times \frac{(c_{11}^2 + c_{12}c_{11} - 2c_{12}^2)c_{44}}{2c_{44}c_{11} + c_{11}^2 + c_{11}c_{12} - 2c_{12}^2}; \quad (2.31)$$

$$E_{[111]} = 3 \times \frac{c_{44}(c_{11} + 2c_{12})}{c_{11} + 2c_{12} + c_{44}}; \quad (2.32)$$

Непосредственные вычисления по вышеприведенным выражениям для определения значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона в про-

извольном направлении являются затруднительными. Для решения этой задачи нами было разработано программное обеспечение.

Выполним формальное описание алгоритма определения механических параметров в подложке арсенида галлия для произвольного кристаллографического направления.

Как было сказано выше, вычислить значение модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольном направлении можно путем вычисления тензора упругой податливости в повернутой системе координат относительно базовой.

Перепишем выражение (2.5) в виде:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (2.33)$$

В свою очередь при выполнении поворота обратный тензор упругой жесткости может быть вычислен как:

$$C'_{ijkl} = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 Q_{pi} Q_{qj} Q_{rk} Q_{sl} C_{pqrs}. \quad (2.34)$$

где  $Q_{ij}$  – элементы матрицы направляющих косинусов.

Тогда тензор упругой податливости в соответствии с (2.2) может быть найден как:

$$S = inv \ C'^{-1}, \quad (2.35)$$

откуда модуль Юнга и коэффициент Пуассона можно определить по выражениям (2.15), (2.16).

Алгоритм вычисления модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольной кристаллографической ориентации представлен на рисунке 2.4.

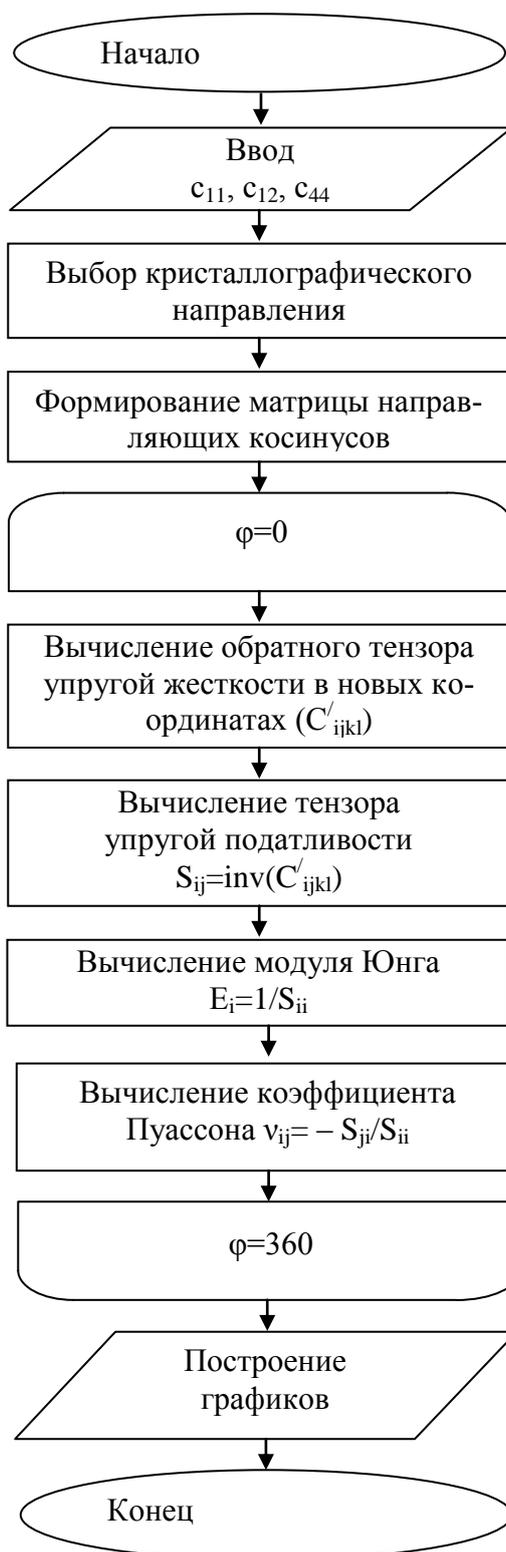


Рисунок 2.4 – Блок схема алгоритма вычисления модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольной кристаллографической ориентации.

Программная реализация предложенного алгоритма выполнена нами в программном комплексе LabView. Программа позволяет рассчитывать значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для произвольного кристаллографического направления в ориентациях (100) и (111). Интерфейс программы позволяет задавать значения констант упругой жесткости  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$ , рассчитывать значение для заданного кристаллографического направления или для всех направлений в заданной ориентации. Интерфейс позволяет представлять полученные данные в графическом виде и имеет средства для настройки графического отображения данных. Интерфейс программы показан на рисунке 2.5.

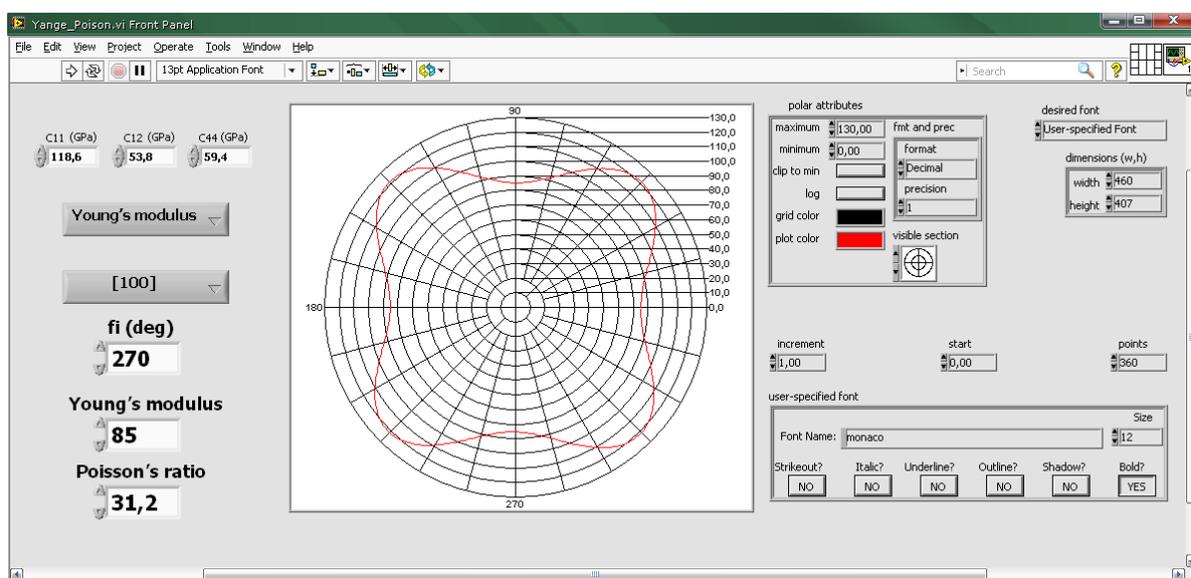


Рисунок 2.5 – Интерфейс программы вычисления модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольной кристаллографической ориентации.

Рассчитанные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для подложек арсенида галлия ориентации (100) в произвольном направлении представлены на рисунках 2.6. и 2.7. .

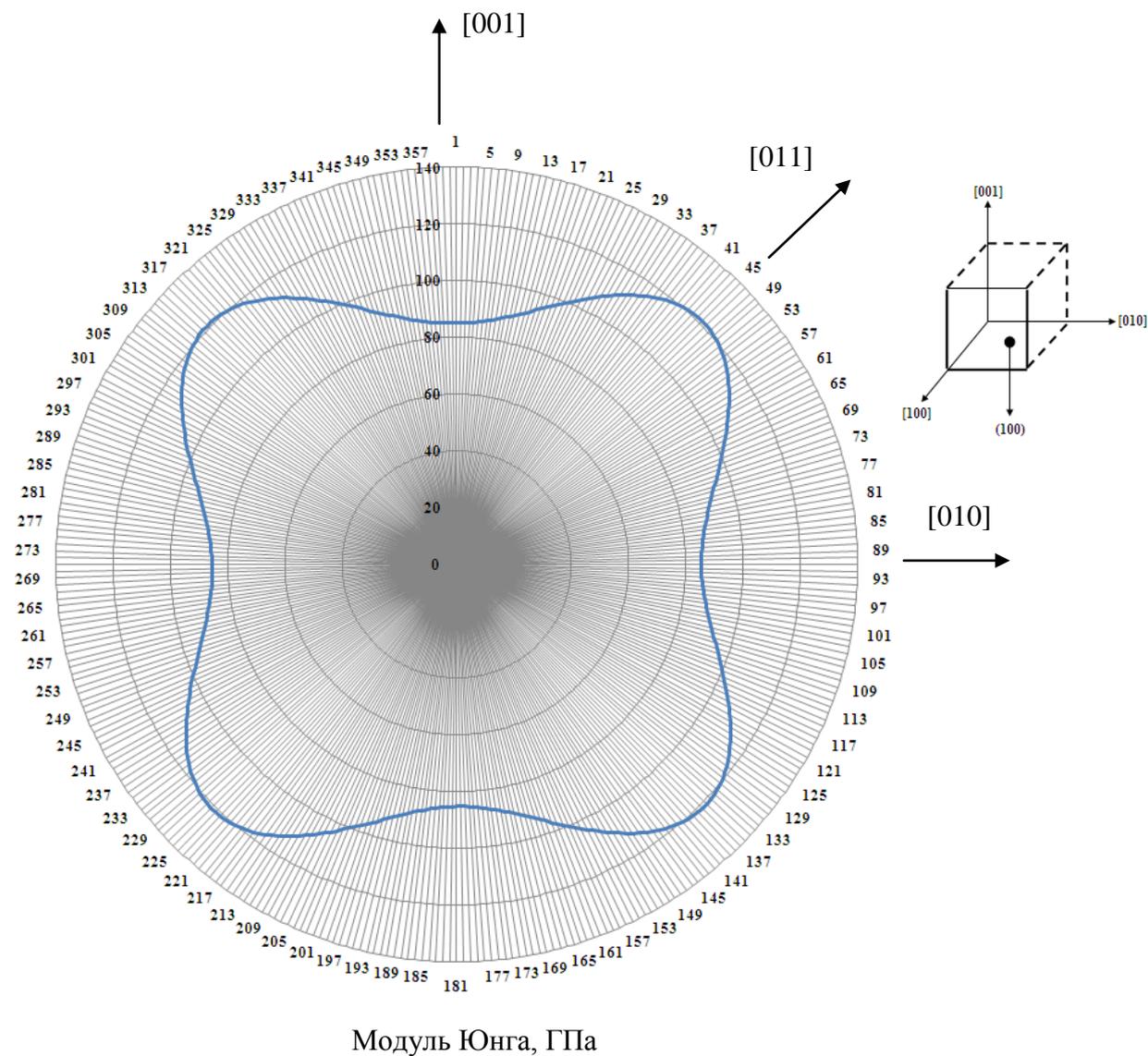
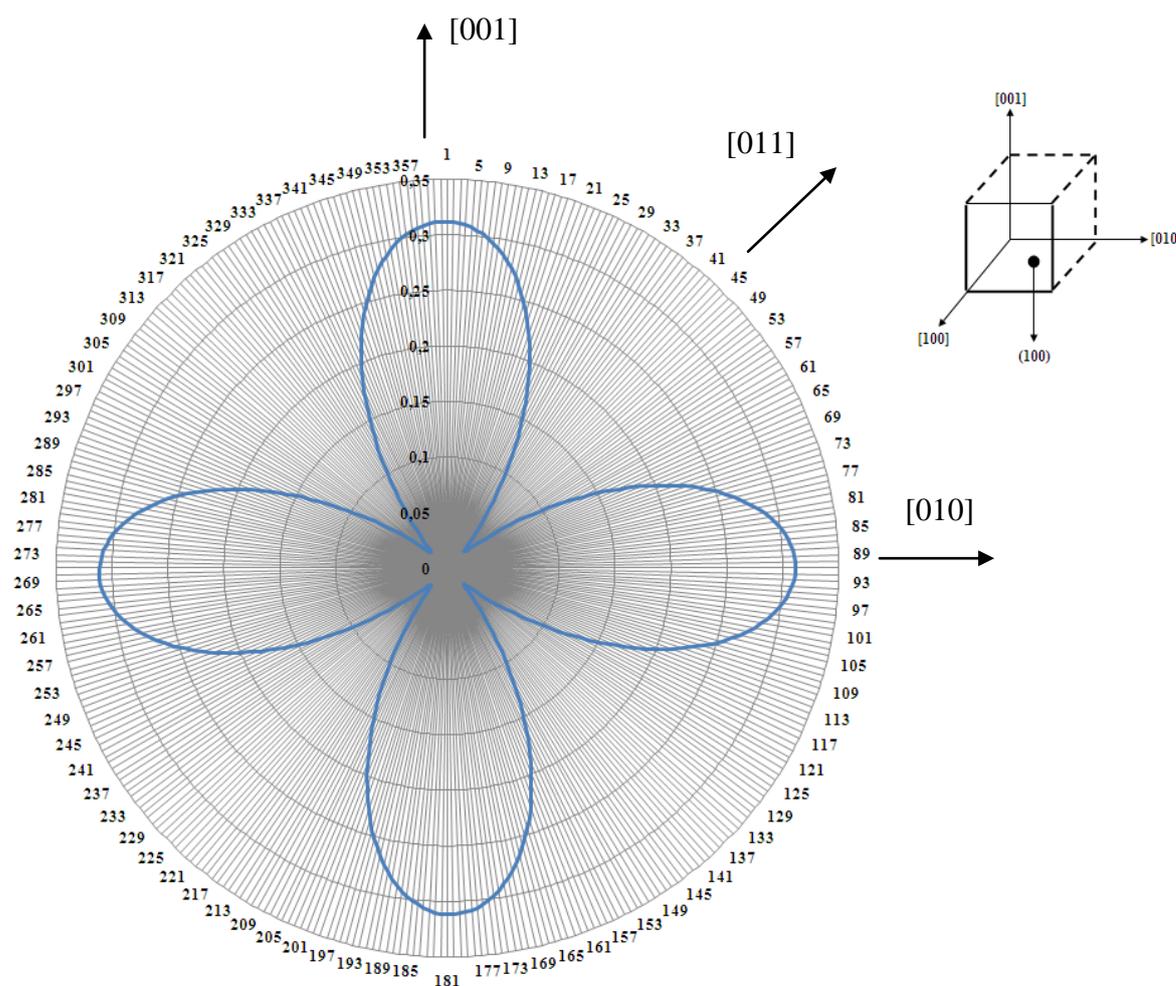


Рисунок 2.6 – Значение модуля Юнга подложек GaAs ориентации (100) для произвольного кристаллографического направления.



Коэффициент Пуассона

Рисунок 2.7 – Значение коэффициента Пуассона ориентации (100) для произвольного кристаллографического направления.

В результате выполненных расчетов были получены модуль Юнга и коэффициент Пуассона для главных кристаллографических направлений ориентации (100):

Для направления [011]  $E=121,28$  ГПа,  $\nu=0,312$ . (Максимальное значение)

Для направления [001]  $E=85,26$  ГПа,  $\nu=0,02$ . (Минимальное значение)

В ориентации (111) вследствие инвариантности для всех направлений значение модуля Юнга составило 121,1 ГПа и коэффициента Пуассона - 0,312.

В ориентации (110) значения составили:

Для направления  $E=145,013$  ГПа,  $\nu=0,2$ . (Максимальное значение)

Для направления [001]  $E=85,26$  ГПа,  $\nu=0,312$ . (Минимальное значение)

В ориентации (111) значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона являются инвариантными к кристаллографическим направлениям. Расчитанные значения этих параметров для GaAs в ориентации (111) показаны на рисунках 2.8 и 2.9 соответственно.

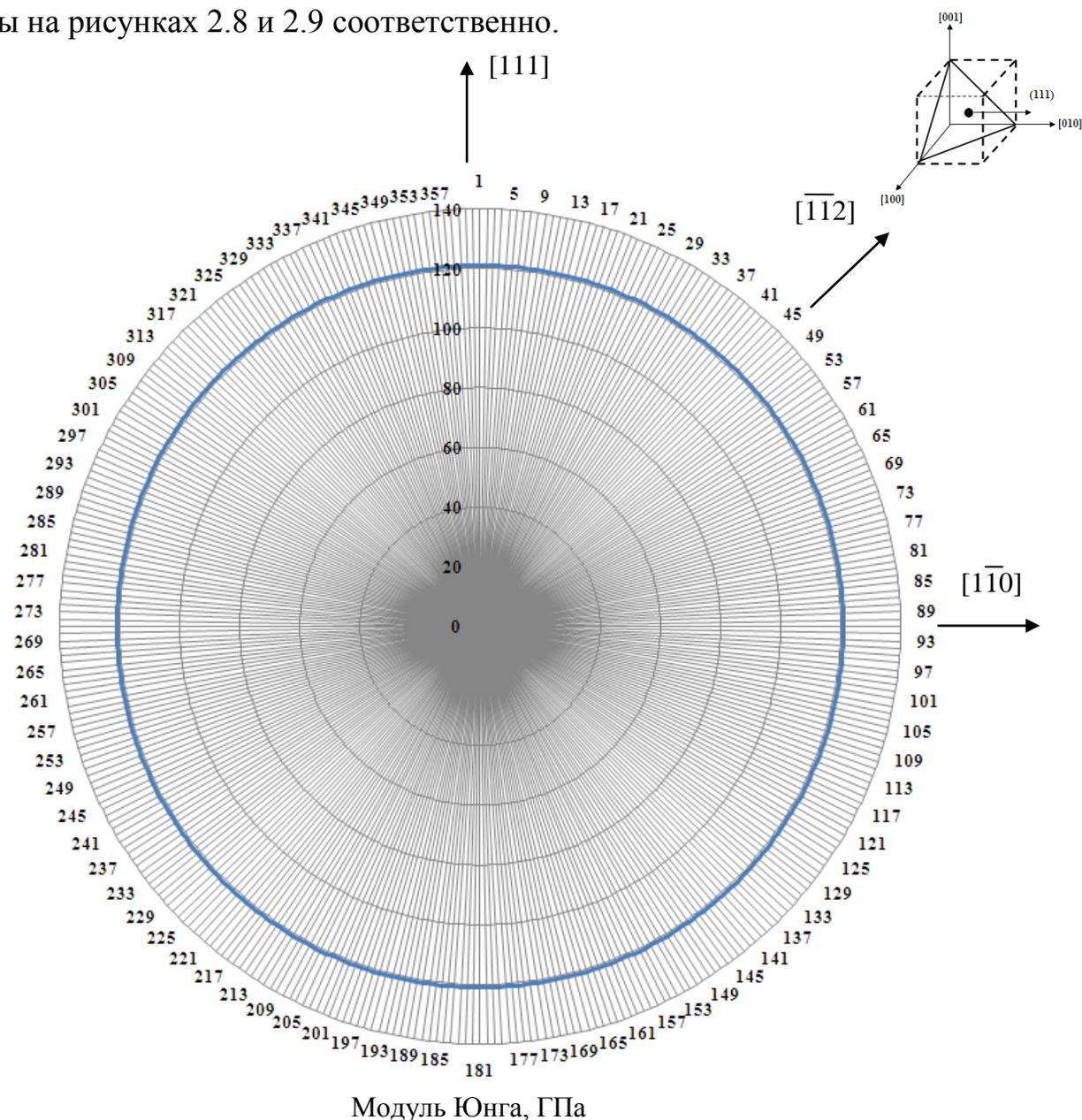


Рисунок 2.8 – Значение модуля Юнга подложек GaAs ориентации (111) для произвольного кристаллографического направления.

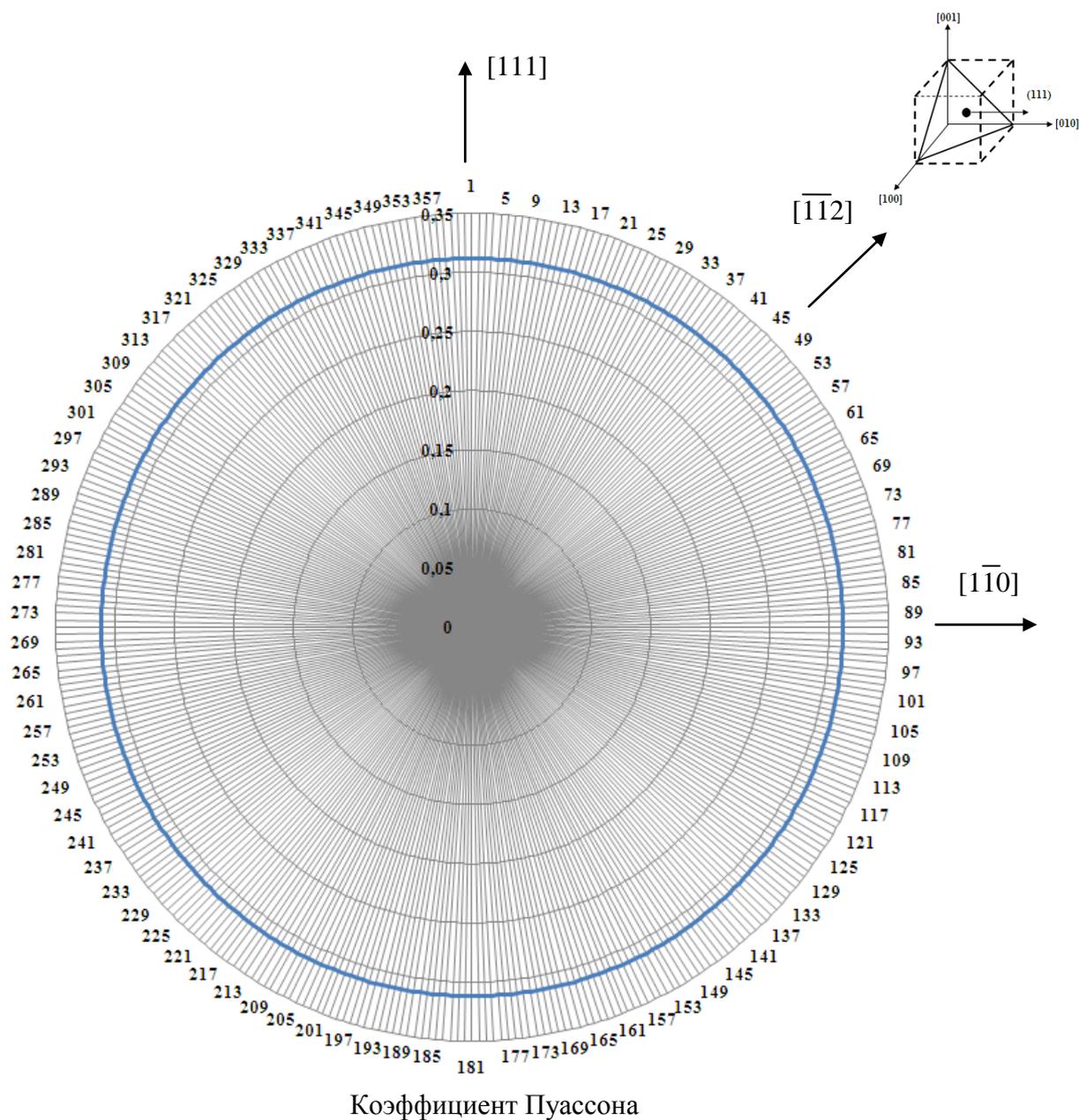


Рисунок 2.9 – Значение коэффициента Пуассона ориентации (111) для произвольного кристаллографического направления.

В ориентации (110) значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона по характеру совпадают с идентичными значениями ориентации (100). Рассчитанные значения этих параметров для GaAs в ориентации (110) показаны на рисунках 2.10 и 2.11.

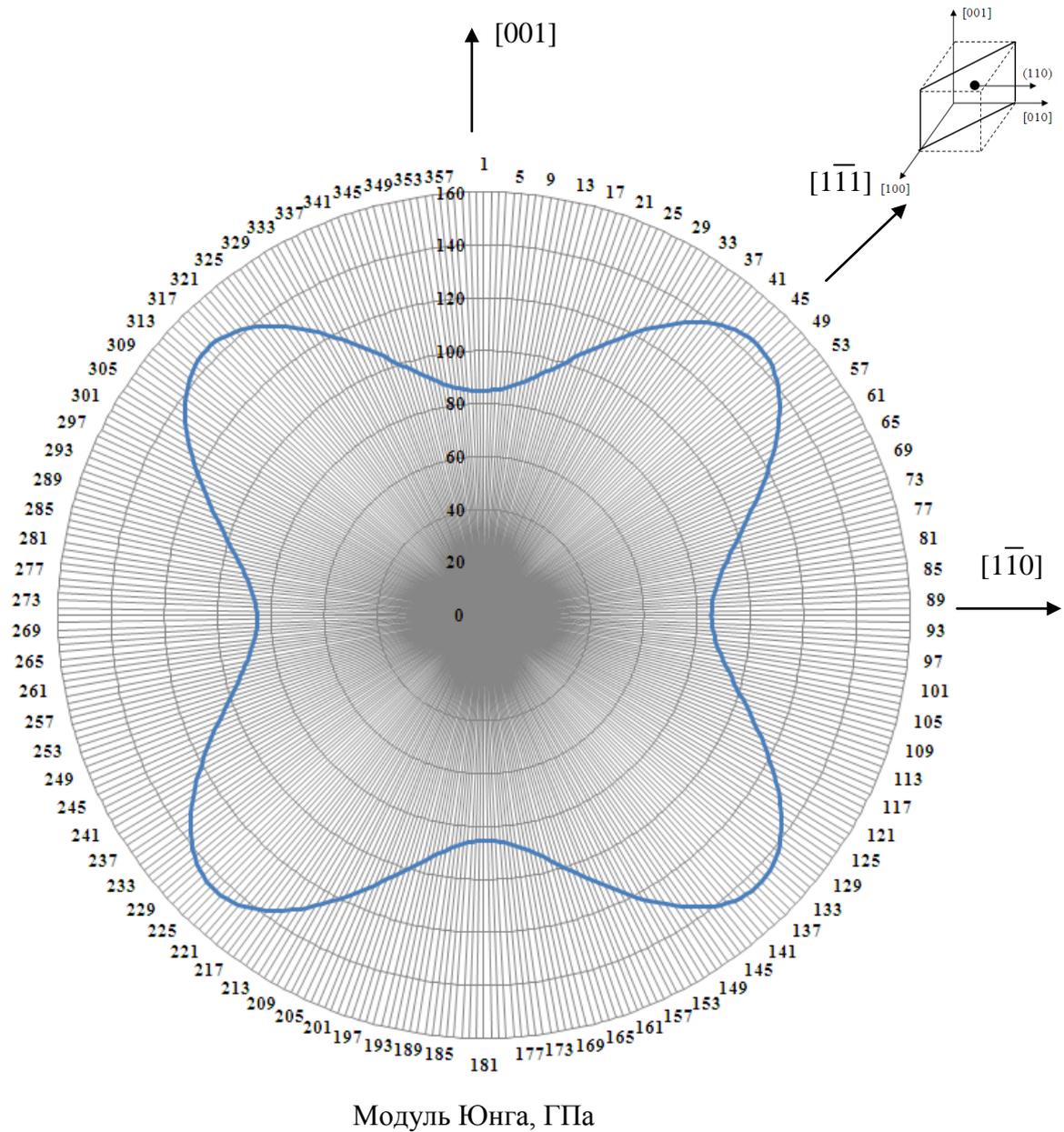
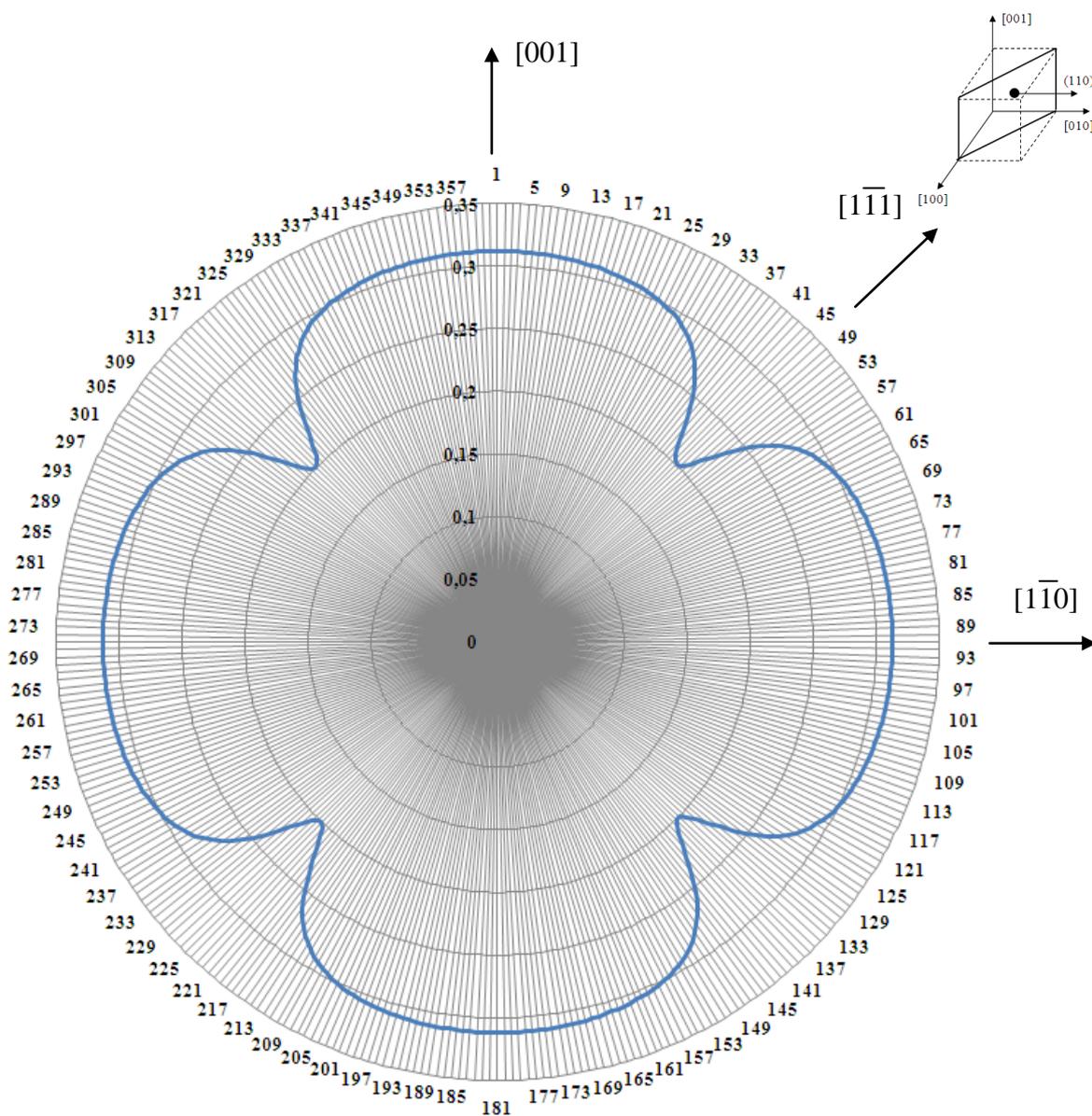


Рисунок 2.10 – Значение модуля Юнга подложек GaAs ориентации (110) для произвольного кристаллографического направления.



Коэффициент Пуассона

Рисунок 2.11 – Значение коэффициента Пуассона подложек GaAs ориентации (110) для произвольного кристаллографического направления.

Для оценки адекватности усовершенствованной модели мы выполнили сравнение экспериментальных данных полученных различными авторами [78 ÷ 81] с полученными нами расчетными данными. Результаты приведены в таблице 2.3 и таблице 2.4.

Таблица 2.3

Экспериментальные и рассчитанные значения модуля Юнга, ГПа.

Ориентация (100)			Ориентация (111)	Ориентация (110)			Источник
[001]	[011]	[010]	[111],[1 $\bar{1}$ 0], [ $\bar{1}$ $\bar{1}$ 2]	[001]	[1 $\bar{1}$ 1]	[1 $\bar{1}$ 0]	
85,3	121,3	85,3	121,3	85,3	141,2	85,3	[78](экспер.)
85	122	85	122	85	142	85	[79](экспер.)
85,29	121,5	85,29	121,5	85,29	141,1	85,29	[80](экспер.)
<b>85,26</b>	<b>121,28</b>	<b>85,26</b>	<b>121,1</b>	<b>85,26</b>	<b>145,013</b>	<b>85,26</b>	<b>Модель</b> (расчетные данные)

Таблица 2.4

Экспериментальные и рассчитанные значения коэффициент Пуассона.

Ориентация (100)			Ориентация (111)	Ориентация (110)			Источник
[001]	[011]	[010]	[111],[1 $\bar{1}$ 0], [ $\bar{1}$ $\bar{1}$ 2]	[001]	[1 $\bar{1}$ 1]	[1 $\bar{1}$ 0]	
0,312	0,021	0,312	0,303	0,312	0,189	0,312	[78](экспер.)
0,32	0,024	0,32	0,31	0,32	0,194	0,32	[79](экспер.)
0,32	0,022	0,32	0,31	0,32	0,19	0,32	[80](экспер.)
<b>0,312</b>	<b>0,02</b>	<b>0,312</b>	<b>0,312</b>	<b>0,312</b>	<b>0,2</b>	<b>0,312</b>	<b>Модель</b> (расчетные данные)

Отклонения расчетных данных от экспериментальных значений приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Отклонения расчетных данных от экспериментальных значений для модуля Юнга и коэффициента Пуассона, %.

Параметр	Ориентация (100)			Ориентация (111)	Ориентация (110)		
	[001]	[011]	[010]	[111],[1 $\bar{1}$ 0], [ $\bar{1}$ $\bar{1}$ 2]	[001]	[1 $\bar{1}$ 1]	[1 $\bar{1}$ 0]
Отклонение модуля Юнга	4,7	2,6	4,7	0,4	4,7	2,5	4,7
Отклонение коэффициента Пуассона	1,57	1,4	1,57	1,4	1,57	4,71	1,57

Сопоставление рассчитанных значений с полученными экспериментальными данными для углов кратных  $45^0$  показывает хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными данными. Отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 4,7 %.

## 2.2. Разработка математической модели влияния остаточных напряжений на механические свойства подложек GaAs.

Известно, что механические свойства арсенида галлия относятся к различным фундаментальным явлениям твердотельной физики, таким как межатомные потенциалы, фононные спектры и так далее. Они также связаны с теплоемкостью, тепловым расширением и температурой Дебая. Знание механических свойств GaAs имеет большое значение для многих практических применений, связанных с его механическими свойствами: изгиб, термоупругие напряжения, внутренние деформации, и хрупкость [81].

Несмотря на высокие технологические достижения в производстве

GaAs, поведение GaAs под действием остаточных напряжений до сих пор не достаточно изучено. Многие фундаментальные проблемы для GaAs находящегося под действием остаточных напряжений, например, упругие свойства, электронная структура и механизмы связывания, по-прежнему остаются нерешенными. В то же время вопрос как рассчитать влияние остаточного напряжения и внутреннего давления, которое они вызывают на упругие константы, требует особого рассмотрения. Данная проблема рассматривалась в работах [82-84]. Использование компьютерного моделирования сделало возможным вычисление, с большой точностью электронных и структурных свойств твердых тел, из первых принципов. Это позволило объяснить и предсказать свойства твердых тел в условиях, которые являются недоступными для эксперимента [85].

В тех случаях, когда требуется прогнозировать механические параметры подложек GaAs необходимо использовать новые подходы атомарного описания, основанные на теории динамической решетки.

Как показано в работе [86], остаточные напряжения создают искажение кристаллической решетки и, следовательно, давление в микрообъеме подложки. Рассмотрим влияние этого давления на механические свойства GaAs.

Для моделирования механических свойств под давлением  $P$ , мы использовали метод сохранения деформации в объеме, так – как этот метод позволяет рассчитать упругие константы, используя коэффициенты напряженно-деформированного состояния, которые используются для расчета скорости упругих волн в твердом теле. В соответствии с [87] упругие константы  $c_{ijkl}$  через конечные значения переменных деформации определяется как:

$$c_{ijkl} = \left( \frac{\partial \sigma_{ij}(x)}{\partial e_{kl}} \right)_{\mathbf{X}} \quad (2.36)$$

где  $\sigma_{ij}$  и  $e_{kl}$  приложенное напряжение и тензор деформации Эйлера,  $\mathbf{X}$

и  $x$  являются координатами и до и после деформации. Для изотропного напряжения можно использовать [88]:

$$c_{ijkl} = F_{ijkl} + \frac{P}{2} \left( 2\delta_{ij}\delta_{kl} - \delta_{il}\delta_{jk} - \delta_{ik}\delta_{jl} \right) \quad (2.37)$$

$$F_{ijkl} = \left( \frac{1}{V(x)} \frac{\partial^2 E(x)}{\partial e_{ij} \partial e_{kl}} \right)_{\mathbf{X}} \quad (2.38)$$

где  $c_{ijkl}$  обозначает производные второго порядка по отношению к бесконечно малой деформации (деформации Эйлера). Как было показано выше тензор четвертого ранга  $c$  имеет в общем 21 независимый компонент и с учетом симметрии кристалла цинковой обманки это число снижается до 3 ( $c_{11}, c_{12}, c_{44}$ ). Значение  $\delta$  для расчета общей энергии  $E$  было принято равным  $\pm 0,0018$ .

По известным значениям упругих постоянных, можно получить значение температуры Дебая ( $\Theta_D$ ) при которой возбуждаются все моды колебаний в арсениде галлия. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к появлению новых мод колебаний, а лишь ведёт к увеличению амплитуд уже существующих, то есть средняя энергия колебаний с ростом температуры растёт. Температура Дебая может быть оценена по средней скорости звука  $V_m$ , значение которого получено в [89].

$$\Theta = \frac{\hbar}{k} \left( \frac{3n}{4\pi} \left( \frac{N_A \rho}{M} \right) \right)^{\frac{1}{3}} V_m, \quad (2.39)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана,  $N_A$  – число Авогадро,  $n$  – число атомов в молекуле,  $M$  – молекулярный вес,  $\rho$  – плотность,  $V_m$  – средняя скорость звука.

$$V_m = \left( \frac{1}{3} \left( \frac{2}{C_s^3} + \frac{1}{C_L^3} \right) \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (2.40)$$

где  $C_s$  и  $C_L$  являются поперечной и продольной скоростью звука соответственно.

Для арсенида галлия модуль объёмного сжатия  $K$  и модуль сдвига  $G$  определяются из следующих выражений:

$$K = \frac{c_{11} + 2c_{12}}{3} \quad (2.41)$$

$$G = \frac{(G_V + G_R)}{2} \quad (2.42)$$

где  $G_V$  – модуль упругости, полученный в соответствии с теорией Войгта,

$$G_V = \frac{(2C + 3c_{44})}{5}, \quad (2.43)$$

и  $G_R$  – модуль упругости, полученный в соответствии с теорией Рейса.

$$G_R = \frac{1}{15 \left( \frac{6}{C} + \frac{9}{c_{44}} \right)}, \quad (2.44)$$

а скорость звука определяется как:

$$C = \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \quad (2.45)$$

Значение поперечной и продольной скорости звука  $C_S$  и  $C_L$  получаются из уравнения Навье в соответствии с [90]:

$$C_S = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2.46)$$

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.47)$$

Как было сказано выше, для расчета модели мы использовали программу CASTEP, со следующими принятыми начальными условиями:

Pseudo atomic calculation performed for Ga 3d10 4s2 4p1

Converged in 31 iterations to a total energy of -2050.9297 eV

Pseudo atomic calculation performed for As 4s2 4p3

Converged in 17 iterations to a total energy of -168.5992 eV

Calculation parallelised over 1 nodes.

K-points are distributed over 1 groups, each containing 1 nodes.

\*\*\*\*\*

-----  
Unit Cell  
-----

Real Lattice(A)			Reciprocal Lattice(1/A)		
5.5315076	0.0000000	0.0000000	1.1358902	0.0000000	0.0000000
0.0000000	5.5315076	0.0000000	0.0000000	1.1358902	0.0000000
0.0000000	0.0000000	5.5315076	0.0000000	0.0000000	1.1358902

Lattice parameters(A)

a = 5.531508

b = 5.531508

c = 5.531508

Cell Angles

alpha = 90.000000

beta = 90.000000

gamma = 90.000000

Current cell volume = 169.250724 A\*\*3

Cell Contents

Total number of ions in cell = 8

Total number of species in cell = 2

Max number of any one species = 4

Результаты моделирования приведены на рис. 2.12.

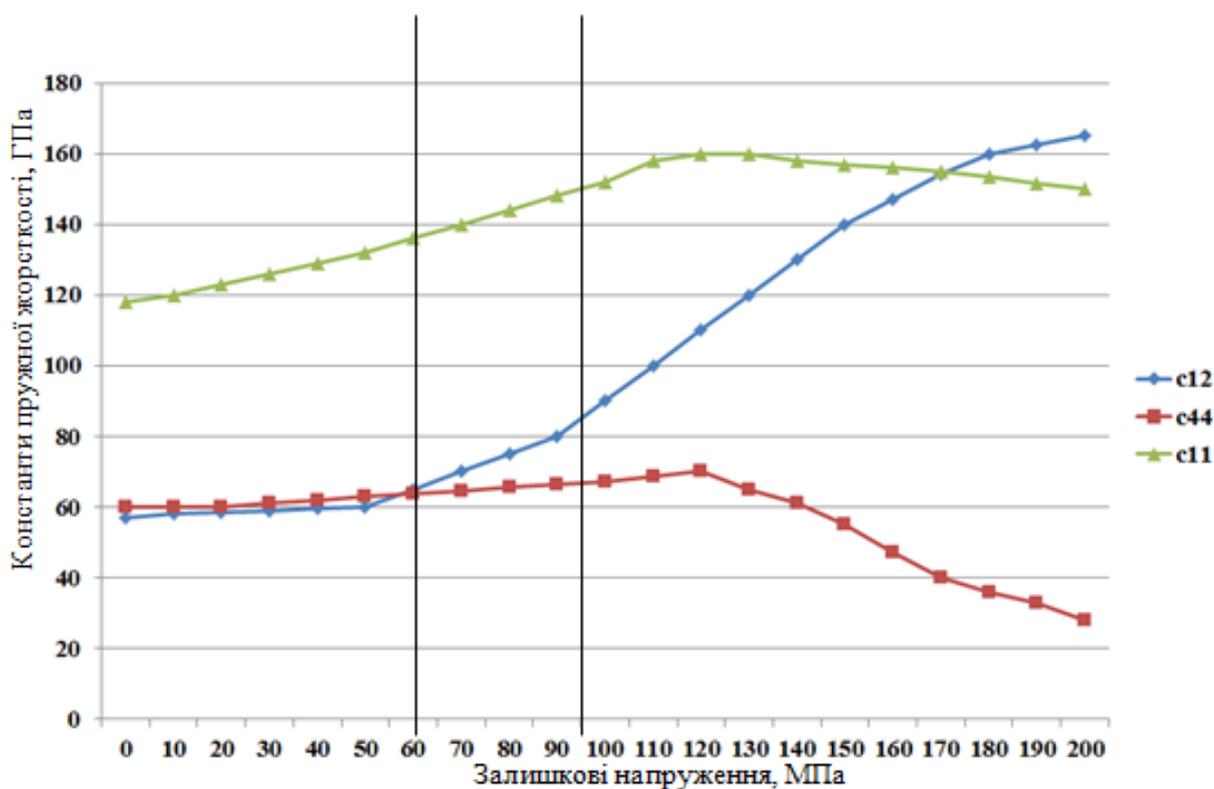


Рисунок 2.12 – Рассчитанные значения констант упругой жесткости  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  в зависимости от величины остаточных напряжений.

Результаты моделирования показывают, что увеличение уровня

остаточных напряжений приводит к увеличению значения упругих констант, при этом наибольшее приращение наблюдается у константы  $c_{12}$ .

Для оценки устойчивости подложек к механическому разрушению в арсениде галлия под действием остаточных напряжений можно применить условие, определенное в [91]:

$$c_{44} > 0, \quad c_{11} > |c_{12}|, \quad c_{11} - 2c_{12} > 0 \quad (2.48)$$

Можно видеть, что в диапазоне остаточных напряжений до 60 МПа подложки арсенида галлия остаются механически стабильными. Начиная с 90 МПа, происходит увеличение константы  $c_{12}$  и при значении остаточного напряжения равным 100 МПа происходит нарушение условия (2.48) что приводит к потере механической устойчивости.

Рассмотрим влияние упругих констант на отклонение от плоскостности подложек GaAs.

Для построения требуемой модели можно использовать теорию упругости алмазоподобных решёток типа цинковой обманки кристаллов, которая основана на классической модели близко расположенных атомов симметричными и несимметричными константами взаимодействия. Эта модель хорошо соглашается с экспериментальными данными для длинных волн, но дает большие отклонения от экспериментальных данных для коротких волн. Причина этого эффекта состоит в том, что число констант взаимодействия является недостаточным, чтобы точно описать упругость материала. В работе [92] модель была модифицирована путем увеличения констант взаимодействия до 25-ого самого близкого соседа. Однако с увеличением констант взаимодействия, сложность модели экспоненциально увеличивается.

Для решения этой задачи мы расширили приложение сплошной среды, которое основано на теории динамики кристаллической решетки применяемой для определения упругости трехмерных материалов GaAs. В этом случае упругие постоянные второго порядка GaAs могут быть выра-

жены как функция констант взаимодействия. Для получения значений этих констант необходимо использовать фоновые дисперсионные соотношения.

Структурно последовательность вычисления механических свойств с использованием предлагаемой модели показано на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Структурная схема моделирования влияния упругих констант на механические свойства GaAs.

Суть теории дополненной сплошной среды состоит в том, чтобы используя положения механики сплошной среды, определять свойства материала из атомарного описания локальной окружающей среды. При таком подходе полупроводниковые структуры описываются в двух уровнях: 1 – уровень сплошной среды; 2 – атомарный уровень. На уровне сплошной среды полупроводниковая структура представлена рядом дискретных вершин, и деформация полупроводника определена законами механики

сплошной среды. На атомарном уровне арсенид галлия содержит атомы, которые связаны ковалентными связями и каждый атом четырехгранным образом связан с четырьмя соседними атомами, при этом перемещения атомов определены законами динамики кристаллической решетки.

Классический подход к расчету упругости арсенида галлия с использованием динамики кристаллической решетки основывается на учете взаимодействия самого близкого соседа центральной константы взаимодействия  $\alpha'$  и асимметричной константы взаимодействия  $\beta'$ . Согласно предложенному методу, сначала вычисляется сила на атоме с точки зрения констант взаимодействия и атомных смещений. В уравнениях движения атома с точки зрения градиентов компонент напряжения сравниваются с уравнениями макроскопического движения и определяются отношения между константами взаимодействия и константами упругости. Модель Китинга широко используется для изучения упругих и статических свойств ковалентных полупроводников [93]. Вычисление фононной дисперсии с этой моделью дает хорошее описание для продольной оптической (LO (longitudinal optical)), поперечной оптической (TO (transverse optical)) и продольной акустической (LA (longitudinal acoustical)) ветви, но не применимо для поперечной акустической (TA (transverse acoustical)) модели дисперсии. Следовательно, необходимо учитывать дальние взаимодействия с соседними атомами. Существующая модель Китинга использует потенциальную энергию, которая включает только растягивающие и сгибающие взаимодействия. Мы дополнили модель таким образом, чтобы она включала четыре типа взаимодействия. С учетом этих четырех типов взаимодействия потенциальная энергия может быть выражена как:

$$U = \frac{1}{2} \sum_i \alpha \Delta r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} \beta \Delta \theta_{ij} \Delta \theta_{ij} + \frac{1}{2} \sum_{ij} \tau \Delta r_i \Delta r'_j + \frac{1}{2} \sum_{ijn} k \Delta \theta_{ij} \Delta \theta'_{jn} \quad (2.48)$$

Четыре слагаемых в выражении описывают два первоначальных взаимодействия Китинга, ближние компланарные углы и взаимодействие близких связей. Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $k$  представляют собой соответствующие

константы силового взаимодействия:  $\alpha$  – отображает взаимодействие между двумя атомами,  $\beta$  и  $\tau$  – взаимодействие между тремя атомами,  $\kappa$  – взаимодействие между четырьмя атомами.

Структурно силы взаимодействия показаны на рис. 2.14.

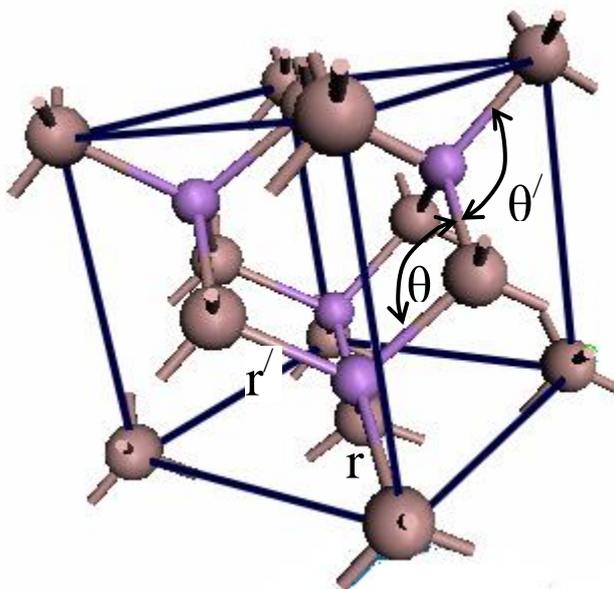


Рисунок 2.14 – Силы взаимодействия в атомной решетке арсенида галлия. Двухатомное взаимодействие  $\alpha\Delta r\Delta r$ , трехатомное –  $\beta\Delta\theta\Delta\theta$  и  $\tau\Delta r\Delta r'$ , и четырехатомное -  $\kappa\Delta\theta\Delta\theta'$ .

Предложенная модель в нашем случае используется в качестве интерактивного потенциала, который включает четыре константы взаимодействия, то есть  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  и  $\kappa$ . Модель Китинга включает два основных условия для энергии деформации, а именно: ближайший сосед связанный двухатомной силой  $\alpha$  и один трехатомной силой  $\beta$ . Соответственно  $\alpha$  описывает связи растяжения и сжатия, в то время как  $\beta$  характеризует сгибающее взаимодействие. Такой подход описывает оптические фононы довольно хорошо, но дает очень неполное описание фононной дисперсии ТА. Следовательно, необходимо учитывать дальнейшие взаимодействия с соседними атомами. Усовершенствуем модель Китинга таким образом, что  $\tau$  будет описывать взаимодействие связь-связь, а  $\kappa$  будет характеризовать

взаимодействие угол-угол, которое проявляется между двумя самыми близкими компланарными углами, разделяющими одну общую связь с различными вершинами. Таким образом, параметр  $\kappa$  характеризует взаимодействия дальнего порядка, которые включают до пяти атомов ближайшего соседа.

В соответствии с положениями механики упругих тел макроскопическая плотность потенциальной энергии деформации второго порядка для кубических кристаллов может быть выражена функцией упругих постоянных второго порядка:

$$\begin{aligned} \frac{U_0}{V} = & \left( \frac{c_{11}}{2} \right) (e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2) + c_{12} (e_{xx}e_{yy} + e_{xx}e_{zz} + e_{yy}e_{zz}) + \\ & + \left( \frac{c_{44}}{2} \right) (e_{xy}^2 + e_{xz}^2 + e_{yz}^2) \end{aligned} \quad (2.50)$$

где  $U_0$  - макроскопическая потенциальная энергия деформации, и  $V$  объем кристалла.

Подставив статическую потенциальную энергию в выражение (2.49) с макроскопической плотностью энергии в выражение (2.50) получаем [94]:

$$c_{11} = \frac{1}{2a} \left( 2\kappa + 2\tau + \frac{1}{3}\alpha + \frac{2}{3}\beta + 0.1255X \right) \quad (2.51)$$

$$c_{12} = \frac{1}{2a} \left( \kappa + \tau + \frac{1}{3}\alpha - \frac{1}{3}\beta - 1.324X \right) \quad (2.52)$$

$$c_{44} = \frac{1}{2a} \left( \kappa + \tau + \frac{1}{3}\alpha + \frac{1}{6}\beta - 0.063X \right) - \frac{M^2}{N} \quad (2.53)$$

где  $a$  – постоянная кристаллической решетки, для арсенида галлия равная 5,6533Å,

$$M = 2.519 \frac{z^2 e^2}{2a^5} - \frac{\alpha - \beta}{3a^2}, \quad (2.54)$$

$$N = \frac{\frac{4}{3}(\alpha + 2\beta) - \frac{4\pi z^2 e^2}{6a^3}}{2a^3}, \quad (2.55)$$

$$X = \frac{z^2 e^2}{a^3}. \quad (2.56)$$

где  $z$  – число электронов (для арсенида галлия = 4),  $e$  – заряд электрона =  $-1,602176565(35) \cdot 10^{-19}$  Кл.

Чтобы найти силовые константы взаимодействия арсенида галлия мы использовали теорию функционала плотности (DFP) для вычисления фоновых дисперсионных соотношений.

\*\*\*\*\*

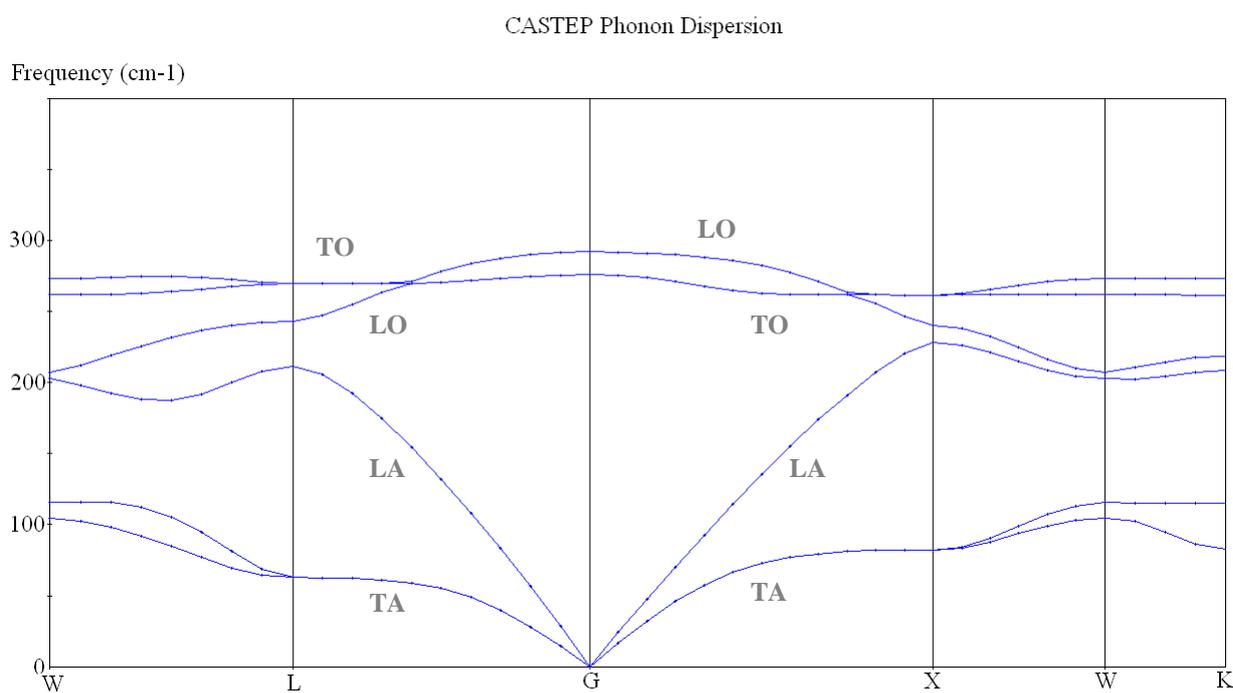


Рисунок 2.15 – Рассчитанная фоновая дисперсия в GaAs.

Для расчета фоновой дисперсии (рис.2.15) мы использовали программу CASTEP со следующими начальными условиями:

Pseudo atomic calculation performed for Ga  $3d^{10} 4s^2 4p^1$   
 Converged in 24 iterations to a total energy of -1700.6780 eV

Pseudo atomic calculation performed for As  $4s^2 4p^3$   
 Converged in 18 iterations to a total energy of -167.7234 eV  
 Calculation parallelised over 1 nodes.  
 K-points are distributed over 1 groups, each containing 1 nodes.

Аналитические выражения для фононных частот получены путем выделения аналитической ветви диагонализующей динамической матрицы в предположении высокой симметрии k точек. Расчетные значения для G и X точек приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6.

Рассчитанные значения фононных частот GaAs

Частота(см <sup>-1</sup> )	Аналитическое выражение.	Рассчитанные значения (см <sup>-1</sup> ).	Экспериментальные данные [95] (см <sup>-1</sup> ).
$\omega_{LO}(G)$	$\sqrt{\frac{1}{m} \left( \frac{4}{3}(\alpha + 2\beta) + \frac{4\pi}{3} X \right)}$	297,78	279,35
$\omega_{TO}(G)$	$\sqrt{\frac{1}{m} \left( \frac{4}{3}(\alpha + 2\beta) - \frac{2\pi}{3} X \right)}$	262,13	246,28
$\omega_{LO}(X)$	$\sqrt{\frac{1}{m_1} \left( \frac{4}{3}(\alpha + 2\beta) + 8\kappa + 2.165X \right)}$	271,67	285,39
$\omega_{LA}(X)$	$\sqrt{\frac{1}{m_2} \left( \frac{4}{3}(\alpha + 2\beta) + 8\tau + 2.165X \right)}$	266,34	247,38

Комбинируя аналитические выражения, приведенные в таблице 2.6 с k точками высокой симметрии и соответствующими фононными частотами (см. рис. 2.15), можно рассчитать параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ , и  $\kappa$ . Подставляя  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ , и  $\kappa$  в уравнение (2.50 – 2.52), можно рассчитать значение упругих констант второго порядка.

В таблице 2.7 приведены результаты расчета четырех констант силового взаимодействия.

Таблица 2.7

Рассчитанные значения констант силового взаимодействия.

$\alpha$	$\beta$	$\kappa$	$\tau$	$z^2 e^2 / a^3$
N/m	N/m	N/m	N/m	N/m
88.346	15.509	7.275	6.194	3.308

Полученные значения упругих констант позволяют рассчитать модуль Юнга (E) для различных кристаллографических направлений используя следующие выражения:

$$E_{[100]} = (c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12}) / (c_{11} + c_{12}) \quad (2.57)$$

$$E_{[110]} = 2 / (c_{11} / (c_{11}^2 + c_{11}c_{12} - 2c_{12}^2) + 1 / (2c_{44})) \quad (2.58)$$

$$E_{[111]} = 3 / \left( (c_{11} - c_{12}) / (c_{11}^2 + c_{11}c_{12} - 2c_{12}^2) + 1 / (c_{44}) \right) \quad (2.59)$$

Рассчитанные значения упругих констант и модуля Юнга приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Рассчитанные значения упругих констант.

	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{44}$	$E_{[100]}$	$E_{[110]}$	$E_{[111]}$
	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа
Рассчитанные значения	111,92	46,59	59,71	84,53	119,57	138,73
Экспериментальные данные [96]	118,1	53,2	59,2	85,3	121,3	131,3

Полученная нами модель позволяет рассчитать влияние остаточных напряжений на значение модуля Юнга для различных кристаллографиче-

ских ориентаций, которая приведена на рис.2.16.

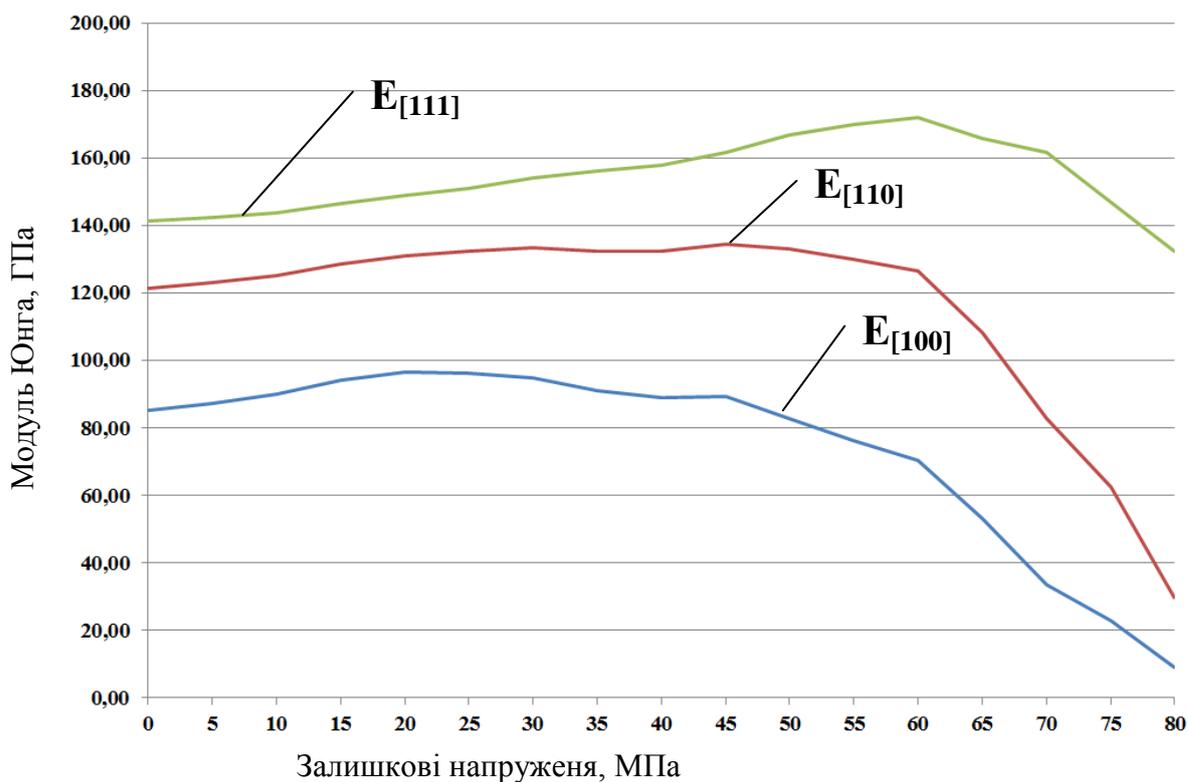


Рисунок 2.16 – Результаты моделирования влияния остаточных напряжений в подложке арсенида галлия на модуль Юнга.

Можно видеть, что начиная с 30 МПа модуль Юнга с увеличением значения остаточных напряжений, начинает уменьшаться, что свидетельствует об уменьшении способности подложки сопротивляться растяжению или сжатию при упругой деформации.

### 2.3. Разработка математической модели влияния кристаллографической ориентации подложек GaAs на плотность дислокаций.

Дислокации в полупроводниках оказывают большое влияние на характеристики конечных полупроводниковых приборов. Наличие дислокаций в подложках значительно сокращает срок службы приборов, ухудшает

рабочие характеристики и увеличивает коэффициент брака. Среди основных полупроводников, применяющихся в электронной промышленности, таких как кремний, германий и арсенид галлия, последний обладает самой высокой плотностью дислокаций, которая доходит до  $10^6 \text{ см}^{-2}$ .

Экспериментальные методы исследования дислокаций позволяют обнаружить уже сформированную плотность. Решения задачи формирования, размножения и движения дислокаций возможно только при использовании подходов математического моделирования.

Не смотря на то, что вопросу разработки моделей описывающих процессы возникновения дислокаций в полупроводниковых материалах уделяется достаточно большое внимание, до настоящего времени не полностью решен вопрос, описания влияния анизотропии арсенида галлия на плотность и геометрию дислокаций.

Как известно, дислокации формируются в слитке в процессе его выращивания вследствие появления термоупругих напряжений. Поэтому для исследования дислокаций в подложках GaAs рассмотрим механизм формирования дислокаций в слитках. Впервые геометрия плотности дислокаций в выращиваемом слитке была предсказана Джордано [97]. В основании предложенной модели использовался механизм приведенного критического касательного напряжения, где плотность дислокаций предполагалась пропорциональной разности между приведенным критическим касательным напряжением и термоупругим напряжением в слитке. Эта модель была привлекательной благодаря своей простоте и способности качественно оценить закономерности распространения дислокаций в слитке, даже несмотря на то, что она не могла быть использована для количественного определения отношений между параметрами процесса роста и плотностью дислокаций в выращенных слитках. Основной решенной задачей этой модели стало то, что стало возможным предсказать характер дислокаций, если определены термоупругие напряжения в слитке.

На основании предложенной Джордано модели, были разработаны

модели для слитков, выращиваемых по методу Чохральского применительно к LEC процессу для арсенида галлия [98 ÷ 101]. В тоже время на основании [102] можно утверждать, что образование дислокаций в слитке во время роста не может быть напрямую связано с постоянной величиной, зависящей от температуры и приведенного критического касательного напряжения. Поэтому, необходима разработка математической модели, которая принимает во внимание перемещение и размножение дислокаций во время пластической деформации.

С точки зрения динамики формирования дислокаций макроскопическая пластическая деформация может быть описана микроскопическим дислокационным движением и формированием дислокаций. Макроскопическая пластическая деформация, вызванная движением дислокаций, может тогда использоваться для моделирования дислокационного движения и размножения в каждой системе скольжений слитка. Такая модель, которая связывает коэффициент пластической деформации и коэффициент размножения дислокаций с температурой, применительно к напряжению и плотности дислокаций в кристаллах со структурой алмаза или структурой цинковой обманки (GaAs), была предложена Хаазеном и Александером [103]. Этой моделью может быть описано размножение дислокаций, вызванное напряжениями, генерируемыми во время процесса роста слитка. Экспериментальное подтверждение данной модели было сделано в работе [104].

Не смотря на то, что предложенные модели являются осесимметричными, они не полностью описывают реальную геометрию расположения дислокаций в арсениде галлия. Как известно, дислокации перемещаются и размножаются по плоскостям скольжений кристаллических плоскостей, и как было установлено в работе [105] плотность дислокации в пластине GaAs (001) обладает четырехкратной симметрией. Таким образом, модель размножения дислокаций должна учитывать кристаллографию арсенида галлия и учитывать четырехкратную симметрию плотности дислокаций.

В работе [106] показано, что перемещение дислокаций в арсениде галлия определяется пластической деформацией. Модель размножения дислокаций в алмазной кубической структуре основана на концепции эффективного напряжения  $\tau_{\text{eff}}$ , которое является необходимым требованием для преодоления дислокацией внутреннего сопротивления кристаллической решетки с заданной скоростью,

$$\tau_{\text{eff}} = \tau_a - \tau_i, \quad (2.60)$$

где  $\tau_a$  – приложенное напряжение,  $\tau_i$  – напряжение, необходимое для преодоления силы взаимодействия между движущимися дислокациями. В свою очередь значение  $\tau_i$  определяется как:

$$\tau_i = Gb(\sqrt{N} / \beta) = D\sqrt{N}, \quad (2.61)$$

где  $G$  - модуль сдвига,  $b$  - величина вектора Бюргера,  $N$  - плотность двигающихся дислокаций,  $\beta$  - параметр, характеризующий взаимодействие между дислокациями.

$D$  - параметр, характеризующий соотношение между  $N$  и  $\tau_i$  (коэффициент механического упрочнения) и который определяется как:

$$D = Gb / \beta.$$

Скорость перемещения дислокаций в подложке находящейся под деформацией можно найти по следующему выражению:

$$V = V_0 \langle \tau_a - D\sqrt{N} \rangle^m \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \quad (2.62)$$

где  $Q$  - потенциал Пайерлса,  $k$  – постоянная Больцмана,  $V_0$  - предэкспоненциальный коэффициент,  $T$  - абсолютная температура,  $m$  – константа материала, выражение внутри скобок  $\langle x \rangle$  определяется как  $\langle x \rangle = x$  если  $x \geq 0$  и  $\langle x \rangle = 0$  если  $x < 0$ .

Дислокации размножаются во время движения. Считается, что уве-

личение путидвигающихся дислокаций пропорционально удельной площади, которую занимает дислокация, а затем плотность дислокации возрастает в соответствии с выражением:

$$dN = K\tau_{eff}^{\lambda} NVdt = NKV_0 \langle \tau_a - D\sqrt{N} \rangle^{m+\lambda} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2.63)$$

где  $K$  и  $\lambda$  - материальные константы.

Как показано в работе [101] в арсениде галлия  $60^\circ$  винтовые дислокации имеют более высокую подвижность. Следовательно, можно утверждать, что коэффициент пластической деформации кристалла влияет на перемещение винтовых дислокаций. Таким образом, скорость перемещения дислокаций в подложке ( $V$ ) в уравнении (2.62) можно принять равной скорости винтовых дислокаций. Тогда скорость пластической деформации сдвига в соответствии с определится как [103]:

$$v^{pl} = NVb = NbV_0 \langle \tau_a - D\sqrt{N} \rangle^m \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2.64)$$

Таблица 2.9.

Параметры материальной модели расчета дислокаций

Параметр	Значение
$T_{melt}, K$	1511
$m$	1,7
$\lambda$	1,0
$b, m$	$4,0 \times 10^{-10}$
$Q, eV$	1,5
$k, eV/K$	$8,638 \times 10^{-5}$
$V_0, m^{2m+1} N^{-m} s^{-1}$	$1,8 \times 10^{-8}$
$K, m/N$	0,007
$D, N/m$	3,13

Пластическая деформация и формирование дислокаций отсутствует при условии, что  $(\tau_a - D\sqrt{N}) \leq 0$ . Общая скорость деформации сдвига в

процессе деформации определяется выражением:

$$v = v^{el} + v^{pl} = \left( \dot{\tau} / G \right) + v^{pl} \quad (2.65)$$

где  $v$  и  $v^{el}$  скорость общего и упругого приведенного напряжения сдвига соответственно,  $\dot{\tau}$  - приведенное напряжение сдвига.

С учетом [108] были выбраны параметры материальной модели (2.65) приведенные в табл. 2.9.

Для моделирования размножения дислокаций с учетом кристаллографического направления и плоскостей скольжения можно применить тепловой расчет напряжений, возникающих в слитке в процессе выращивания. В этом случае удобно использовать декартову систему координат, в которой декартовы оси совпадают с главными кристаллографическими направлениями, а в частности ось  $z$  совпадает с направлением [001],  $x$  совпадает с направлением [100] и ось  $y$  совпадает с направлением [010]. Кроме того модель должна предполагать что геометрия слитка осесимметричная. Тогда можно вычислить упругие компоненты теплового напряжения  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$ ,  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{rz}$  в цилиндрических координатах в соответствии с двухмерной тепловой моделью упругости и затем преобразовать их к любой плоскости скольжения для моделирования и размножения и геометрии дислокаций.

Моделирование распределения температурного поля в слитке арсенида галлия было выполнено в работе [109], полученные авторами результаты показаны на рисунке 2.17.

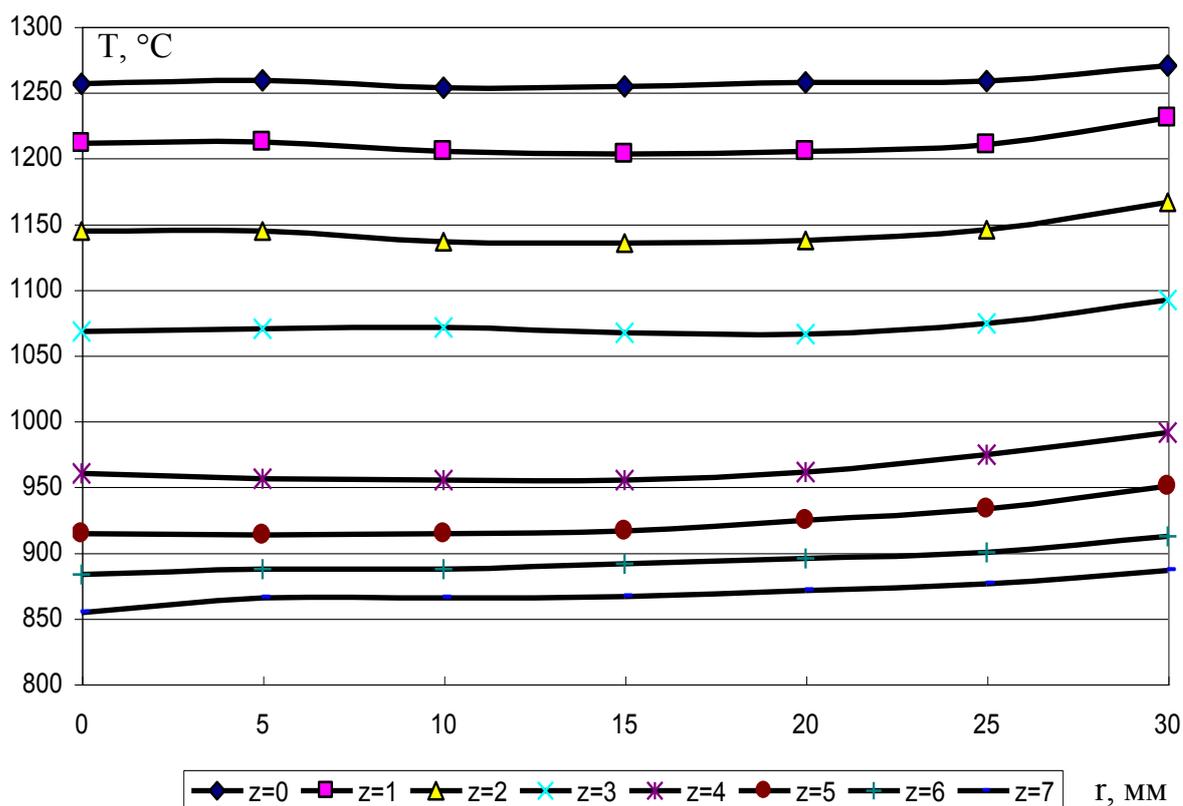


Рисунок 2.17 – Результаты расчетов температурных профилей по радиусу слитка арсенида галлия. По результатам работы [109].

Как известно, GaAs обладает структурой цинковой обманки. Для такой решетки деформация происходит по плотноупакованным октаэдрическим плоскостям (111) в плотноупакованных направлениях [110], как показано на рисунке 2.18.

Для каждой из четырёх различно ориентированных плоскостей (111) имеются три направления [110] с вектором Бюргера полной дислокации  $a/2[110]$ . Таким образом, общее число возможных систем скольжения, которые могут принимать участие в деформации, равно двенадцать (см. табл. 2.10.).

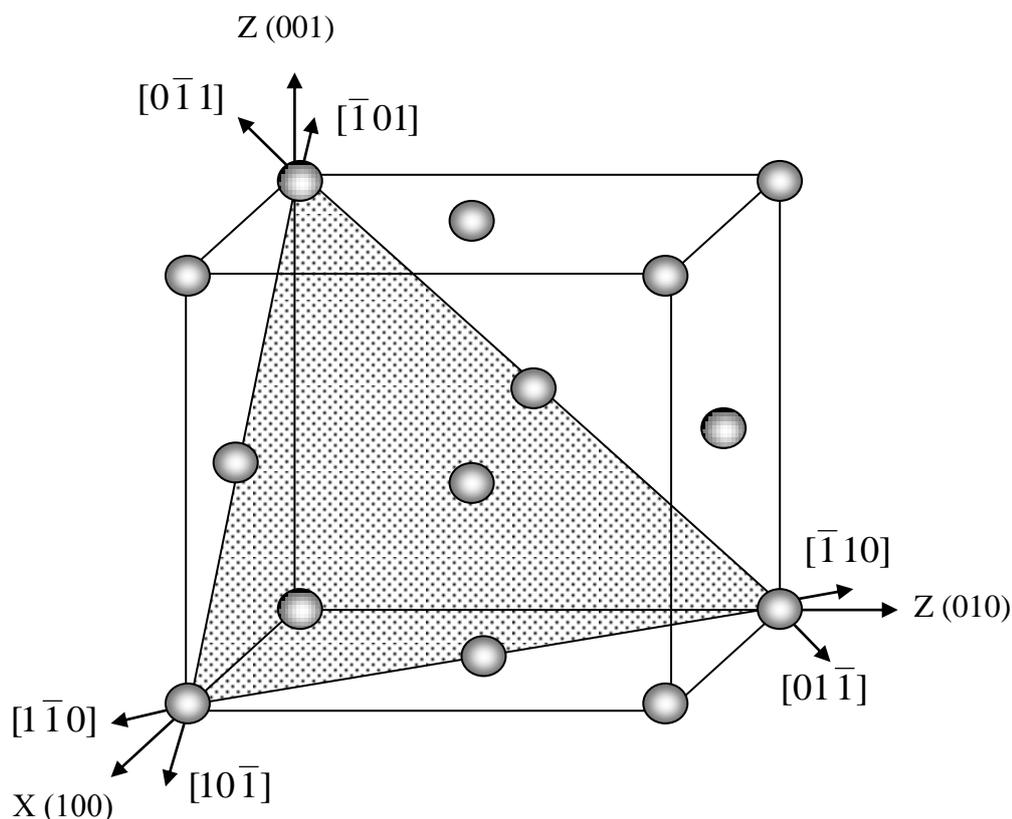


Рисунок 2.18 – Плоскости скольжения в арсениде галлия.

Дислокации скольжения, простирающиеся вдоль направления  $[110]$  являются или чисто винтовыми или смешанными, для которых вектор Бюргера  $\mathbf{b}$  наклонен под углом  $\pm 60^\circ$  к касательному вектору дислокации  $\xi$ . Как известно скорость деформации в GaAs зависит от движения винтовых дислокаций  $[111]$ . Таким образом, для данной модели мы сделали предположение, что дислокации имеют винтовой характер.

Принимая, что оси  $x$ ,  $y$ , и  $z$  параллельны кристаллографическому направлению  $[100]$ ,  $[010]$  и  $[001]$  (см. рис. 2.21), соответственно, компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат преобразуются в глобальной декартовой системе по осям координат  $(x, y, z)$ . Затем преобразуем тензор напряжений в глобальной декартовой системе координат в тензор напряжений  $\boldsymbol{\sigma}$  в локальной прямоугольной системе координат  $(x', y', z')$  для каждой системы скольжения, где вектор Бюргера  $\mathbf{b}$  вдоль оси  $x'$ ,  $y'$  нормальный к плоскости скольжения, ось  $z'$  параллельна вектору  $\mathbf{b}$  и

$\mathbf{n}$ , ( $\mathbf{n}$  -единичный вектор нормали к плоскости скольжения). Компоненты напряжения  $\sigma$  вызывают усилие дислокации, которое может быть определено уравнением Пича-Келлера [111].

Таблица 2.10.

## Плоскости и линии скольжения в арсениде галлия

№	Плоскость	Направление
1	(111)	$[\bar{1}10]$
2	(111)	$[0\bar{1}1]$
3	(111)	$[10\bar{1}]$
4	$(\bar{1}11)$	$[\bar{1}0\bar{1}]$
5	$(\bar{1}11)$	$[0\bar{1}1]$
6	$(\bar{1}11)$	$[110]$
7	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[011]$
8	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[\bar{1}0\bar{1}]$
9	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[1\bar{1}0]$
10	$(1\bar{1}1)$	$[011]$
11	$(1\bar{1}1)$	$[10\bar{1}]$
12	$(1\bar{1}1)$	$[\bar{1}\bar{1}0]$

$$f = (b\sigma) \times \xi \quad (2.66)$$

где  $\sigma$  – тензор напряжения, в соответствии с позицией дислокации,  $\xi$  – проекция единичного вектора, задающего направление линии дислокации.

Тогда силы скольжения можно определить путем проецирования  $f$  на направление в плоскости скольжения, которое нормально к линии дислокации, и, следовательно, можно записать:

$$f_g = f(n \times \xi) \quad (2.67)$$

Разрешенное напряжение сдвига, действующее на дислокацию, мож-

но получить из силы скольжения действующей на дислокации при использовании выражения:

$$\tau = f_g / |b| \quad (2.68)$$

Рассмотрим уравнение ползучести. Как известно, уравнение деформации арсенида галлия, которое включает в себя все виды деформации, записывается в виде:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^t + \dot{\varepsilon}_{ij}^c \quad (2.69)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t$  и  $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$  скорость упругой деформации, скорость тепловой деформации и скорость деформации ползучести, соответственно. Для объемного напряженного состояния, в соответствии с [103,112] можно записать:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = f S_{ij} \quad (2.70)$$

где

$$f = \frac{bk_0 N_m \exp(-Q/kT) (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^p}{2\sqrt{J_2'}} \quad (2.71)$$

и

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\sigma_{kk} \delta_{ij}}{3}, \quad J_2' = \frac{S_{ij} S_{ij}}{3} \quad (2.72)$$

В выражениях (2.71, 2.72)  $\sigma_{ij}$  - является напряжением,  $S_{ij}$  тензор упругой податливости, и  $J_2'$  - второй инвариант тензора упругой податливости.

Скорость движения дислокаций в свою очередь определяется как:

$$\dot{N}_m = Kk_0 N_m e^{-Q/kT} (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^p \times (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m})^\lambda \quad (2.73)$$

где  $N_m$  - плотность дислокации.

Анализ выражений (2.70) и (2.73) показывает, что значение скорости дислокаций  $\dot{N}_m$  и скорость деформации GaAs  $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$  становятся равными 0 если выполняется условие  $\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d \leq 0$ .

Из выражения (2.73) следует, что  $N_m$  равно 0, когда начальная плот-

ность дислокаций  $N_{m0}$  равна 0, следовательно, необходимо принять ненулевое значение  $N_{m0}$ . Таким образом, мы предполагаем, что начальная плотность дислокации в монокристалле, на фронте кристаллизации, является очень маленькой. На основании результатов работы [113], в качестве начальной дислокации полуизолирующего GaAs было выбрано значение  $N_{m0} = 1.0 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ . В выражении (2.73)  $\tau_d$  обозначает напряжение торможения дислокаций, вызванное взаимодействием между примесными атомами и дислокацией. Как следует из выражений (2.70) и (2.73),  $\tau_d$  влияет на движение дислокации, но не влияет на размножение дислокации [114]. В то же время известно, что и на движение дислокации и их размножение оказывает влияние взаимодействие между дислокациями и легирующей примесью. С учетом этого выражение (2.73) можно записать в следующем виде:

$$\dot{N}_m = Kk_0 N_m e^{-Q/kT} (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^{p+\lambda} \quad (2.74)$$

Учет влияния на дислокации кристаллической анизотропии в арсениде галлия требует трехмерного анализа даже для кристаллов осесимметричной формы.

Следовательно, для определения влияния анизотропии на плотность дислокаций необходимо определить радиальное напряжение  $\sigma_r$ , осевое напряжение  $\sigma_z$ , азимутальное напряжение  $\sigma_\theta$  и напряжение сдвига  $\tau_{rz}$ . Значение  $\sqrt{J_2'}$  в выражениях (2.70) и (2.73) за исключением знаменателя в выражении (2.71) необходимо заменить максимальным значением абсолютной проекции напряжения сдвига, вследствие того, что скольжение в кристалле вызывается максимальной проекцией напряжения сдвига.

Как было показано выше, в GaAs, существует 12 систем скольжения приведенных в таблице 2.10. Тогда, полученные значения напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\tau_{rz}$ , можно преобразовать в другую систему поворотом на угол  $\phi$ , используя метод тензорного преобразования рассмотренный выше.

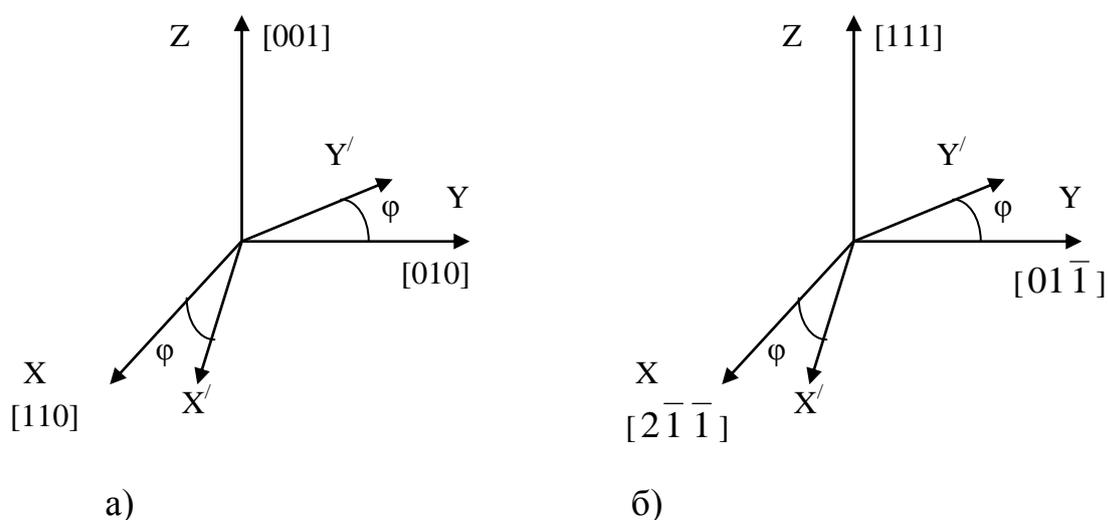


Рисунок 2.19 – Поворот кристаллографических осей для определения влияния анизотропии на плотность дислокаций: а) – ориентация (001), б) – ориентация (111).

Приняв обозначение для напряжения в виде:

$$\bar{\sigma}_r = \sigma_r - \sigma_\varphi, \quad (2.75)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_r - \sigma_\varphi, \quad (2.76)$$

запишем значения проекции касательного напряжения на направленные скольжения для ориентации (001) которые сведены в таблицу 2.11 и для ориентации (111) сведенные в таблицу 2.12.

Для ориентации (001) можно записать значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона при повороте осей координат следующим образом:

$$E = \frac{4}{s_{11} - 2s \cos^2 \theta \sin^2 \theta}, \quad (2.77)$$

$$\nu = -\frac{s_{12} - 2s \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{s_{11} - 2s \cos^2 \theta \sin^2 \theta}, \quad (2.78)$$

Таблица 2.11

## Проекция касательного напряжения для ориентации (001)

№	Плоскость	Направление	Проекция касательного напряжения на направление скольжения
1	(111)	$[\bar{1}10]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}(\bar{\sigma}_r \cos 2\varphi - \sigma_{rz}(\sin \theta - \cos \varphi))$
2	(111)	$[0\bar{1}1]$	$\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi - \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi - \sigma_{rz} \cos \varphi\right)$
3	(111)	$[10\bar{1}]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi - \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi - \sigma_{rz} \sin \varphi\right)$
4	$(\bar{1}11)$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi - \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi - \sigma_{rz} \sin \varphi\right)$
5	$(\bar{1}11)$	$[0\bar{1}1]$	$\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \sin^2 \varphi + \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi - \sigma_{rz} \cos \varphi\right)$
6	$(\bar{1}11)$	$[110]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}(\bar{\sigma}_r \cos 2\varphi - \sigma_{rz}(\sin \varphi + \cos \varphi))$
7	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[011]$	$\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \sin^2 \varphi - \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi - \sigma_{rz} \cos \varphi\right)$
8	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi - \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi - \sigma_{rz} \sin \varphi\right)$
9	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[1\bar{1}0]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}(\bar{\sigma}_r \cos 2\varphi - \sigma_{rz}(\cos \varphi - \sin \varphi))$
10	$(1\bar{1}1)$	$[011]$	$\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \sin^2 \varphi + \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\varphi + \sigma_{rz} \cos \varphi\right)$
11	$(1\bar{1}1)$	$[10\bar{1}]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}\left(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r \cos^2 \theta + \frac{\bar{\sigma}_r}{2} \sin 2\theta - \sigma_{rz} \sin \theta\right)$
12	$(1\bar{1}1)$	$[\bar{1}\bar{1}0]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6}(\bar{\sigma}_r \cos 2\varphi - \sigma_{rz}(\sin \varphi + \cos \varphi))$

Таблица 2.12

## Проекция касательного напряжения для ориентации (111)

№	Плос- кость	Напра- вле- ние	Проекция касательного напряжения на направление скольжения
1	(111)	$[\bar{1}10]$	$\sigma_{rz}(\frac{1}{2} \sin \varphi - \frac{3}{2} \cos \varphi)$
2	(111)	$[0\bar{1}1]$	$-\sigma_{rz} \sin \varphi$
3	(111)	$[10\bar{1}]$	$\sigma_{rz}(\frac{1}{2} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi)$
4	$(\bar{1}11)$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	$\frac{\sqrt{6}}{9} \bar{\sigma}_r (\cos^2 \varphi + \bar{\sigma}_z) - \frac{\sqrt{2}}{6} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi + \sigma_{rz}(\frac{1}{6} \sin \varphi + \frac{7\sqrt{3}}{18} \cos \varphi)$
5	$(\bar{1}11)$	$[0\bar{1}1]$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi - \frac{\bar{\sigma}_r}{3} \sin \varphi$
6	$(\bar{1}11)$	$[110]$	$-\frac{\sqrt{6}}{9} \bar{\sigma}_r (\cos^2 \varphi + \bar{\sigma}_z) - \frac{\sqrt{2}}{6} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi + \sigma_{rz}(\frac{1}{6} \sin \varphi - \frac{7\sqrt{3}}{18} \cos \varphi)$
7	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[011]$	$\frac{\sqrt{6}}{9} \bar{\sigma}_r (\cos^2 \varphi - \bar{\sigma}_z) + \frac{\sqrt{2}}{6} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi + \sigma_{rz}(\frac{2}{3} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{9} \cos \varphi)$
8	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	$\frac{\sqrt{6}}{9} (\bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi + \bar{\sigma}_z) + \frac{\sqrt{6}}{6} \bar{\sigma}_r + \sigma_{rz}(\frac{1}{2} \sin \varphi + \frac{5\sqrt{3}}{18} \cos \varphi)$
9	$(\bar{1}\bar{1}1)$	$[1\bar{1}0]$	$-\frac{\sqrt{6}}{6} \bar{\sigma}_r \cos 2\varphi - \frac{\sqrt{2}}{6} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi + \sigma_{rz}(\frac{1}{6} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{6} \cos \varphi)$
10	$(1\bar{1}1)$	$[011]$	$-\frac{\sqrt{6}}{9} (\bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi - \bar{\sigma}_z) + \frac{\sqrt{2}}{6} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi + \sigma_{rz}(\frac{2}{3} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{9} \cos \varphi)$
11	$(1\bar{1}1)$	$[10\bar{1}]$	$\frac{\sqrt{6}}{6} \bar{\sigma}_r \cos 2\varphi - \frac{\sqrt{2}}{6} \bar{\sigma}_r \sin 2\varphi + \sigma_{rz}(\frac{1}{6} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{6} \cos \varphi)$
12	$(1\bar{1}1)$	$[\bar{1}\bar{1}0]$	$-\frac{\sqrt{6}}{9} (2\bar{\sigma}_r \cos^2 \varphi + \bar{\sigma}_z) + \frac{\sqrt{6}}{6} \bar{\sigma}_r + \sigma_{rz}(\frac{1}{2} \sin \varphi - \frac{5\sqrt{3}}{18} \cos \varphi)$

Для ориентации (111) с учетом инвариантности значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона при повороте осей координат определяется как:

$$E = \frac{4}{2s_{11} - 2s_{12} + s_{44}}, \quad (2.79)$$

$$\nu = -\frac{s_{12} + 5s_{12} - s_{44}/2}{3(s_{11} + s_{12} + s_{44}/2)}, \quad (2.80)$$

где

$$s = s_{11} - s_{12} - \frac{s_{44}}{2}, \quad (2.81)$$

константы упругой податливости  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{44}$ , вычисляются в соответствии с выражениями (2.7а ÷ 2.7в).

Таким образом, определив значения  $E$  и  $\nu$  определим значения  $\sigma$  и, следовательно, можно рассчитать выражение (2.74).

Результаты моделирования плотности дислокаций представлены на рисунках 2.20 – 2.24.

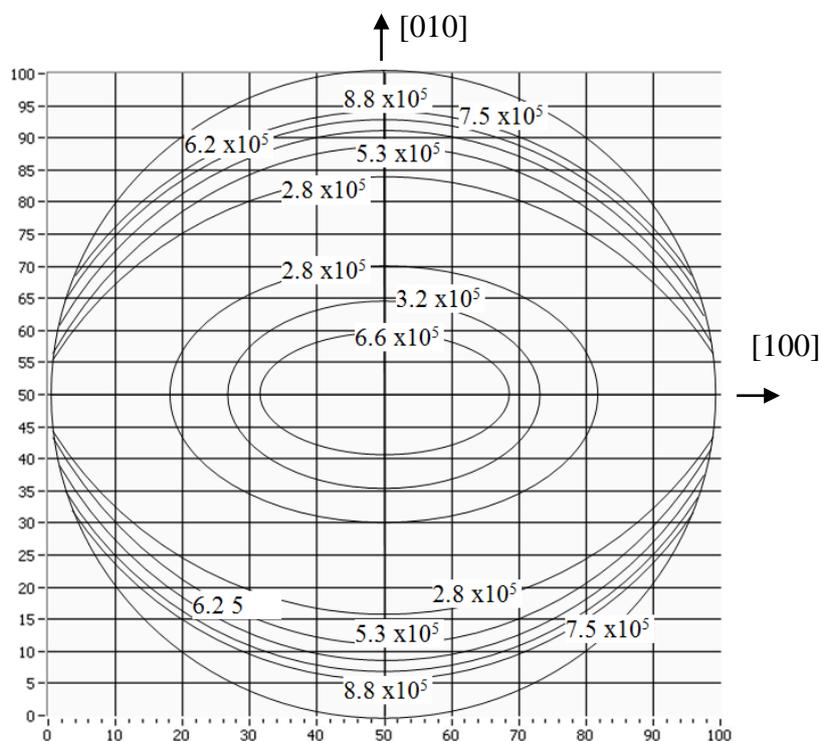


Рисунок 2.20 – Рассчитанная плотность дислокаций ( $\text{см}^{-2}$ ) в пластине ориентации (001) для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[011]$  и  $(1\bar{1}\bar{1})[0\bar{1}1]$ .

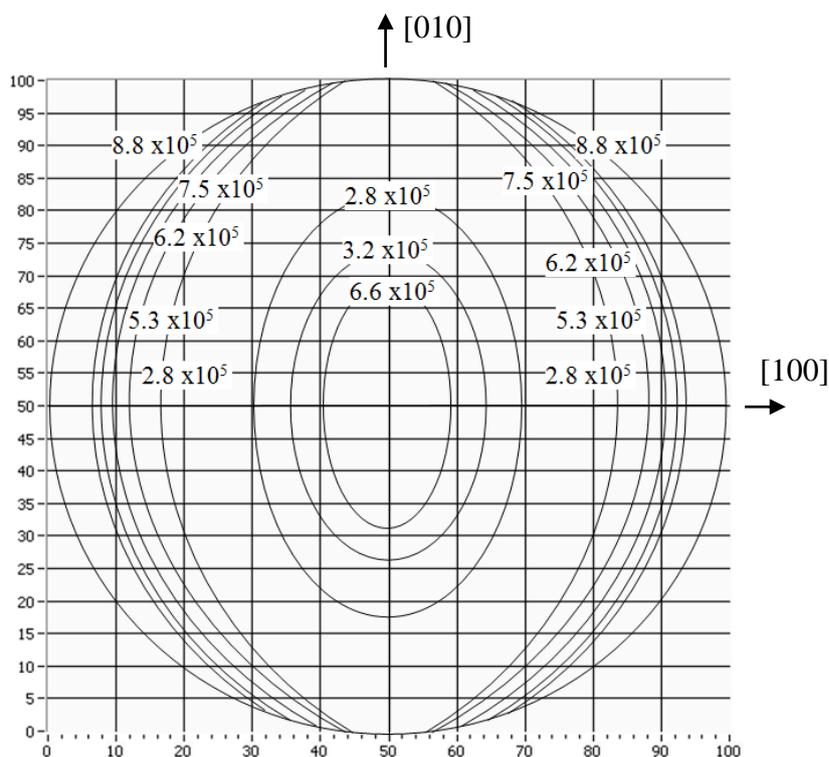


Рисунок 2.21 – Рассчитанная плотность дислокаций ( $\text{см}^{-2}$ ) в пластине ориентации (001) для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[10\bar{1}]$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[101]$ .

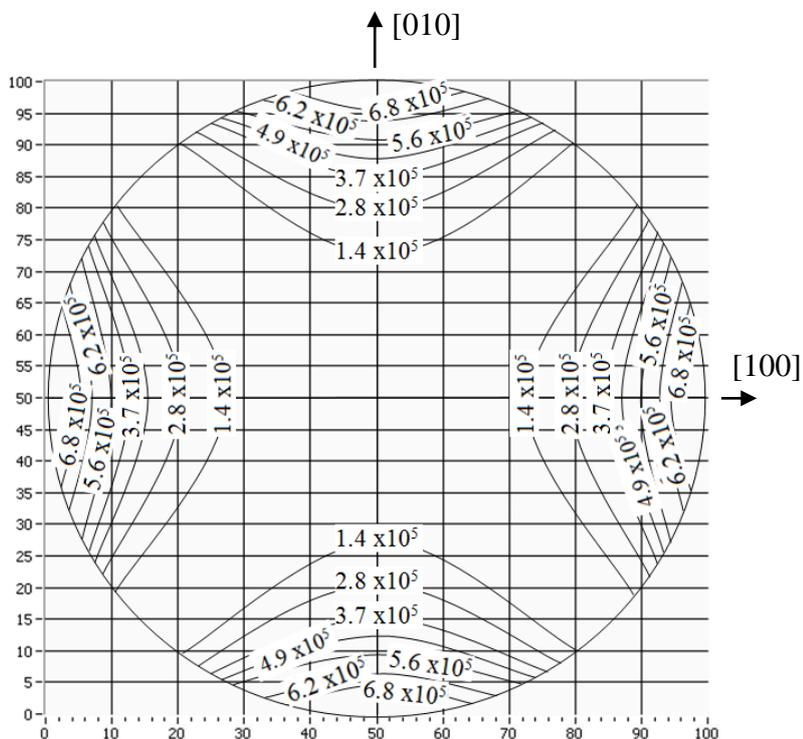


Рисунок 2.22 – Рассчитанная плотность дислокаций ( $\text{см}^{-2}$ ) в пластине ориентации (001) для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[\bar{1}10]$ ,  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[110]$ ,  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[110]$  и  $(111)[\bar{1}10]$ .

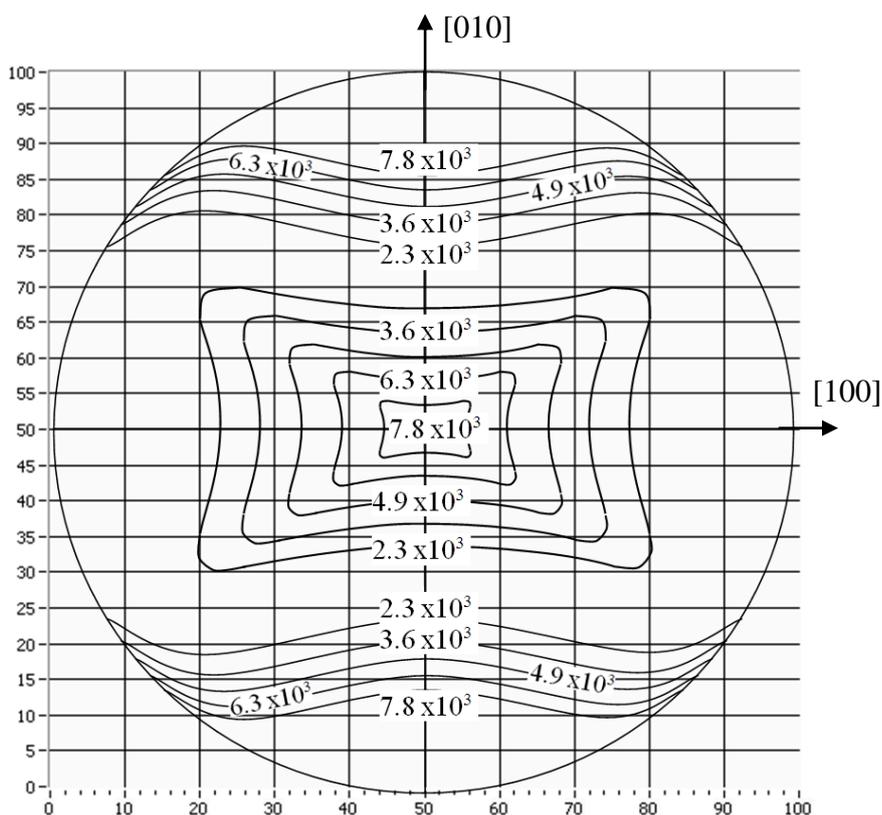


Рисунок 2.23 – Рассчитанная плотность дислокаций ( $\text{см}^{-2}$ ) в пластине ориентации (001) для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}1)[011], (111)[01\bar{1}]$ .

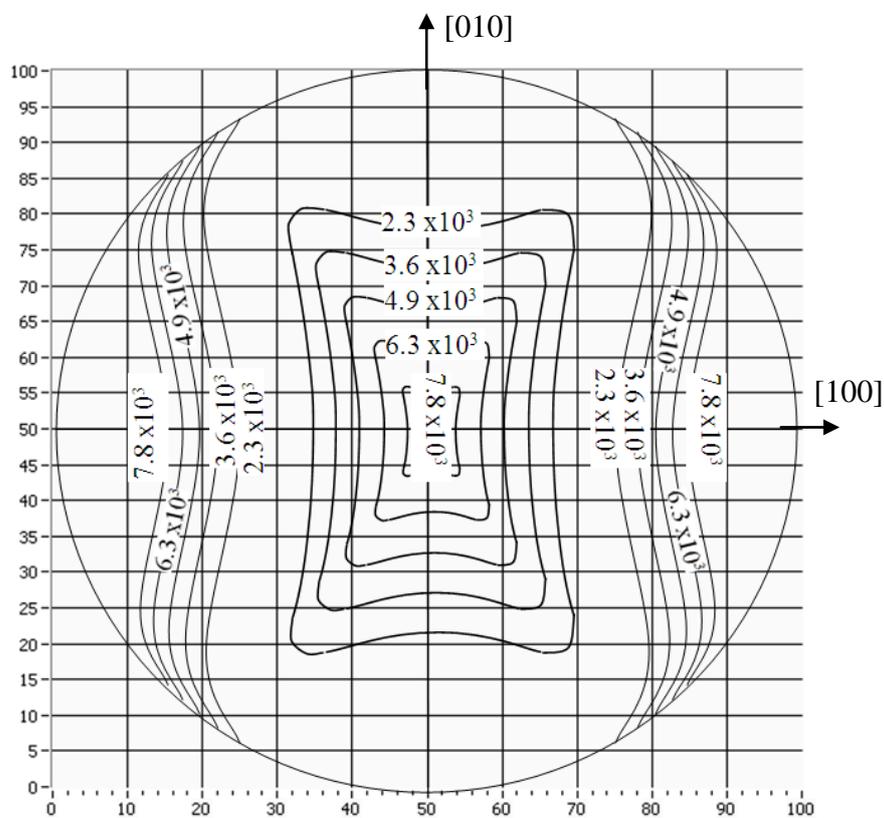


Рисунок 2.24 – Рассчитанная плотность дислокаций ( $\text{см}^{-2}$ ) в пластине ориентации (001) для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}1)[101], (111)[10\bar{1}]$ .

В результате моделирования нами было установлено, что 12 систем скольжения сводятся в результате к 5 системам. Для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[011]$  и  $(1\bar{1}\bar{1})[0\bar{1}\bar{1}]$  (см. рис. 2.23) дислокации сконцентрированы в центре и вблизи верхнего и нижнего края подложки по кристаллографическим направлениям  $[010]$  и  $[0\bar{1}0]$ , для систем скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[10\bar{1}]$  и  $(1\bar{1}\bar{1})[101]$  (рис. 2.24) распределение плотности дислокаций подобно вышерассмотренному за исключением того, что изолинии расположения дислокаций развернуты на  $90^\circ$ . В системах скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[1\bar{1}0]$ ,  $(1\bar{1}\bar{1})[110]$ ,  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[110]$  и  $(111)[1\bar{1}0]$  (см. рис. 2.25) дислокации сгруппированы по кристаллографическим направлениям  $[010]$ ,  $[0\bar{1}0]$  и  $[100]$ ,  $[\bar{1}00]$  что хорошо согласуется со значениями коэффициента Пуассона для произвольного кристаллографического направления (см. рис. 2.7). Системы скольжения  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[011]$  и  $(111)[0\bar{1}\bar{1}]$  приводят к максимальному значению плотности дислокаций в центре и по краям (рис. 2.26) в направлении  $[010]$  и  $[0\bar{1}0]$ , а для систем  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[101]$  и  $(111)[10\bar{1}]$ , (рис. 2.27), распределение аналогично, с тем отличием, что изолинии развернуты на  $90^\circ$ .

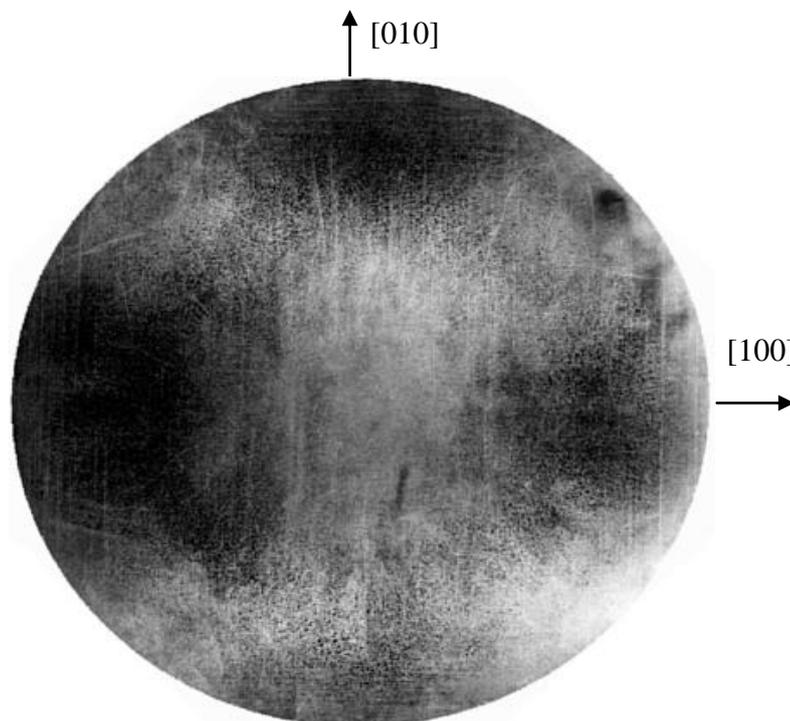


Рисунок 2.25 – Распределение плотности дислокаций в подложке ар-

сенида галлия диаметром 100 мм., кристаллографическая ориентация (100). Отраженный свет.

Для оценки полученных результатов мы исследовали обработанный в селективном травителе, образец подложки арсенида галлия. Снимок распределения дислокаций, полученный в отраженном свете, представлен на рис. 2.25. Можно видеть, что полученное в результате моделирования распределение дислокаций хорошо совпадает с реальной картиной распределения плотности дислокаций в подложке.

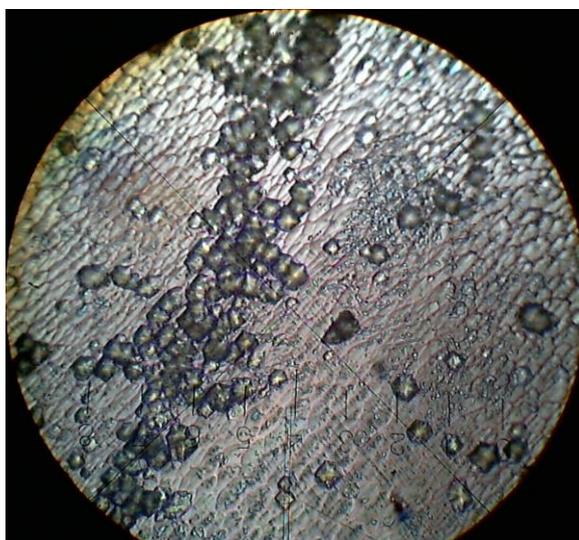


Рисунок 2.26 – Линия скольжения в подложке арсенида галлия диаметром 100 мм., кристаллографическая ориентация (100). Микроскоп МИИ - 4, увеличение 400 х.

Анализ результатов моделирования показывает, что дислокации в подложке сосредоточены в основном в центре и по краю. Максимальная плотность дислокаций наблюдается в направлении [100] по краю подложки минимальная плотность наблюдается в направлении [110] между краем и центром.

Выполненное нами сравнение полученного распределения плотности дислокаций с экспериментальными данными, полученными в работе [114] показывает хорошие совпадения результатов.

### Выводы по разделу.

1. Усовершенствована математическая модель описывающая влияние кристаллической структуры на механические свойства арсенида галлия кристаллографической ориентации оси слитка (100) и (111) и рассчитаны значения механических свойств (упругие постоянные, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) для произвольных кристаллографических направлений. Разработан алгоритм и программное обеспечение для расчета механических свойств в соответствии с разработанной моделью. Отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 4,7 %.

2. Усовершенствована математическая модель, позволяющая математически определить влияние величины остаточных напряжений на константы упругости  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  определяющие модуль Юнга и коэффициент Пуассона в подложках арсенида галлия. Установлено что увеличения уровня остаточных напряжений до значения 60 МПа приводит к увеличению значения констант, при этом константа  $c_{12}$  имеет наибольшее приращение. Начиная со значения 60 МПа значение констант  $c_{11}$ ,  $c_{44}$  начинают уменьшаться, при этом значение константы  $c_{44}$  изменяется в большей степени. Определены условия, при которых обеспечивается механическая устойчивость подложки арсенида галлия при воздействии на нее остаточных напряжений. Показано, что нарушение устойчивости происходит при величине остаточных напряжений равной 100 МПа.

3. Усовершенствована математическая модель описывающая влияние кристаллографической ориентации подложек арсенида галлия на плотность дислокаций, которая в отличии от существующих позволяет оценить плотность и распределение дислокаций в подложках GaAs с учетом систем скольжения. Установлено, что механизм размножения дислокаций во всех 12 допустимых для арсенида галлия системах скольжения может быть описан 5-ю системами.

### РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ В ПОДЛОЖКАХ GaAs

#### 3.1. Разработка методики контроля остаточных напряжений в подложках GaAs.

В настоящее время существуют различные методы и методики измерения остаточных напряжений [115,116], которые по различным причинам не обеспечивают их использование для измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия. Для решения задачи повышения качества подложек GaAs требуется информация об уровне остаточных напряжений и следовательно, разработка соответствующей методики.

Для измерения остаточных напряжений в полупроводниках успешно применяется метод фотоупругости. В основе этого метода лежит измерение разности хода ( $\delta$ ) между обычным и необычным лучом света (для полупроводников используется инфракрасное излучение), которое получается в результате двулучепреломления вызванного остаточными напряжениями. Разность хода в свою очередь находится в зависимости от толщины измеряемого образца.

Учитывая то, что в полупроводниках разность хода является сравнительно не большой, необходимо подготавливать образцы толщиной в несколько миллиметров. Подложки арсенида галлия для промышленного применения изготавливаются толщиной 400 мкм для диаметра подложки 50.8 мм, 600 мкм для подложек диаметром 76.2, и 650 мкм для подложек диаметром 100 мм. Измерение уровня остаточных напряжений для таких толщин требует разработки новых методик измерения.

Рассмотрим ошибки измерения остаточных напряжений методом фотоупругости с использованием поляриметра. Учитывая, что поляриметр

является оптико-электронной системой, ошибки метода можно свести к двум группам:

- ошибки приемного тракта (ошибки вызванные работой электронной схемы приемника ИК излучения);
- ошибки оптического тракта, вызванные погрешностями ориентации анализатора и поляризатора относительно главной оси излучения.

Рассмотрим первую группу ошибок. Как правило, в существующих поляриметрах, которые используются для измерения остаточного напряжения, используется эллиптическая поляризация [117,118].

В случае тонкой двулучепреломляющей пластины, которой является подложка GaAs, эллипсоид показателей преломления можно рассматривать как эллипс, общее уравнение которого может быть записано в виде:

$$\frac{y'^2}{n'^2} + \frac{z'^2}{n''^2} = 1, \quad (3.1)$$

где  $n'$  и  $n''$  являются неизвестными коэффициентами преломления направленными вдоль основных осей. Сдвиг фазы, вызванный двулучепреломлением можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} |n' - n''| \quad (3.2)$$

где  $d$  – толщина подложки,  $\lambda$  – длина волны поляризованного света.

Интенсивность входного сигнала на оптическом приемнике в этом случае определяется по формуле [119]:

$$I_t = I_0(\varphi)(1 - R(\varphi))^2 \times (\cos^2(\chi - \varphi) - \sin 2(\chi - \psi) \times \sin 2(\varphi - \psi) \times \sin^2(\delta/2)) \times G(\chi) + I_d(\varphi, \chi) \quad (3.3)$$

где  $\varphi$  – угол поворота поляризатора, угол  $\psi$  – угол двулучепреломления, угол  $\chi$  – угол поворота анализатора,  $I_0(\varphi)$  – интенсивность входного излучения, включающая потери излучения в поляризаторе,  $R(\varphi)$  – коэффициент отражения подложки GaAs,  $G(\varphi)$  чувствительность приемника излучения, включающая потери в анализаторе,  $I_d(\varphi, \chi)$  – темновой ток фотоприемника.

Рассмотрим ограничения метода, которые накладываются на чувствительность приемного тракта поляриметра. Согласно принятому методу измерения [120],  $I_t$  необходимо измерять в параллельной плоскости поляризации (случай когда  $\chi=\varphi$ ) и в перпендикулярной плоскости ( $\chi-\varphi=\pi/2$ ). Для этих случаев выражение (3.3) может быть переписано в виде:

$$I_t^{\parallel}(\varphi) = I_s(\varphi) \times G^{\parallel}(\varphi)(1 - \sin 2(\varphi - \psi) \times \sin^2(\delta/2)) + I_d^{\parallel}(\varphi) \times G^{\parallel}(\varphi), \quad (3.4)$$

$$I_t^{\perp}(\varphi) = I_s(\varphi) \times G^{\perp}(\varphi)(\sin 2(\varphi - \psi) \times \sin^2(\delta/2)) + I_d^{\perp}(\varphi) \times G^{\perp}(\varphi), \quad (3.5)$$

где  $I_0(\varphi) = I_0(\varphi)(1-R(\varphi))^2$ .

Тогда общая интенсивность излучения запишется как:

$$\begin{aligned} I_r(\varphi) &\equiv \frac{I_t^{\perp}(\varphi)}{I_t^{\perp}(\varphi) + I_t^{\parallel}(\varphi)} = \\ &= \frac{G_r(\varphi) \sin^2 2(\varphi - \psi) \sin^2(\delta/2) + I_d^{\perp}(\varphi)G_r(\varphi) / I_s(\varphi)}{(1 + (G_r(\varphi) - 1) \sin^2 2(\varphi - \psi) \sin^2(\delta/2)) + (I_d^{\perp}(\varphi)G_r(\varphi) + I_d^{\parallel}(\varphi)) / I_s(\varphi)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $G_r(\varphi) = G^{\perp}(\varphi)/G^{\parallel}(\varphi)$  чувствительность приемного тракта.

Если принять следующие условия:

$$G_r(\varphi) \approx 1 \quad \text{и} \quad I_d^{\perp}(\varphi), I_d^{\parallel}(\varphi) < I_s(\varphi) \quad (3.7)$$

тогда выражение (3.6) можно переписать в следующем виде:

$$I_r(\varphi) \approx G_r(\varphi) \sin^2 2(\varphi - \psi) \sin^2(\delta/2) + I_d^{\perp}(\varphi)G_r(\varphi) / I_s(\varphi) \quad (3.8)$$

В этом выражении первое слагаемое определяет полезный сигнал, а второе слагаемое – помеху.

Выполнение условия (3.7) может быть достигнуто применением специальных решений при разработке аппаратурной части поляриметра. Из выражения (3.8) можно видеть, что в том случае если сдвиг фазы  $\delta$  сравнительно небольшой, то величина помехи может превысить величину полезного сигнала, что является ограничивающим фактором чувствительности приемного тракта. Вторым ограничением является невыполнение условия  $G_r(\varphi) \approx 1$ . Если условие  $G_r(\varphi) \approx 1$  не выполняется, уменьшается точность определения параметров  $\delta$  и  $\psi$ , так как  $G_r(\varphi)$  модулируется периодическими компонентами  $\sin^2 2(\varphi - \psi) \sin^2 (\delta/2)$ .

Решение задачи обеспечения выполнения условия (3.7) возможно при условии использования в схеме поляриметра фазочувствительного контура и высокочувствительного фотоприемника. Увеличение чувствительности приемного тракта возможно путем введения цифровой обработки входного сигнала. В этом случае параметры  $\delta$  и  $\psi$  могут быть определены как среднее, взвешенное для измеренных значений  $I_r(\varphi)$ , минимизируя при этом влияние шумовой составляющей полезного сигнала. Если производить измерения  $I_r(\varphi_j)$  для  $(j=0, \dots, J-1)$  в интервале  $2\pi/J$  при  $0 < \varphi < 2\pi$  то можно записать следующие преобразования:

$$I_{\sin} = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} I_r(\varphi_j) \sin 4\varphi_j = \frac{1}{4} \sin 4\psi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (3.9)$$

$$I_{\cos} = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} I_r(\varphi_j) \cos 4\varphi_j = \frac{1}{4} \cos 4\psi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (3.10)$$

Тогда сдвиг фазы  $\delta$  и угол двулучепреломления  $\psi$  может быть определен следующими выражениями:

$$\delta = 2 \arcsin(4(I_{\sin}^2 + I_{\cos}^2))^{1/4} \quad (3.11)$$

$$\psi = 4 \arctan \frac{I_{\sin}}{I_{\cos}} \quad (3.12)$$

Остаточные напряжения в соответствии с [121] могут быть найдены как:

$$|\sigma| = \frac{\lambda \delta}{\pi d n_0^3} \left| \frac{\sin 2\psi}{p_{44}} \right| \quad (3.13)$$

где  $d$  – толщина подложки GaAs,  $n_0$  – коэффициент преломления GaAs при отсутствии остаточных напряжений, равный 3.4 [122]  $p_{44}$  – фотоупругая константа равная 0.0686 [123],  $\lambda = 3.3$  мкм.

Вторая группа ошибок связанная с оптической схемой возникает вследствие несоответствия длины волны четвертьволновых пластин и номинального наклона оптических элементов, которые включают в себя анализатор и поляризатор.

Рассмотрим оптическую схему поляриметра, представленную на рисунке 3.1, которая состоит из источника ближнего ИК излучения, поляризатора, двух четвертьволновых пластинок, анализатора и детектора ИК излучения.

Ошибки, связанные с несоответствием длины волны четвертьволнового и номинального наклона оптических элементов, были проанализированы Паттерсоном в работах [124, 125]. Полученные авторами результаты показывают, что основными источниками ошибки являются угловое смещение в двух четвертьволновых пластинках, анализаторе и поляризаторе.

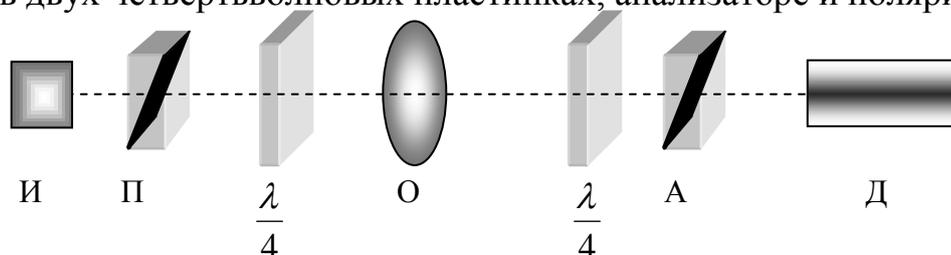


Рисунок 3.1 – Схема поляриметра: И – источник ИК излучения, П – поляризатор,  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка, О – образец, А – анализатор, Д – датчик ИК излучения.

Распространение света в полярископе может быть описано вектором Стокса и матрицей Мюллера [126]. Для ИК излучения, распространяющегося вдоль направления  $Z$  (рис. 3.1), электрическое поле может быть разложено по  $x$  и  $y$ , и описано выражениями:

$$E_x = E_{0x} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \omega t\right) + \delta_x \right] \quad (3.14)$$

$$E_y = E_{0y} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \omega t\right) + \delta_y \right] \quad (3.15)$$

где  $E_x$ ,  $E_y$  являются величинами электрического поля вдоль оси  $x$  и  $y$ ,  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  – фазы излучения,  $\omega$  - частота,  $\lambda$  - длина волны, и  $t$  - время. Относительное запаздывание  $\delta$  фазы, между  $E_x$  и  $E_y$  вычисляется разностью  $\delta_x - \delta_y$ . Это излучение может также быть выражено через вектор Стокса как:

$$S = \begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

где

$$s_0 = E_{x0}^2 + E_{y0}^2 \quad (3.17)$$

$$s_1 = E_{x0}^2 - E_{y0}^2 \quad (3.18)$$

$$s_2 = 2E_{x0}E_{y0} \cos \delta \quad (3.19)$$

$$s_3 = 2E_{x0}E_{y0} \sin \delta \quad (3.20)$$

В вышеприведенных уравнениях, первый компонент  $s_0$  является интенсивностью ИК излучения, а другие три компонента описывают фазу. Эти четыре компонента зависят друг от друга, и удовлетворяют условию  $s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$ . Для произвольно ориентированного поляризованного ИК

излучения вектор Стокса  $S$  определяется как:

$$S_0 = I_a [1, 0, 0, 0]^T \quad (3.21)$$

где  $T$  является транспонированной матрицей,  $I_a$  - интенсивность ИК излучения.

Опишем идеальный линейный поляризатор матрицей Мюллера  $P(\beta)$ , в следующем виде:

$$P(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\beta & \sin 2\beta & 0 \\ \cos 2\beta & \cos^2 2\beta & \sin 2\beta \cos 2\beta & 0 \\ \sin 2\beta & \sin 2\beta \cos 2\beta & \sin^2 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

где  $\beta$  - угол между основной осью поляризатора и кристаллографической осью образца.

Образец и четвертьволновую пластину можно рассматривать как фазовращатель, который описывается матрицей Мюллера следующим образом:

$$M(\theta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \cos^2 2\theta + \sin^2 \theta \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin 2\theta \sin \delta \\ 1 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos^2 \theta \cos \delta & -\cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & -\sin 2\theta \sin \delta & \cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

где  $\theta$  - угол между основной осью четвертьволновой пластины и кристаллографической осью. Для идеальной четвертьволновой пластины, у которой не наблюдается несоответствие длины волны,  $\delta = \pi/2$ , матрица Мюллера запишется в следующем виде:

$$M\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 1 & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & -\cos 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Тогда круговой полярископ, показанный на рисунке 3.2 можно проанализировать связью матриц Мюллера как:

$$S = S_m + P(\beta)M\left(\alpha, \frac{\pi}{2}\right)M(\theta, \delta)M\left(\phi, \frac{\pi}{2}\right)P(0)S_0 \quad (3.25)$$

где  $S_m$  коэффициент который учитывает фоновое освещение,  $P(0)$  и  $P(\beta)$  описывают поляризатор и анализатор соответственно,  $M(\phi, \pi/2)$ ,  $M(\theta, \delta)$  и  $M(\alpha, \pi/2)$  является первой четвертьволновой пластиной, образцом и второй четвертьволновой пластиной соответственно.

Проверку неточности совмещения оптических осей поляризатора и анализатора мы выполняли на установке, структурная схема, которой представлена на рисунке 3.2.

Теоретически излучение на выходе анализатора, можно описать матрицами Мюллера как:

$$S = P(\theta)P(0)S_0 \quad (3.26)$$

А интенсивность выходящего излучения запишется как:

$$I = I_0 + I_a \sin(\theta) \quad (3.27)$$

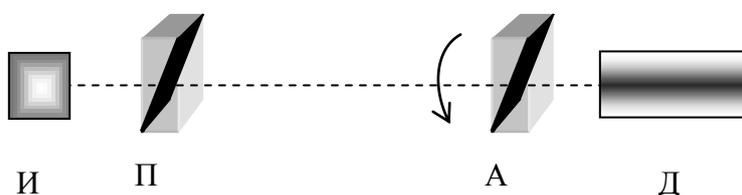


Рисунок 3.2 – Структурная схема установки для проверки неточности установки поляризатора. И – источник ИК излучения, П – поляризатор, Д – датчик ИК излучения

Проверку неточности совмещения оптических осей мы проводили,

зафиксировав поляризатор в положение  $0^{\circ}$  и анализатор вращался от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  с шагом  $5^{\circ}$ . Полученные результаты представлены на рисунке 3.3.

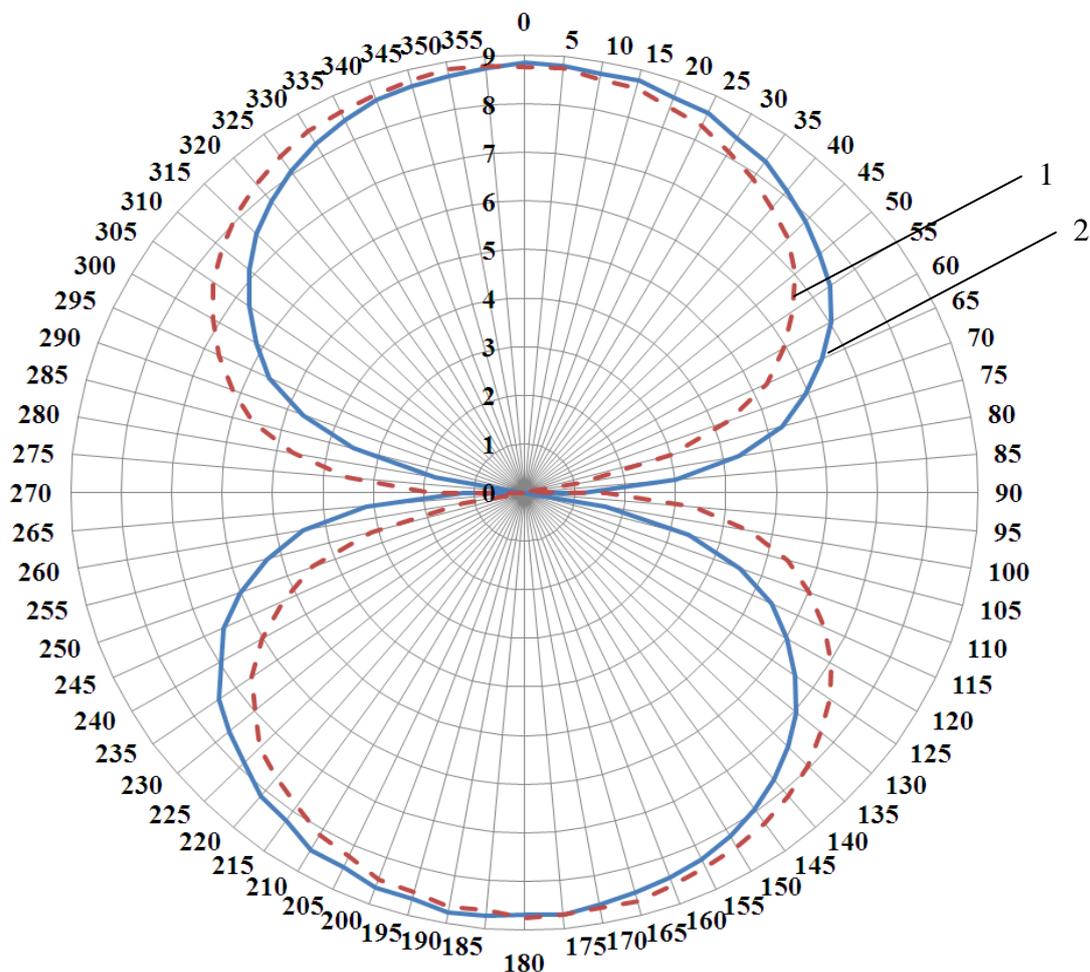


Рисунок 3.3 – Зависимость интенсивности ИК-излучения ( $I$ ), от угла поворота анализатора при закрепленном поляризаторе. 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения.

Рассмотрим влияние на погрешности измерения остаточных напряжений при отклонении от соосности четвертьволновых пластин. В схеме поляриметра пара поляризатор – четвертьволновая пластина используется для того чтобы получить циркулярно – поляризованное излучение, и любое неточное совмещение оптической оси ухудшит качество круговой поляризации.

Поляризатор, оптическая схема которого состоит из поляризатора, четвертьволновых пластин и анализатора можно описать матрицами Мюллера

лера в виде:

$$S = S_0 + P\left(\frac{\pi}{2}\right)M\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right)P(0) \quad (3.28)$$

Где  $\theta=0,5\dots360^0$ . Интенсивность излучения определяется как

$$I = I_0 + I_a(1 - \cos^2(\theta)) \quad (3.29)$$

Проверку неточности совмещения оптических осей поляризатора и анализатора мы выполняли на установке структурная схема, которой представлена на рисунке 3.4.

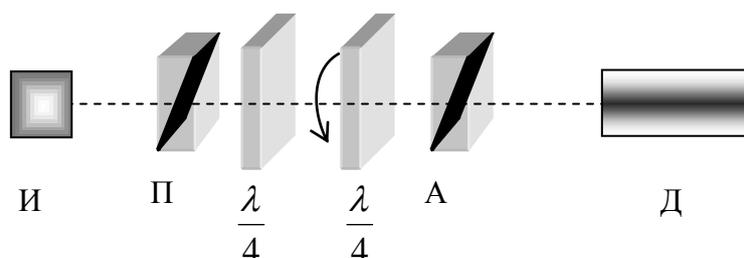


Рисунок 3.4 – Структурная схема установки для проверки неточности установки поляризатора: И – источник ИК излучения, П – поляризатор,  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластина, А – анализатор; Д – датчик ИК излучения.

Полученные результаты измерения соосности четвертьволновых пластин и группы анализатор – поляризатор показаны на рисунке 3.5.

С учетом второй четвертьволновой пластины для оценки погрешности необходимо ввести смещение  $\Delta\phi$  в пределах  $\pm 1^0$  в выражение (3.25). Тогда схема поляриметра может быть описана следующим уравнением:

$$S_i = P(\beta_i)M\left(\alpha_i, \frac{\pi}{2}\right)M(\theta, \delta)M\left(\frac{\pi}{4} + \Delta\phi, \frac{\pi}{2}\right)P(0)S_0 \quad (3.30)$$

где  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  являются углами поворота четвертьволновой пластины.

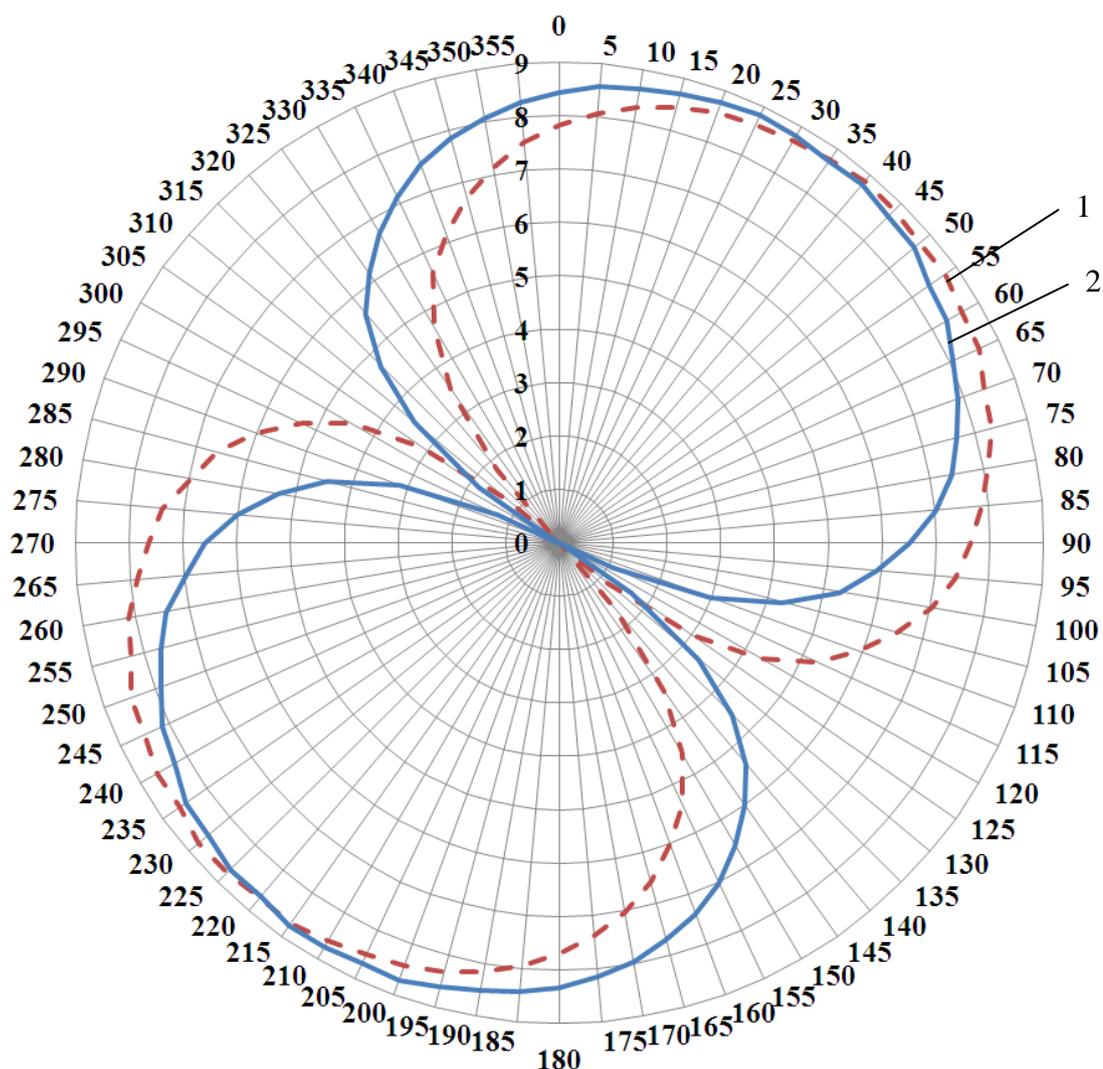


Рисунок 3.5 – Зависимость интенсивности ИК-излучения (I), от угла поворота четвертьволновой пластины при закрепленном поляризаторе и анализаторе: 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения.

Для второй пластины систематическая ошибка сдвига фаз, вызванная несоосностью, определяется выражением:

$$\Delta\delta = 2\Delta\alpha \sin 2\theta \sin^2 \delta \quad (3.31)$$

Случайную ошибку второй пластины можно найти следующим образом:

$$S_i = P(\beta_i)M(\alpha_i, \Delta\alpha_i, \frac{\pi}{2})M(\theta, \delta)M(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2})P(0)S_0 \quad (3.32)$$

Тогда общую погрешность, вызванную несоосностью оптических элементов можно получить при помощи следующих формул:

$$\Delta\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial\delta}{\partial\alpha_i} \Delta\alpha_i \right)^2} \quad (3.33)$$

$$\Delta\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial\theta}{\partial\beta_i} \Delta\beta_i \right)^2} \quad (3.34)$$

Для экспериментальной проверки влияния несоосности элементов оптической системы был выполнен ряд измерений, в процессе которых элементы устанавливались таким образом, чтобы интенсивность ИК излучения соответствовала теоретической (см. рис. 3.3, 3.5), проводились измерения остаточных напряжений, и вносилось смещение  $\Delta\varphi$  с шагом  $0,1^0$  в диапазоне углов  $\pm 1^0$ . Данный диапазон углов был выбран из практических соображений. Результаты измерений приведены в таблице 3.1.

Анализ систематической погрешности оптического тракта позволил определить, что ошибка установки поляризатора  $\pm 1^0$  приводит к погрешности измерения 0,7 МПа, погрешности в установке четвертьволновых пластин  $\pm 1^0$  приводят к ошибке измерения 0,5 МПа.

Таблица 3.1.

Экспериментальные результаты оценки влияния смещения элементов оптической системы полярископа.

Смещение анализатора ( $\alpha$ ), град.	Смещение $\frac{1}{4}$ волновой пластины ( $\beta$ ), град.	Отклонение результата измерения $ \sigma $ , МПа при $\lambda = 3.3$ мкм для $\alpha$ .	Отклонение результата измерения $ \sigma $ , МПа при $\lambda = 3.3$ мкм для $\beta$ .
1	1	0,7	0,5
0,9	0,9	0,49	0,42
0,8	0,8	0,38	0,34
0,7	0,7	0,29	0,21
0,6	0,6	0,17	0,16
0,5	0,5	0,98	0,98
0,4	0,4	0,05	0,52
0,3	0,3	0,03	0,24
0,2	0,2	0,03	0,01
0,1	0,1	0,01	0
0	0	0	0
-0,1	-0,1	0,01	0,012
-0,2	-0,2	0,01	0,25
-0,3	-0,3	0,03	0,04
-0,4	-0,4	0,035	0,064
-0,5	-0,5	0,07	0,086
-0,6	-0,6	0,12	0,1
-0,7	-0,7	0,23	0,18
-0,8	-0,8	0,36	0,25
-0,9	-0,9	0,45	0,33
-1	-1	0,56	0,46

С учетом вышеописанного можно предложить усовершенствованную методику измерения остаточных напряжений в подложках GaAs:

1. Провести подготовку подложек в соответствии с ГОСТ19658-81.
2. Установить элементы оптической системы в скрещенное положение, контролируя минимальный сигнал на выходе приемника при включенном излучателе.
3. Зафиксировать уровень фонового излучения как выходной сигнал приемника при скрещенных элементах оптической системы.

4. Установить в держатель контролируемую подложку, таким образом, чтобы ось кристаллографической ориентации была параллельна плоскости поляризации излучателя.

5. Провести измерение синусоидальной и косинусоидальной составляющей входного сигнала по выражениям (3.9, 3.10) с учетом фонового излучения.

6. Определить сдвиг фазы и угол двулучепреломления по выражениям (3.11, 3.12).

7. Рассчитать уровень остаточного напряжения по выражению (3.13).

8. Учесть погрешность измерения, вызванную погрешностями оптического тракта.

### **3.2. Разработка методики контроля плотности дислокаций в подложках GaAs.**

В настоящее время контроль плотности дислокаций производят согласно стандартам [127,128] которые, описывают методику определения дислокаций для кремния. В тоже время подготовка и травление арсенида галлия имеет свои особенности. Ситуация осложняется для процессов измерения плотности дислокаций в подложках GaAs диаметром больших 100 мм, которые изготавливаются толщиной 600 мкм и более.

Для выявления дислокаций часто используют кислотные селективные и неселективные травители [129]. Недостатком данных травителей является то, что данные травители представляют собой сильно концентрированные кислоты, такие как плавиковая, сернистая и азотная. Работа с такими травителями в условиях серийного производства представляет собой определенные трудности.

В работе [129] рассмотрено применение в качестве травителя гидроксида калия при температуре 300 °С. Применение данного способа обеспечивает хорошие результаты как для плоскости {100} так и для плоскости {111}. В тоже время процесс травления при такой температуре требу-

ет наличия специального оборудования и предварительного прогрева подложек для отсутствия термоудара. С увеличением диаметра слитка и толщины подложки увеличивается вероятность механического разрушения подложки.

В работе [130] предложено использовать в качестве селективных и неселективных травителей органические кислоты и в качестве окислителя разбавленный раствор азотной кислоты в дистиллированной воде. В работе исследовались винная, лимонная и щавелевая кислоты.

Результаты исследования органических травителей для подложек АГЧХ-98,0-650-(100) ориентации  $\{100\}$ , приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

#### Действие органических травителей на подложки GaAs

№ п.п	Травитель	Режим травления	Действие травителя	Свойство травителя
1.	$2C_6H_8O_7 + 1HNO_3 + 2H_2O$	70 °С, 240 сек	Образует ромбовидные ямки травления	Селективный
2.	$1C_6H_8O_7 + 1HNO_3 + 2H_2O$	60 °С, 360 сек	Образует ромбовидные ямки травления	Селективный
3.	$1C_2H_2O_4 + 1HNO_3 + 3H_2O$	70 °С, 120 сек	Образует ромбовидные ямки травления	Селективный

Анализ результатов исследования травителей позволил сделать вывод о пригодности для травления подложек GaAs травителя на основе щавелевой кислоты (травитель №3). Преимуществом данного травителя является сравнительно низкая температура травления, около 70 °С, при непродолжительном времени травления.

Перед травлением образцы необходимо подготовить, в частности провести механическую и химическую полировку. Механическая полировка должна выполняться на шлифовальном станке, например модернизированный станок алмазной шлифовки подложек GaAs САШ-АМ [131]. Шероховатость поверхности после механической шлифовки должна находиться в пределах  $0,1 \div 0,3$  мкм. Измерение шероховатости в нашем случае проводилось с использованием микроинтерферометра Линника МИИ-4.

Химическая полировка должна проводиться в смеси концентрированной серной кислоты, перекиси водорода и воды в отношении 5:1:1. Полировка проводится при температуре  $60^{\circ}\text{C}$  в течение  $5 \div 15$  мин.

Полученные результаты травления представлены на рис.3.9, 3.10.

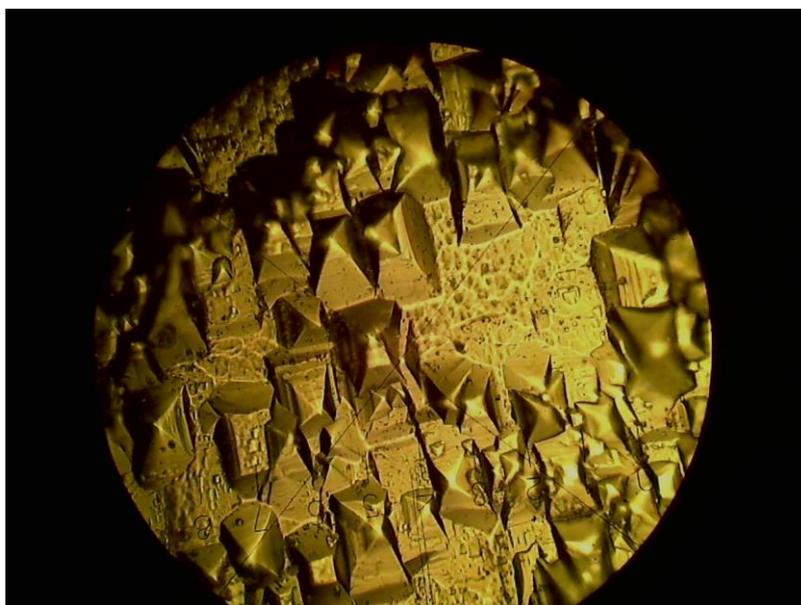


Рисунок 3.6 – Результат травления подложки арсенида галлия АГЧХ-98,0-650-(100) ориентации  $\{100\}$  травителем №1, время травления 240 сек, температура травления  $70^{\circ}\text{C}$ . Увеличение  $400^{\times}$

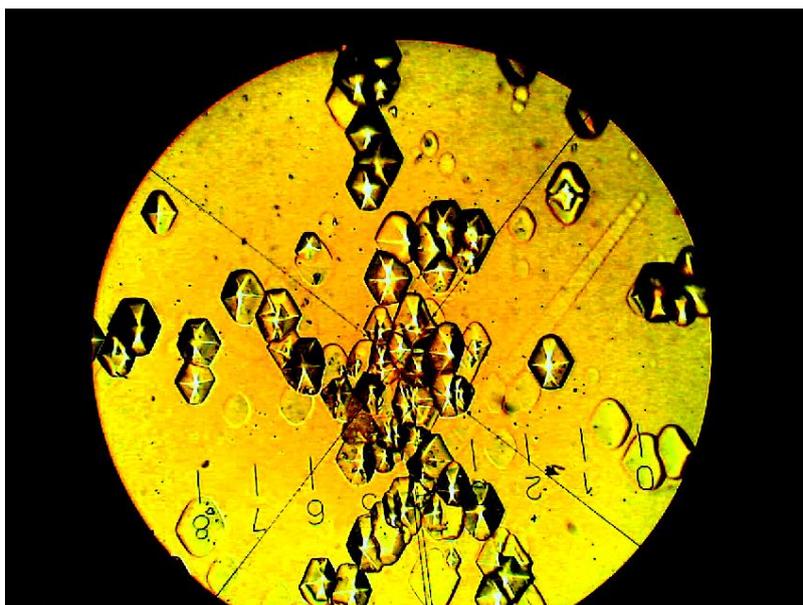


Рисунок 3.7 – Результат травления подложки арсенида галлия АГЧХ-98,0-650-(100) ориентации  $\{100\}$  травителем №3, время травления 120 сек, температура травления  $70^{\circ}\text{C}$ . Увеличение  $400^{\times}$

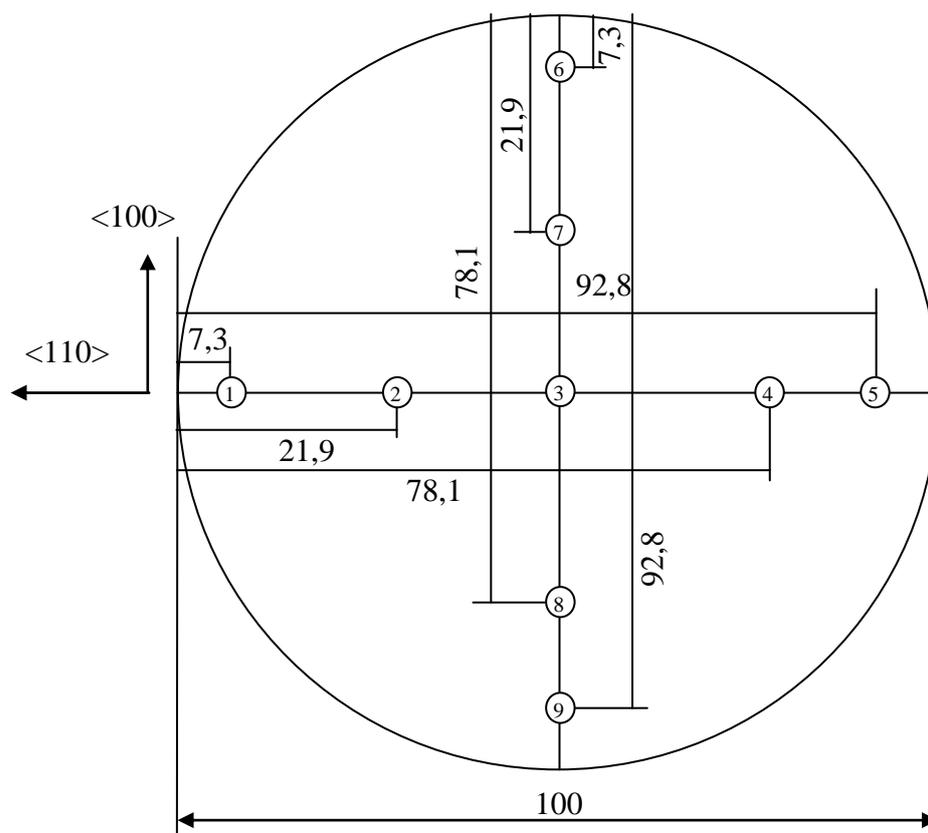


Рисунок 3.8 – Схема выбора полей измерения в соответствии с методикой [126] для подложки диаметром 100 мм.

Методика, которая используется в настоящее время, предполагает определение плотности дислокаций в девяти точках [126] в соответствии с планом измерения, приведенном на рис. 3.8:

В данной схеме точки измерения расположены в ячейках квадратной сети на расстоянии  $l_k$  от края подложки. При этом  $l_k$  зависит от диаметра подложки, и для подложек диаметром 100 мм равен 7,3 мм. Интервал между точками измерения  $l_d$  должен составлять 14,6 мм для подложек диаметром 100 мм.

Для составления карты распределения дислокаций по площади подложки данный план измерения не является удовлетворительным. Решение этой задачи возможно при использовании плана измерения позволяющего проводить измерения с более частым шагом как по оси X так и по оси Y поверхности подложки. План измерения, реализующий предлагаемую методику, показан на рисунке 3.9.

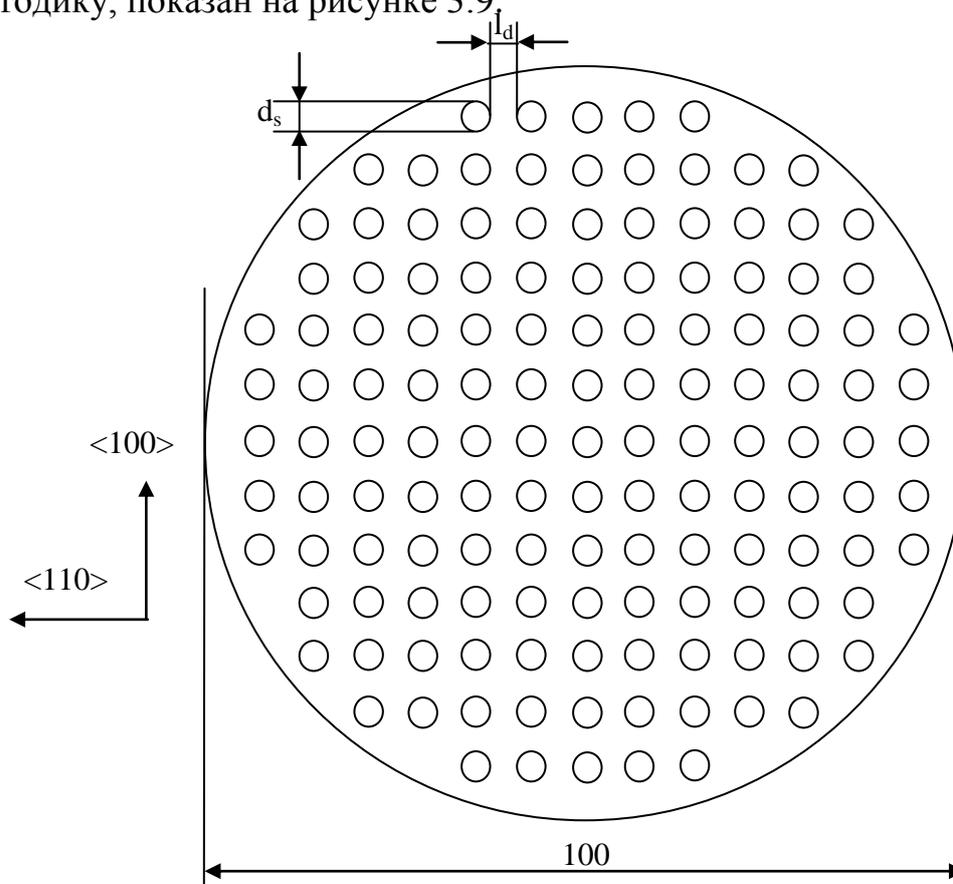


Рисунок 3.9 – Полный план измерения подложки GaAs:  $d_s$  – диаметр зоны измерения,  $l_d$  – расстояние между зонами измерения.

Площадь зоны измерения  $S_d$  определяется по объектмикрометру, как показано на рисунке 3.10, по следующему выражению:

$$S_d = \pi \left( \frac{K_d}{2} \right)^2 \times 10^{-8} \text{ см}^2 \quad (3.35)$$

где  $K_d$  – количество видимых делений объектмикрометра.

Расстояние между зонами измерения не должно быть меньше диаметра зоны измерения. Зоны измерения должны располагаться в ячейках прямоугольной сетки, как показано на рисунке 3.9. Расстояние между узлами сетки не должно превышать  $d/10$ , где  $d$  – диаметр подложки.

Плотность дислокации в зоне измерения может быть рассчитана в соответствии с выражением:

$$N_{ds} = N/S_d \quad (3.82)$$

где  $N$  – число видимых дислокаций в зоне измерения.

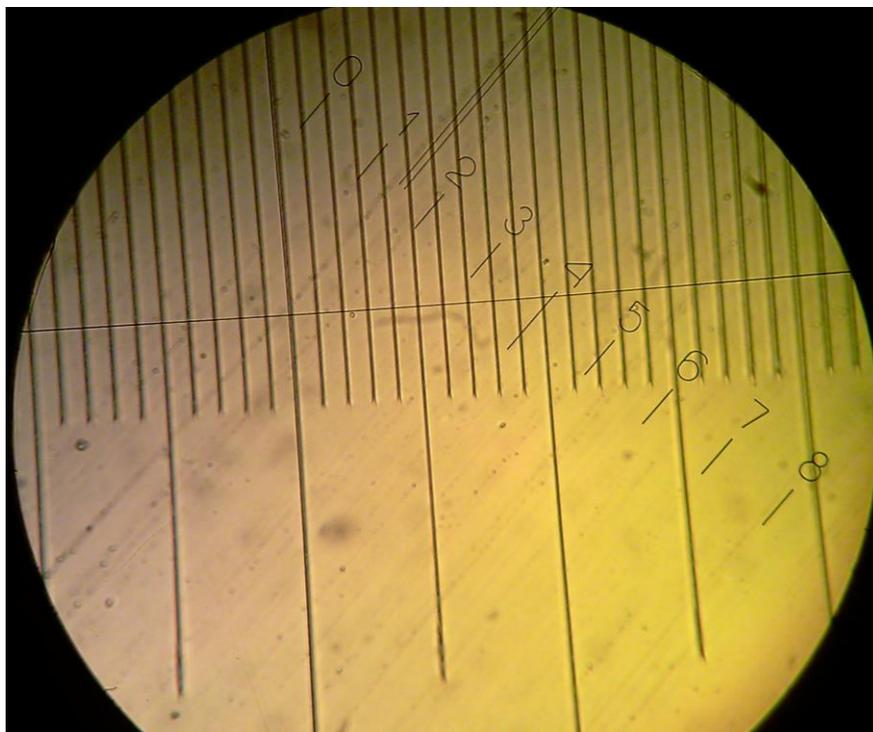


Рисунок 3.10 – Изображение объектмикрометра для определения площади зоны измерения.

Следовательно, плотность дислокации подложки GaAs определится как:

$$N_d = \frac{1}{i} \sum N_{ds} \quad (3.84)$$

где  $i$  – число зон измерения.

### **3.3. Разработка методики контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs.**

Любая вновь разрабатываемая методика контроля отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия, должна удовлетворять следующим очевидным условиям:

1. Контроль должен быть неразрушающим;
2. Процесс измерений должен быть полностью автоматизирован;
3. Результаты измерения должны хорошо коррелировать с применяемой в настоящее время методикой и аппаратурой контроля отклонения от плоскостности [132];
4. Инструментальная погрешность измерений не должна превышать  $\pm 0,8$  мкм при воздействии всех дестабилизирующих факторов в диапазоне измерения  $l = 100$  мм.

Рассмотрим погрешности метода интерференционной микроскопии взятого в качестве базового для контроля отклонение от плоскостности. Анализ структурной схемы устройства показывает, что основными источниками погрешности являются:

- погрешности механической конструкции, которые включают в себя погрешности установки корундовых наконечников, погрешности механизма перемещения объектива и погрешности установки индуктивного датчика;
- погрешность индуктивного датчика перемещения объектива;
- погрешность распознавания линии интерференции.

Суммарную погрешность, которая возникает можно разделить на си-

стематическую и случайную.

Систематическая погрешность вызвана неточностью установки корундовых наконечников, ошибками механизма перемещения объектива и ошибкой установки индуктивного датчика.

Случайная погрешность вызвана погрешностью индуктивного датчика перемещения объектива и погрешностью распознавания линии интерференции.

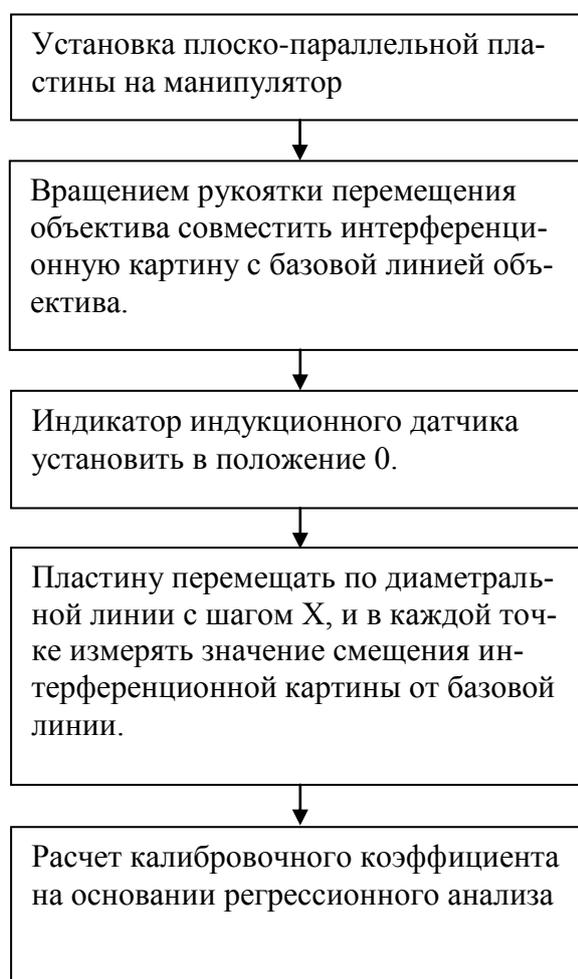


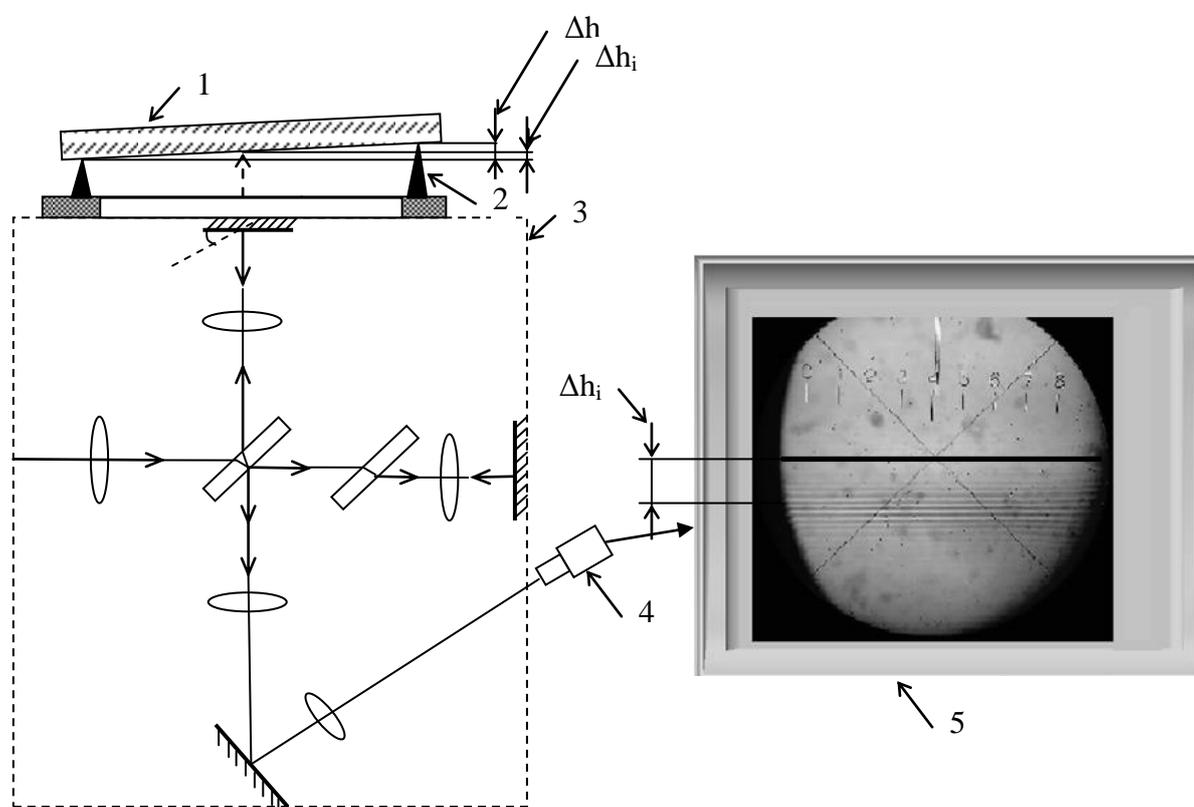
Рисунок 3.11 – Последовательность выполнения операции калибровки аппаратуры контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs.

Систематическую погрешность можно устранить путем выполнения калибровки по эталонному образцу с известной непараллельностью сто-

рон. В качестве такого образца были взяты пластины плоско-параллельные, стеклянные типа ПИ100 НИЖНИЕ изготовленные по ГОСТ 15150-69. Данные пластины применяются для притирания к ним плоскопараллельных концевых мер длины при интерференционных измерениях, а также для проверки плоскостности измерительных поверхностей концевых мер, измерительных приборов и инструментов.

Калибровку по эталонному образцу необходимо выполнять по схеме, представленной на рис. 3.11.

Установка плоско-параллельной пластины на манипулятор, выполняется по следующей схеме:



1 – плоско-параллельная пластина ПИ ГОСТ 15150-69; 2 – корундовые наконечники на манипуляторе; 3 – микроинтерферометр Линника МИИ - 4; 4 – видеокамера; 5 – интерфейс программы.

Рисунок 3.12 – Схема калибровки аппаратуры контроля отклонения от плоскостности.

В данной схеме  $\Delta h$  показывает отклонение от плоскостности вызванное установкой корундовых наконечников на манипуляторе. Отклонение  $\Delta h_i$  – погрешность в  $i$  – той точке измерения.

Шаг  $X$  перемещения пластины определяет точность расчета калибровочного коэффициента. Учитывая линейный характер данной погрешности, достаточная точность обеспечивается для значения  $X = 10$  мм.

Погрешность индуктивного датчика перемещения объектива МИИ - 4 определяется следующими факторами:

- Температурный дрейф нулевого уровня единичного индуктивного датчика;
- Нелинейность характеристики преобразования перемещения в напряжение, определяемая конструкцией конкретного типа датчика;
- Нелинейность характеристики преобразования перемещения в напряжение, определяемая изменением переменного напряжения, питающего датчик при смещении его магнитного сердечника относительно нейтрального положения;
- Временная и температурная нестабильность вторичного преобразователя перемещения в напряжение;
- Вариация датчика, определяемая точностью выполнения шариковых направляющих измерительного стержня.

Как известно, дрейф нуля индуктивного датчика может достигать значений порядка  $\frac{dh}{dT} = \pm 0,2 \text{ мкм} \cdot \text{K}^{-1}$  и зависит от его конструкции. Снижение этой составляющей инструментальной погрешности может быть выполнено за счет стабилизации температуры, что в условиях производства малоосуществимо. Проведенные нами исследования характеристик индуктивного датчика, показали, что для индуктивного датчика типа

М-022-02 значение составляет  $\frac{dh}{dT} = \pm 0,1 \text{ мкм} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Погрешность, обусловленная нелинейностью характеристик преобразователя линейных перемещений на основе индуктивных преобразователей, в конечных точках диапазона измерения может достигать величины порядка  $\Delta h = \pm 2 \dots 3 \text{ мкм}$  и носит мультипликативный характер. Для ее снижения с помощью концевых мер длины строится характеристика  $h=f(U_{\text{изм}})$  (рис. 3.13), связывающая действительное значение перемещения  $h$  с напряжением на выходе электронных узлов преобразователя  $U_{\text{изм}}$ . Для достижения приемлемой точности следует использовать не менее десяти концевых мер, причем их номинальные значения должны выбираться так, чтобы экспериментальные точки лежали плотнее к предельным значениям  $h_{\text{min}}$  и  $h_{\text{max}}$ . Полученная зависимость аппроксимируется полиномом нечетного порядка. Коэффициенты полинома хранятся в памяти управляющей ЭВМ. Экспериментальные исследования показывают, что аппроксимация полиномом пятого порядка обеспечивает снижение нелинейности преобразования до менее чем  $\pm 0,1 \text{ мкм}$ .

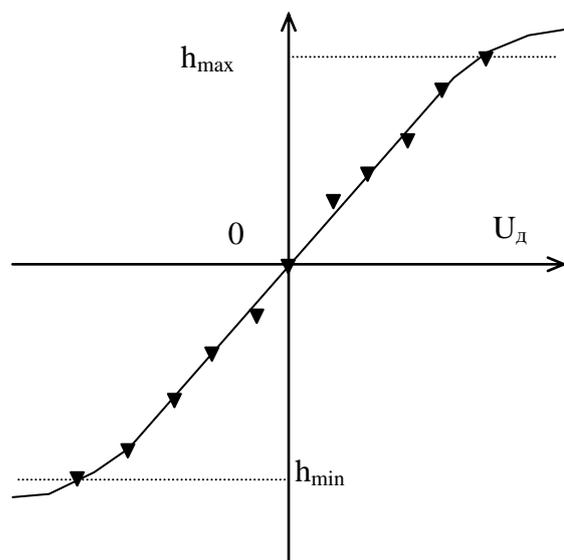


Рисунок 3.13 – Статическая характеристика индуктивного датчика. (▼)

– результаты измерений, (—) – аппроксимация полиномом.

Погрешности, вызванные распознаванием линий интерференции,

возникают в результате телевизионной обработки интерференционных полос.

Точность определения положения интерференционных полос этим методом зависит от технических характеристик видеооптической системы, включающей в себя видеокамеру с объективом, устройства оцифровки видеосигнала и качества получаемого видеоизображения. Не затрагивая технические характеристики видеооптической системы и параметры устройства оцифровки, рассмотрим способ повышения точности измерения положения интерференционных полос, путем улучшения качества видеоизображения.

На качество видеоизображения оказывают влияние различные факторы, такие как изменение освещенности, загрязнение оптической системы и т.д. Для минимизации этих факторов необходимо провести обработку полученного видеоизображения, которая заключается в контрастировании, фильтрации и выделении границ.

Для контрастирования изображения обычно применяется линейная фильтрация или нелинейный оператор преобразования. Учитывая характер изображения, мы использовали метод повышения контрастности изображения нелинейным оператором преобразования, который представляется в виде степенной функции:

$$v_1 = (G - 1) \left[ \frac{k^r}{s^{r-1}} \right] \text{ для } 0 \leq k \leq s, \quad v_2 = (G - 1) \left[ 1 - \frac{(1-k)^r}{(1-s)^{r-1}} \right] \text{ для } s \leq k \leq 1 \quad (3.36)$$

где  $G$  – значение уровня изображения равное 255 для полутонового изображения;  $k = f(x,y)/(G-1)$  нормированное значение функции входного изображения;  $v = f'(x,y)/(G-1)$  – нормированное значение функции выходного изображения;  $s = S/(G-1)$  – нормированное значение точки перегиба характеристики изображения;  $S$  – точка перегиба характеристики изображения, равная 186 (определена экспериментальным путем);  $r$  – показатель

степенной функции, равный 3.

Показатель степенной функции определяет выпуклость или вогнутость характеристики преобразования. Для задач определения диаметра слитка, целесообразно использовать значение  $r$  больше 1, так как в этом случае происходит растягивание шкалы уровня серого вблизи точки перегиба и сжатие на краях шкалы.

После проведения операции контрастирования выполняется нелинейная локальная фильтрация медианным фильтром для подавления шумов. В процессе этой обработки производится сортировка по величине значений пикселей, попавших в окно фильтра, а затем замена значения опорной точки  $(x, y)$  величиной яркости пикселя расположенного на середине этого ряда.

Для выделения границ используется операция взятия градиента. Проведенные исследования показали, что наилучшие результаты удалось добиться, вычисляя вторую производную оператором Лапласа, который представляется в виде:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} \cos^2 \theta + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \sin^2 \theta \quad (3.37)$$

и который вычисляется по приближенной формуле:

$$\nabla^2 f(x, y) = f(x, y) + 4\{f(x, y) - 0,25[f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)]\} \quad (3.38)$$

Использование второй производной оператора Лапласа позволяет выделить границы изображения за счет учета высокочастотной составляющей изображения интерференционной полосы. Это приводит к тому, что улучшается выделение полосы путем увеличения фокуса.

Полученное изображение с телекамеры поступает через видеоплату ввода в компьютерную программу, в которой изображение раскладывается на составляющие в видеомассиве и определяются базовые границы линии интерференции.

Задача сводится к нахождению шагов, при которых производная

имеет максимальное и минимальное значение при проходе с левого и правого края линии сканирования.

Положение интервенционной линии определяется по следующей формуле :

$$H_L = \nabla^2 f(x, y) * K \quad (3.39)$$

где  $\nabla^2 f(x, y)$  - первый максимум производной в пикселях;  $K$  – коэффициент масштабирования (мм/пиксель), определяющий вес разницы между двумя соседними пикселями к физическому размеру в мм.

Коэффициент  $K$  зависит от фокусного расстояния объектива. Он определяется практическим методом, путем измерения не параллельности пластины и последующим сравнением измеренных значений с фактическим отклонением определяемым в контрольных точках микрометром и расчетом получаемого значения  $K$  по формуле:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^n H_f}{\sum_{n=1}^n H_p} \quad (3.40)$$

где  $n$  - число точек измерения;  $H_f$  – фактическое отклонение от горизонтальной плоскости пластины в мкм;  $H_p$  – измеренное отклонение от горизонтальной плоскости пластины в мкм.

### Выводы по разделу

1. Разработана методика контроля остаточных напряжений в подложках арсенида галлия методом фотоупругости. Установлено, что погрешность метода, которая вызывается ошибками приемного тракта поляриметра и ошибками установки оптических элементов в основном определяется погрешностями приемного тракта.

2. Усовершенствована методика автоматизированного контроля плотности дислокаций в подложках арсенида галлия. Установлено, что лучшие результаты выявления дислокаций достигаются при использова-

нии травителя на основе щавелевой кислоты. Предложен план измерения позволяющий получить карту распределения дислокаций в подложках GaAs.

3. Разработана методика автоматизированного контроля отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия. Установлено что основные погрешности контроля вызываются погрешностью механической конструкции, погрешностью индуктивного датчика, погрешностью распознавания линии интерференции. Разработана методика калибровки системы контроля отклонения от плоскостности.

## Раздел 4

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ ПОДЛОЖЕК GaAs

### 4.1. Усовершенствование метода и разработка устройства неразрушающего контроля остаточных напряжений.

В последнее время метод фотоупругости для неразрушающего контроля внутренних напряжений в полупроводниковых материалах и структурах стал быстро развиваться в связи с развитием компьютерной технологии. Большие успехи были достигнуты в использовании методов цифровой обработки изображений для сбора данных в фотоупругости [133]. Использование таких методов как анализ полей интерференции, кластеризация интерференции, трассировка интерференции, фазовое смещение и методы Фурье преобразования, значительно способствовали автоматизации сбора данных. Всесторонний обзор разработки фотоупругости был дан К. Рэмешем [134].

Однако только в последнее время этот метод стал широко использоваться в связи с быстрым развитием компьютерных и цифровых технологий.

Приложения метода фотоупругости в части неразрушающего контроля полупроводниковых подложек проводится по трем направлениям:

1 – оценка остаточных напряжений в полупроводниковых слитках, то есть Si, GaAs, InP. Исследования фокусируются на изучении свойства двойного лучепреломления этих материалов и термоупругого остаточного напряжения во время и после окончания роста монокристаллов [135,136];

2 – изучение распределения остаточных напряжений, в подложке полупроводников вызванные технологическими этапами производства приборов, таких как оксидирование высокой температурой, ионная имплантация

ция, распространение легирующей примеси и т.д. Активно это направление развивала группа Zhao Shounan которая получила важные результаты [137];

3 – приложения метода фотоупругости для изучения распределения напряжения в полупроводниковых структурах, таких как тонкие пленки, гетероструктуры, и т.д. [138].

Для измерения уровня остаточных напряжений в подложках арсенида галлия нами была выбрана схема кругового поляриметра.

Такая схема была реализована нами в поляриметре «Полярон – 1» [139] (см. рис. 4.1).

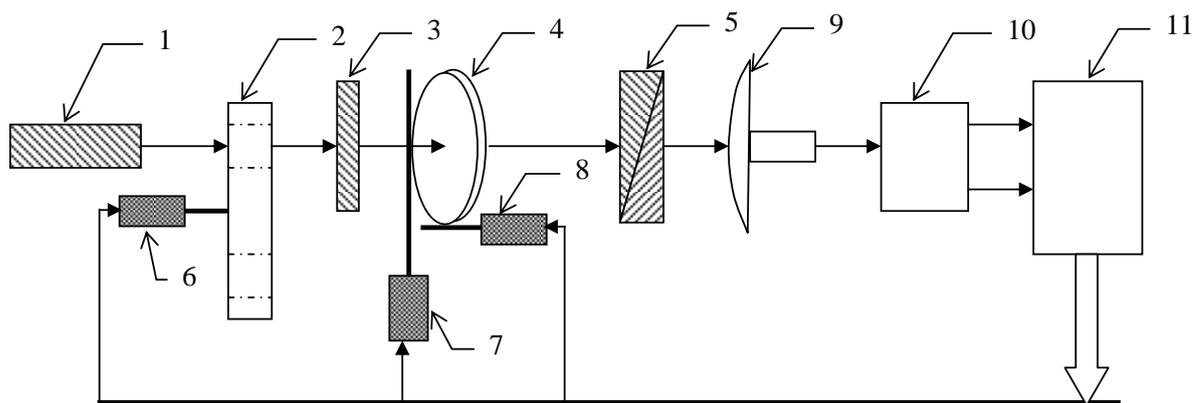


Рисунок 4.1 – Поляриметр «Полярон – 1».

В отличие от классической схемы в данный поляриметр добавлен модулятор, представляющий собой вращающийся диск с симметрично расположенными по радиусу диска отверстиями. Такое решение позволило исключить погрешности, вызванные тепловыми фоновыми помехами. Для перемещения измеряемой подложки арсенида галлия, использовался двухкоординатный сканатор, который позволяет перемещать измеряемую подложку по осям  $x$  и  $y$ .

Структурная схема поляриметра «Полярон – 1» приведена на рисун-

ке 4.2.



1 – лазер газовый ЛГ-79-1; 2 – механический модулятор; 3 – поляризатор с четвертьволновой пластиной; 4 – измеряемая подложка; 5 – анализатор с четвертьволновой пластиной; 6 – электрический привод модулятора; 7 – электрический привод сканатора по оси  $y$ ; 8 – электрический привод сканатора по оси  $x$ ; 9 – приемник ИК излучения; 10 – электронный блок сопряжения с ЭВМ; 11 – ЭВМ.

Рисунок 4.2 – Структурная схема поляриметра «Полярон – 1»

С помощью устройства «Полярон – 1» были получены графики распределения внутренних напряжений в пластине GaAs.

На рисунке 4.3 изображен график распределения остаточных напряжений в подложке GaAs диаметром 51 мм по одной линии сканирования.

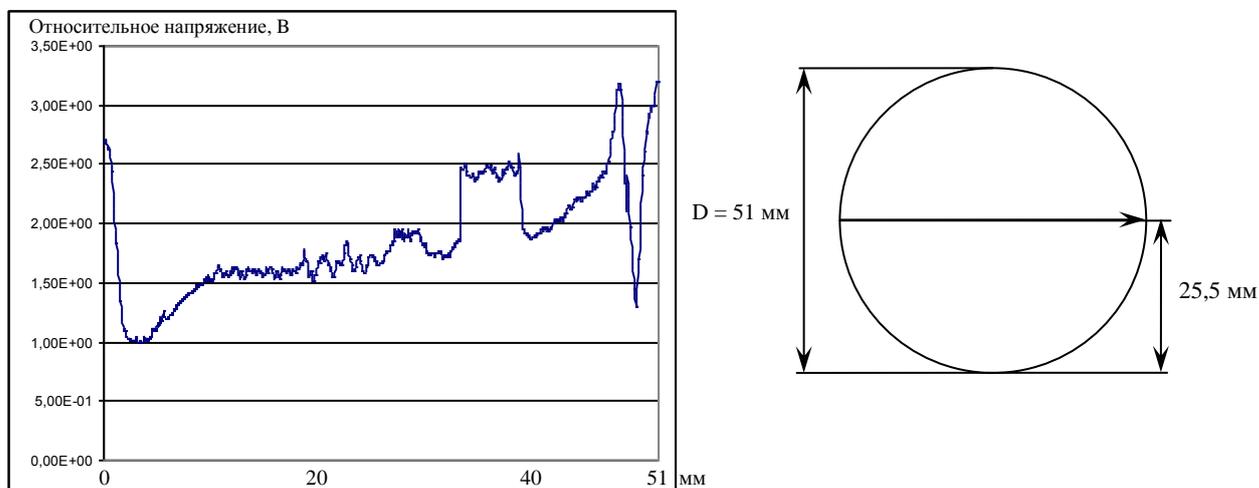


Рисунок 4.3 – График распределения напряжений в пластине GaAs.

В среде LabVIEW была разработана программа, позволяющая на основании данных, которые мы получили, строить трехмерный график распределения остаточных напряжений в пластинах полупроводников. Лицевая панель интерфейса оператора представлена на рисунке 4.4.

Результаты измерения отображаются в виде трехмерного графика, ось  $x$  – количество измерений на одну линию сканирования, ось  $y$  – число линий сканирования, а ось  $z$  при помощи цветовой шкалы отображает измеренное относительное напряжение. На графике видно цветовую градацию от фиолетового цвета к красному. Фиолетовый цвет соответствует наименьшему напряжению, а красный – наибольшему.

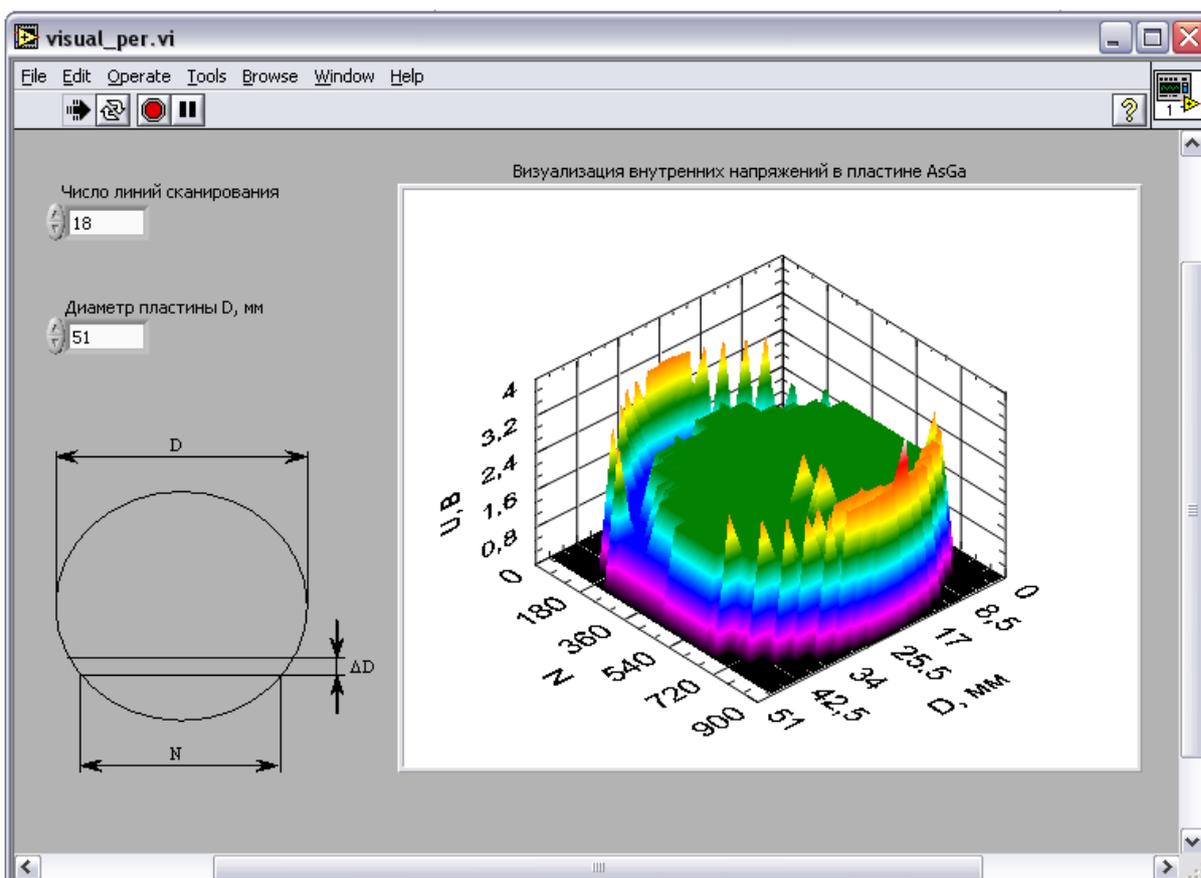
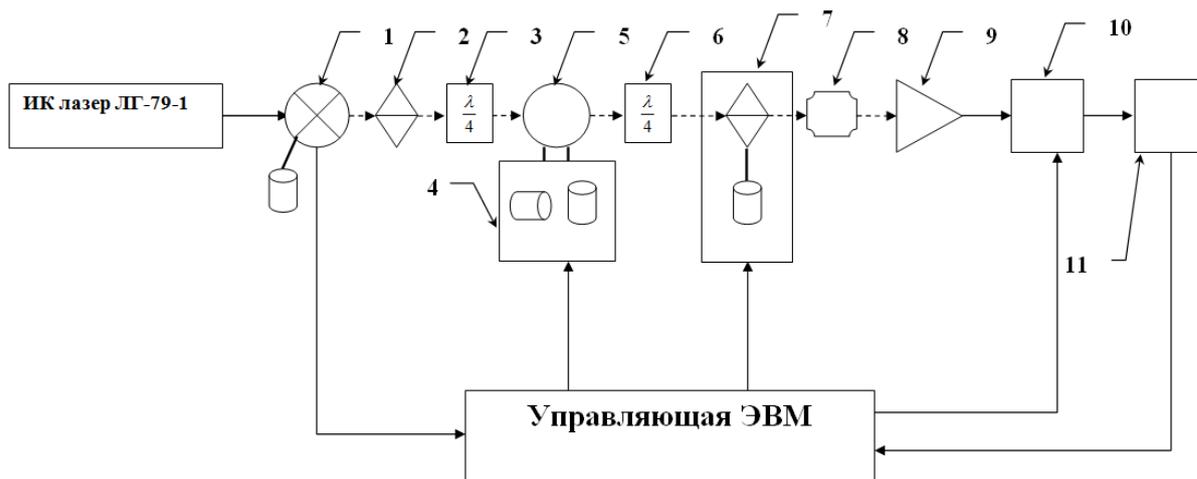


Рисунок 4.4 – Интерфейс программы «Полярон – 1».

Необходимость автоматизации измерений остаточных напряжений привела к использованию схемы поляриметра с вращающимся анализатором.

ром [140], структурная схема которого приведена на рисунке 4.5.



ИК лазер ЛГ-79-1 – лазер газовый одномодовый, длина волны 3,39 мкм, мощность 12 мВт, диаметр пучка – 2 мм; 1 – модулятор с частотой модуляции 1 кГц; 2 – поляризатор; 3 – четвертьволновая пластина; 4 – сканатор для перемещения пластины по осям X и Y; 5 – исследуемый образец (подложка арсенида галлия); 6 – четвертьволновая пластина; 7 – вращающийся анализатор; 8 – приемник (фоторезистор PbSe с активным элементом 2x2 мм); 9 – усилитель; 10 – синхронный детектор; 11 – интегрирующий АЦП 24 разряда.

Рисунок 4.5 – Структурная схема лазерного поляриметра «Полярон-2»:

Анализатор вращается с определенной угловой скоростью и преобразует степень эллиптичности ИК излучения в постоянную и переменную составляющие интенсивности луча. По соотношению интенсивностей этих составляющих определяются остаточные напряжения в подложке.

Для данной схемы можно записать следующие соотношения:

Интенсивность выходящего света равна:

$$I = 2a^2 \sin^2 \frac{\pi d}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (4.1)$$

Условие гашения выражается равенством:

$$\alpha=2n\pi, \quad (4.2)$$

где  $n$  – целое число. Интенсивность света максимальна тогда, когда:

$$\alpha=(2n+1)\pi. \quad (4.3)$$

Напряжение, снимаемое с фотоприемника, пропорционально интенсивности света после вращающегося анализатора:

$$U=U_0+U_0 \sin (2\omega mt) \cdot \sin (2\alpha), \quad (4.4)$$

где  $U_0$  - постоянная составляющая, пропорциональная средней интенсивности света,  $\omega$  – круговая частота,  $m$  – число отверстий модулятор.

Переменная составляющая, снимаемая с фотоприемника, равна:

$$U_{\sim}=U_0 \sin(2\omega mt) \cdot \sin(2\alpha). \quad (4.5)$$

Напряжения  $U_0$  и  $U_{\sim}$  выделяются с помощью фильтров и детектируются

$$U_{\delta 0} = K_{\delta 1} U_0, \quad (4.6)$$

$$U_{\delta \sim} = K_{\delta 2} U_0 \sin 2\alpha. \quad (4.7)$$

Так как  $n_1-n_2=C(\sigma_1-\sigma_2)$ , а параметр  $\alpha$  можно определить в соответствии с выражением:

$$\alpha = \frac{2\pi C(\sigma_1 - \sigma_2) d}{\lambda},$$

то

$$\frac{U_{\delta\sim}}{U_{\delta 0}} = \sin \alpha = S \frac{2\pi Cd}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (4.8)$$

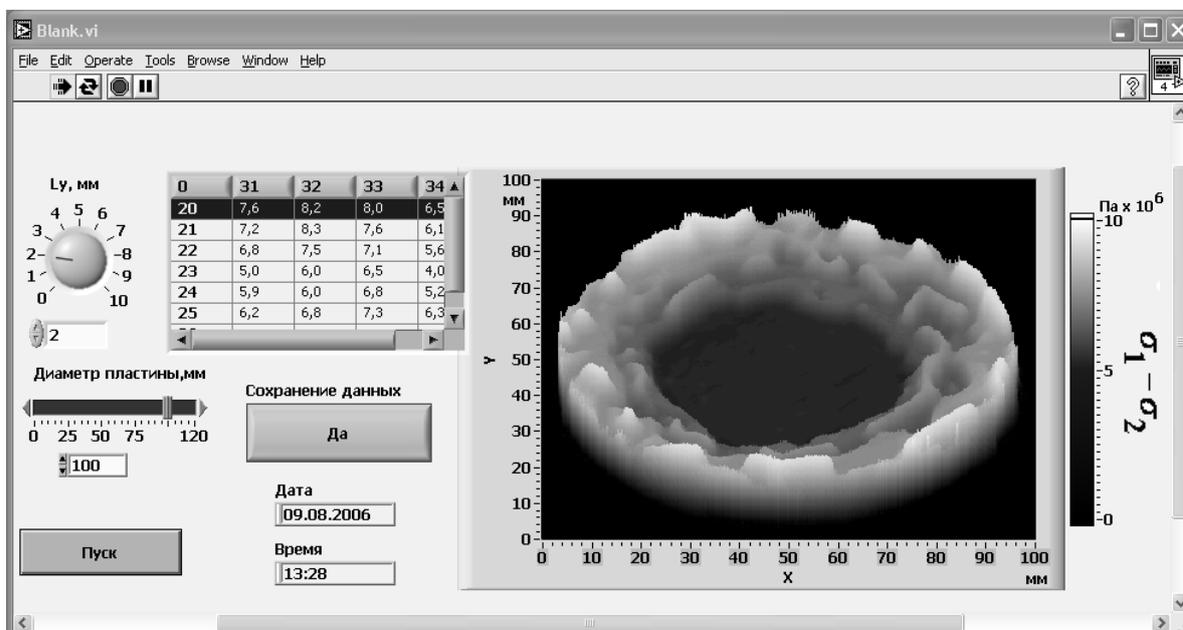
Откуда

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda_{arc} \sin \frac{U_{\delta\sim}}{U_{\delta 0}}}{2\pi Cd}. \quad (4.9)$$

Автоматизированный комплекс показан на рисунке 4.6.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Автоматизированный комплекс «Полярон – 2»: а – общий вид комплекса; б – программный интерфейс комплекса.

Как показал опыт работы с автоматизированным комплексом, он обладает не достаточной точность измерения для тонких (менее 800 мкм) подложек арсенида галлия.

Измерение уровня остаточных напряжений для таких толщин требует усовершенствования метода измерения, модернизации аппаратуры с целью увеличения чувствительности измерительного тракта, разработки нового программного обеспечения, включающего в себя цифровую обработку.

Данные соображения были учтены в устройстве измерения остаточных напряжений «Полярон – 4» [141].

С учетом выше рассмотренных ограничений (см. главу 3), и для повышения чувствительности измерения тонких пластин арсенида галлия, предложена структурная схема комплекса для автоматизации измерения подложек арсенида галлия, которая показана на рисунке 4.7.

Структурная схема включает в себя инфракрасный газовый одномодовый лазер ЛГ-79-3 с длиной волны 3,39 мкм, мощностью излучения 12 мВт, диаметром пучка – 2 мм, для повышения чувствительности приемного тракта в схему введен механический модулятор (1) с частотой модуляции 3 кГц, модулятор оснащен высокостабильным приводом (3) с ПИД регулятором (4).

Для определения сдвига фазы  $\delta$  в схему введен синхронный детектор СД (5). Схема содержит вращающийся поляризатор (4) и анализатор (10), которые управляются синхронизаторами вращения СВ (8,11) с точностью определения угла поворота  $0,05^{\circ}$  и частотой вращения 1 об/сек. После четвертьволновой пластины (6) поляризация становится эллиптической и поступает на измеряемую подложку GaAs (9), укрепленную в сканаторе (7). Сканатор осуществляет перемещение подложки по оси  $x$  и  $y$ , для измерения остаточных напряжений по всей поверхности подложки. Для умень-

шения темнового тока приемник ИК излучения выполнен на базе фоторезистора PbSe (12) с активным элементом 2x2 мм и термостатированием при температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (13). Сигнал с приемника через усилитель (14) поступает на полосовой фильтр (16) с частотой 3 кГц и через АЦП (17) поступает в ЭВМ. Для выделения сдвига фазы сигнала служит фазовый детектор (15).

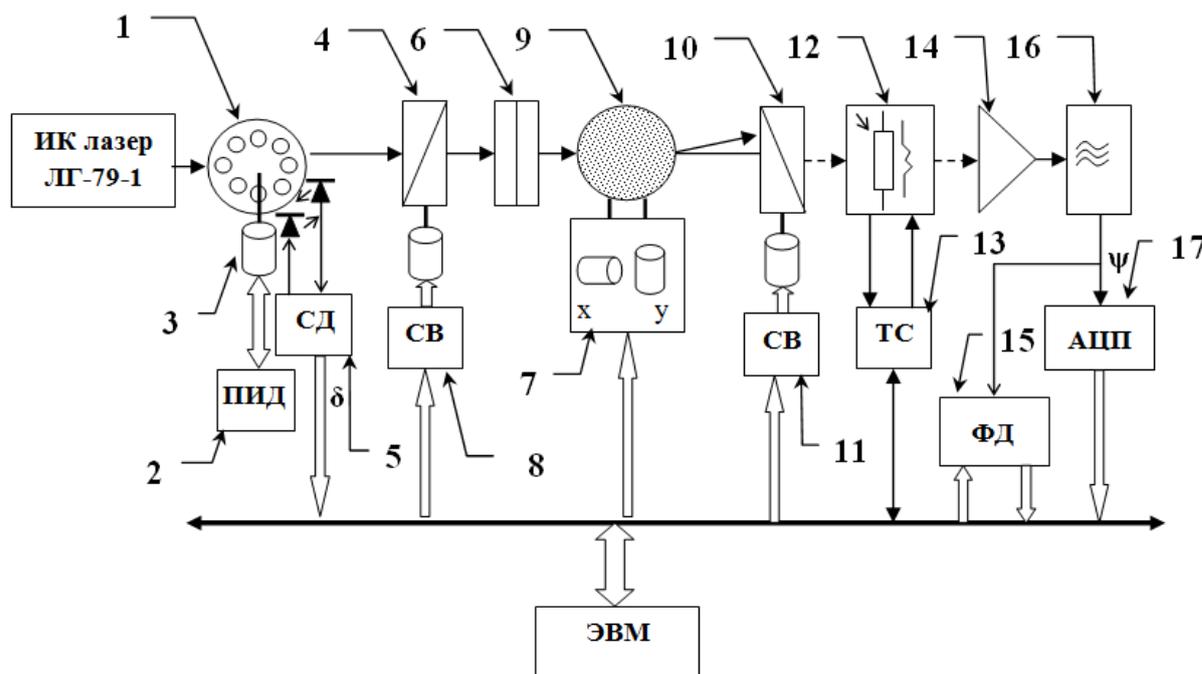


Рисунок 4.7 – Структурная схема устройства измерения остаточных напряжений «Полярон – 4»

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что в основе структурной схемы устройства неразрушающего контроля остаточных напряжений должен лежать круговой поляризатор с вращающимся анализатором и термостатированным приемным ИК трактом.

Исходя из структурной схемы, основными элементами поляриметра, требующими разработки или модернизации являются приемный тракт, механический модулятор и сканатор.

Приемный тракт является основным элементом поляриметра, поэтому к его параметрам предъявляются повышенные требования. Учитывая

выбранную длину волны лазера, приемник должен иметь максимум спектральной характеристики на такой длине волны.



Рисунок 4.8 – Устройство измерения остаточных напряжений «Полярон – 4».

Как показано в разделе 3.1. для решения задачи повышения чувствительности приемного тракта в соответствии с предложенным методом измерения остаточных напряжений необходимо применение высокочувствительного фотоприемника. Там же предлагается частичное решение этой задачи путем введения математической обработки принятого сигнала.

Рассмотрим повышения чувствительности приемного тракта путем аппаратных решений.

Для применения в автоматизированном комплексе, в качестве фотоприемника был выбран фоторезистор на основе халькогенидов свинца (PbS). Данные приборы представляют наибольший интерес для создания приемных трактов поляриметров. Фоторезисторы работают при температуре  $195\text{ }^{\circ}\text{K}$  и используют термоэлектрическое охлаждение (ТЭО). При этом обеспечивается достаточно высокая удельная обнаружительная способность и отношение сигнал/шум. Преимуществами ТЭО является срав-

нительная простота выполнения, низкое энергопотребление, малые масса и габариты. При рабочей температуре 195 °К для фоторезисторов и фотодиодов на основе PbS длина волны максимума спектральной чувствительности составляет 2,3 ... 4 мкм, темновое сопротивление 0,1 ... 10 МОм, постоянная времени  $10^3 \dots 10^4$  мкс. Удельное разрешение этих фотоприемников  $D^* = 10^{10} \text{ ВТ}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$  [142].

На основе анализа данных фоторезисторов и фоторезисторных модулей был выбран фоторезистор **УФР02**, на основе PbSe – фоторезистора, имеющий в своем составе охлаждение двухкаскадным термоэлектрическим охладителем и встроенный датчик температуры. Конструктивно фоторезистор выполнен в герметичном исполнении, в металлостеклянном корпусе с плоским лейкосапфировым входным окном.

Структурная схема приемного тракта устройства «Полярон – 4» приведена на рис. 4.9

Как известно, повышение чувствительности предусилителя возможно путем минимизации отношения сигнал-шум (ОСШ).

Рассмотрим входные каскады приемного тракта, которые включают в себя датчик ИК излучения, предусилитель и схему смещения датчика, с точки зрения обеспечения максимального значения ОСШ.

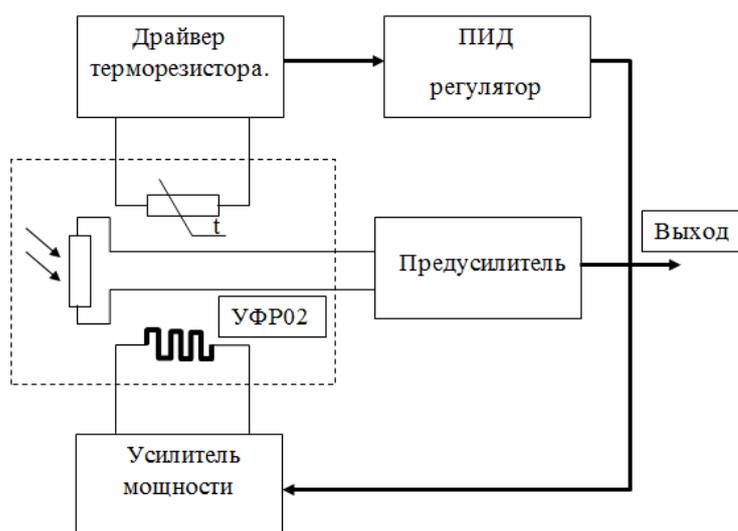


Рисунок 4.9 – Структурная схема приемного тракта устройства «Полярон – 4».

Предусилители, используемые для фотоприемников могут быть классифицированы по трем категориям: предусилители с низким импедансом, предусилители с высоким импедансом и трансимпедансные предусилители (управляемый ток усилитель напряжения).

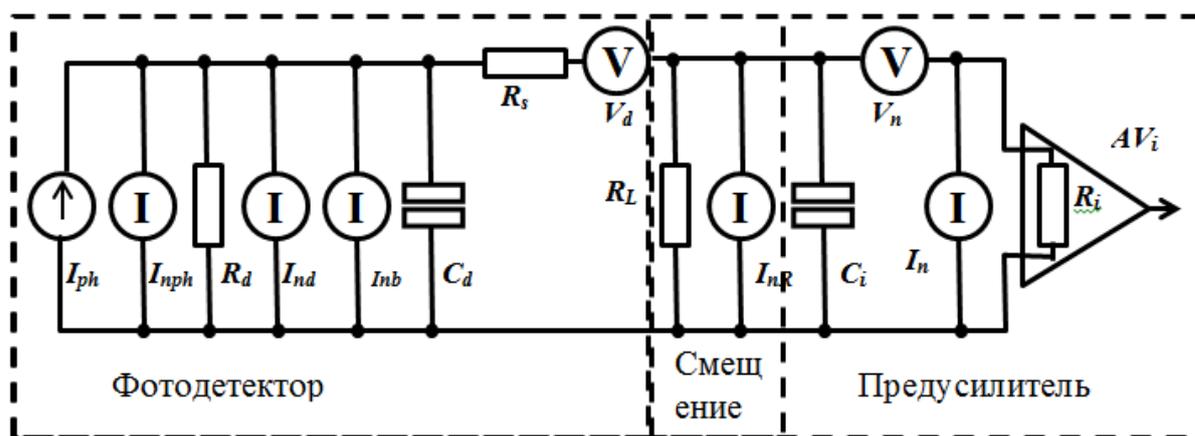
Предусилитель с низким импедансом обладает широкой пропускной способностью и обеспечивает высокой чувствительностью. Предусилители высокого импеданса хорошо выполняют задачу уменьшения влияния источников шума, но данные обладают большим значением входной временной постоянной RC цепочки. Трансимпедансный предусилитель в значительной степени уменьшает недостатки предусилителя высокого импеданса. Преимущества трансимпедансного предусилителя заключаются в следующем:

- более широкий динамический диапазон по сравнению с усилителем высокого импеданса;
- не требуется коррекции;
- низкая входная временная постоянная;
- характеристики передачи усилителя фактически определяются его трансимпедансом, который является резистором обратной связи.

Общая модель шума входного предусилителя и датчика ИК может быть построена в соответствии с рис. 4.10.

Уровень шума входного каскада предусилителя является функцией исходного импеданса показанного детектором. Таким образом, необходимо согласовать детектор с соответствующим входным каскадом [143].

Можно видеть, что эквивалентная схема ИК датчика состоит из источника сигнала, сопротивления и емкости датчика, а так же из источников шума датчика и шума фона [144].



$I_{ph}$  – фототок датчика;  $I_{nd}$  ток шума датчика;  $I_{nb}$  – ток фоновой помехи;  $C_d$ ,  $R_d$  емкость и сопротивление датчика соответственно;  $V_d$  - напряжение шума последовательно включенного резистора;  $I_n$ ,  $V_n$  - ток шума и напряжение шума предусилителя соответственно;  $R_i$ ,  $C_i$  – входное сопротивление и входная емкость предусилителя соответственно,  $AV_i$  - усиление предусилителя.

Рисунок. 4.10 – Эквивалентная модель входного каскада фотоприемника при воздействии помехи.

Как известно уровень шума предусилителя определяется двумя источниками, напряжением и током. Базируясь на анализе моделей шума приемников с фотодатчиками, можно записать следующее выражение для отношения ОСШ [145]:

$$\frac{S}{N} = \frac{I_{ph}^2}{\frac{kI\beta^\alpha}{f\beta} + 4q^2\eta(\Phi_s + \Phi_b)Ag^2\Delta f + 4q^2G_{th}g^2\Delta f + \frac{4kT_d\Delta f}{R_d} + \frac{4kT_L\Delta f}{R_L} + I_a^2} \quad (4.10)$$

где  $I_{ph}$  – фототок;  $k$  – постоянная Больцмана;  $I_b$  – смещение датчика ИК излучения;  $f$  – частота;  $q$  – электронный заряд;  $\eta$  – квантовая эффективность;  $\Phi_s$  – мощность излучения полезного сигнала;  $\Phi_b$  – мощность излучения фона;  $A$  – область датчика;  $g$  – усиление датчика;  $\Delta f$  – полоса ча-

стоты пропускания;  $G_{th}$  – тепловая проводимость;  $T_d$  – температура датчика;  $R_d$  – сопротивление датчика;  $T_L$  – температура сопротивления нагрузки;  $R_L$  – сопротивление нагрузки; и  $I_a$  – шум предусилителя.

Числитель выражения (4.10) представляет собой квадрат выходного сигнала датчика, а знаменатель является эквивалентом общего входного шума.

Первый член знаменателя уравнения (4.10) определяет шум типа 1/f, вторая группа элементов знаменателя – шум вызываемый колебаниями излучения полезного сигнала и фона, третье слагаемое – шум, вызванный температурными эффектами в полупроводнике, и следующие члены представляют тепловой шум сопротивления датчика, нагрузки и предусилителя [146].

Шум типа 1/f определяется технологией производства датчика и током смещения. Второй элемент может быть уменьшен сужением поля зрения датчика и применением оптических фильтров. Снижение температуры датчика вызывает уменьшение влияния третьего и четвертого фактора. Влияние этих факторов можно уменьшить конструктивными решениями, например сужением полосы пропускания, использованием светофильтров и охлаждением датчика. Минимизацию тепловых помех можно обеспечить увеличением входного сопротивления нагрузки. Следовательно, необходимо оптимизировать шумы предусилителя.

Рассмотрим факторы, влияющие на отношение ОСШ для фотоприемников выполнив анализ выражения (4.11).

$$\frac{S}{N} = \frac{M^2(V,T)I_{ph}^2}{2q\Delta f \left[ (I_{ph} + I_b) M^2(V,T) F(M(V,T)) \right]} + \frac{1}{\left[ (I_s + I_{db} M^2(V,T) F(M(V,T))) \times 2 \frac{T-300}{10} \right] + \frac{4kT\Delta f}{R_L} F_n} \quad (4.11)$$

где  $M$  является коэффициентом усиления,  $F$  – коэффициент усиления датчика,  $V$  – напряжение смещения датчика, и  $F_n$  – шумовой фактор предусилителя.

Числитель содержит среднее значение квадрата фототока, умноженное на коэффициент усиления в квадрате датчика. Знаменатель представляет полный входной шум приемника. Первый элемент знаменателя в выражении (4.11) описывает флуктуационный шум, второй – тепловые помехи сопротивления нагрузки и шум предусилителя. Флуктуационный шум зависит от фототока датчика, тока вызванного фоновым сигналом, от поверхностных и объемных компонентов темнового тока.

Шум в электрических системах, как правило, является функцией частоты. Для высоких частот эквивалент шума токового сигнала  $I_{total}$ , определяется как:

$$I_{total}^2 = I_{nph}^2 + I_{nd}^2 + I_{nb}^2 + V_{nd}^2 \omega^2 C_d^2 + I_n^2 + \frac{4kT\Delta f}{R_L} + V_n^2 \omega^2 (C_d^2 + C_i^2)^2 \quad (4.12)$$

где  $V_{nd}$  – напряжение шума сопротивления детектора.

Входная емкость предусилителя  $C_j$ , в том случае, если она находится в непосредственной близости от детектора, образует генератор шума,  $V_n$ . Минимизацию этого эффекта можно получить, сгруппировав емкость предусилителя с  $C_d$ . В этом случае  $V_n$  можно рассматривать как генератор белого шума.

Перепишав уравнение (4.12) получаем:

$$I_{total}^2 = I_{nph}^2 + I_{nd}^2 + I_{nb}^2 + V_{nd}^2 \omega^2 C_d^2 + I_n^2 + \frac{4kT\Delta f}{R_L} + V_n^2 \omega^2 (C_d^2 + C_i^2)^2 \quad (4.13)$$

Первое слагаемое описывает шум, вызванный внешними элементами, а второе слагаемое влияние частоты.

Не смотря на то, что сам конденсатор не является источником шума,

напряжение шума детектора,  $V_n$ , и напряжение шума предусилителя,  $V_n$  увеличивается на значение  $C_d$  и  $C_d + C_i$  соответственно, как видно из второго слагаемого в выражении (4.13). Анализ этого выражения показывает, что для согласования усилителя с детектором, необходимо минимизировать сумму:  $I_n + V_n^2 \omega^2 (C_d + C_i)^2$ .

Чувствительность оптического приемника удобно анализировать с точки зрения шумовой эквивалентной мощности (noise-equivalent power NEP) которая является мерой чувствительности оптических приемников. Она определяется как такой уровень полезного сигнала, вызывающего реакцию приемника, равный уровню шума. Можно записать что:

$$NEP = (I_{ntotal}^2)^{\frac{1}{2}} \frac{h\nu}{\eta q} [q] \quad (4.14)$$

Как правило, в технических условиях значение NEP указывается для датчика, в тоже время при подключении предусилителя общее значение шума приемного тракта будет определяться суммой источников шума усилителя, соединенного с помехами датчика, особенно его входной емкости сопротивления (см. рис. 4.10).

Таким образом, чтобы иметь достаточное отношение сигнал-шум предусилителя, необходимо выполнить следующие требования:

а) сопротивление в цепи обратной связи должно быть, по крайней мере, в несколько раз выше чем сопротивление детектора, то есть, порядка сотни МΩ;

б) ток шума используемого предусилителя должен быть ниже чем темный ток датчика, входные токи должны иметь порядок мкА.

Использование в качестве датчика PbSe – фоторезистора имеет свои особенности. Фоторезистор обычно включают во входную цепь предусилителя последовательно с источником опорного напряжения постоянного тока. К источнику тока предъявляются повышенные требования в части стабильности. Датчик ИК в этом случае представляет собой нагрузочный резистор для источника опорного напряжения, и полезный сигнал на фото-

резисторе проявляется как падение напряжения.

Учитывая большое сопротивление датчика, сигнал который с него снимается необходимо усилить, обеспечив при этом максимальное соотношение сигнал/шум, чего можно достичь, выполнив следующие рекомендации:

- сопротивление резистора нагрузки должно быть равно темновому сопротивлению фоторезистора;
- полоса пропускания регистрирующего электронного тракта должна быть минимально необходимой;
- напряжение шума регистрирующего электронного тракта должно быть меньше напряжения шума фоторезистора не менее чем в три раза;
- фотоприемник и электронный тракт должны быть максимально защищены от воздействия оптических и электрических помех.

Типовая схема входного каскада предусилителя приведена на рисунке 4.11, предпочтительна для применения в аппаратуре с двухполярным питанием.

Наличие разделительного конденсатора позволяет исключить влияние температурного дрейфа ФР и постоянного фонового излучения на режим работы усилителя.

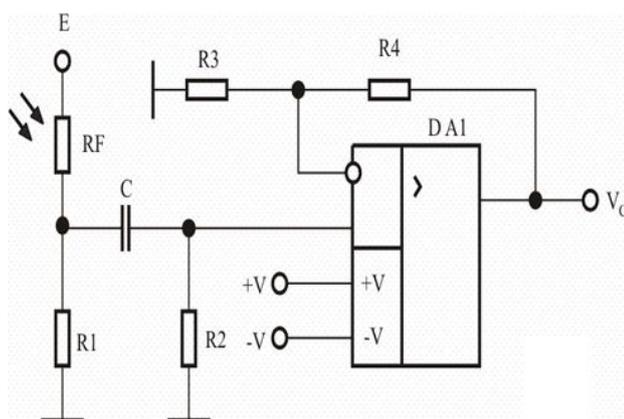


Рисунок 4.11 – Входной каскад предусилителя с фоторезистором в качестве датчика ИК излучения.

В этом случае напряжение полезного сигнала на выходе ОУ опреде-

ляется следующим выражением:

$$V_c = \Phi \cdot S_v (R_4/R_3 + 1), \quad (4.15)$$

где  $\Phi$  – фототок излучения,  $S_v$  – вольтовая чувствительность.

Тогда частота среза входного фильтра определится как:

$$f_c = 2\pi R_2 \cdot C. \quad (4.16)$$

Для проверки принятых решений в части построения предусилителя устройства измерения остаточных напряжений «Полярон – 4» была разработана компьютерная модель и выполнен анализ шумов схемы. Модель представлена на рис. 4.12.

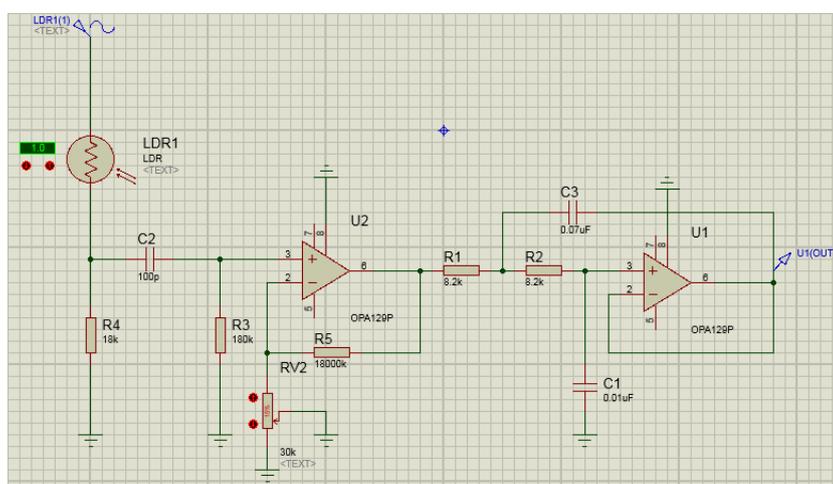


Рисунок 4.12 – Компьютерная модель предусилителя автоматизированного комплекса «Полярон – 4» в программе «Proteus».

Анализ уровня шума представлен на рисунке 4.13.

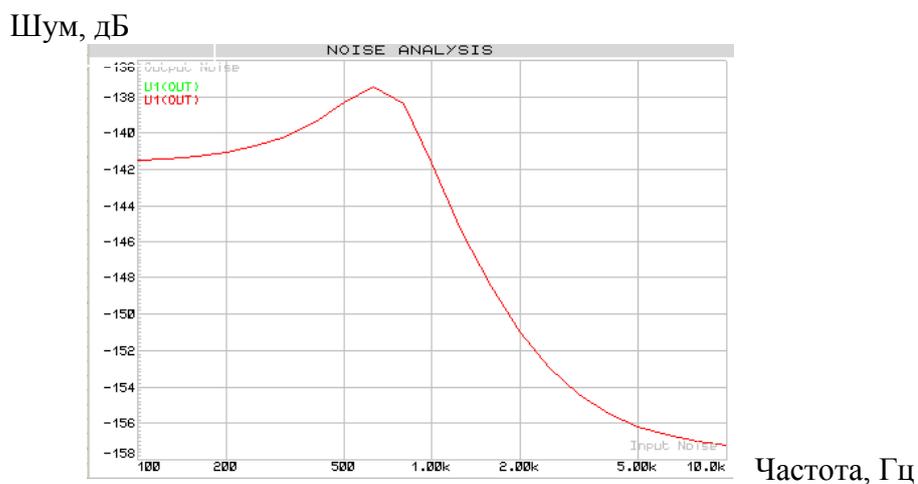


Рисунок 4.13 – Зависимость уровня шума предусилителя от частоты при температуре 30 °С.

Можно видеть, что при частоте модуляции датчика напряжение шума, вызванное влиянием комплектующих элементов, минимально.

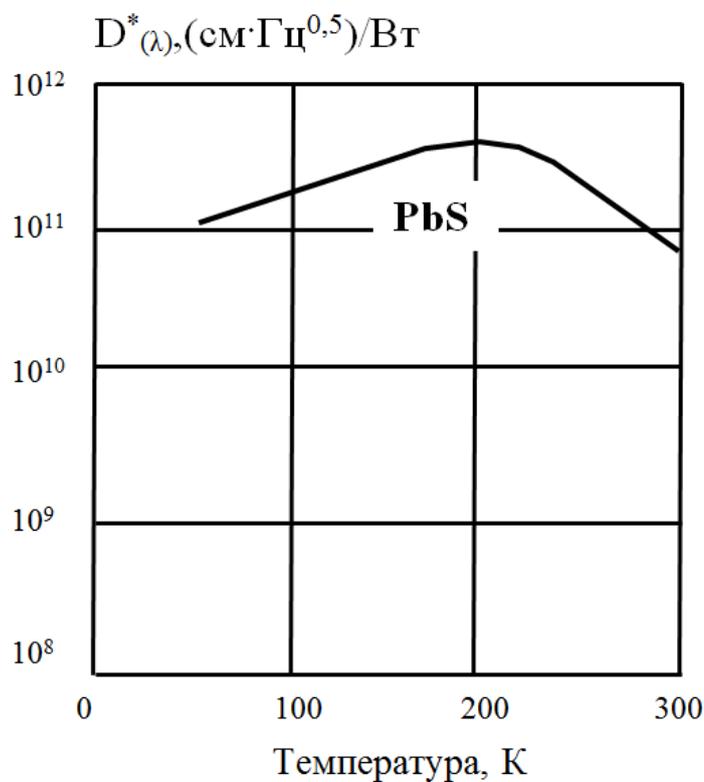


Рисунок 4.14 – Зависимость чувствительности фоторезистора на базе PbS от температуры.

Для улучшения чувствительности фоторезистора и снижения уровня тепловых шумов необходимо использовать термостабилизацию. Как можно видеть из графика зависимости чувствительности фоторезистора от температуры [147] максимум чувствительности приходится на диапазон 150 – 250 К (рис. 4.14).

В приемном тракте автоматизированного комплекса «Полярон – 4» используется термостабилизационный контур с температурой стабилизации минус 25 °С. Регулировка и стабилизация температуры осуществляется микроконтроллерным ПИД регулятором.

Приемный тракт показан на рисунке 4.15.

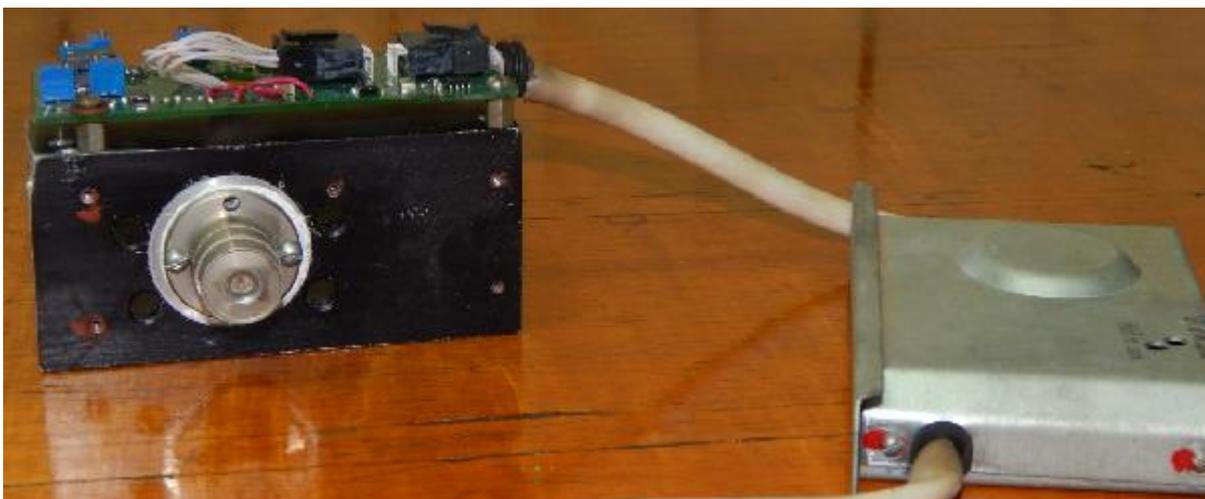


Рисунок 4.15 – Приемный тракт автоматизированного комплекса «Полярон – 4».

В соответствии с вышеизложенными требованиями к приёмному тракту в части того что фотоприемник и электронный тракт должны быть максимально защищены от воздействия оптических и электрических помех, в систему введен механический модулятор на базе двигателя постоянного тока и модулирующего диска.

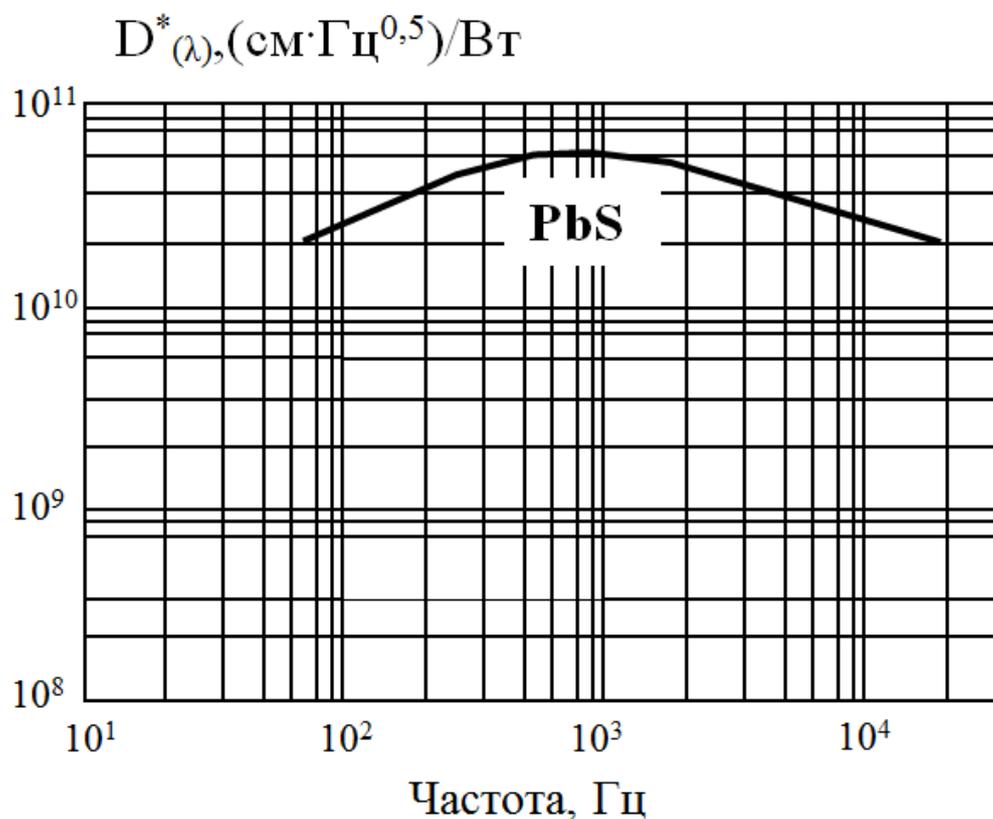
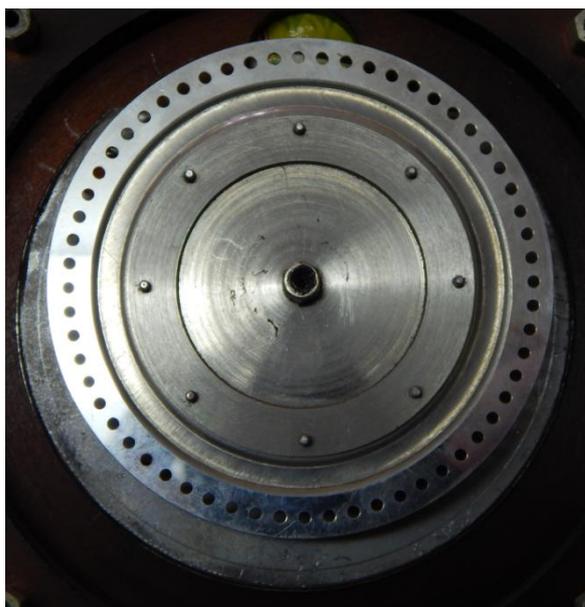


Рисунок 4.16 – Частотная характеристика фоторезистора на базе PbS.



а)



б)

Рисунок 4.17 – Механический модулятор автоматизированного комплекса «Полярон – 4»: а – модуляционный диск, б – механический модулятор с системой стабилизации оборотов.

В результате анализа частотной характеристики фоторезистора было принято решение использовать частоту модуляции равной 3000 Гц. Учитывая диаметр пучка лазера ЛГ-79-1 равный 2 мм, и приемлемый диаметр диска, число модуляционных отверстий равно 60.

В этом случае для обеспечения частоты модуляции равной 3000 Гц частота вращения вала электродвигателя должна составлять 3000 об/мин. Такая частота позволяет использовать электродвигатель с небольшим коэффициентом детонации. Модуляционный диск и механический модулятор с системой стабилизации оборотов показан на рис. 4.17.

Для позиционирования подложки относительно лазера необходимо использовать устройство механического перемещения подложки, так называемый сканатор.

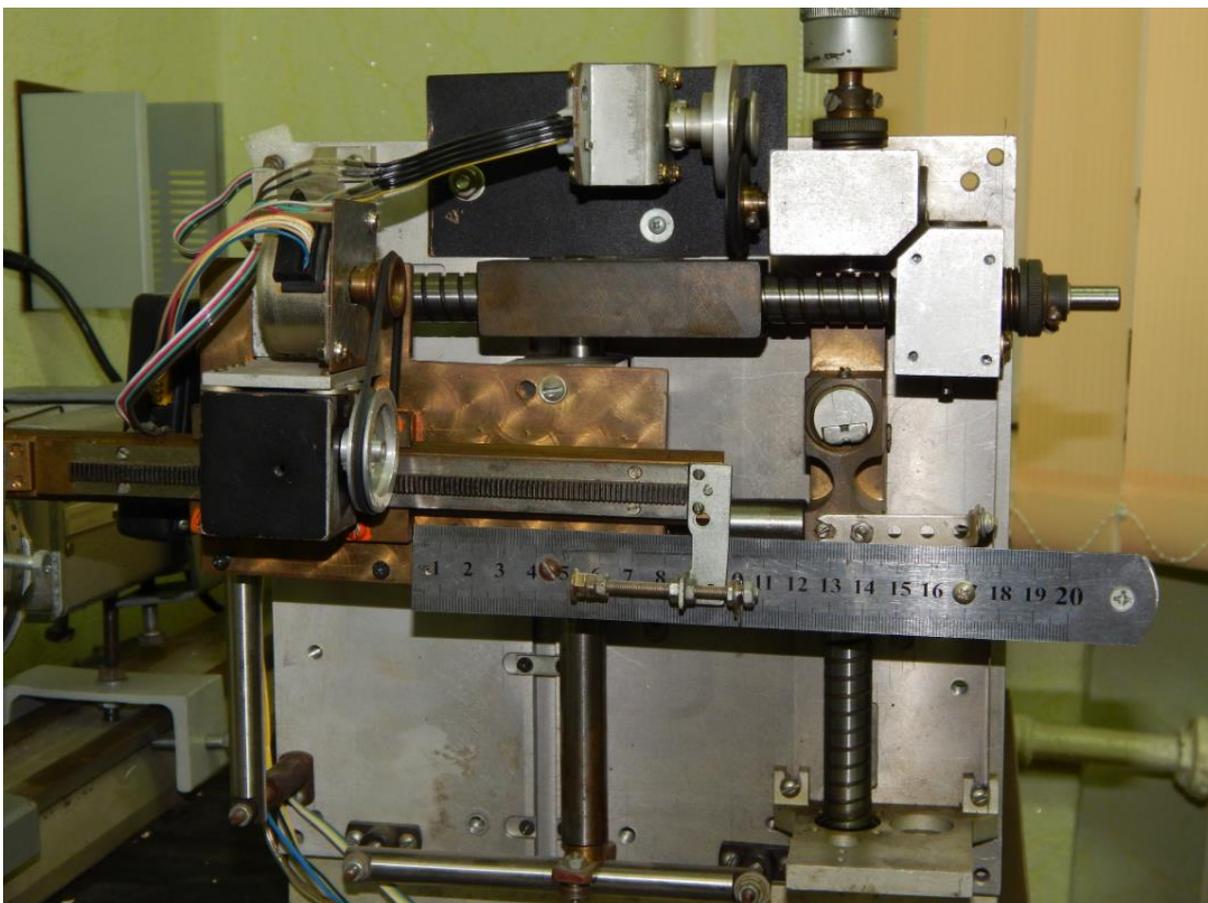


Рисунок 4.18 – Сканатор автоматизированного комплекса «Полярон – 4»: а – модуляционный диск; б – механический модулятор с системой стабилизации оборотов.

В качестве сканатора автоматизированный комплекс «Полярон – 4» содержит устройство 2-х координатного перемещения, общий вид которого показан на рис. 4.18. Перемещение подложки осуществляется двумя шаговыми двигателями.

Алгоритм управления двигателями должен обеспечивать сканирование подложки по двум осям. Он должен решать две задачи: 1 – обеспечивать экспрессное измерение остаточных напряжений в цеховых условиях для выбраковки подложек или проверки контрольных подложек партии при приемных испытаниях; 2 – позволять производить подробные измерения уровня остаточных напряжений с заданной дискретностью для обнаружения условий выращивания, которые вызывают недопустимые напряжения.

В качестве сканатора автоматизированный комплекс «Полярон – 4» содержит устройство 2-х координатного перемещения, общий вид которого показан на рис. 4.18. Перемещение подложки осуществляется двумя шаговыми двигателями.

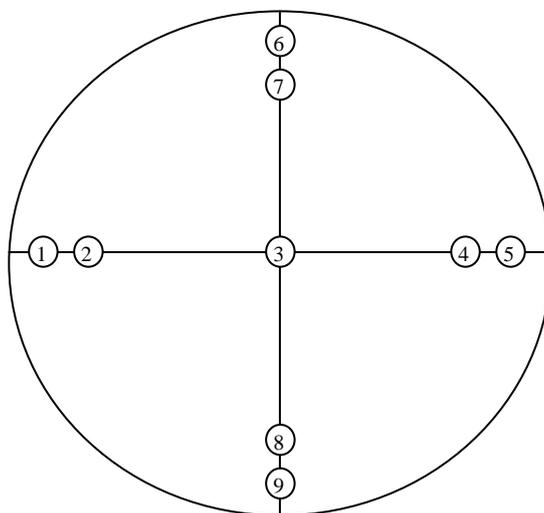


Рисунок 4.19 – Модель измерения в соответствии с ГОСТ 19658-81.

В качестве сканатора автоматизированный комплекс «Полярон – 4» содержит устройство 2-х координатного перемещения, общий вид которого показан на рис. 4.18. Перемещение подложки осуществляется двумя шаговыми двигателями.

Рассмотрим существующие модели сканирования, которые лежат в основе алгоритмов управления перемещением подложки.

Модель измерения в соответствии с ГОСТ 19658-81 (рис.4.19) использует 9 полей измерения.

В стандарте SEMI M83-1112 используется более подробная модель измерения, которая приведена на рис. 4.20.

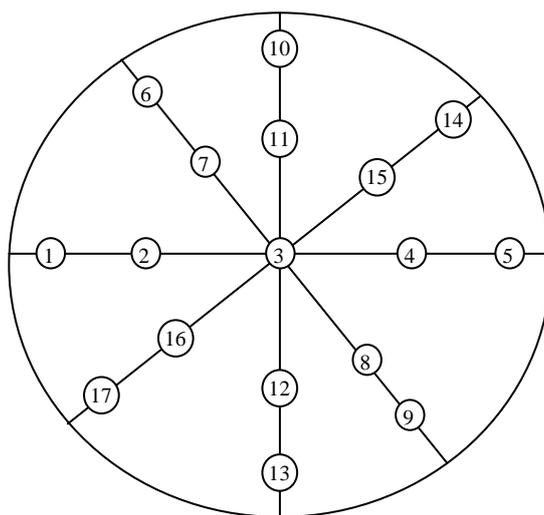


Рисунок 4.20 – Модель измерения в соответствии с SEMI M83-1112.

Обе эти модели подходят для цеховых экспрессных измерений. В работе [140] нами была разработана полная модель измерения, которая позволяет производить детальные измерения уровня остаточных напряжений (см. рис. 4.21). Данная модель была применена в автоматизированной установке «Полярон-2».

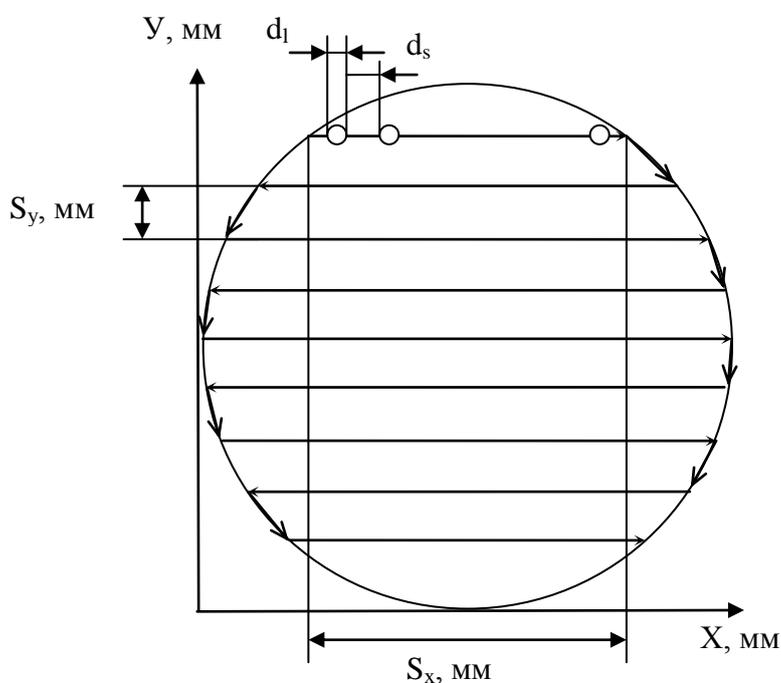


Рисунок 4.21 – Модель измерения предложенная в работе [140].

Сущность этой модели состоит в линейном проходе по оси X с про-

ведением измерений в фиксированных точках, и последующем перемещении по оси У. Число проходов по оси Х определится как:

$$N = \left\lceil \frac{D_n}{S_y} \right\rceil, \quad (4.15)$$

где  $D_n$  – диаметр измеряемой подложки, который может составлять 120, 100, 72 и 40мм,  $S_y$  – шаг по оси У, значение которого определяется требуемой подробностью измерений.

Время измерения подложки при использовании данной модели определится следующим выражением:

$$t_n = \sum_{i=k}^N \left[ \left( \frac{V_x}{S_{xi}} + t_{meas} \times \frac{S_{xi}}{d_l + d_s} \right) + \frac{V_y}{S_y} \right], \quad (4.16)$$

где  $V_x$ ,  $V_y$  – скорости сканирования по осям Х и У соответственно,  $S_{xi}$  – длина текущей хорды по которой проходит сканирование,  $S_y$  – перемещение по оси У после очередного прохода,  $t_{meas}$  – время измерения остаточного напряжения в одной точке,  $d_l$  – диаметр точки измерения, в нашем случае 2 мм,  $d_s$  – расстояние между точками измерения.

Как показал практический опыт эксплуатации автоматизированной установки «Полярон-4» данная модель обладает рядом недостатков, а в частности:

- сложность позиционирования в начальную точку после очередного прохода по оси Х;
- большое время измерения вызванное необходимостью ожидания перемещения по оси У;
- необходимостью пересчета результатов измерения для четных проходов по оси Х.

Для устранения этих недостатков автором была предложена модель сканирования в основе, которой лежит Архимедова спираль.

Как известно, уравнение Архимедовой спирали в полярных координатах записывается в виде:

$$\rho = k * \varphi \quad (4.17)$$

где  $k$  — смещение точки  $m$  по лучу  $\rho$ , при повороте на угол равный одному радиану.

Для перехода от полярной системы координат к декартовой системе можно воспользоваться следующими выражениями:

$$x = \rho * \cos(\varphi); \quad y = \rho * \sin(\varphi). \quad (4.18)$$

Возведя выражение (4.17) в квадрат и используя равенство  $x^2 + y^2 = \rho^2$  получим:

$$\rho^2 = k^2 * \varphi^2; \quad (4.19)$$

$$x^2 + y^2 = k^2 * \varphi^2. \quad (4.20)$$

Выполнив несложные преобразования можно записать:

$$y^2 = k^2 * \varphi^2 - x^2,$$

$$y^2 = k^2 * \varphi^2 - \rho^2 \cos^2(\varphi),$$

$$y = \sqrt{k^2 \varphi^2 - \rho^2 \cos^2(\varphi)},$$

$$y = \sqrt{k^2 \varphi^2 - k^2 \varphi^2 \cos^2(\varphi)},$$

$$y = \sqrt{k^2 \varphi^2 (1 - \cos^2(\varphi))},$$

$$y = \sqrt{k^2 \varphi^2 \sin^2(\varphi)},$$

$$y = |k \varphi \sin(\varphi)|$$

Аналогичным образом можно определить координату  $x$

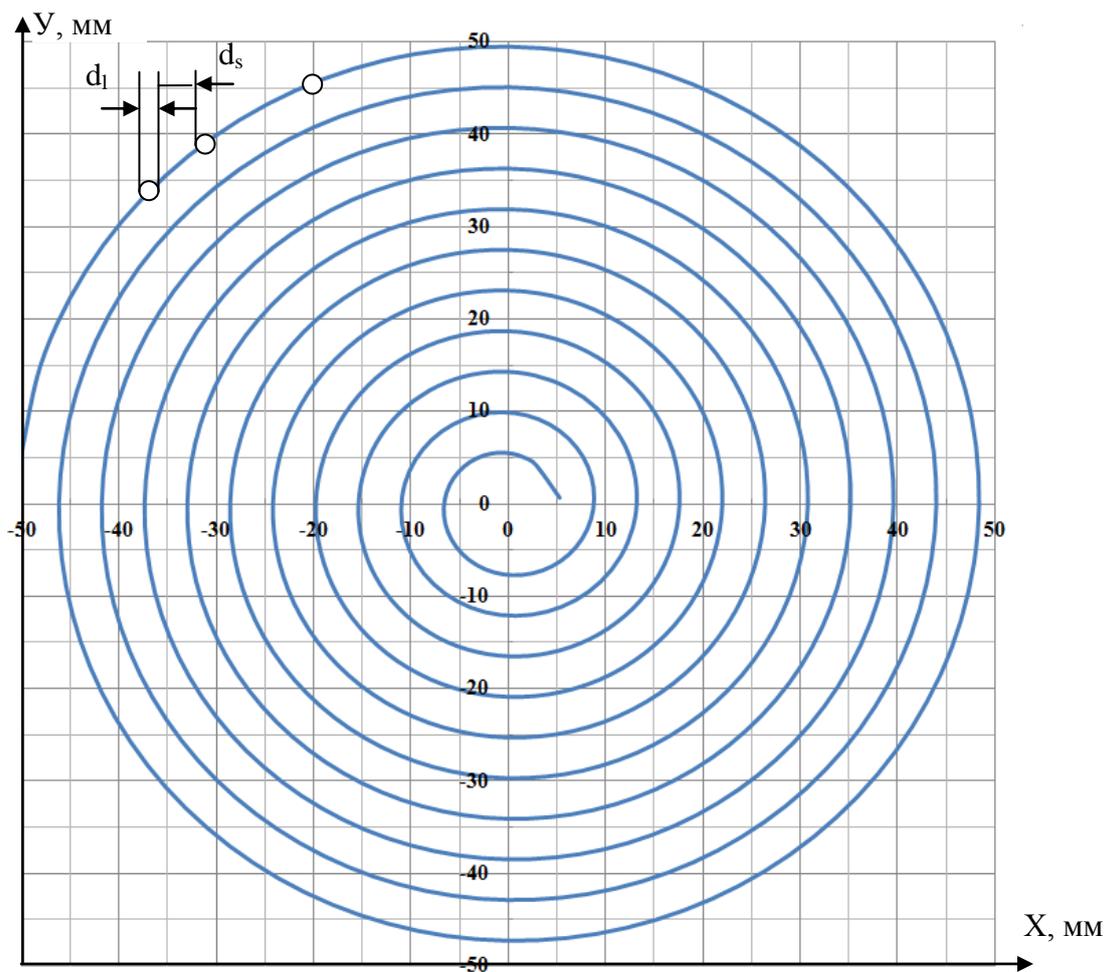


Рисунок 4.22 – Траектория сканирования подложки GaAs полной модели измерения при измерении остаточных напряжений автоматизированным комплексом «Полярон – 4».

Таким образом, структурная схема устройства механического перемещения подложки должна включать в себя два привода перемещения по оси X и Y, управляющий контроллер и датчики положения подложки. Данная структурная схема представлена на рисунке 4.23.

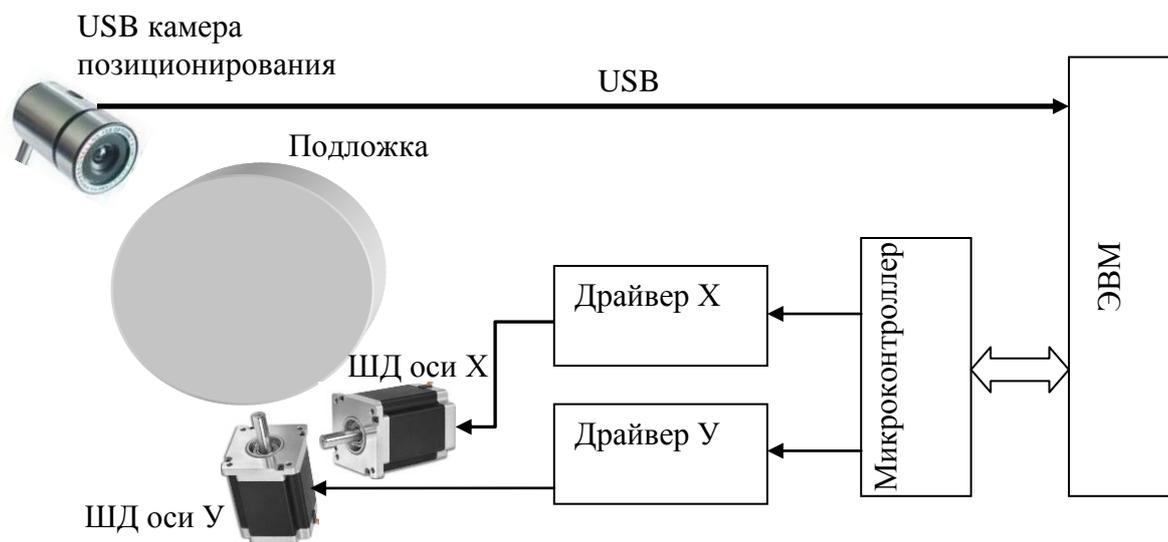


Рисунок 4.23 – Структурная схема устройства механического перемещения подложки устройства «Полярон – 4».

С учетом того, что к точности определения положения подложки не выдвигаются повышенные требования (достаточная погрешность  $\pm 1$  мм.) и с целью упрощения устройства было принято решение в качестве датчика положения подложки использовать USB камеру.

Схема реализует возможность производить измерение с использованием любой модели сканирования требуемой в конкретных условиях.

Как показано в разделе 3 данной работы, измерение остаточного напряжения рассчитывается по выражению (3.13) с учетом (3.9 ÷ 3.12).

Таким образом, можно определить функции, которые возлагаются на программное обеспечение устройства «Полярон – 4»:

1. Измерение синусоидальной и косинусоидальной составляющей входного сигнала согласно выражениям (3.9, 3.10).
2. Расчет значения остаточного напряжения по выражению (3.59).
3. Расчет новых координат и перемещение подложки в рассчитанное положение.
4. Формирование массива результатов измерения.
5. Графическое отображение распределения уровня остаточных

напряжений.

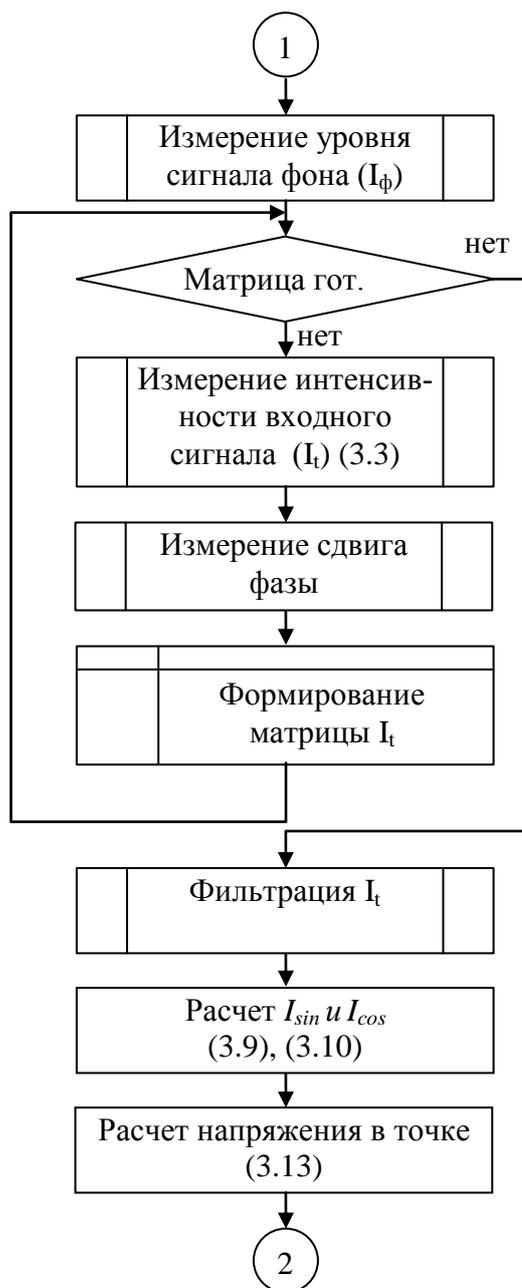


Рисунок 4. 24 – Алгоритм расчета остаточных напряжений.

Реализация модуля измерения синусоидальной и косинусоидальной составляющей входного сигнала требует обеспечения работы с входным аналогово-цифровым преобразователем, выполнения цифровой обработки входного сигнала и выполнения операции тарировки входного сигнала для исключения влияния внешнего ИК излучения. Алгоритм, реализующий модуль измерения представлен на рисунке 4.24.

Задачей, которую реализует модуль перемещения, является позиционирование измеряемой подложки в точку с рассчитанными координатами. При этом модуль должен обеспечивать перемещение по траектории в соответствии с выбранной моделью измерения, которые описаны выше. Соответственно алгоритм модуля перемещения может быть представлен в следующем виде:

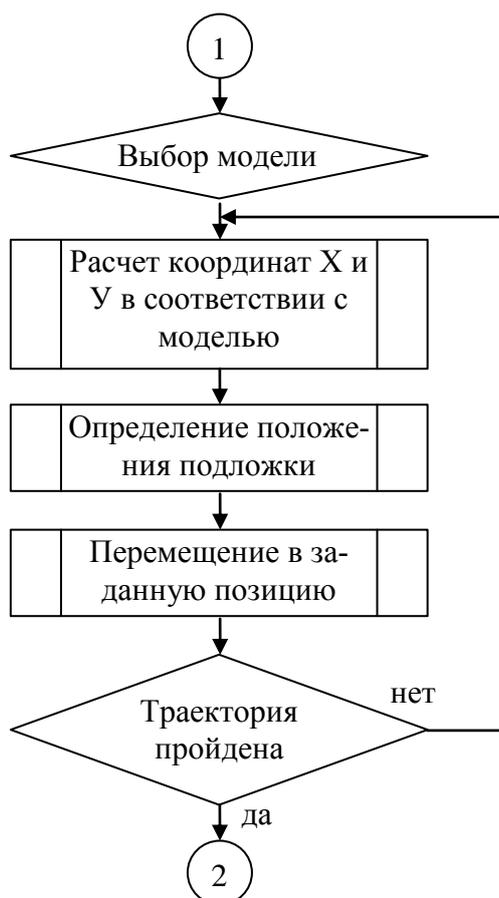


Рисунок 4. 25 – Алгоритм позиционирования подложки.

С учетом вышесказанного, в укрупненном виде общий алгоритм работы устройства «Полярон – 4» можно представить следующим образом:

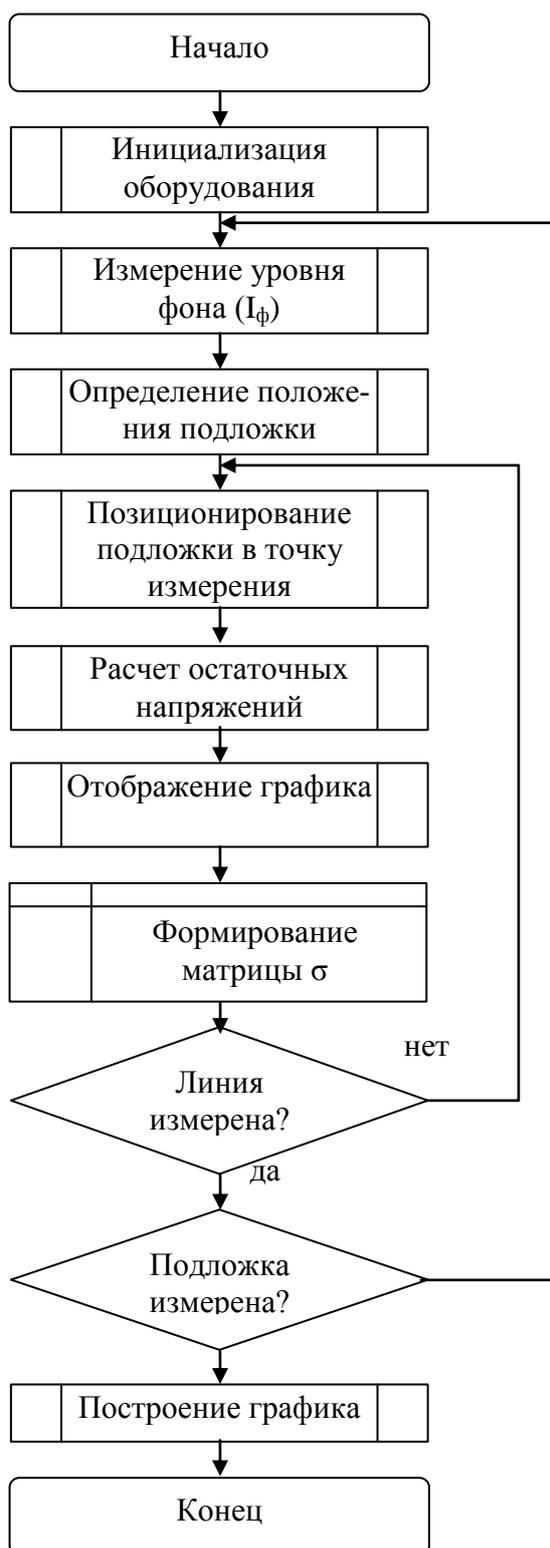


Рисунок 4.26 – Алгоритм работы устройства «Полярон – 4».

Интерфейс программы, которая реализует вышерассмотренные алгоритмы, должен обеспечивать возможность учета фоновой помехи, установки параметров фильтрации, установки параметров сканирования с вы-

бором модели сканирования, отображения данных. Разработанный автором интерфейс устройства «Полярон – 4» представлен на рисунке 4.27.

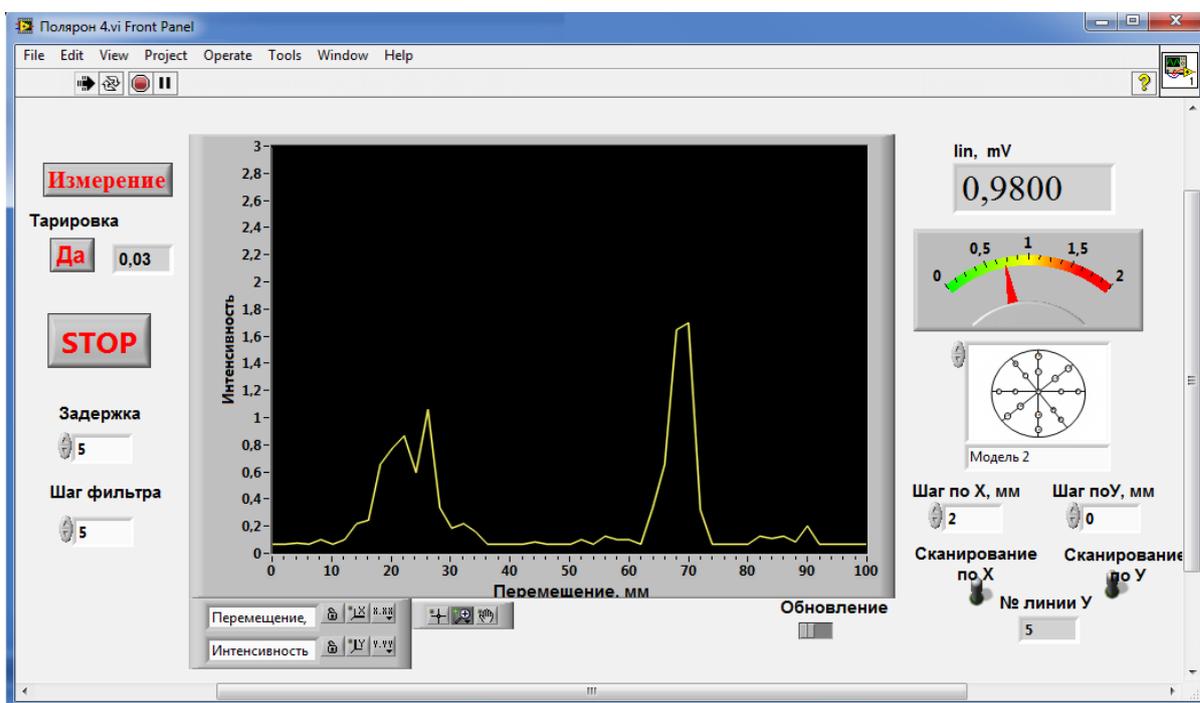


Рисунок 4.27 – Интерфейс программы устройства «Полярон – 4».

Средой программирования для программы устройства была выбрана LabView. Это позволило встроенными средствами среды решить вопросы ввода данных с аналого-цифрового преобразователя, ввода данных с фазового детектора, цифровой обработки полученного сигнала, используя встроенную библиотеку цифровых фильтров и графического отображения полученных данных.

Интерфейс позволяет управлять всеми режимами устройства и отображает принятую интенсивность ИК излучения. По завершению сканирования подложки формируется массив, содержащий рассчитанные значения в точках измерения.

Для графического отображения результатов измерения была разработана отдельная подпрограмма, выводящая данные в виде 3D графика, в виде цветовых полей и в виде изонапряжений. Данная подпрограмма может получать из архивных файлов и непосредственно в процессе измере-

ния.

Кроме отображения общей картины распределения остаточных напряжений, подпрограмма отображает линию сканирования в уровнях интенсивности.

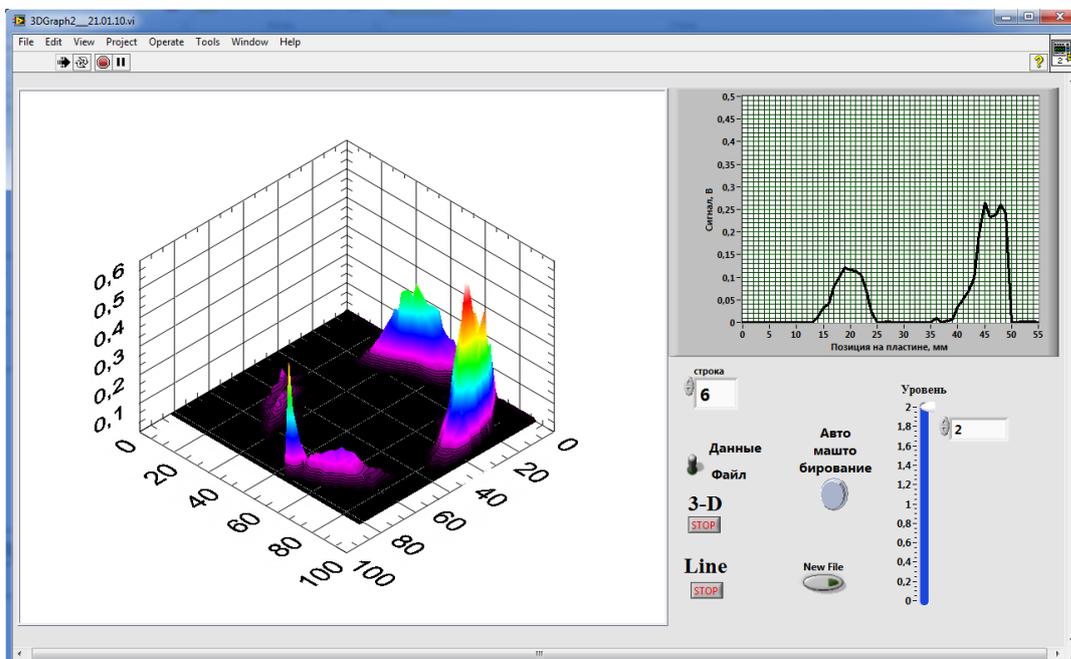


Рисунок 4.28 – Подпрограмма графического отображения уровня остаточных напряжений ( $\times 100$  МПа) в режиме 3 D.

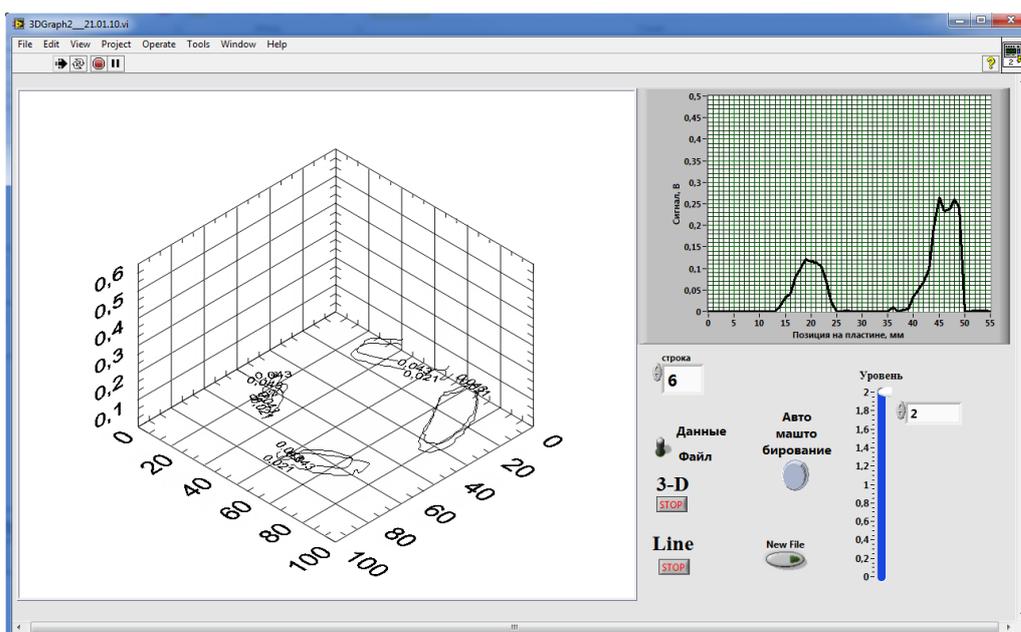


Рисунок 4.29 – Подпрограмма графического отображения уровня остаточных напряжений ( $\times 10$  МПа) в режиме изонапряжений.

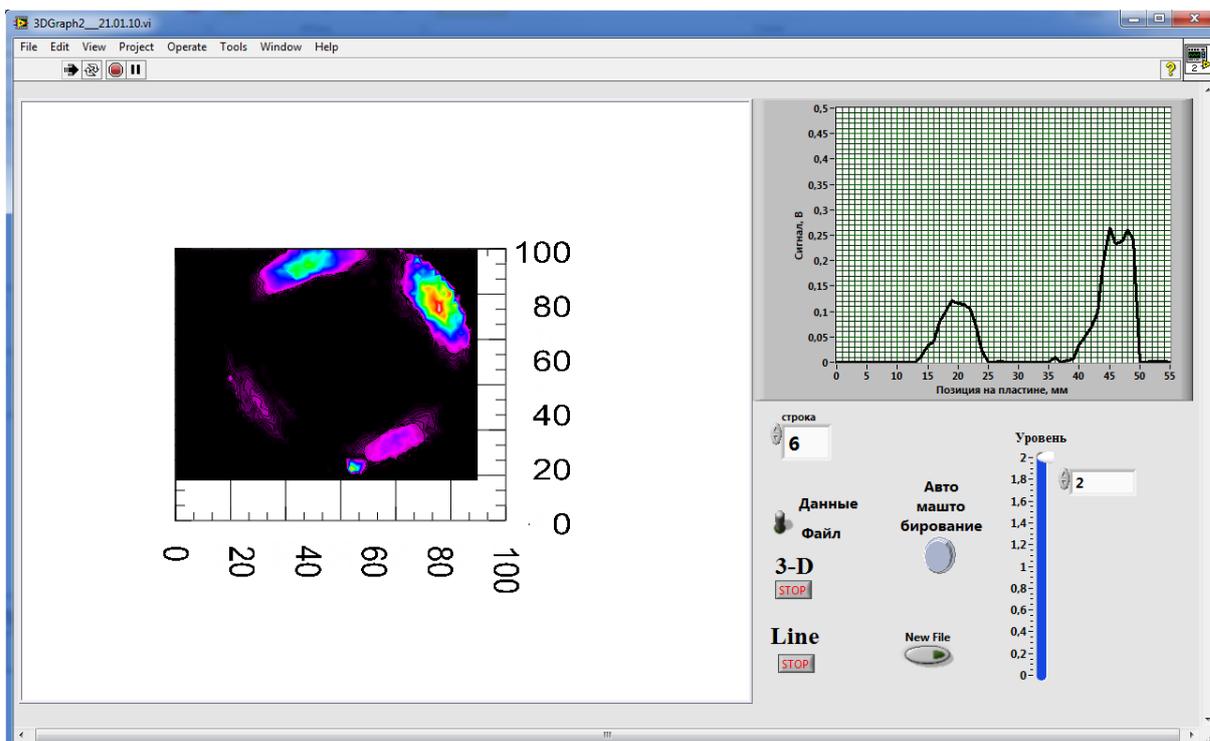


Рисунок 4.30 – Подпрограмма графического отображения уровня остаточных напряжений в виде цветных полей.

#### 4.2. Усовершенствование метода и разработка устройства неразрушающего контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs.

В настоящее время возрастают требования, предъявляемые к качеству полупроводниковых материалов и изделий, к уровню и стабильности их свойств.

Вопросы физики пластичности и прочности полупроводниковых материалов составляют один из фундаментальных разделов физического материаловедения и физики твердого тела. Закономерности пластической деформации представляют значительный теоретический и практический интерес. Пластическая деформация приводит к изменению формы полупроводниковых подложек, к изменению их структуры и соответственно свойств подложек GaAs. Задачи влияния деформации на изменение формы

и свойств часто решаются одновременно.

Отклонение от плоскостности полупроводниковых приборов может вызывать как положительные, так и отрицательные эффекты. Деформация в полупроводниках может вызываться преднамеренно, для получения новых или улучшения существующих свойств полупроводниковых приборов, так и проявляться как непреднамеренный процесс, приводящий к релаксации напряжений, вызванных градиентом температур или сил трения, разностью коэффициентов термического расширения и удельных объемов фаз и др.

В работе [147] показано, что пластическая деформация пластин во время высокотемпературной обработки возникает как следствие температурного градиента между краем и центром пластины. В работах [148–150] показано влияние дислокаций на величину механической прочности.

Отклонение от плоскостности подложки также приводит к искажению формы и размеров элементов топологии ИС и влияет на один из важных параметров – суммарное отклонение от параллельности и плоскостности.

Таким образом, можно утверждать, что отклонение от плоскостности подложек может усложнить технологические стадии, такие как фотолитография, диффузия, эпитаксия, и т.д., а также может изменить электрические характеристики готовых полупроводниковых устройств и микросхем.

Проблема определения величины деформации и отклонения от параллельности и плоскостности для полупроводниковых пластин и структур заключается в широком диапазоне значений отклонений от плоскостности, которые необходимо контролировать (от единиц до сотен микрон) при толщине пластин в несколько микрон, требованиями к бесконтактному и неразрушающему контролю.

В настоящее время существует достаточно много экспериментальных методов измерения отклонений от плоскостности в различных материалах [151–153]. К таким методам относятся тензометрические методы

измерения отклонения от плоскостности, методы электротензометрии, а также методы, основанные на оптических эффектах, такие как метод муаровых полос, метод оптически чувствительных покрытий, голографическая интерферометрия.

Для изучения поверхностей твердых тел существуют методики, применяемые в зависимости от поставленной задачи [154,155]. В работе [156] описана методика и устройство для неразрушающего контроля отклонения от плоскостности кремниевых структур с применением микросиловых компараторов. Однако существующие методы либо не обеспечивают требуемую точность измерения, либо являются контактными.

Как показано в работе [157] подложка деформируемая малыми усилиями, имеет плоскую форму и устойчивое равновесие, которые сохраняются до некоторого значения усилий. В том случае если приложенные к пластине усилия превышают критические значения, пластина переходит к новой устойчивой форме с искривленной поверхностью в виде изгиба, прогиба или с двумя радиусами кривизны в противоположном направлении (антикластический изгиб). Переход пластины в это состояние может произойти в результате воздействия минимальных усилий.

С учетом того что полупроводниковые материалы имеют кристаллическую структуру, величина изгиба непосредственно зависит от кристаллографической ориентации. Подробно эта зависимость рассмотрена в работе [158].

Можно сделать вывод, что разрабатываемый в данной работе метод должен позволять измерять отклонения от плоскостности полупроводниковых пластин и структур, имеющих практически все виды изгиба, включая антикластический изгиб, а также позволять измерять отклонение от плоскостности в различных кристаллографических направлениях.

Как показал выполненный нами анализ существующих методов и методик измерения отклонения от плоскостности различных материалов, для решения задачи бесконтактного измерения отклонения от плоскостно-

сти полупроводниковых пластин необходимо использовать оптические методы. Наиболее приемлемым методом является метод интерференционной микроскопии. В последние годы методы интерферометрии интенсивно развиваются для контроля микрорельефа и чистоты поверхностей полупроводниковых материалов [159]. Метод интерферометрии позволяет оценить размеры микроизгибов благодаря высокой чувствительности и точности интерференционных приборов.

Принцип интерференции света основан на сложении полей световых волн от двух или нескольких источников. Рассмотрим предлагаемую нами схему бесконтактного метода измерения отклонения от плоскостности [160], которая представлена на рисунке 4.31.

Как видно из схемы, разность хода  $\Delta S = S_2 - S_1$  между лучами, идущими от источников  $I_1$  и  $I_2$  в точку  $f_1$  с координатой  $x$  можно найти как

$$S_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2; \quad (4.21)$$

$$S_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2; \quad (4.22)$$

где  $d$  – расстояние между источниками света, а  $L$  – расстояние от источников освещения  $I_1$  и  $I_2$  до фокальной плоскости объектива  $O$ ,  $x$  – смещение места формирования интерференционной полосы от главной оси оптической системы, следовательно можно записать:

$$S_2^2 - S_1^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 = 2x \times d, \quad (4.23)$$

или

$$S_2^2 - S_1^2 = (S_2 + S_1) \times (S_2 - S_1)^2 = 2L \times \Delta S. \quad (4.24)$$

Тогда разность оптического хода лучей будет равняться

$$\Delta S = \frac{x \times d}{L}, \quad (4.25)$$

Перемещение объектива  $O$  (см. рис. 4.34) приводит к изменению соотношения  $l_1/l_2$ . В том случае если фокальная плоскость объектива совпа-

дает с плоскостью пластины, на ней будут наблюдаться интерференционные полосы в точке  $f_1$ .

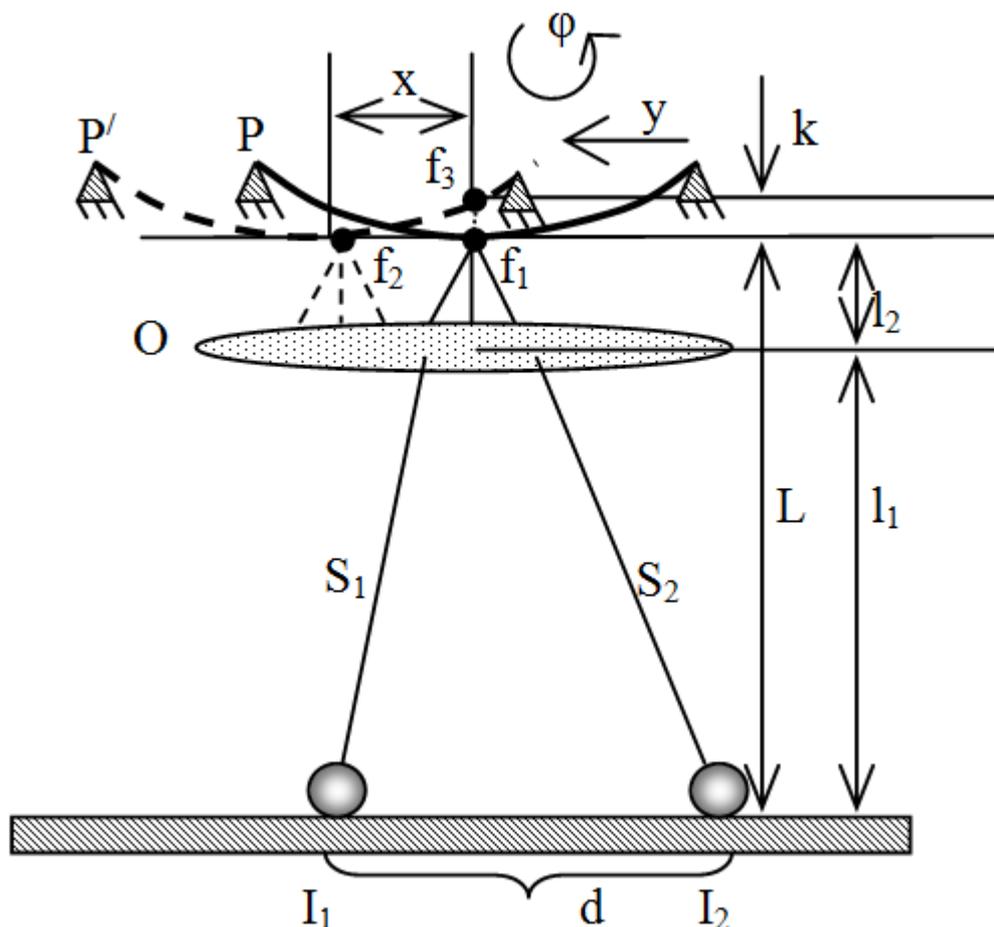


Рисунок 4.31 – Схема метода бесконтактного измерения отклонения от плоскостности полупроводниковых пластин и структур.

В том случае, если пластина имеет отклонение от плоскостности (см. рис. 4.34) в виде прогиба на величину  $k$  то перемещение пластины вдоль оптической системы в направлении  $y$  приведет к смещению фокуса объектива в точку  $f_2$  на расстояние  $x$ , и следовательно в соответствии с (4.25), интерференционная картина также будет смещаться. Изменение соотношения  $l_1/l_2$  вызванное перемещением объектива в вертикальном направлении приведет к перемещению фокуса в точку  $f_3$ , и как следствие к смещению интерференционной картинке в обратном направлении.

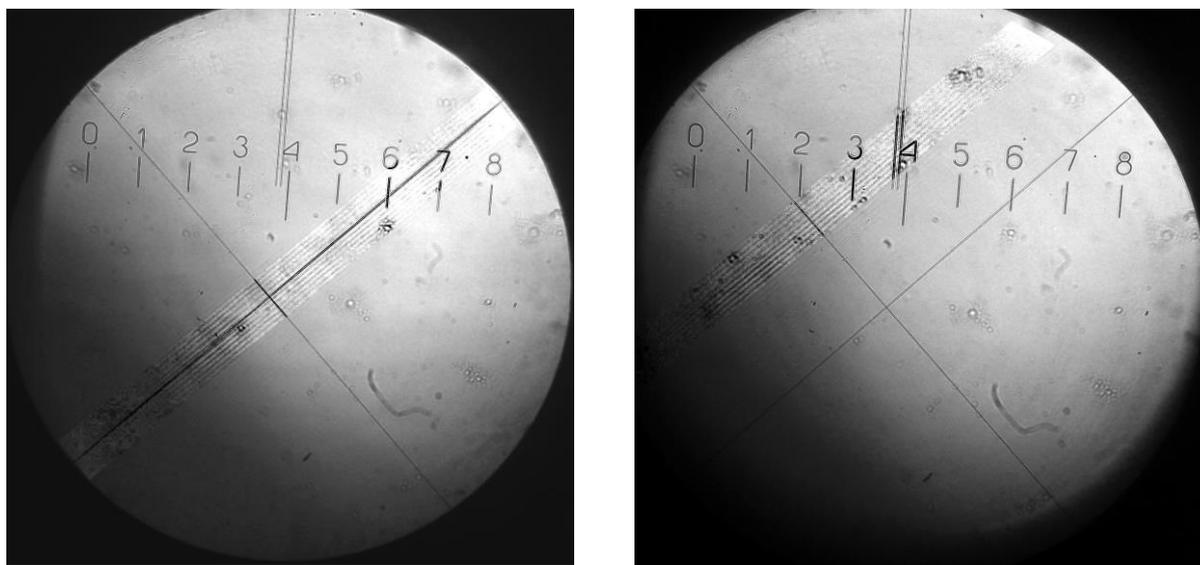
Величина перемещения объектива на величину  $k$  до совпадения интерференционной картинке с базовой, за которую выбирается точка с ну-

левой деформацией находящаяся вблизи опоры  $P$ , будет соответствовать величине отклонения от плоскостности пластины.

Разворот исследуемой пластины на угол  $\varphi$  позволяет провести измерения отклонения от плоскостности пластины в различных кристаллографических направлениях.

Для реализации предложенного метода нами было разработано устройство «АКИДП 1». В основе комплекса лежит микроинтерферометр Линника МИИ-4.

Микроинтерферометр МИИ-4 позволяет измерять высоты неровностей в пределах от 5 до 0.003 мкм.



а)

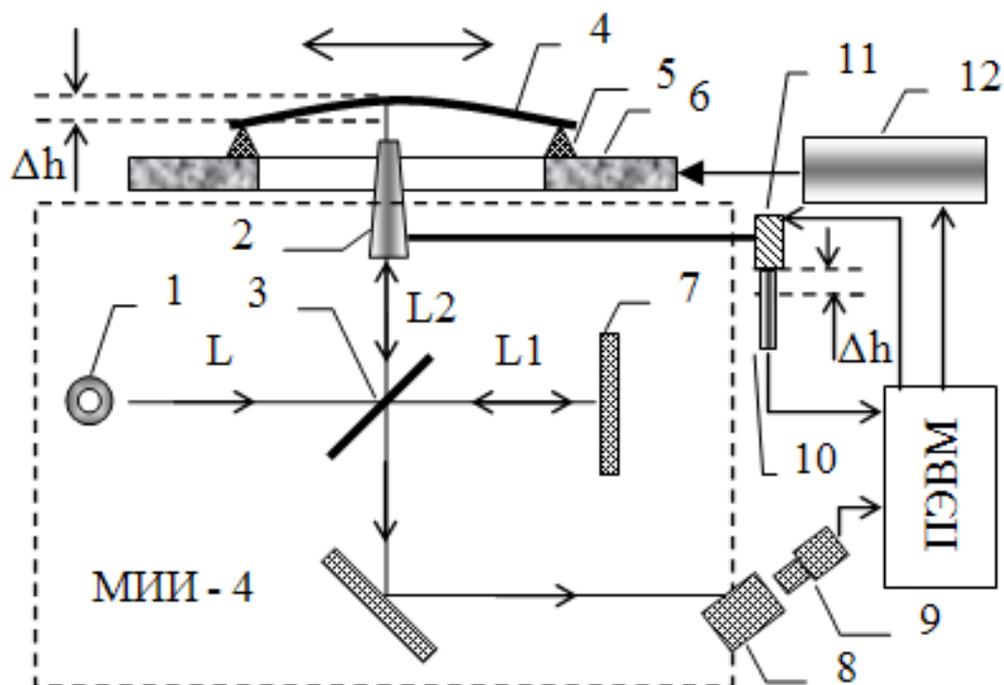
б)

Рисунок 4.32 – Интерференционная картина на подложке GaAs : а) – в базовой точке, б) – смещение интерференционной картины, вызванное изгибом структуры.

Конструктивно оптика МИИ-4 построена так, что независимо от образца, фронт второго луча имеет градиент фазы. В результате, в случае идеально гладкой и плоской поверхности образца интерференционная картина представляет собой последовательность параллельных чередующихся тёмных и светлых полос, расстояние, ширина и направление которых

определяются параметрами прибора и могут изменяться. При наличии на поверхности образца каких-либо отклонений от плоскостности полосы сдвигаются относительно начальной точки.

Полученная нами интерференционная картина базовой точки и точки с отклонением от плоскостности показаны на рисунке 4.32.



1 – источник света; 2 – объектив; 3 – делительная пластинка; 4 – измеряемая пластина; 5 – корундовые опоры; 6 – столик манипулятора; 7 – эталонное зеркало; 8 – окуляр микроинтерферометра; 9 – видеокамера; 10 – индуктивный датчик перемещения; 11 – устройство перемещения объектива; 12 – устройство поворота и перемещения манипулятора.

Рисунок 4.33 – Структурная схема устройства измерения отклонения от плоскостности подложек GaAs «АКИДП 1».

Для измерения сложных форм отклонения от плоскостности подложек и зависимости формы отклонения плоскостности от кристаллографических направлений в плоскости подложки GaAs нами был разработан манипулятор [158] позволяющий перемещать исследуемый образец в вертикальном направлении и осуществлять вращение образца на 360 градусов.

Структурная схема разработанного нами автоматизированного аппаратного комплекса «АКИДП 1» представлена на рисунке 4.33.

В разработанной системе перемещение объектива (2) осуществляется устройством перемещения (11) с которым связан индуктивный датчик перемещения (10). Определение положения интерференционной картинке определяется при помощи видеокамеры (9).

С учетом того, что цена деления микрометрического винта перемещения объектива микроинтерферометра составляет 0,3 мкм и точность измерения перемещения объектива индуктивным датчиком составляет 0,1 мкм, разрешающая способность измерения отклонения от плоскостности автоматизированным комплексом составляет 0,3 мкм.

Практические результаты измерения отклонения от плоскостности подложки арсенида галлия диаметром 60 мм с кристаллографической ориентацией подложки (100) представлены на рисунке 4.34. На пластине четко виден прогиб в направлении  $\langle 110 \rangle$  величина, которого достигает 13 мкм.

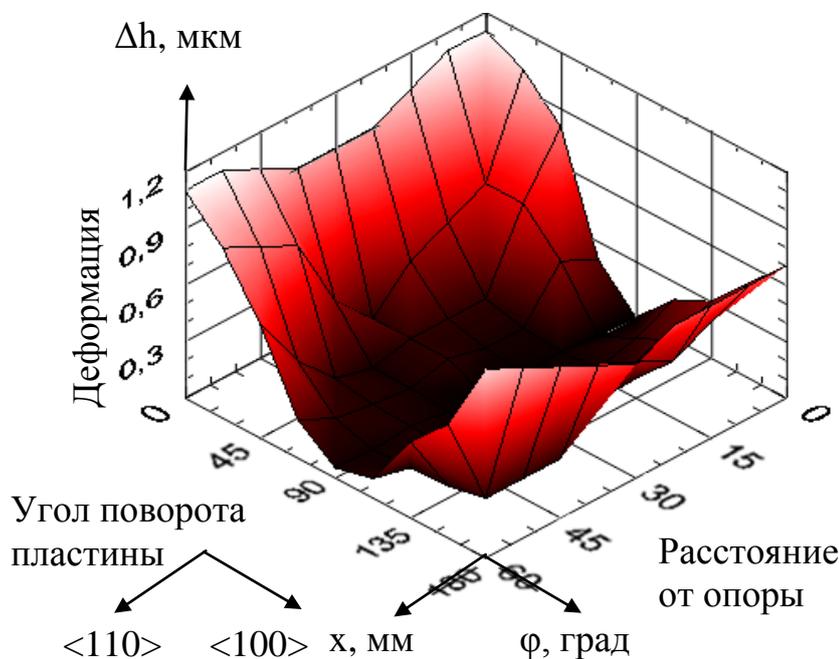


Рисунок 4.34 – Изгиб подложки (100) в направлении  $\langle 110 \rangle$ .

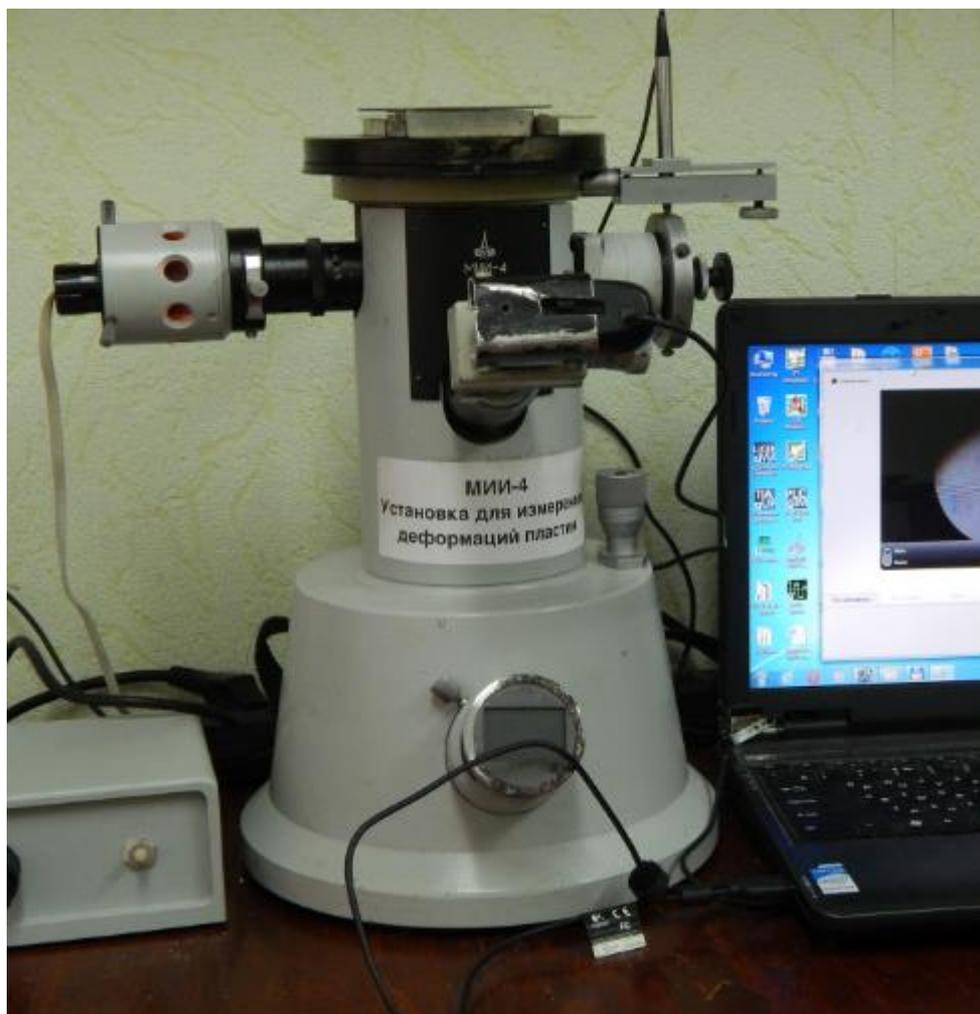


Рисунок 4.35 – Внешний вид устройства «АКИДП 1»

#### **4.3. Усовершенствование метода и разработка устройства контроля плотности дислокаций в подложках GaAs.**

Как хорошо известно, производительность электронных устройств, их качество и технические параметры зависят от наличия дефектов и дислокаций в подложках [161]. В работе [162] показана корреляция снижения квантовой эффективности подложек Si:GaAs для светоизлучающих диодов и показано что линии дислокаций могут выступать в качестве центров безызлучательной рекомбинации. Влияние дислокаций и дефектов упаковки на производительность GaAlAs/GaAs светодиодов и деградацию лазеров на основе ZnSe показано в работе [163,164].

В связи с этим к плотности дислокаций предъявляются исключительно высокие требования. Для создания электронных приборов и фотоэлементов на основе арсенида галлия требуются подложки с плотностью дислокаций, не превышающих  $10^4$ - $10^5$  см<sup>-2</sup> (изготовленных из слитков, выращенных по методу Чохральского с жидкостной герметизацией диаметром более 100 мм.).

Дислокации, которые формируются в монокристаллах, возникают в результате двух факторов [165]. Во-первых, необходимые электрофизические свойства полупроводниковых материалов в процессе выращивания достигаются путем введением соответствующих примесных добавок в процессе роста монокристаллов (легирование), это приводит к возникновению широкого класса точечных дефектов [166]. Вторым фактором является нарушение термодинамического режима выращивания, возникающего вследствие несовершенства технологии оборудования и технологических режимов, что приводит к ростовым дефектам.

Как известно, GaAs кристаллизуется в структуре цинковой обманки. В этой структуре образуются два типа 60-градусных дислокаций, обозначаемых обычно как  $\alpha$  и  $\beta$  дислокации, в соответствии с тем, завершается ли вставленная плоскость решетки атомами галлия или атомами мышьяка.

Плотность дефектов в монокристаллах является контролируемым параметром, значение которого определяется нормативными документами и указывается при сдаче продукции заказчику.

Существует ряд методов определения плотности дислокаций, например такие как [167,168]:

- метод измерения постоянной Холла и электропроводности, которые осуществляются в процессе одного эксперимента на одних и тех же образцах и позволяют определять концентрацию носителей заряда и их подвижность;

- метод емкостной спектроскопии позволяет с очень высокой точностью фиксировать изменения зарядового состояния присутствующих цен-

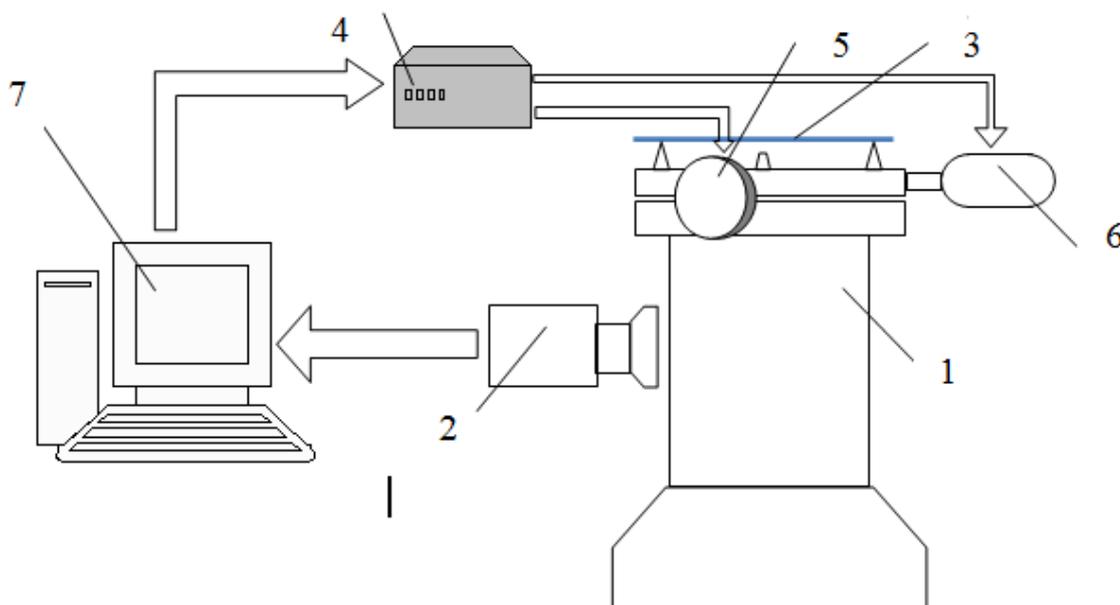
тров в процессе их перезарядки;

- методы, основанные на измерении параметров, чувствительных к тонким изменениям характера межатомных связей и периодичности строения кристаллической решетки в непосредственной близости от дефекта, такие как метод электронного парамагнитного и ядерного магнитного резонанса (ЭПР и ЯМР);

- прецизионные методы измерения плотности и периода решетки;

- методы визуализации дислокаций [169] в полупроводниках, которые могут быть классифицированы как методы выявления мест выхода дислокаций на поверхность кристалла с помощью избирательного травления и наблюдения в оптическом микроскопе и методы наблюдения дислокаций в объеме кристалла.

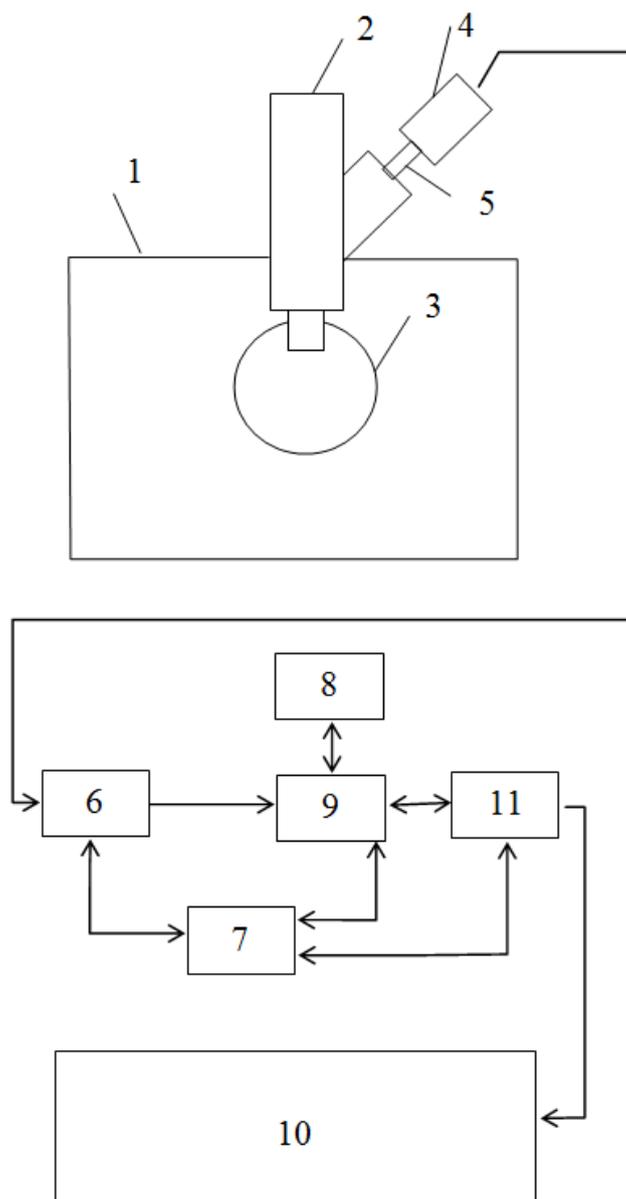
В разделе 3 данной диссертации нами предложена методика измерения плотности дислокаций, в основе которой травление подложки и обнаружение дислокаций методом световой микроскопии.



1 – оптический микроскоп МИИ-4, 2 – видеокамера, 3 – исследуемая пластина, 4 – блок управления двигателями, 5 – двигатель перемещения по оси X, 6 - двигатель перемещения по оси Y, 7 – персональный компьютер.

Рисунок 4.36 – Структурная схема устройства определения плотности дислокаций в подложках арсенида галлия и кремния «ТВ-Дислок 1».

Для решения задачи измерения плотности дислокаций в подложках GaAs нами был разработан автоматизированный комплекс на основе световой микроскопии и телевизионного метода подсчета плотности дислокаций.



1 - подвижный предметный стол; 2- оптический микроскоп МИИ-4; 3- исследуемый образец; 4 -ПЗС видеокамера; 5 - объектив; 6 - видеодекодер, 7 - устройство выделения зоны интереса; 8 - оперативная память, 9 - контроллер памяти, 10 - узел распознавания и вычисления; 11 - шинный интерфейс.

Рисунок 4.37 – Структурная схема канала ввода видеосигнала устройства «ТВ-Дислок 1».

Структурная схема устройства " ТВ-Дислок 1 " измерения плотности дислокаций в арсениде галлия [170] приведена на рисунке 4.36.

Задача определения плотности дислокаций телевизионным методом требует высокого качества изображения получаемого с объектива микроскопа. В автоматизированном комплексе нами была использована CCD видеокамера и плата ввода информации производства National Instrument. Структурная схема подключения видеокамеры [171] приведена на рис. 4.37

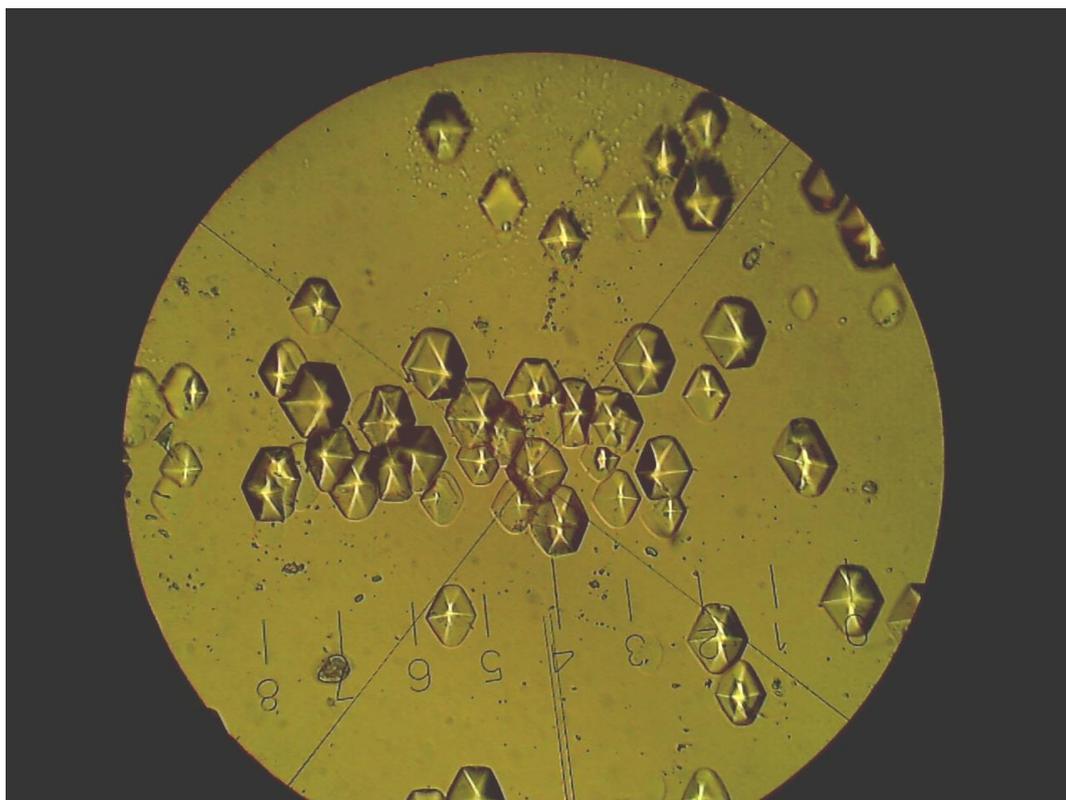


Рисунок 4.38 – Одиночные дислокации в пластине GaAs. Оптический микроскоп МИИ-4. Увеличение 400 х.

Арсенид галлия является материалом с довольно высоким уровнем дислокаций. Для слитков GaAs, выращенных методом Чохральского с жидкостной герметизацией, плотность дислокаций лежит в пределах  $10^{-4} \div 10^{-6} \text{ см}^{-2}$ . Это накладывает определенные сложности для автоматизированных методов измерения плотности дислокаций. В отличие, например от кремния, где микродефекты, как правило, разнесены по площади (за ис-

ключением «свирл» дефектов), дислокации в GaAs могут располагаться либо в виде одиночных дислокаций, либо в виде групп. Пример одиночных и групповых дислокаций, которые получены автором с использованием оптического микроскопа МИИ-4 показан на рис. 4.38 и 4.39 соответственно.

Таким образом, усовершенствованный метод должен определять плотность дислокаций в подложке GaAs расположенных как в виде одиночных дислокаций, так и в виде групп с использованием телевизионного способа определения плотности дислокаций.



Рисунок 4.39 – Группы дислокаций в пластине GaAs. Оптический микроскоп МИИ-4. Увеличение 400 х.

Рассмотрим телевизионный способ. На практике не всегда удаётся выявить на видеоизображении всю полезную информацию. Часть её не регистрируется аппаратурой из-за слабого контраста, фоновой неоднородности и не поддаётся анализу.

Для устранения этих проблем необходимо решить следующие задачи:

1. Обработать изображение для более детального выделения дислокаций на изображении.
2. Отфильтровать шумы, которые получаются после обработки изображения.
3. Разработать алгоритм для автоматизированного определения плотности дислокаций.

Одной из основных задач обработки и анализа изображений является сегментация, т.е. разделение изображения на области, для которых выполняется определенный критерий однородности, например, выделение на изображении областей приблизительно одинаковой яркости.

Учитывая то, что яркость изображения дислокаций изменяется в незначительном диапазоне, для выделения дислокаций, в работе была применена бинаризация с двойным ограничением. Таким образом, яркость пикселя после преобразования определяется выражением:

$$f'(m, n) = \begin{cases} 0, & f(m, n) \geq t_1 \\ 1, & t_1 < f(m, n) \leq t_2 \\ 0, & f(m, n) > t_2 \end{cases} \quad (4.26)$$

где  $t_1, t_2$  – пороговые значения бинаризации, значение которых определяется экспериментальным путем,  $f(m, n)$  – значение яркости пикселя, полученное с ТВ камеры.

После бинаризации изображений, на снимке остается очень много «шума», который мешает выделить необходимые области. Для решения этой задачи предположим, что на изображении подложки дислокации имеют среднюю яркость, которая выше, чем средняя яркость фона, на котором она наблюдается.

Если области наблюдений характеризуются функцией распределения одного вида, то можно записать:

$$F_0(x) = F_1(x - \Delta) , \quad (4.27)$$

где  $F_0(x)$ ,  $F_1(x)$  – функции распределения дислокаций и фона, соответственно.

Такая модель адекватно описывает изображения, получаемые, в результате аддитивного взаимодействия двумерного двухуровневого эталона  $S, S, S = \{M_0, M_1\}$  и белого шума  $\xi_{ij}$ . При этом:

$$x_{ij} = S_{ij} + \xi_{ij}, \quad (4.28)$$

где  $x_{ij}$  – отсчёт изображения.

Таким образом, алгоритм квантования для бинарного случая можно представить в виде:

$$Y_{ij} = \begin{cases} \Lambda_0, & x_{ij} \leq C \\ \Lambda_1, & x_{ij} > C \end{cases} \quad (4.29)$$

где  $\Lambda_{0,1}$  – метка яркостного класса отсчета;  $C$  – порог сегментации.

Для метода квантования мод он выбирается по межмодовому минимуму гистограммы. Представим правило ранговой бинарной сегментации в форме, подобной (4.29):

$$\gamma R_{ij} = \begin{cases} \Lambda_0, & R_{ij} \leq C_R \\ \Lambda_1, & R_{ij} > C_R \end{cases} \quad (4.30)$$

где  $R_{ij}$  ранг  $x_{ij}$  отсчета изображения;  $C_R$  – порог сегментации.

Можно показать, что выбор порога  $C_R=1$ , где 1 – количество элементов фона изображения, обеспечивает минимум безусловной ошибки классификации  $P_{ij}$  отсчета изображения с помощью правила (4.30):

$$P_{ij} = \frac{(n-1)}{n} \cdot P_{0/1} + \frac{1}{n} \cdot P_{1/0} \quad (4.31)$$

где  $P_{0/1}, P_{1/0}$  условные вероятности ошибки классификации фонового отсчета, как отсчета объекта и фона, соответственно;  $n$  – общее количество элементов изображения.

При неперекрывающихся распределениях яркости объекта и фона правило (4.30) обеспечивает нулевую вероятность ошибки классификации. Учитывая, что информации о количестве элементов фона изображения, ко-

торое является параметром алгоритма сегментации, заранее не существует, в (4.30) предлагается использовать оценку количества элементов фона, построенную по имеющейся выборке наблюдений.

Предположим, что на изображении, состоящем из  $n$  точек, имеются области фона, содержащие 1 элемент. Количество элементов объекта в этом случае –  $n-1$ . Предположим также, что каждому отсчету  $x_{ij}$  поставлен в соответствие его ранг  $R_{ij}$  в вариационном ряду, составленном из всех элементов изображения. Сформируем рабочую выборку из рангов  $m$  элементов изображения  $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$  локализующихся в компактную область на изображении. Форма упомянутой области, из которой извлекаются отсчеты рабочей выборки, роли не играет. Так рабочая выборка может быть, например, сформирована из отсчетов, попадающих в квадратное "окно". Ранги наблюдений, не попавших в рабочую выборку, составляют опорную выборку. В общем случае, вследствие произвольного способа формирования рабочей выборки, последняя является неоднородной, т.е. содержит ранги элементов, как объекта, так и фона. Распределение рангов неоднородной рабочей выборки зависит от количества фоновых элементов  $l$  имеющихся на данном изображении ( $l$  параметр, который нам необходимо оценить), и от количества элементов фона, содержащихся в рабочей выборке  $k$ . При неперекрывающихся распределениях яркости объекта и фона можно показать, что достаточной статистикой для параметра  $l$  является вектор  $\{R_k, R_{k-1}\}$ . С учетом этого максимально правдоподобная оценка  $l$  вычисляется следующим образом:

$$l = \arg_1 \max P_R(R_k, R_{k-1} / l, k) \quad (4.32)$$

Положим сначала, что количество фоновых отсчетов изображения, попавших в рабочую выборку, известно и равно  $k$ . Подставляя выражения для соответствующих распределений в (4.31) получаем следующий алгоритм вычисления максимально правдоподобной оценки  $l$ :

$$l = \begin{cases} R^{(k)}, & g(R^{(k)}) < g(R^{(k-1)}) \\ R^{(k-1)}, & g(R^{(k)}) > g(R^{(k-1)}) \end{cases} \quad (4.33)$$

Здесь  $g(x)$ - функция, определенная на множестве натуральных чисел следующим образом:

$$g(x) = C_x^k \cdot C_{n-x}^{m-k}. \quad (4.34)$$

Если  $k$  заранее неизвестно, то можно предположить, что для непрерывающихся распределений максимально правдоподобная оценка может быть найдена следующим образом:

$$k = \arg_l \min(C_{R^{(k)}}^{k-1} \cdot C_{n-R^{(k)}}^{m-k}). \quad (4.35)$$

С учётом этого:

$$l = l(k), \quad (4.36)$$

где  $\hat{k}$  - максимально правдоподобная оценка количества фоновых элементов рабочей выборки, а  $l(k)$  - функция (4.32). При этом максимально правдоподобная оценка  $l$ , вычисляемая согласно (4.32), является смещенной.

Дальнейшая обработка изображения производится с целью его улучшения для возможности реализации алгоритма определения плотности дислокаций, то есть выполнение ряда бинарных операций с целью уменьшения зашумленности информации, повышения ее контрастности, резкости, подчеркивания контуров.

Таким образом, можно синтезировать укрупнённый алгоритм для автоматизированного определения плотности дислокаций.

Получение изображения дислокаций с ТВ-камеры производится посредством подключения USB-камеры которая установлена на микроскопе МИИ-4, к компьютеру. Изображение поступает в программу, которая выполнена на основе среды LabView. Полученное в результате изображение дислокаций в подложке арсенида галлия показано на рисунке 4.41.

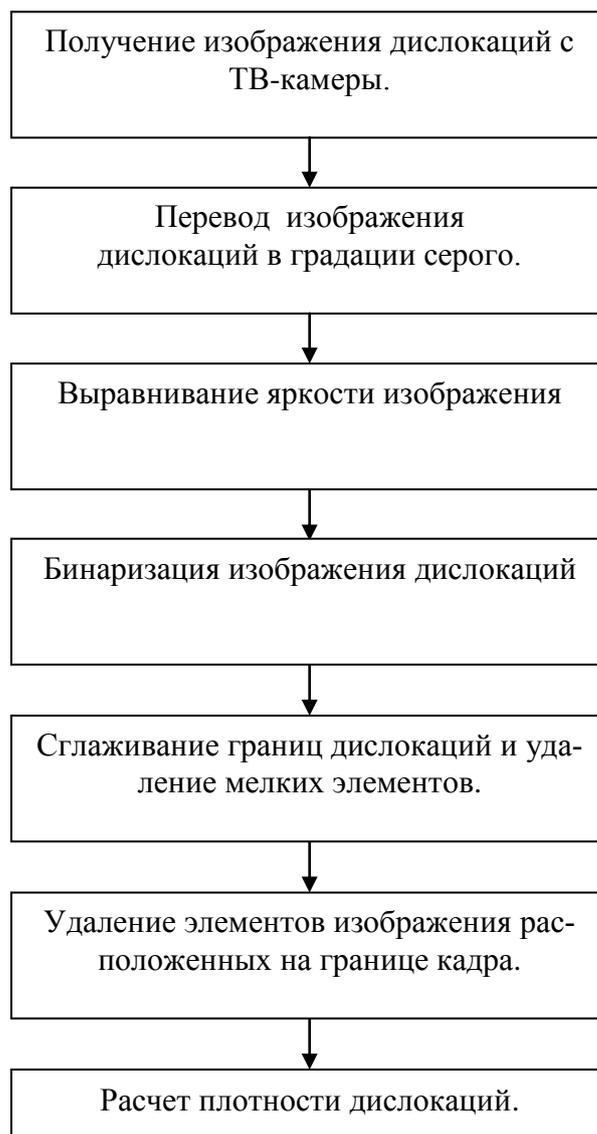


Рисунок 4.40 – Алгоритм метода измерения плотности дислокаций автоматизированным комплексом «ТВ-Дислок 1».

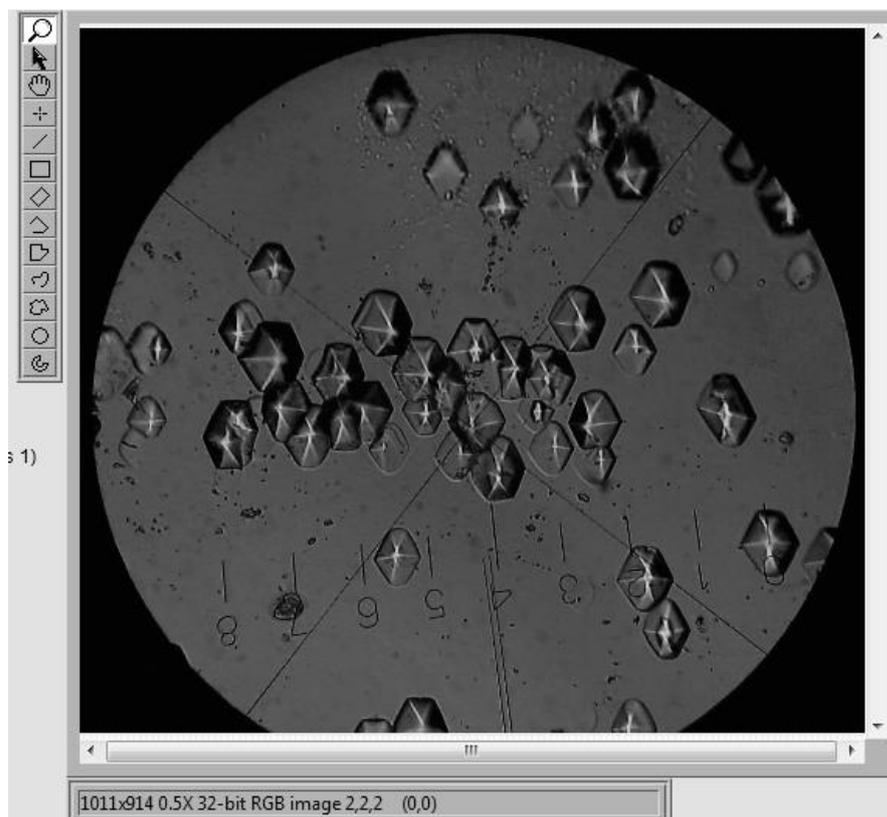


Рисунок 4.41 – Фрагмент лицевой панели с изображением дислокаций.

LabView переводит изображение в двумерный массив размерностью  $n \times m$ . Каждый пиксель массива является точкой определяющей яркость в формате RGB.

Для дальнейшей обработки изображения необходим его 8-ми битный формат (в градации серого). С учетом того, что получаемое с камеры изображение имеет формат RGB, используем формулу:

$$Y_{n,m} = 0.36 * R_{n,m} + 0.53 * G_{n,m} + 0.11 * B_{n,m}. \quad (4.37)$$

где  $Y_{n,m}$  – результирующая яркость пикселя с координации  $n \times m$ ,  $R_{n,m}$  – яркость красного канала,  $G_{n,m}$  – яркость зеленого канала,  $B_{n,m}$  – яркость синего канала. Полученное изображение показано на рисунке 4.42.

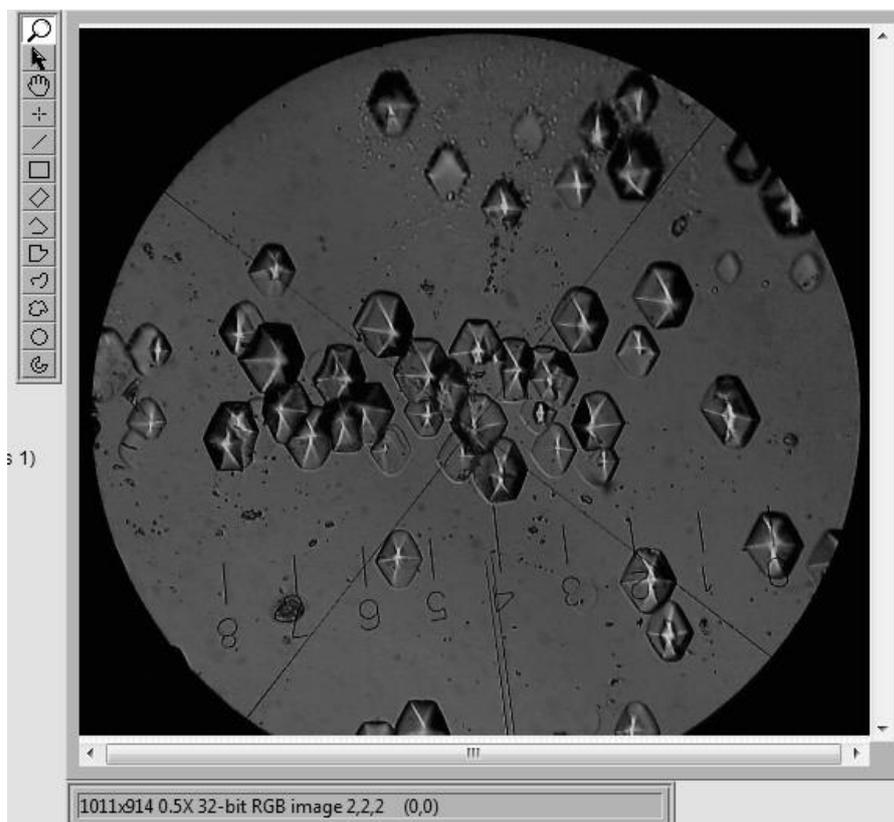


Рисунок 4.42 – Фрагмент лицевой панели с изображением дислокаций в градациях серого.

Выравнивание яркости изображения и применение фильтрации сверткой, позволяет привести изображение к равномерному. Свертка позволяет вычислить новое значение яркости пикселя на основе значения яркости соседних пикселей попадающих в окно. В нашем случае выбрано окно 5x6 пикселей, эта размерность была определена экспериментальным путем. Результат применения операции свертки показан на рисунке 4.43.

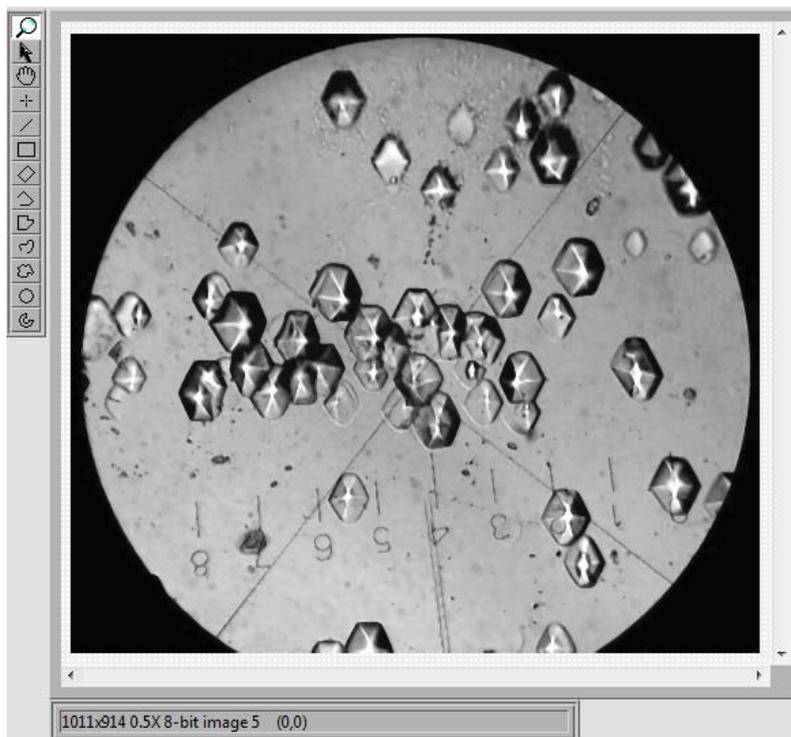


Рисунок 4.43 – Фрагмент лицевой панели с изображением дислокаций после выравнивания яркости.

Бинаризация изображения производится с целью перевода изображения, из формата в градациях серого в бинарное где каждый пиксель имеет только два значения, 0 или 1.

Практический анализ различных методов выполнения операции бинаризации, таких как бинаризация с нижним порогом, бинаризация с верхним порогом, бинаризация с двойным ограничением, метод Отса. Для реализации операции бинаризации мы использовали метод бинаризации с двойным ограничением, согласно выражению (4.26).

Полученное изображение после выполнения операции бинаризации показано на рисунке 4.44.

Сглаживание границ дислокаций и удаление мелких элементов выполняется при помощи операций заполнения и пополнения. Учитывая размер дислокаций при выбранном увеличении микроскопа, был выбран структурный элемент в форме круга размером 25 пикселей. Выполнение данной операции представлено на рисунке 4.45.

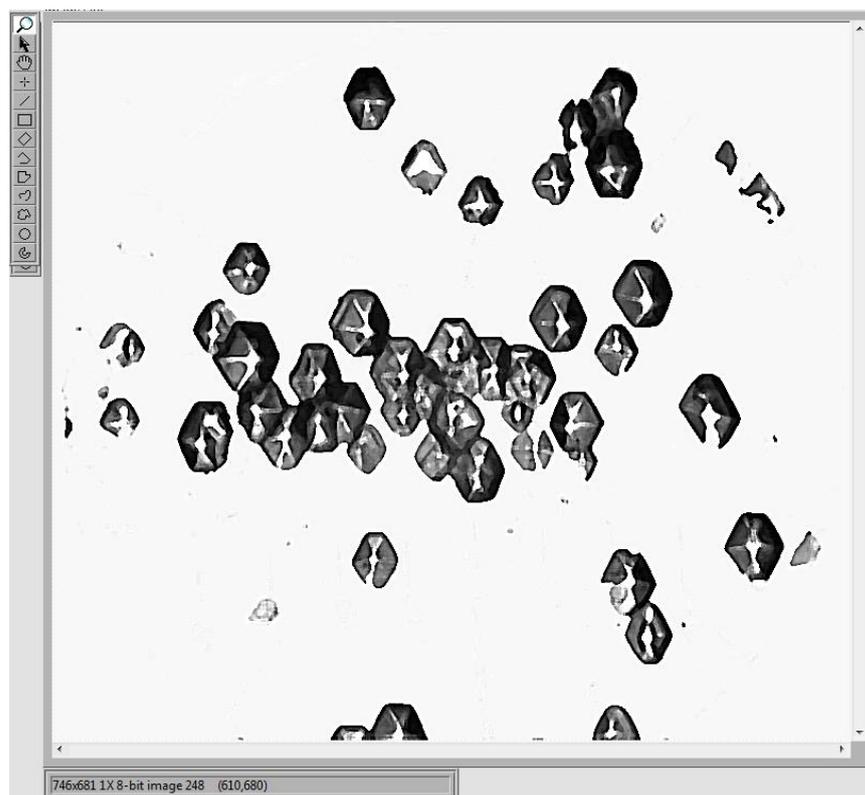


Рисунок 4.44 – Фрагмент лицевой панели с изображением дислокаций после выполнения операции бинаризации.



Рисунок 4.45 – Результат выполнения операции, сглаживания границ изображения дислокаций и удаление мелких элементов.

Последней операцией обработки изображения дислокаций перед выполнением операции вычисления плотности дислокаций является удаление элементов изображения расположенных на границе кадра.

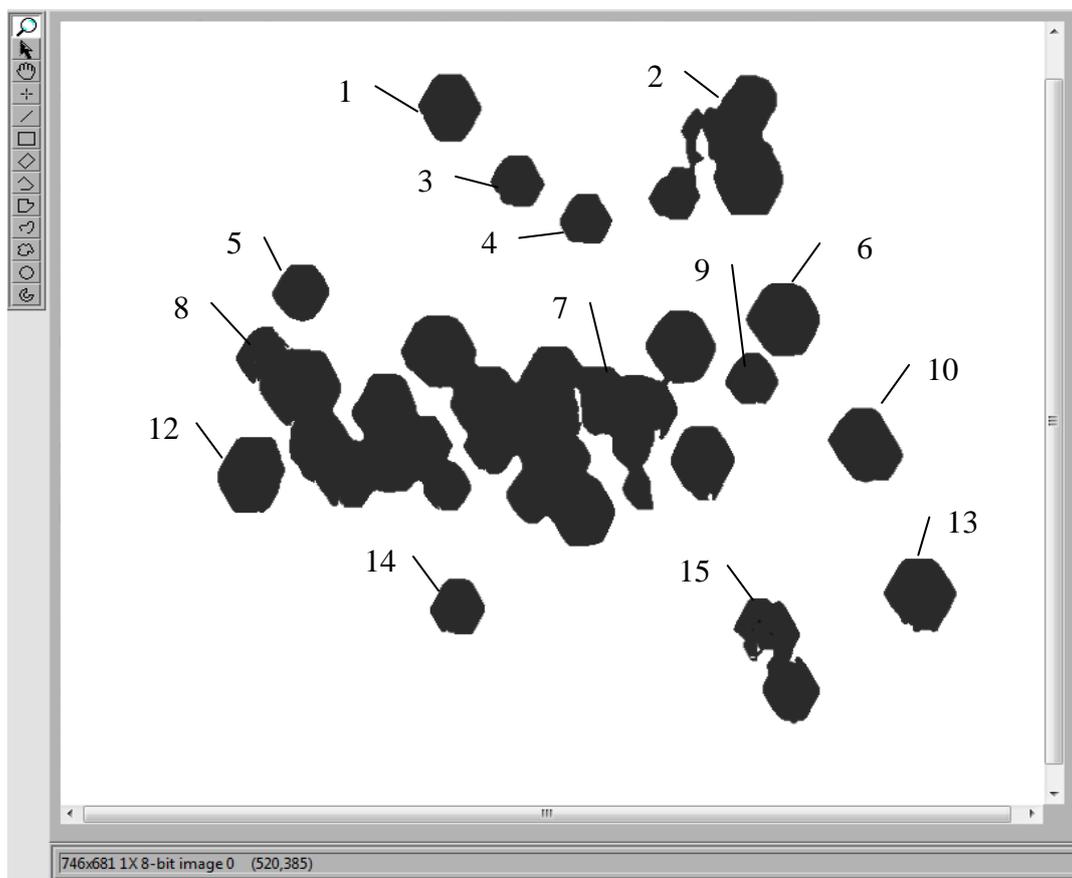


Рисунок 4.46 – Результат выполнения операции, сглаживания границ изображения группы дислокаций и удаление мелких элементов.

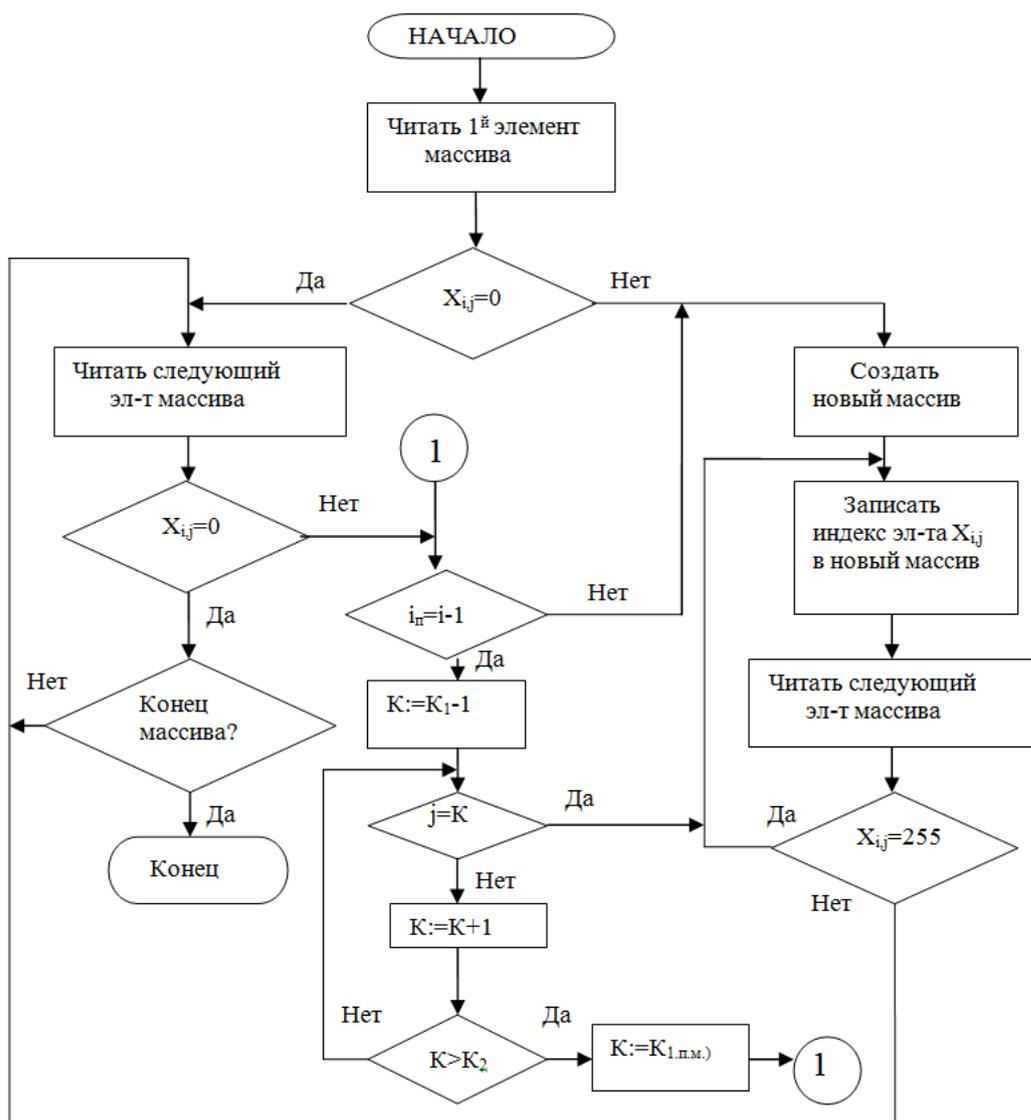
Можно видеть, что на изображении было выделено 15 областей, которые включают в себя как одиночные дислокации, так и группы дислокаций (объекты 7,8,15). Алгоритм программы позволяет подсчитать количество, как одиночных дислокаций, так и число дислокаций входящих в группу.

Подсчет дислокаций производится путем определения числа разделенных фигур на изображении и определения размера области фигур в пикселях.

Определение числа дислокаций и групп дислокаций производится путем выделения границ и суммирования пикселей входящих в разделен-

ную зону.

Подсчет области занимаемой дислокациями начинается с 0-й строки 0-го столбца двумерного массива изображения, причем элементы массива сканируются сначала по строке, а затем по столбцам. Условием начала микродефекта является перепад яркости пикселей. Как только значение пикселя меняется с белого на черное, то считается, что это - начало изображения дислокаций.



$X_{i,j}$  - значение  $i,j$  элемента массива;  $i$  - индекс строки;  $j$  - индекс столбца;  $K_1$ ,  $K_2$  - начальное и конечное значение столбцов в созданных массивах

Рис 4.47 Алгоритм обработки строк и столбцов изображения.

Учитывая, что обработка строк идет сверху вниз, то эта точка будет вершиной дислокации или группы дислокаций. Индекс элемента массива, в котором происходит перепад яркости, записывается в новый массив, в который также записываются все элементы имеющие значение 0, после перехода из значения 0 в 255 заканчивается запись в новый массив и продолжается поиск перепада из 255 в 0. Дойдя до конца строки, начинается обход следующей строки.

Если в одной строке попадаете второй переход из черного(0) в белое(255), то записывается еще один массив с индексами элементов массива.

В следующей строке первый переход относим к первому массиву, второй ко второму. В строке, где заканчивается фигура при переходе из черного в белое индекс массива необходимо сравнить с первым массивом. И если хотя бы один индекс столбца совпадает, то запись этих элементов осуществляем в этот массив, с которым сравнивали. Если не совпадает тогда сравнить со вторым массивом и при совпадении столбца записывать в этот второй массив и так далее сравнивать со всеми массивами. Если ни с каким массивом не совпадет, тогда начать запись нового массива. В следующей строке опять перемещаемся по столбцам и при перепадах яркости начинаем сравнивать и записывать и так далее пока не обработаем последнюю строку массива.

Обработав последнюю строку массива, подсчитываем количество записанных массивов, что определит количество дислокаций. Алгоритм обработки строк и столбцов представлен на рисунке 4.47.

Результат работы алгоритма в виде таблицы показан на рисунке 4.48.

Объект	Область	Число дислокаций
1	1997	2
2	6917	5
3	1292	1
4	1259	1
5	1501	1
6	2604	2
7	22497	18
8	13757	11
9	1250	1
10	2474	2
11	2200	2
12	2576	2
13	2425	2
14	1476	1
15	1476	3

Рисунок 4.48 – Число обнаруженных объектов в виде дислокаций в подложке GaAs, занимаемая ими область в пикселях, и вычисленное число дислокаций.

Перемещение по плоскости подложки в автоматизированном комплексе «ТВ-Дислок 1» выполняется системой позиционирования, принцип и алгоритм работы которой соответствует рассмотренной ранее системе механического перемещения подложки устройства «Полярон – 4», (см. п.4.1.2).

Аналогично были использованы и модели измерения, в частности:

- модель измерения в соответствии с ГОСТ 19658-81 (рис. 4.23);
- модель измерения в соответствии с SEMI M83-1112 (рис. 4.24);
- линейная полная модель измерения (рис. 4.25);
- полярная полная модель измерения (рис. 4.26);

Расчет плотности дислокаций производится по усовершенствованной методике, описанной в разделе 3 данной работы.

Интерфейс программы устройства «ТВ-Дислок1» показан на рисунке 4.49.

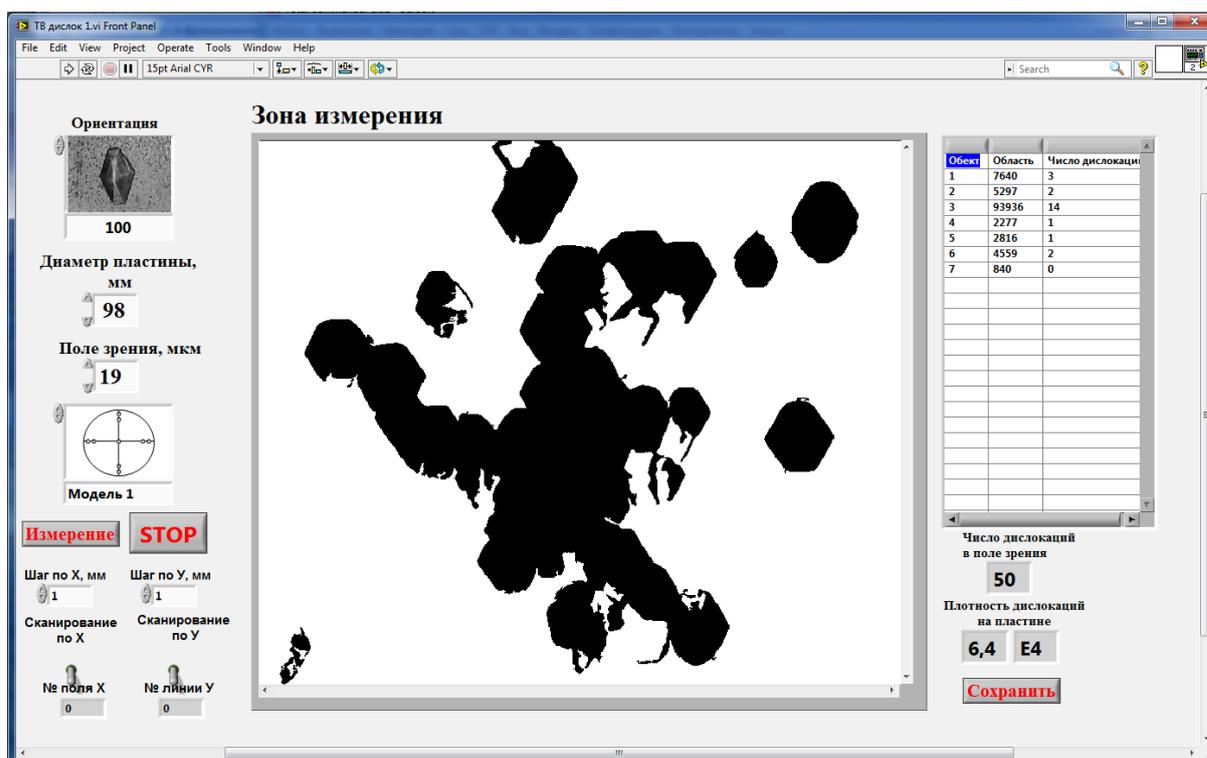


Рисунок 4.49 – Интерфейс программы устройства «ТВ-Дислок1».

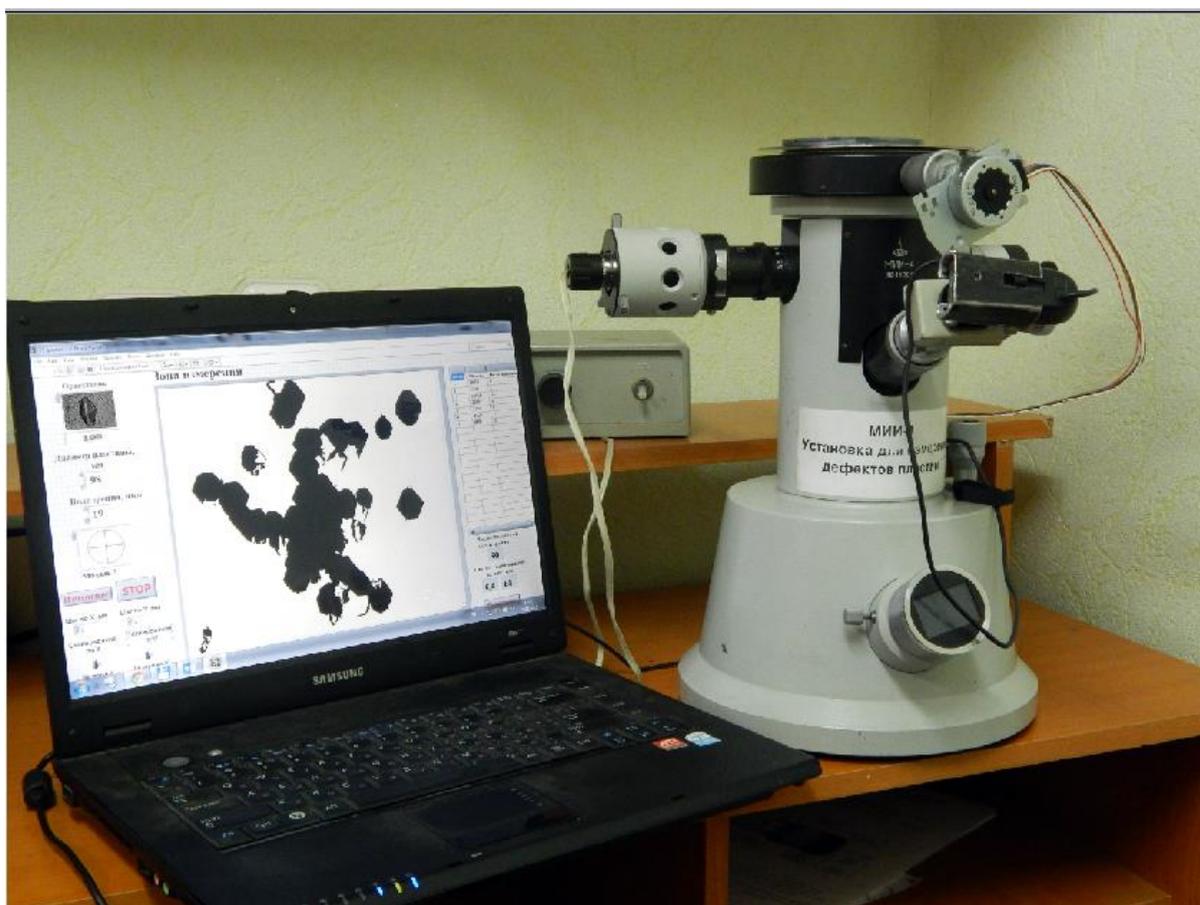


Рисунок 4.50 – Автоматизированный комплекс «ТВ-Дислок1».

#### **4.4. Определение метрологических характеристик разработанных устройств.**

Разработанные в данной работе устройства являются нестандартными средствами измерения, и, следовательно, не подлежат государственным испытаниям. Целью выполнения аттестации является:

- определение методов аттестации устройств и комплексов;
- экспериментальное определение нормированных точностных характеристик аттестуемого оборудования;
- установление номенклатуры метрологических характеристик, подлежащих контролю при поверке /калибровке/.

##### **4.4.1. Определение метрологических характеристик устройства «Полярон 4».**

В настоящее время существует достаточно большое количество методов и методик контроля остаточных напряжений в твердых телах. Применительно к полупроводниковым материалам, и в частности к GaAs большое распространение получили рентгенодифракционный метод и метод фотоупругости. Автору не известны метрологическое оборудование или стандартные эталоны для поверки приборов измеряющих уровень остаточных напряжений в полупроводниковых материалах. Поэтому, существуют определенные сложности для проведения калибровки разработанного устройства.

Для решения задачи был применен метод непосредственного сличения измеренных значений остаточных напряжений автоматизированным комплексом неразрушающего контроля с эталоном. Как известно, в основе метода лежит проведение одновременных измерений одной и той же физической величины поверяемым (калибруемым) и эталонным приборами. При этом определяют погрешность как разницу показаний поверяемого

и эталонного средств измерений, принимая показания эталона за действительное значение величины.

В качестве эталонного прибора в работе использовался рентгеновский дифрактометр X'Pert PRO MRD с высоким разрешением включающий набор рентгенооптических компонентов для использования в стандартной компланарной схеме дифракции, а также для дифракции в качающейся геометрии (некомпланарная схема), дифракции и рефлектометрии (Голландия), отдела дифракционных исследований структуры полупроводников института физики полупроводников им. Лошкарева. Рентгеновский дифрактометр использовался для измерения постоянной кристаллической решетки в заранее определенных точках подложки.

Схема измерения постоянной решетки GaAs приведена на рисунке 4.51.

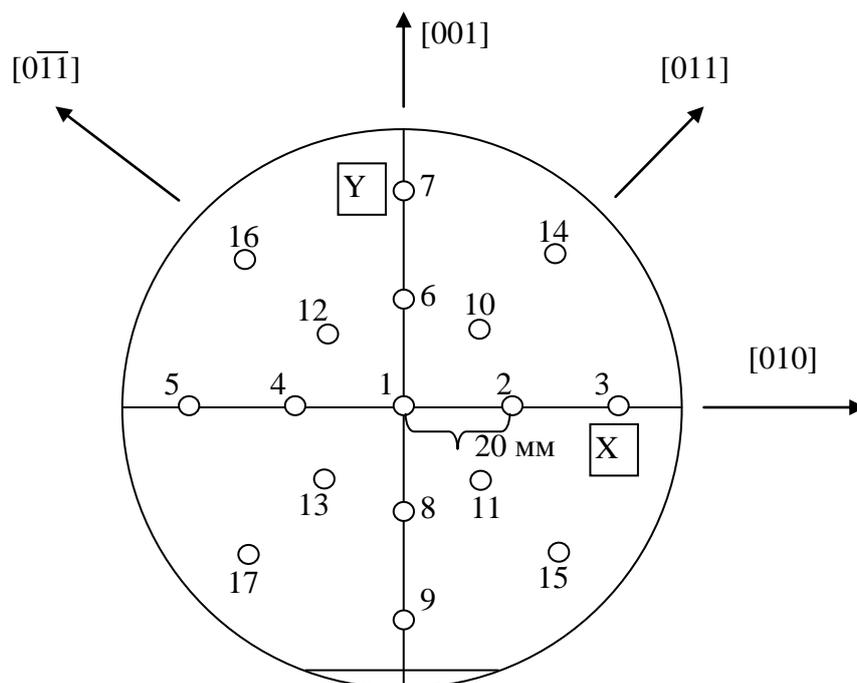


Рисунок 4.51 – Схема измерения постоянной решетки подложки GaAs.

Измеренные значения постоянной решетки приведены в таблице 4.2. Расчет остаточных напряжений производился в соответствии с выражением [172]:

$$\sigma = \frac{E}{\nu} \left( \frac{a_n - a_0}{a_0} \right), \quad (4.37)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $a_0$  – значение постоянной кристаллической решетки GaAs в недеформированном состоянии равное 5,6533 нм [173],  $a_n$  – измеренная рентгеновским дифракционным методом постоянная кристаллической решетки GaAs.

Результаты расчета остаточных напряжений в подложке GaAs сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.2.

Экспериментальные значения постоянной кристаллической решетки подложки типа АГЧХ диаметром 100 мм.

Номер точки измерения	Координаты точки		Постоянная решетки, нм, образец №1	Постоянная решетки, нм, образец №2
	x, мм	x, мм		
1	0	0	5,653324	5,653300
2	0	20	5,653638	5,653392
3	0	40	5,653341	5,653527
4	0	-20	5,653448	5,653384
5	0	-40	5,653341	5,653466
6	20	0	5,653704	5,653621
7	40	0	5,653390	5,653647
8	-20	0	5,653399	5,653430
9	-40	0	5,653886	5,653309
10	20	20	5,653647	5,653805
11	20	-20	5,653440	5,653617
12	-20	20	5,655076	5,654339
13	-20	-20	5,656828	5,654962
14	40	40	5,653966	5,653454
15	40	-40	5,653614	5,653995
16	-40	40	5,653382	5,653466
17	-40	-40	5,653550	5,653548

Таблица № 4.3.

Рассчитанные значения остаточных напряжений в подложке типа  
АГЧХ диаметром 100 мм.

Координаты точки		Модуль Юнга, МПа, источник [135, 136]	Коэффициент Пуассона, источ- ник [135-137]	$\sigma$ , МПа об- разец №1	$\sigma$ , МПа об- разец №2
x, мм	x, мм				
0	40	85,3	0,312	0,32	0,01
0	20	85,3	0,312	4,13	1,12
0	0	85,3	0,312	0,56	2,75
0	-20	85,3	0,312	1,81	1,02
0	-40	85,3	0,312	0,53	2,01
40	0	85,3	0,312	4,91	3,89
20	0	85,3	0,312	1,11	4,23
-20	0	85,3	0,312	1,25	1,58
-40	0	85,3	0,312	7,16	0,12
40,00	40,00	121,5	0,024	4,21	6,12
20,00	20,00	121,5	0,024	1,72	3,84
-20,00	-20,00	121,5	0,024	21,53	12,58
-40,00	-40,00	121,5	0,024	42,7	20,12
-40,00	40,00	121,5	0,024	8,07	1,87
-20,00	20,00	121,5	0,024	3,81	8,42
20,00	-20,00	121,5	0,024	1,01	2,01
40,00	-40,00	121,5	0,024	3,03	3,01

Проведение измерения остаточных напряжений в двух образцах показало хорошие совпадения экспериментальных данных полученных рентгенодифракционным методом, и поляризационным методом, реализуемым автоматизированным комплексом «Полярон – 4».

При измерении использовалась полная модель сканирования. Результаты измерения в виде 3D графиков и профили сканирования по отдельным направлениям приведены на рисунках 4.52 – 4.56.

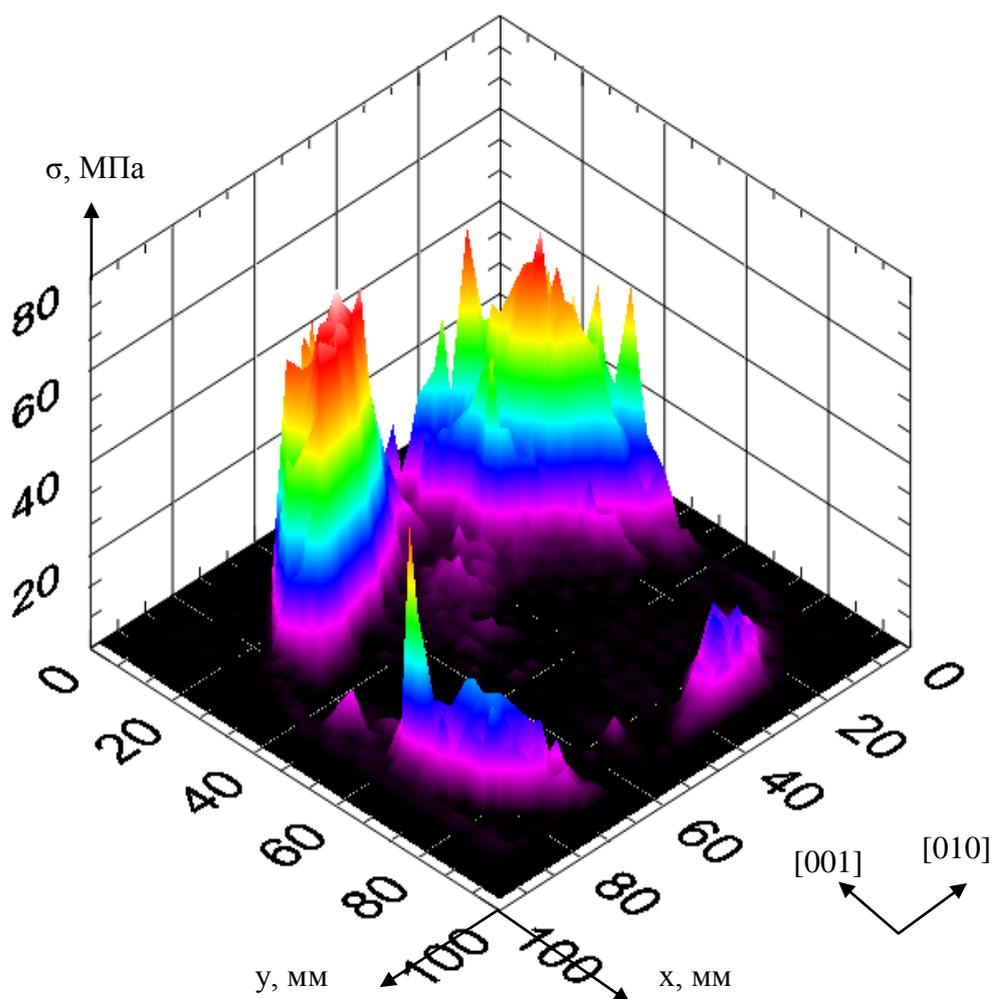


Рисунок 4.52 – Остаточные напряжения измеренные в подложке типа АГЧХ диаметром 100 мм. «Полярон 4».

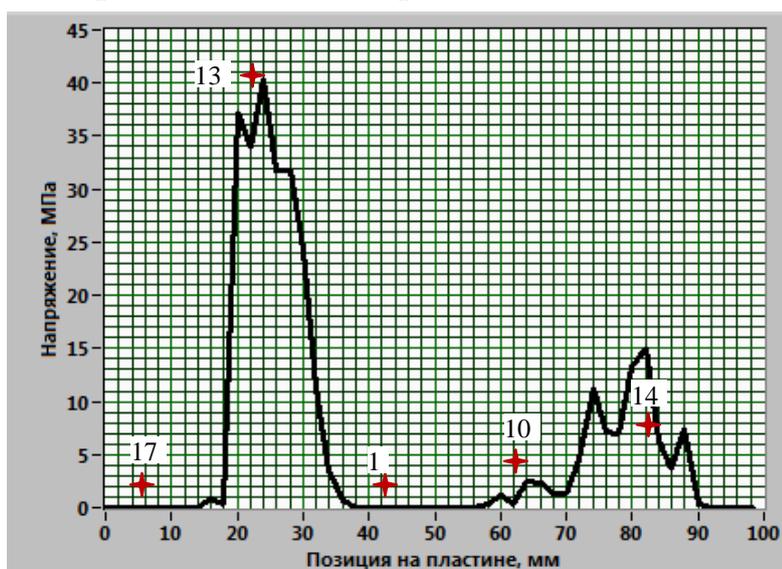


Рисунок 4.53 – Профиль остаточного напряжения в направлении [011]. ★ – рассчитанные значения и номер точки измерения в соответствии со схемой измерения (рис. 4.53.).

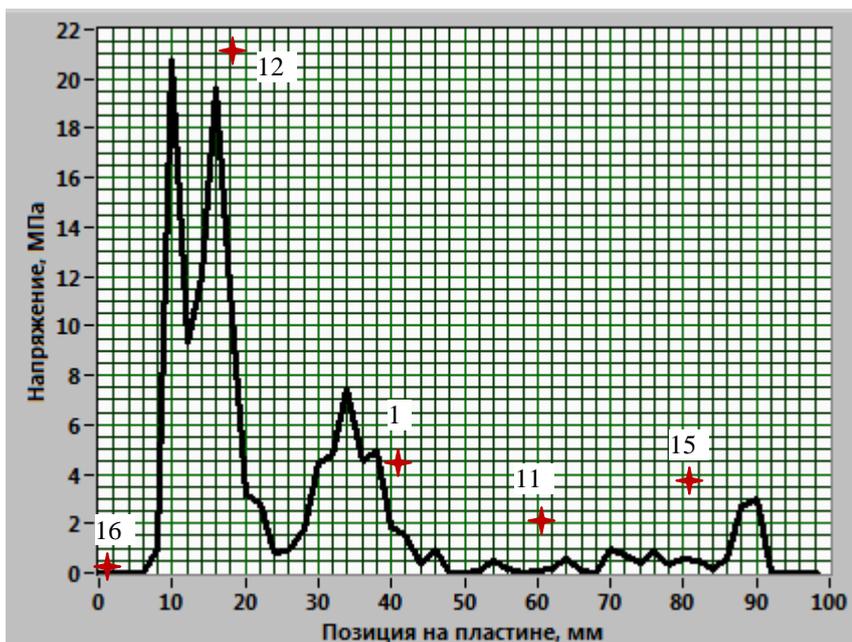


Рисунок 4.54 – Профиль остаточного напряжения в направлении  $[0\bar{1}1]$ .

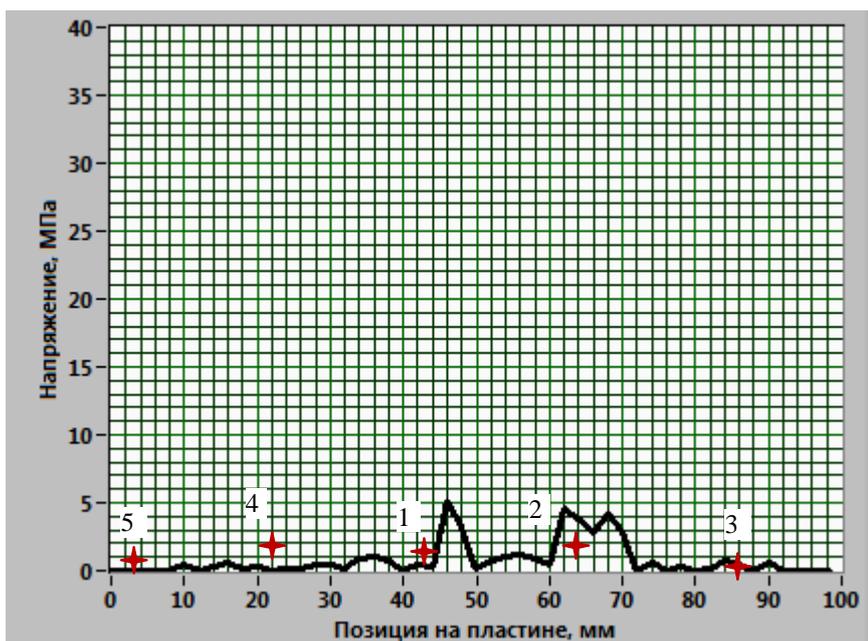


Рисунок 4.55 – Профиль остаточного напряжения в направлении  $[010]$ .

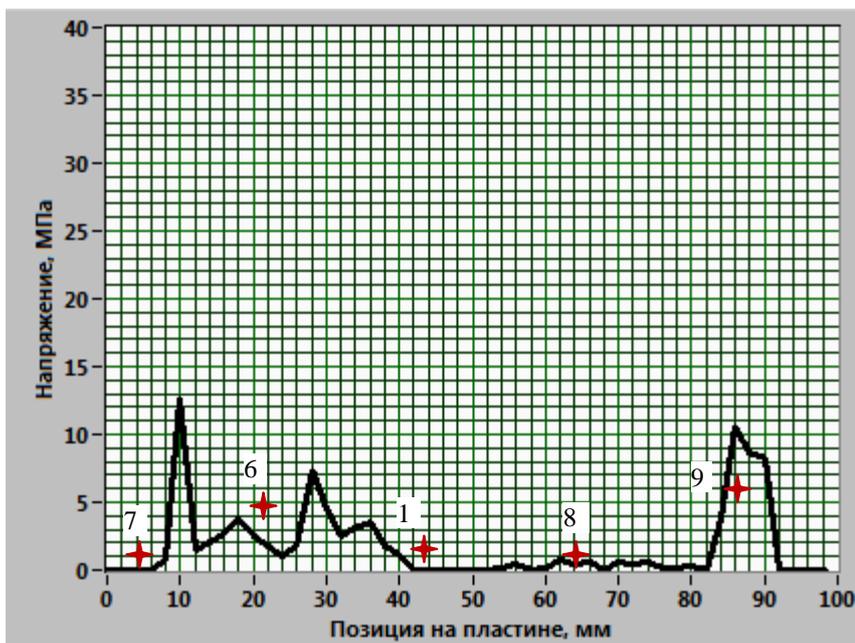


Рисунок 4.56 – Профиль остаточного напряжения в направлении [001].

Как было сказано выше, для определения метрологических характеристик был использован метод сличения с эталоном.

Для определения основных метрологических характеристик вычислялись следующие величины:

Среднее значение абсолютной погрешности определялась как,

$$A = \frac{1}{n} \sum_{n} \sigma_{sn} - \sigma_{in}, \text{ МПа} \quad (4.38)$$

где  $\sigma_{sn}$  - эталонное значение остаточного напряжения, измеренное рентгенодифракционным методом,  $\sigma_{in}$  - остаточное напряжение измеренное комплексом,  $n$  - количество измерений.

Результаты расчета отклонения эталонных значений остаточных напряжений от измеренных приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Отклонение измеренных значений остаточных напряжений, измеренных разработанным комплексом «Полярон 4» от эталонных значений.

№ точки измерения	Эталонное значение, МПа	Измеренное значение, МПа	Отклонение, МПа	Эталонное значение, МПа	Измеренное значение, МПа	Отклонение, МПа
	образец №1			образец №2		
1.	0,3	0,16	0,14	0,01	0,21	1,09
1.	4,8	2,5	2,3	2,8	2,8	0,12
1.	1,2	0,8	0,4	0,9	0,9	0,12
1.	1,1	0,25	0,85	3,02	3,02	0,18
2.	4,1	4,8	0,7	1,12	0,12	1
3.	0,5	0,43	0,07	2,75	0,18	2,57
4.	1,8	0,96	0,84	1,02	0,61	0,41
5.	0,5	0,15	0,35	2,01	1,28	0,73
6.	4,9	2,16	2,74	3,89	0,53	3,36
7.	1,1	0,23	0,87	4,2	1,72	2,48
8.	1,2	0,95	0,25	1,58	0,12	1,46
9.	7,1	9,2	2,1	0,12	0,14	0,02
10.	4,21	1,8	2,41	6,12	3,21	2,91
11.	1,7	0,3	1,4	3,84	0,52	3,32
12.	21,5	14,5	7	12,58	15,5	2,92
13.	42,7	40,9	1,8	20,12	14,9	5,22
14.	8,07	10,2	2,13	1,87	0,87	1
15.	2,8	0,9	1,9	8,42	0,3	8,12
16.	1,001	0,8	0,201	2,01	0,23	1,78
17.	3,03	0,3	2,73	3,01	0,25	2,76

В данной таблице приведены эталонные, измеренные значения остаточного напряжения, абсолютное значение разности этих двух величин в двух пластинах по 17 точкам измерения (см. рис. 4.53.), а также 4 значения, измеренные в центре пластины (точка измерения № 1).

Общее среднее значение абсолютной погрешности устройства «Полярон – 4» в соответствии с выражением 4.41 можно определить как среднюю величину абсолютной погрешности для первой пластины, второй пластины и центра. Тогда можно записать:

$$A_c = \frac{1}{3}(A_1 + A_2 + A_s) = \frac{1}{3}(1,6 + 2,4 + 2,1) = 2,03 \approx 2 \text{ МПа} \quad (4.39)$$

где  $A_1$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным 1-й пластины;  $A_2$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным 2-й пластины;  $A_s$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным центра пластин.

Систематическая погрешность находилась в соответствии с выражением:

$$\delta_s = \frac{\sigma_s - \sigma_i}{\sigma_i} * 100\% \quad (4.40)$$

откуда, общая систематическая погрешность определится в соответствии с выражением:

$$\delta_c = \frac{1}{3}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_{ce}) = \frac{1}{3}(44,7 + 65,3 + 28,1) = 46 \% \quad (4.41)$$

где  $\delta_1$  = средняя систематическая погрешность, рассчитанная по данным 1-й пластины;  $\delta_2$  = средняя систематическая погрешность, рассчитанная по данным 2-й пластины;  $\delta_s$  = средняя систематическая погрешность, рассчитанная по данным центра пластин.

#### **4.4.2. Определение метрологических характеристик устройства «АКИДП – 1».**

Разработанное устройство «АКИДП – 1», описанное выше, предназначено для неразрушающего контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs. Для решения задачи измерения отклонения от плоскостности необходимо провести калибровку комплекса и определить его метрологические характеристики.

Метрологические характеристики устройства так же были определе-

ны методом сличения, с эталоном подробно описанным выше. В качестве эталона использовалась метрологическая поверочная пластина плоскопараллельная стеклянная типа ПИ100 нижняя. Метрологические параметры определялись путем установки поверочной пластины на корундовые наконечники манипулятора с последующим перемещением пластины в горизонтальной плоскости и определением отклонения от параллельности [160]. Пластины плоские стеклянные ПИ 100 нижние (опорные) применяются для притирания к ним плоскопараллельных концевых мер длины при интерференционных измерениях, а также для поверки плоскостности измерительных поверхностей концевых мер, калибров, измерительных приборов и инструментов.

Технические характеристики ПИ-100:

Класс точности - 2.

Диаметр рабочих поверхностей - 100 мм.

Отклонение рабочих поверхностей от плоскостности - не более 0,09 мм.

Местное отклонение от плоскостности рабочей поверхности - не более 0,1 интерференционной полосы.

Габаритные размеры:

- диаметр - 100 мм;

- высота - 25 мм.

Масса - не более 395 г.

Пластина ПИ-100 изготавливается из оптического стекла в форме прямого цилиндра с плоскими торцевыми поверхностями, которые являются рабочими.

Учитывая то, что комплекс представляет собой сложную механико-оптическую систему, погрешности, которые возникают можно разделить на систематические и случайные.

Систематическая погрешность вызвана неточностью установки корундовых наконечников, ошибками механизма перемещения объектива и

ошибкой установки индуктивного датчика.

Случайная погрешность вызвана погрешностью позиционирования интерференционных линий относительно базовой линии.

Для проведения калибровки, устройства неразрушающего контроля отклонения от плоскостности подложек GaAs была использована следующая схема:

- на манипулятор устанавливалась поверочная пластина ПИ100;
- вращением рукоятки перемещения объектива проводилось совмещение интерференционной картины с базовой линией объектива.
- индикатор индукционного датчика устанавливался в 0.
- пластина перемещается по оси X, и на ней измеряется значение смещения интерференционной картины от базовой линии.

Результаты измерения приведены на рисунке 4.57.

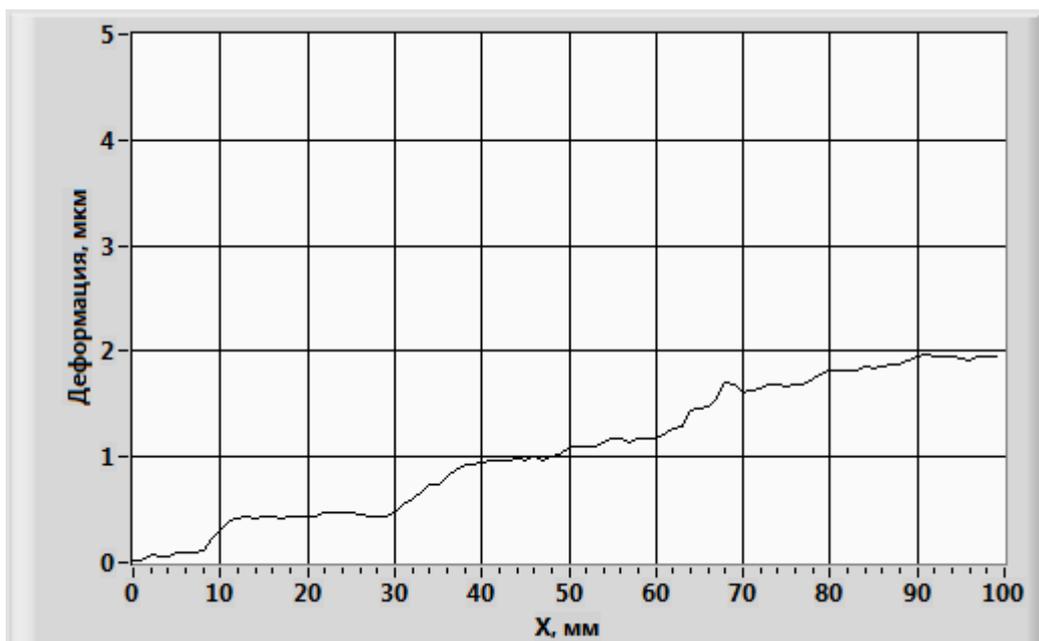


Рисунок 4.57 – Результаты калибровки устройства «АКИДП 1».

Результаты измерения показывают, что присутствует систематическая погрешность вызванная, скорее всего не точностью установки корундовых наконечников.

Для устранения погрешности был выполнен регрессионный анализ, используя различные алгоритмы. Полученные результаты в виде лицевой

панели виртуального прибора показаны на рисунке 4.58.

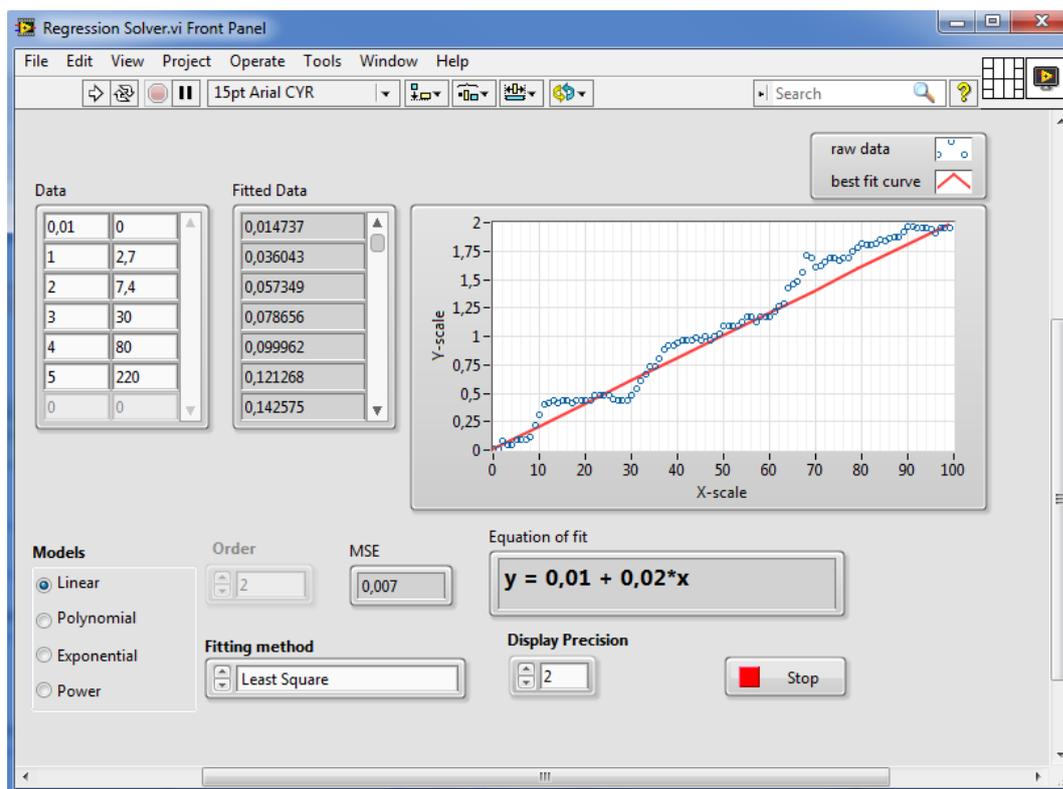


Рисунок 4.58 – Линеаризация данных устройства «АКИДП 1».

Лучшие результаты были получены при использовании линейной модели. Уравнение линеаризации экспериментальных данных можно записать в виде:

$$y = 0,01 + 0,02 * x \quad (4.42)$$

где  $y$  – поправочный коэффициент,  $x$  – относительное перемещение.

Коэффициент корреляции регрессии составил 0,990238, и стандартная ошибка составила 0,0874327, что говорит о хорошем соответствии между экспериментальными тарированными данными и уравнением линеаризации.

Общее корректировочное выражение для определения тарированного коэффициента можно записать в виде:

$$k = 0,01 + x * (0,02 - \text{tg}(\alpha)) \quad (4.43)$$

где  $\alpha$  – угол наклона кривой линеаризации, и в данном случае равен

0,0212 радиан.

Систематическая составляющая абсолютной погрешности определялась как,

$$A = h_s - h_i, \text{ мкм} \quad (4.44)$$

где  $h_i$  - истинное значение отклонения от плоскостности измерительной пластины.

Систематическая составляющая относительной погрешности:

$$\delta_s = \frac{h_s - h_i}{h_i} * 100\% \quad , \quad (4.45)$$

Среднее квадратичное отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum (h_i - h_s)^2} \quad , \quad (4.46)$$

Случайная составляющая основной относительной погрешности:

$$\Lambda = \frac{S * t}{h_s} * 100\% = \frac{S * 2}{h_s} * 100\% \quad , \quad (4.47)$$

Максимальное значение допускаемой основной относительной погрешности при  $P=0,95$ :

$$\delta = \delta_s + \text{sign}(\delta_s) * \Lambda \quad , \quad (4.48)$$

где  $\text{sign}$  -знаковая функция,

Доверительный интервал:

$$\delta_s + \Lambda < \sigma < \sigma_s - \Lambda \quad (4.49)$$

Результаты расчетов определения погрешности приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4.

Погрешности определения отклонения от плоскостности подложки

A, мкм	$\delta_s, \%$	S, мкм	$\Lambda, \%$	$\delta, \%$
1,27	0,2	1,04	0,08	0,216

#### 4.4.3. Определение метрологических характеристик устройства «ТВ-Дислок 1».

Определение метрологических характеристик, устройства контроля плотности дислокаций, довольно сложная задача. Ее сложность заключается в том, что измерение проводится путем анализа изображения полученного при помощи микроскопа. Изображение имеет ряд артефактов вызванных воздействием, как ростовых дислокаций, так и дефектов после ростовой обработки. Обработка изображения и определение плотности дислокации проводится лаборантом, что в свою очередь накладывает дополнительные погрешности.

Для определения погрешности разработанного комплекса мы использовали метод сравнения с эталоном, при этом в качестве эталона была выбрана усовершенствованная методика контроля плотности дислокаций в подложках GaAs, описанная выше (см. раздел 3.2.).

Подсчет дислокаций при использовании эталонного способа проводился в соответствии с ГОСТ 19658-81, (раздел «Определение плотности дислокаций в монокристаллических слитках кремния») в девяти точках.

Для упрощения вычисления плотности дислокаций и подсчета числа дислокаций была разработана программа, позволяющая оператору отмечать дислокации на мониторе компьютера, который подключен к объективу микроскопа.

Интерфейс программы представлен на рисунке 4.59.

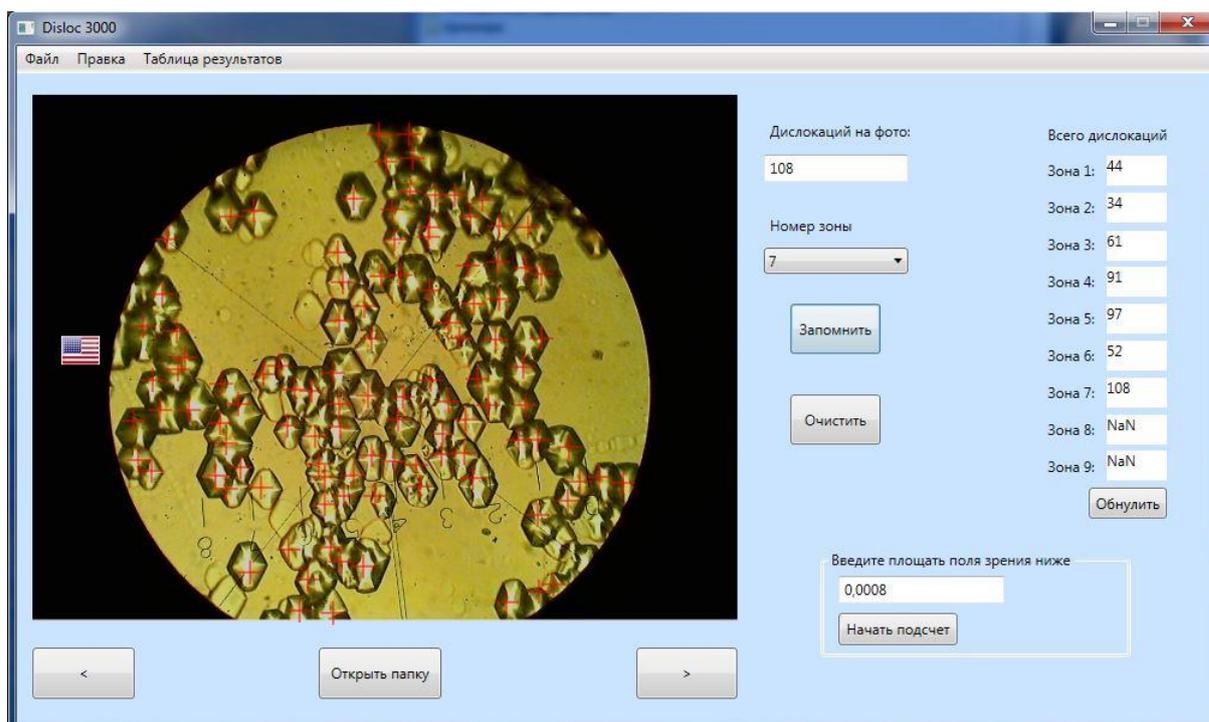


Рисунок 4.59 – Интерфейс программы для ручного подсчета дислокаций “Disloc 3000”.

Подсчет плотности дислокации программой выполняется следующим образом:

– по результатам измерений вычисляют среднее значение количества ямок травления в поле зрения объектива микроскопа по следующему выражению:

$$\bar{N} = \frac{\sum N_i}{n}, \quad (4.50)$$

где  $N_i$  — количество дислокаций в области зрения микроскопа,  $n$  — количество полей зрения. В соответствии с ГОСТ 19658-81 было выбрано 9 полей зрения.

– плотность дислокации рассчитывается по формуле:

$$N_D = \bar{N} \times K \quad (4.54)$$

где коэффициент  $K$  определяет поле зрения микроскопа, и в свою очередь вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{S} \quad (4.55)$$

где  $S$  — площадь зрения объектива микроскопа, которая определяется объектмикрометром.

Сравнительная таблица плотности дислокаций в пластинах GaAs определенная стандартным метод и методом, реализуемым автоматизированным комплексом «ТВ-Дислок1» приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5.

Плотность дислокаций в пластинах GaAs

№ образца	Стандартный метод «Disloc 3000», см <sup>-2</sup>	Усовершенствованный метод «ТВ-Дислок1», см <sup>-2</sup>	Примечание
1. АГЧП-98,0-650-(100)	1.3 x 10 <sup>5</sup>	8.7 x 10 <sup>4</sup>	Верх
2 АГЧХ-98,0-650-(100)	6.8 x 10 <sup>4</sup>	5.1 x 10 <sup>4</sup>	Середина
3 АГЧТ-98,0-650-(100)	8.7 x 10 <sup>4</sup>	6.9 x 10 <sup>4</sup>	Низ
4 АГЧХ-75,0-450-(100)	4.8x10 <sup>4</sup>	1.3x10 <sup>4</sup>	Середина

Погрешность комплекса находилась аналогично определению погрешности комплекса «Полярон-4».

Для определения основных метрологических характеристик вычислялись следующие величины:

Среднее значение абсолютной погрешности определялась как,

$$A = \frac{1}{n} \sum \delta_{sn} - \delta_{in}, D/\text{см}^2 \quad (4.54)$$

где  $\delta_{sn}$  - эталонное значение плотности дислокаций, измеренное стандартным методом,  $\delta_{in}$  - плотность дислокаций, измеренная комплексом,  $n$  - количество измерений.

Общее среднее значение абсолютной погрешности устройства «Дислок - ТВ» в соответствии с выражение 4. 54 можно определить как среднюю величину абсолютной погрешности для четырех пластин. Тогда можно записать:

$$A_c = \frac{1}{4}(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) = \frac{1}{4}(1,8 + 1,7 + 4,3 + 3,5) = 2,8 \approx 3 \quad (4.51)$$

где  $A_1$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным 1-й пластины;  $A_2$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным 2-й пластины;  $A_3$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным 3-й пластины;  $A_4$  = средняя абсолютная погрешность рассчитанная по данным 4-й пластины.

Относительная погрешность находилась в соответствии с выражением:

$$\delta_s = \frac{N_{ds} - N_{di}}{N_{di}} * 100\% . \quad (4.52)$$

откуда, общая относительная погрешность определится в соответствии с выражением:

$$\delta_c = \frac{1}{4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) = \frac{1}{4}(0,26 + 0,33 + 0,49 + 0,27) = 33\% \quad (4.53)$$

где  $\delta_1$  = средняя относительная погрешность, рассчитанная по данным 1-й пластины;  $\delta_2$  = средняя относительная погрешность, рассчитанная по данным 2-й пластины;  $\delta_3$  = средняя относительная погрешность, рассчитанная по данным 3-й пластины;  $\delta_4$  = средняя относительная погрешность, рассчитанная по данным 4-й пластины.

### **Выводы по разделу**

1. Усовершенствован метод измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия для условий серийного производства, и разработана аппаратура для его реализации. Метод обеспечивает проведение

неразрушающего контроля остаточных напряжений с абсолютной погрешностью  $\pm 2$  МПа.

Разработано устройство “Полярон – 4” позволяющие измерять остаточные напряжения в подложках арсенида галлия и отображать результаты в виде распределения остаточных напряжений в 2 D и 3D виде. Разработано программное обеспечение на базе программного комплекса LabView.

2. Усовершенствован метод контроля отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия позволяющий, в отличии от существующих, строить профиль отклонения от плоскостности подложки. Величина абсолютной погрешности метода составила 0,8 мкм. Разработан автоматизированный комплекс контроля отклонения от плоскостности подложек «АКИДП – 1» позволяющий в автоматическом режиме строить профили отклонения от плоскостности.

3. Усовершенствован метод измерения плотности дислокаций в подложках арсенида галлия. Метод поддерживает различные модели измерения дислокаций, включая модель по ГОСТ 19658-81 и модель по SEMI M83-1112. Разработан автоматизированный комплекс «ТВ-Дислок1» реализующий усовершенствованный метод. Относительная погрешность метода составила 33%.

**Раздел 5**  
**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА**  
**ПОДЛОЖЕК GaAs ДИАМЕТРОМ 4''**

**5.1. Разработка, устройства контроля диаметра выращиваемого  
слитка GaAs.**

Как было показано выше, качество подложек GaAs напрямую зависит от структурного совершенства слитков, и в частности от плотности дислокаций и остаточных напряжений в слитках. Поэтому технология изготовления подложек GaAs должна также касаться и технологии выращивания слитков.

Основными факторами, приводящими к повышенным значениям дислокаций и остаточных напряжений в слитках GaAs при выращивании, являются температурные градиенты. В работе [175] исследовалась связь между диаметром слитка и его структурным совершенством.

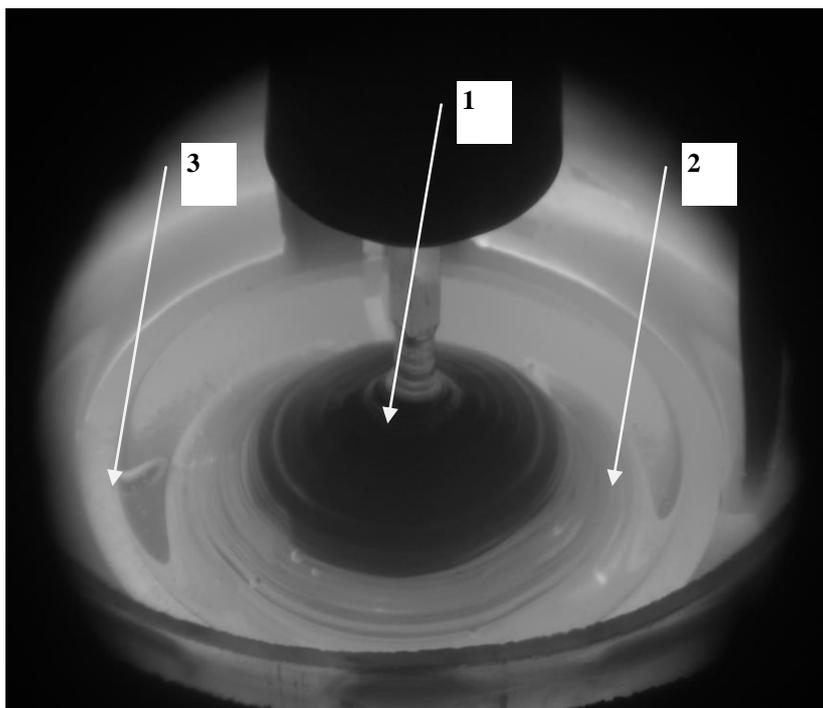
Наиболее часто в промышленности для выращивания слитков арсенида галлия используется метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski – LEC). В тоже время сущность LEC метода не позволяет использовать традиционные и хорошо зарекомендовавшие себя при выращивании слитков кремния методом Чохральского способы измерения диаметра слитка [176,177].

Существует несколько методов измерения диаметра слитка в процессе его выращивания по методу Чохральского. Самое большое распространение получили оптические методы, в основе которых лежит автоматическое определение границы расплав-кристалл [178]. Граница определяется яркостным кольцом, которое называется мениском. Мениск - это столб жидкости, который образуется над поверхностью расплава благодаря силам поверхностного натяжения, действующим на границах жидкой фазы и

слитка, которые образуются при вытягивании слитка из расплава.

К оптическим методам принадлежат метод определения диаметра электронным оптическим датчиком и метод с использованием видеокамеры. Как показано в [178], данный метод позволяет измерять диаметр слитка на всех этапах его выращивания и исключить погрешности, связанные с неточностью позиционирования оптического датчика. Система измерения диаметра слитка кремния, реализующая телевизионный метод предложена в работе [179].

При выращивании слитков арсенида галлия, по методу Чохральского с жидкостной герметизацией, не представляется возможным использование оптических методов, так как граница расплав-кристалл находится под слоем жидкого герметизатора. Слиток GaAs в процессе роста показан на рис. 5. 1.



1 – слиток GaAs, стадия выращивания прямого конуса; 2 – жидкостной герметизатор (борный ангидрид); 3 – фоновый нагреватель.

Рисунок 5.1 – Изображение процесса роста слитка арсенида галлия с жидкостной герметизацией.

В подавляющем большинстве случаев решение задачи измерения диаметра растущего слитка GaAs получают, используя весовой метод [180 – 182]. Суть этого метода заключается в том, что значение диаметра определяется расчетным путем на основе показаний датчика веса, которые представляют собой сумму веса штока и образовавшейся до момента измерения части слитка, приращения веса слитка за определенное время, веса мениска и сил поверхностного натяжения.

При использовании метода Чохральского слиток, подвешенный на штоке в процессе выращивания, поднимается вверх со скоростью, обеспечивающей кристаллизацию при текущем температурном градиенте, и также вращается вокруг своей оси для равномерного распределения тепловых потоков. Процесс проходит в ростовой камере, при вакууме и температуре порядка 1200 °С.

Для реализации весового метода измерения диаметра, шток с подвешенным слитком через вращающийся токопереход механически соединяется с датчиком веса.

Метод, измерения диаметра слитков арсенида галлия в процессе его выращивания, основанный на прямом взвешивании слитка, в настоящее время является самым распространенным. В тоже время этому методу присущ ряд недостатков, которые приводят к погрешности измерения. Основными причинами, приводящими к погрешностям, являются:

- а) широкий диапазон веса слитка, который изменяется от нескольких граммов в начале выращивания до десятков килограммов в конце;
- б) наличие жидкостного герметизатора под слоем которого происходит кристаллизация, и который приводит к нестационарным гидродинамическим процессам и изменяющимся присоединенным массам, влияющим на вес слитка.

Большое влияние на погрешность измерения оказывает температура в зоне установки весоизмерительного оборудования и нестабильность питающего напряжения, вызванная работой систем вращения и перемещения

слитка с тиглем. С увеличением диаметра слитка усиливается отрицательное влияние погрешностей измерения его веса, которое приводит к недопустимо большой погрешности измерения диаметра слитка. Это в свою очередь приводит к погрешностям работы систем автоматического управления процессом выращивания слитка и, как следствие, к увеличению температурных градиентов, увеличению плотности дислокаций, появлению недопустимых остаточных напряжений в слитке, увеличению процента брака.

Снижение погрешности измерения диаметра слитка в процессе его выращивания возможно при разработке новых методов и устройств, в которых используются преимущества существующих методов и устраняются присущие им недостатки.

Для решения задачи снижения погрешности, измерения диаметра слитка арсенида галлия, выращиваемого по ЛЕС методу в промышленном производстве необходимо решить следующие задачи:

- разработка метода измерения, диаметра слитка арсенида галлия в процессе выращивания, обеспечивающего абсолютную погрешность не более  $\pm 1,5$  мм;
- синтез структурной схемы и разработка устройства, реализующего данный метод;
- оценка погрешности разработанного устройства.

Связь между весом слитка и его радиусом [173] в процессе выращивания определяется как:

$$F(t) = m_0 g + \int_0^t \pi r^2 \rho_k g v dt + \pi r_m^2 \rho_{жс} g h + 2\pi r \sigma_{жс} \sin \alpha \quad (5.1)$$

где  $m_0$  — масса штока со слитком;  $\rho_k$  и  $\rho_{жс}$  — плотности GaAs в твердом и расплавленном состоянии;  $r$  — радиус слитка;  $r_m$  — усредненный радиус мениска;  $v$  — скорость выращивания;  $h$  — высота мениска;  $\sigma_{жс}$  — коэффициент поверхностного натяжения расплава,  $\alpha$  — угол между поверхностью мениска и поверхностью расплава.

Рассмотрим более подробно весовой метод определения диаметра слитка GaAs не учитывая все составляющие которые влияют на вес, как это сделано в выражении (5.1).

Измерение веса производится в определенные моменты времени ( $dt$ ) при известной скорости выращивания  $V_s$ . При известной плотности расплава GaAs вес слитка определится как:

$$P = S \times \rho \times dL \quad (5.2)$$

где  $S$  - площадь горизонтального сечения слитка,  $\rho$  - плотность расплава,  $dL$  – длина сегмента выращенного за время  $dt$ .

В свою очередь длина сегмента выращенного слитка определится через известную скорость выращивания и известный промежуток времени. Следовательно,

$$dL = V \times dt \quad (5.3)$$

Таким образом, с учетом (5.3), увеличение веса за определенный промежуток времени можно определить как:

$$dP = S \times \rho \times V \times dt \quad (5.4)$$

Откуда

$$S = \frac{dP}{\rho \times V \times dt} \quad (5.5)$$

С учетом цилиндрической формы сечения слитка диаметр можно определить по выражению (5.6).

$$D = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = 2 \times \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (5.6)$$

И с учетом (5.5) можно записать

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{1}{\pi \times \rho \times V} \times \frac{dP}{dt}} \quad (5.7)$$

В свою очередь вес слитка является функцией выходного сигнала датчика веса.

Таким образом для определения диаметра слитка GaAs достаточно измерять его вес через определенные промежутки времени при известной скорости выращивания.

Как видно из выражения (5.1) погрешности измерения веса слитка непосредственно влияют на погрешность определения его диаметра.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на погрешность измерения на основе анализа структурной схемы канала измерения веса слитка, которая представлена на рис. 5.2.

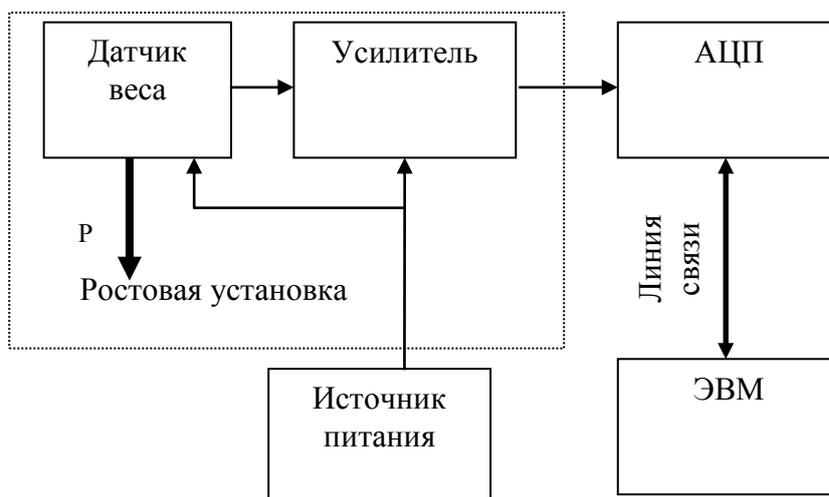


Рисунок 5.2 – Структурная схема канала измерения веса слитка GaAs в процессе выращивания.

Для анализа влияния элементов схемы на общую погрешность измерения разделим их на две группы.

- погрешности, вызванные аналоговой частью канала, в которую входят датчик веса, усилитель сигнала датчика и источник питания;
- погрешности, вызванные цифроаналоговой частью, в которую входит аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и линия связи.

Для оценки влияния аналоговой части на общую погрешность измере-

ния можно использовать математическую модель, полученную по схеме полного факторного эксперимента [174].

Выбор такой модели обусловлен следующими ее свойствами:

- коэффициенты модели в статистическом смысле независимы;
- коэффициенты модели максимально устойчивы;
- каждый коэффициент несет семантическую информацию о влиянии соответствующего эффекта на моделируемый критерий качества;
- план эксперимента соответствует большинству критериев оптимальности;

Структуру многофакторной математической модели, в общем случае определим исходя из возможного множества эффектов, соответствующих множеству эффектов схемы полного факторного эксперимента. Она задается следующим выражением:

$$(1 + X_1 + X_1^2 + \dots + X_1^{s_1-1}) \times \dots \times (1 + X_k + X_k^2 + \dots + X_k^{s_k-1}) \rightarrow N_o \quad (5.8)$$

где  $X_1, \dots, X_k$  – факторы математической модели;

$s_1, \dots, s_k$  – число уровней факторов  $X_1, \dots, X_k$ ;

$k$  – общее число факторов;

$N_o$  – число опытов полного факторного эксперимента, равное числу структурных элементов его схемы.

Необходимым условием для построения модели является выбор числа уровней факторов, значение которых должно быть на 1 больше максимальной степени полинома, необходимой для адекватного описания этими факторами поверхности отклика. Необходимое число экспериментов определится как:

$$N_o \cong 1,5 \dots 2 \sum_{i=1}^k (S_i - 1) \quad (5.9)$$

где  $S_i$  – число уровней фактора  $X_i$ ;  $1 \leq i \leq k$ .

В качестве факторов примем внешние возмущения, оказывающие вли-

яние на датчик веса и усилитель. Отнесем к ним температуру в месте установки датчика и усилителя и нестабильность питающего напряжения.

Учитывая, что в нашем случае число факторов не превышает 10, выбираем коэффициент в выражении (5.9) который равен 2.

Примем, что основными влияющими факторами на показания датчика веса и усилителя являются следующие:

- изменение температуры в месте расположения датчика веса, вызванное колебаниями температуры в процессе выращивания, которое может меняться в диапазоне от 20 до 100°C;

- колебания питающего напряжения, вызванные работой силовых агрегатов установки, которые изменяются в диапазоне от 22 до 26 В.

Введем обозначение факторов и значения их уровней.

$X_1$  – температура в месте расположения датчика веса. Уровни: 20; 50; 100°C.

$X_2$  – напряжение питания. Уровни: 22; 24,0; 26 В.

$X_3$  – измеряемый вес слитка. Уровни: 1; 2000; 4000; 6000; 8000; 10000 г.

В нашем случае необходимое число экспериментов в соответствии с (5.9) составило 18.

Значения уровней варьирования факторов после преобразования в ортогональные контрасты, позволили получить структуру полного факторного эксперимента, будет иметь следующий вид:

$$(1 + x_1) (1 + x_2 + z_1) (1 + x_3 + z_2) \rightarrow N_{18} \quad (5.10)$$

где  $x_1, x_2, x_3; z_1, z_2$  – соответственно линейные, квадратичные и кубические контрасты факторов  $X_1, X_2, X_3$ ;  $N_{18}$  – число структурных элементов для схемы полного факторного эксперимента.

Выполненный предварительный расчет математической модели показал, что в качестве оценки дисперсии воспроизводимости можно выбрать величину равную 1,5.

Число степеней свободы было принято равным 18.

Дисперсия была использована для определения стандартной ошибки коэффициентов уравнения регрессии.

Для вычисления математической модели и ее критериев качества использовалась программа Minitab Statistical Software.

Полученная математическая модель имеет вид:

$$\hat{y} = 373,42x_3 + 4,2634x_2 - 3,0341z_1 + 3,1341x_1 - 0,8941x_1z_1 - 0,84136z_1x_2 + 0,1931z_1x_3, \quad (5.11)$$

где:

$$x_1 = 0,00739821 (X_1 - 3,2273);$$

$$z_1 = 0,202954 (x_1^2 - 0,035873x_1 - 0,05876);$$

$$x_2 = 0,229878 (X_2 - 1);$$

$$z_2 = 0,15 (x_2^2 - 0,067208);$$

$$x_3 = 0,0021 (X_3 - 4,5);$$

Проведенный информационный анализ полученной модели с учетом доли участия каждого элемента показывает, что:

- элемент  $x_3$  сравнительно слабо ( $3,73 \cdot 10^{-6}$ ) взаимодействует с квадратичным элементом  $z_1$  (температура в месте расположения датчика веса): взаимодействие  $z_1x_3$ . Таким образом, математическая модель должна включать эффект влияния температуры в месте расположения датчика веса;

- колебания напряжения питания приводят к изменению результатов взвешивания как через  $x_2$ , так и через  $z_2$ . Их суммарная доля участия составляет  $2,75 \cdot 10^{-1}$ ;

- изменение температуры в месте расположения датчика веса влияет в виде квадратичного  $z_1$  и линейного  $x_1$  эффектов с суммарной долей участия  $1,17 \cdot 10^{-2}$ ;

- изменение температуры в месте расположения датчика веса и изменение напряжения питания образуют, парное взаимодействие  $x_1z_2$  с долей участия  $3,05 \cdot 10^{-5}$ ;

Погрешности, вызванные цифроаналоговой частью, формируются в

основном шумом АЦП. Минимизацию такой погрешности можно осуществить, используя фильтрацию числового ряда, который представляет собой данные измерения веса, собираемые с частотой дискретизации АЦП. Для решения этой задачи можно применить метод скользящего среднего с использованием критерия минимального среднего квадрата ошибки [175].

Экспоненциальное скользящее среднее рассчитывается по формуле:

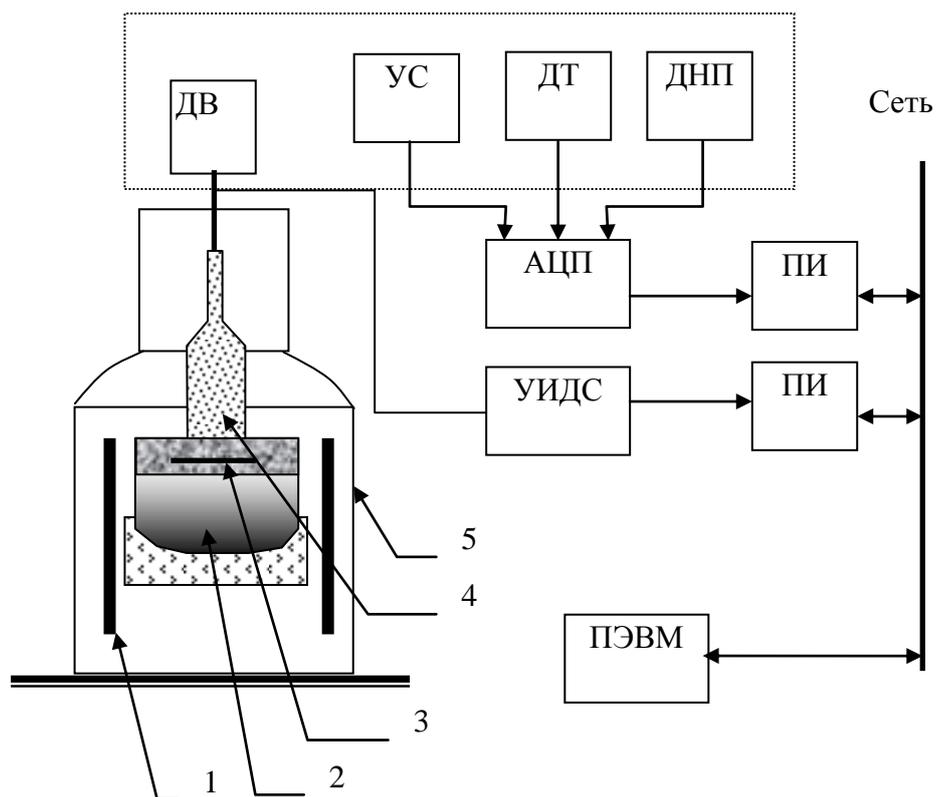
$$P_{cc\ i} = P_{cc\ i-1} + \alpha * (p_i(t) - P_{cc\ i-1}) \quad (5.12)$$

где  $P_{cc\ i}$  - результат фильтрации в текущий момент времени,  $P_{cc\ i-1}$  - результат фильтрации в предыдущий момент времени,  $\alpha$  – коэффициент экспоненциального усреднения равный  $2/(n+1)$ , где  $n$  – величина временного ряда окна усреднения равная 100,  $p_i(t)$  – значение измеренного веса.

Структурная схема устройства измерения диаметра слитка, реализующая предложенный метод, представлена на рисунке 5.4.

В состав устройства входит: ДВ – датчик веса, УС – усилитель, ДТ – датчик температуры, установленный возле датчика веса, ДНП – датчик напряжения питания усилителя и датчик веса, измеряющий колебания питающего напряжения датчика веса и усилителя, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, УИДС – устройство измерения длины слитка, ПИ – преобразователь интерфейса, ПЭВМ – промышленная ЭВМ.

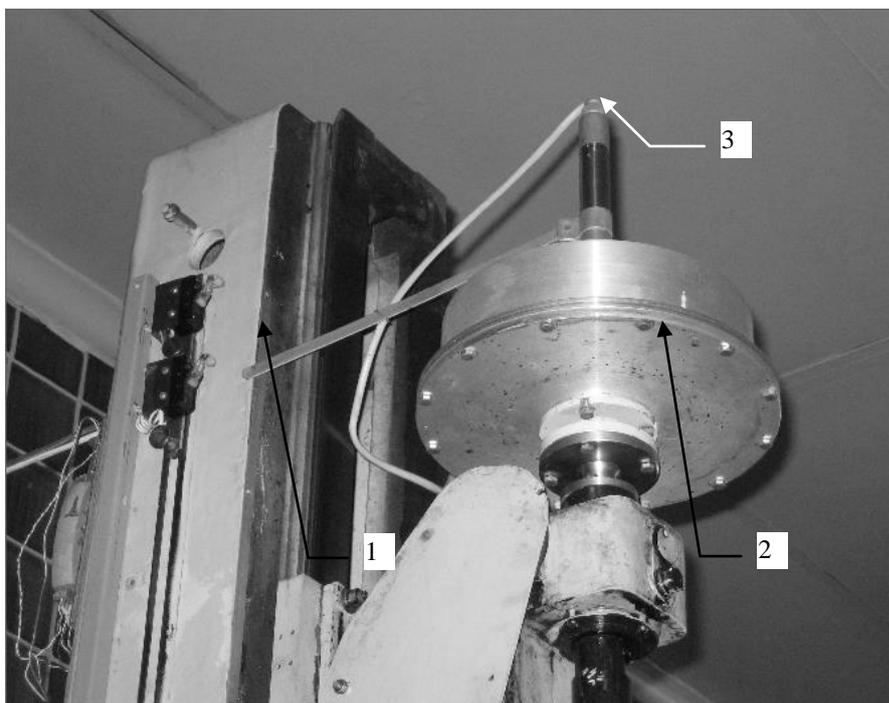
Информация о весе слитка полученная датчиком веса связанным через вращающийся токопереход и разделительную камеру со слитком, поступает на вход усилителя напряжения. Выход усилителя связан с входом АЦП. К другим входам АЦП подключены датчик температуры и датчик напряжения питания УС и ДВ, информация с которых позволяет минимизировать влияние возмущающих факторов на точность измерения веса. Конструктивно, датчик веса, усилитель и датчики установлены в верхней части ростовой установки, как показано на рис. 5.4. Цифровой выход АЦП, через преобразователь интерфейса, передает информацию по промышленной сети ModBus ПЭВМ. Через эту же сеть в ПЭВМ передаются данные о длине слитка.



1 – основной нагреватель; 2 – тигель с расплавом и жидкостным герметизатором; 3 – фоновый нагреватель; 4 – слиток; 5 – ростовая камера.

Рисунок 5.3 – Структурная схема устройства измерения диаметра слитка.

Анализ датчиков измерения веса показывает, что для решения задачи, определения диаметра слитка арсенида галлия лучше всего подходит пьезоэлектрический датчик с включением элементов по мостовой схеме.



1. Колонна ростовой установки; 2. Корзина с установленными внутри датчиком веса, усилителем, датчиком температуры и датчиком напряжения питания; 3. Вращающийся токопереход.

Рисунок 5.4 – Ростовая установка «Арсенид 1» с установленными датчиками.

Датчики такого типа производятся фирмой Scaime (Франция). С учетом, максимального веса выращиваемого слитка, можно использовать датчик марки F60X10 C3 CH 5e.

При использовании датчиков веса большое внимание уделяется линейности. Для решения этой задачи, была разработана схема проверки линейности датчика F60X10, которая приведена на рисунке 5.5.

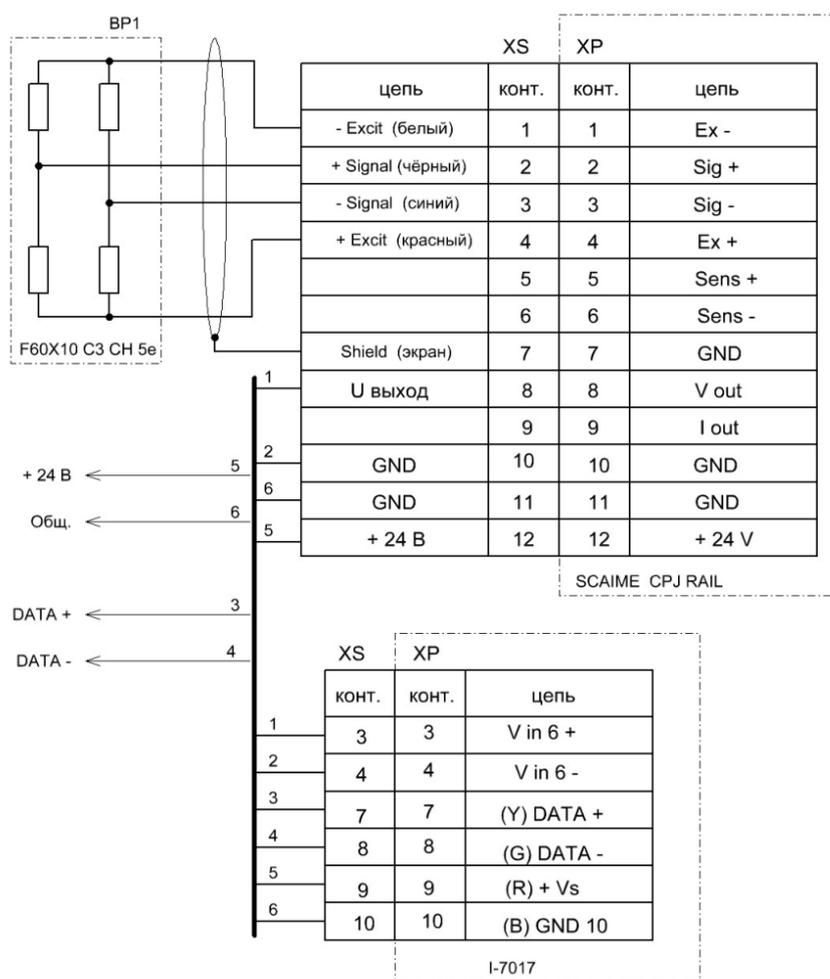


Рисунок 5.5 – Схема включения датчика веса для проверки линейности.

Результаты проверки датчика веса приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Тарировочные значения датчика веса.

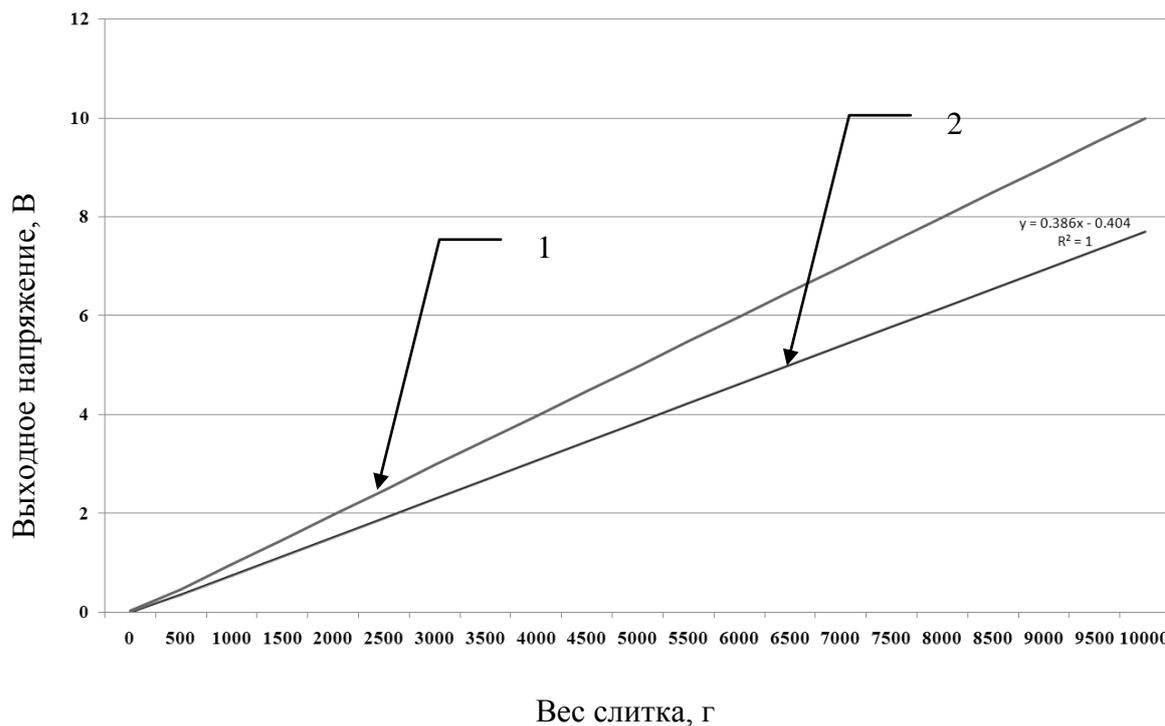
Вес, г	Напряжение на выходе измерительного преобразователя
0	0.028
500	0.358
1000	0.745
1500	1.131
2000	1.519
2500	1.907

продолжение табл.5.1

3000	2.293
3500	2.675
4000	3.065
4500	3.451
5000	3.837
5500	4.224
6000	4.612
6500	5
7000	5.386
7500	5.774
8000	5.16
8500	5.548
9000	5.933
9500	7.32
10000	7.705

По полученным данным, приведенным в таблице 5.3. можно видеть, что характеристика датчика является нелинейной, и для использования измерения диаметра слитка арсенида галлия, этого датчика, необходимо выполнить линеаризацию, и определить коэффициент наклона характеристики.

Учитывая, что датчик веса совместно с усилителем имеет наклон амплитудной характеристики, не соответствующий выбранному нами диапазону веса слитка GaAs (1 – 10 кг), возникла необходимость в корректировке характеристики, которая была выполнена нами путем натурных испытаний. Полученная характеристика представлена на рисунке 5.6.



1 – график зависимости напряжения от веса для системы (датчик F60X10 – измерительный преобразователь *CPJ*); 2 – график заводской измерительной характеристики усилителя датчика веса.

Рисунок 5.6 – График линейаризации датчика веса, слитка арсенида галлия.

В результате проведенных испытаний нами было получено уравнение линейаризации измерительной характеристики:

$$U_{сл} = (0.386x - 0.404) \quad (5.13)$$

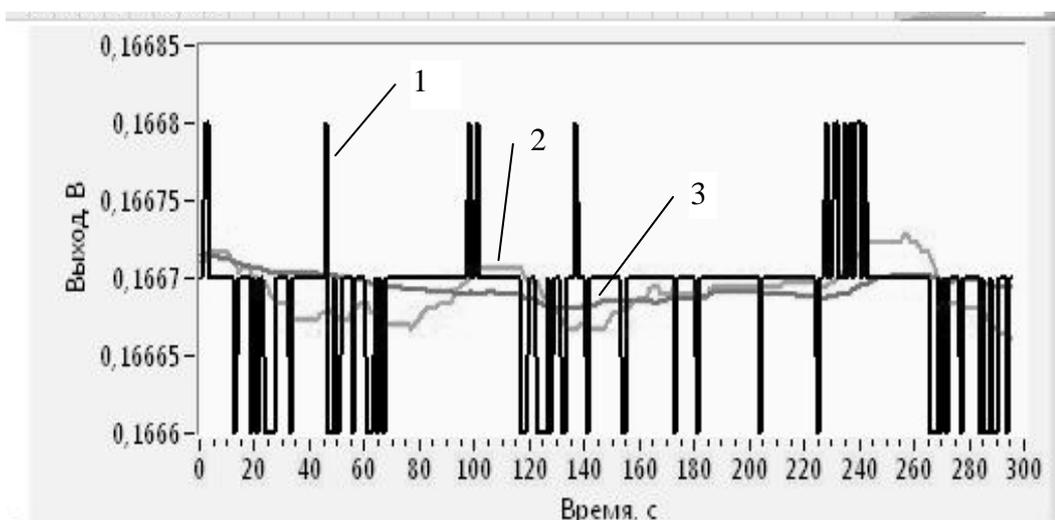
где  $x$  - выходное значение датчика в текущий момент времени.

Расчет диаметра слитка, реализации фильтрации и корректировка возмущающих факторов производится программным путем. Алгоритм работы программы представлен на рис. 5.7.



Рисунок 5.7 – Алгоритм работы устройства измерения диаметра слитка GaAs.

Применение фильтрации результатов измерения веса слитка, позволило снизить нестабильность измерения веса и, как следствие увеличить точность определения диаметра. Результат применения фильтра представлен на рисунке 5.8.



1—выходное напряжение усилителя датчика веса с шумом АЦП; 2 — выходное напряжение датчика веса после фильтрации методом скользящего среднего; 3 - выходное напряжение датчика веса после фильтрации экспоненциальным скользящим средним.

Рисунок 5.8 – Результат работы фильтра весоизмерительного канала.

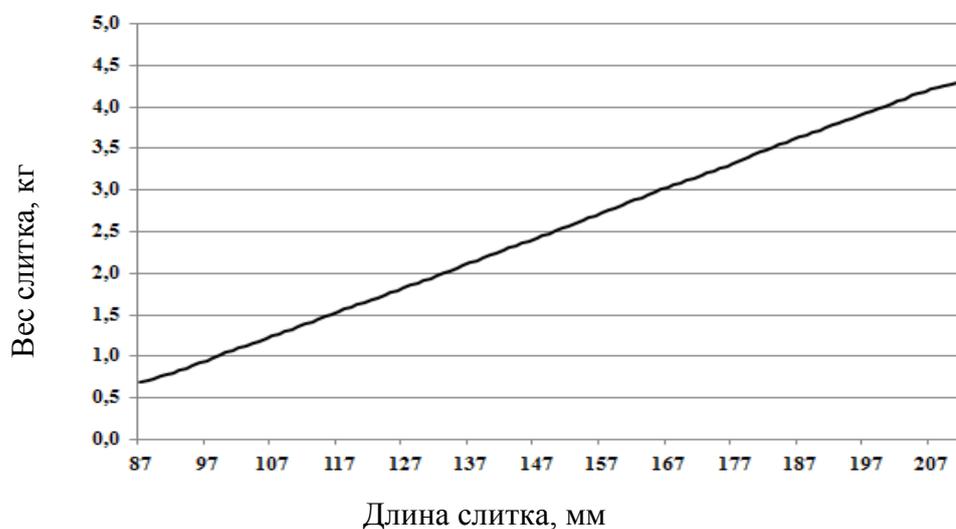
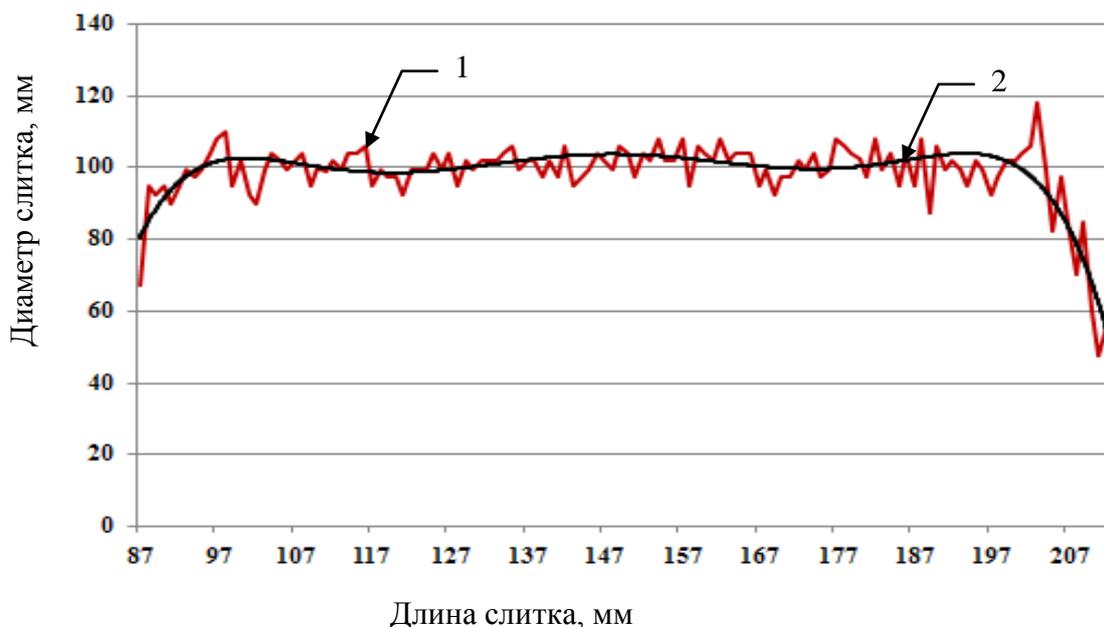


Рисунок 5.9 – График изменения веса слитка GaAs в процессе выращивания.



1 – измеренный диаметр слитка без коррекции возмущающих факторов и шумов АЦП, 2 - измеренный диаметр слитка с применением коррекции и фильтрации.

Рисунок 5.10 – Результат реализации метода и устройства измерения диаметра слитка GaAs в процессе выращивания.

Выращенный слиток GaAs диаметром 100 мм., показан на рисунке 5.11.

Натурные испытания устройства измерения диаметра слитка GaAs проводились на базе ЧП "Галар" по следующей методике, согласованной с центральной заводской лабораторией измерений:

- разработанным устройством измерялся диаметр растущего слитка GaAs;
- фиксировалась длина слитка GaAs;
- по завершению процесса измерялось значение диаметра полученного слитка при помощи штангенциркуля в контрольных точках, привязанных к длине слитка.



Рисунок 5.11 – Слиток GaAs, диаметр которого измерялся разработанным устройством с использованием предложенного метода.

Для определения основных метрологических характеристик вычислялись следующие величины:

- систематическая составляющая абсолютной погрешности определялась как:

$$A_i = |d_i - d_k|, \text{ мм} \quad (5.14)$$

где  $d_i$  – диаметр, измеренный устройством,  $d_k$  – диаметр слитка, измеренный штангенциркулем.

- абсолютная погрешность диаметра, измеренного устройством, определялась как:

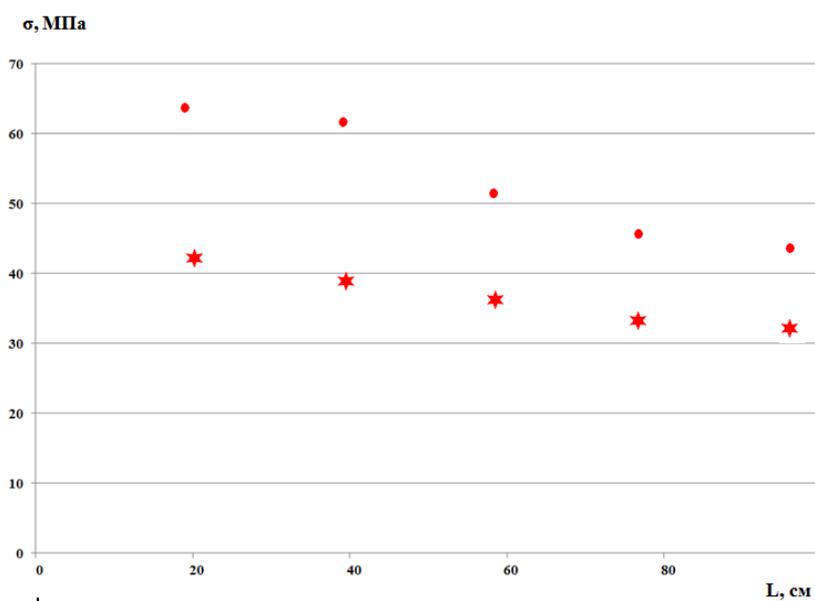
$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \text{ мм} \quad (5.15)$$

где  $n$  - количество измерений.

Полученная абсолютная погрешность измерения диаметра разработанным устройством составила 1,5 мм.

Уменьшение нестабильности диаметра в процессе выращивания слитка позволило уменьшить температурные градиенты, и как следствие привело к уменьшению уровня остаточных напряжений и плотности дислокаций в подложках GaAs.

Для качественной оценки влияния устройства контроля диаметра выращиваемого слитка GaAs на остаточные напряжения и плотность дислокаций нами были проведены измерения данных параметров.



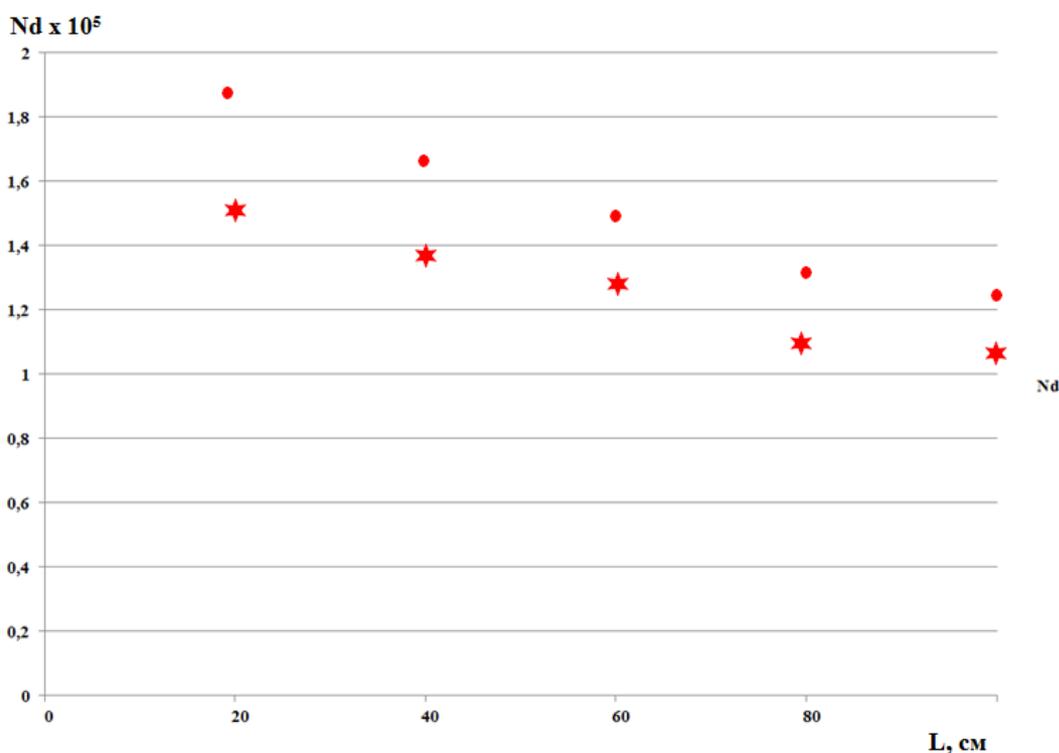
\* – с применением устройства контроля диаметра; ● – без устройства контроля диаметра

Рисунок 5.12 – Остаточные напряжения в пластинах GaAs полученных из слитков, выращенных с устройством и без устройства контроля диаметра.

Для исследования нами были выращены 2 слитка GaAs марки АГЧХ(100) 100 к 5, один из которых был выращен без устройства контроля диаметра, а другой с использованием устройства. Из каждого слитка вырезались 5 пластин толщиной 650 мкм, которые в последствии подго-

тавливались в соответствии с ТУ 48-4-276-82. После полировки пластин проводилось измерение остаточных напряжений в соответствии с предложенной в работе методикой и с использованной разработаного автором устройства «Полярон 4». Результаты измерения приведены на рис.5.12.

После измерения остаточных напряжений было выполнено травление пластин в соответствии с предложенной в работе усовершенствованной методикой, и измерена плотность дислокаций. Измерения проводилось по усовершенствованной в работе методике и с использованием разработаного автором устройства контроля плотности дислокаций «ТВ Дислок». Результаты контроля плотности дислокаций приведены на рис. 5.13.



\* – с использование устройства контроля диаметра; ● – без использования устройства контроля диаметра

Рисунок 5.13 – Плотность дислокаций в пластинах GaAs полученных из слитков, выращенных с применением и без применения устройства контроля диаметра.

Проведенные исследования подтвердили, что использование устрой-

ства контроля диаметра приводит к снижению остаточных напряжений в верхней части слитка порядка на 15%, и в нижней части слитка приблизительно на 10%.

Соответственно плотность дислокаций снижается в верхней части слитка на 10%, и в нижней части на 5%.

## 5.2. Разработка технологии отжига слитка GaAs.

Отжиг слитка и подложек - обязательный технологический процесс производства подложек GaAs. Во время отжига снимаются термоупругие напряжения, и как следствие улучшаются механические свойства слитка и электрические характеристики подложек. Отжиг слитка позволяет улучшить оптические характеристики подложек, в частности пропускание ИК излучения [176].

Решение задачи усовершенствования технологии и аппаратуры для отжига слитка арсенида галлия является актуальной задачей, как с научной, так и с практической точки зрения.

Процесс отжига слитков арсенида галлия заключается в нагреве слитка с заданным температурным градиентом до определенной температуры, выдержке слитка при этой температуре заданное время и охлаждение слитка с заданным градиентом до температуры окружающей среды. Параметры процесса отжига зависят от диаметра слитка. В настоящее время эти параметры определяются технологом интуитивно, регулирование параметров производится аппаратчиком вручную.

В процессе отжига слиток подвергается воздействию высокой температуры (порядка 1000 °С) и, следовательно, подвергается пластической деформации, которая зависит от времени нагрева. В работах [245, 246] такая деформация называется деформацией ползучести.

Связь между деформацией ползучести и плотностью дислокаций в полупроводниковых материалах в виде аналитического выражения показана в работе [179].

Анализ процесса формирования напряжений и дислокаций во время отжига можно выполнить, используя результаты, полученные для этих параметров в процессе выращивания слитков GaAs [180, 181], с учетом того, что процесс отжига является более простым процессом, чем выращивание. Это определяется тем, что при отжиге не изменяется геометрия слитка, и отсутствует слой жидкого герметизатора.

Рассмотрим влияние деформации слитка, вызываемой изменением температуры в процессе отжига на формирование дислокаций. Как известно, общая деформация слитка может быть записана в виде:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^t + \varepsilon_{ij}^c, \quad (5.16)$$

где  $\varepsilon_{ij}^e$  – упругая деформация,  $\varepsilon_{ij}^t$  – тепловая деформация и  $\varepsilon_{ij}^c$  – деформация ползучести.

Значение деформации ползучести  $\varepsilon_{ij}^c$  может быть получено из работы [182], и, следовательно, основываясь на результатах работы [183] можно записать:

$$\varepsilon_{ij}^c = f S_{ij}, \quad (5.17)$$

где

$$f = \frac{bk_0 N_m \exp(-Q/kT) (\sqrt{J'_2} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^P}{2\sqrt{J'_2}} \quad (5.19)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\sigma_{kk} \delta_{ij}}{3}, \quad J'_2 = \frac{S_{ij} S_{ji}}{2}. \quad (5.20)$$

В выражениях (5.19, 5.20) параметр  $N_m$  – плотность дислокаций,  $\sigma_{ij}$  – напряжение,  $S_{ij}$  – девиатор напряжения, который характеризует отклонение данного напряженного состояния от состояния всестороннего растя-

жения или сжатия,  $J$  - второй инвариант девиатора напряжения,  $\sqrt{J_2}$  – тепловое напряжение.

Из выражения (5.19) можно найти скорость размножения дислокаций:

$$\dot{N}_m = Kk_0 N_m e^{-Q/kT} (\sqrt{J_2} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^p \times (\sqrt{J_2} - D\sqrt{N_m})^\lambda \quad (5.21)$$

где  $D$  – коэффициент механического упрочнения,  $b$  – вектор Бюргера,  $Q$  – потенциал Пайерлса,  $k$  – постоянная Больцмана.

Из выражений (5.17) и (5.21) можно видеть, что скорость размножения дислокаций и деформация ползучести становятся равными нулю в том случае если:

$$\sqrt{J_2} - D\sqrt{N_m} - \tau_d \leq 0 \quad . \quad (5.22)$$

Следовательно, если начальная плотность дислокаций  $N_{m0}$  равна 0, то и  $N_m$  – рано нулю. Таким образом, нужно принять начальное значение  $N_{m0}$ , равным значению плотности дислокаций в слитке после выращивания.

Напряжение торможения дислокаций  $\tau_d$  можно определить по выражению:

$$\log_{10} \tau_d = 4,83 + 1382/T, \quad (5.23)$$

Численный анализ влияния температуры в процессе отжига на плотность дислокаций можно провести с использованием метода конечных элементов. Для решения этой задачи мы использовали программный пакет Ansys.

В качестве начальных условий для расчета были выбраны следующие значения, полученные из работы [184]:

$N_m$ – плотность дислокаций	$6.0 \times 10^5$	$m^{-2}$
$B$ – величина вектора Бюргера	$4.0 \times 10^{-8}$	$m$
$Q$ – потенциал Peierls	1.5	eV
$k$ – постоянная Больцмана	$8.617 \times 10^{-5}$	eV/K
$K$ – материальная константа	$7.0 \times 10^{-3}$	m/N
$D$ – к-т механического упрочнения	3.1	N/m
$k_0$ – материальная константа	$1.80 \times 10^{-8}$	$m^{2p+1/Nps}$
$p$ – материальная константа	1.7	
$\lambda$ – материальная константа	1.0	

Анализ тепловых режимов при отжиге слитка и подложек позволяет сделать вывод о температурной зависимости коэффициента удельной теплопроводности  $k$  от удельной теплоемкости  $C_p$ . При увеличении температуры  $k$  уменьшается и  $C_p$  увеличивается. Это означает, что теплота плохо распространяется в подложке, и перепад температур увеличивается с увеличением температуры.

Расчитанное распределение температуры в слитке при отжиге показано на рис. 5.12. Можно видеть, что разница температуры в центре и на поверхности слитка достигает  $5^\circ\text{C}$ , что вызывает температурный градиент.

Для анализа влияния температурных режимов на формирование дислокаций и величину термоупругих напряжений в подложке расчетным методом мы выбрали наиболее типовые два режима отжига (рисунки 5.14 и 5.15), отличающиеся температурными градиентами и временем этапов процесса.

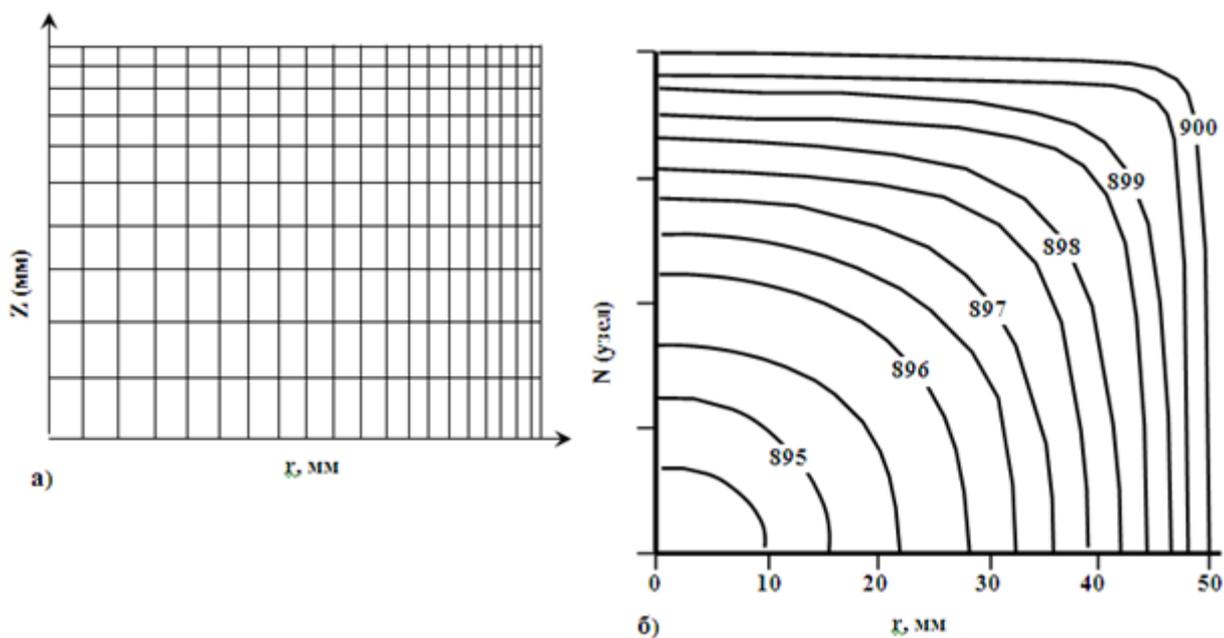


Рисунок 5.14 – Рассчитанные значения распределения температуры в слитке при отжиге: а) сетка для моделирования, б) распределение температуры по радиусу слитка.

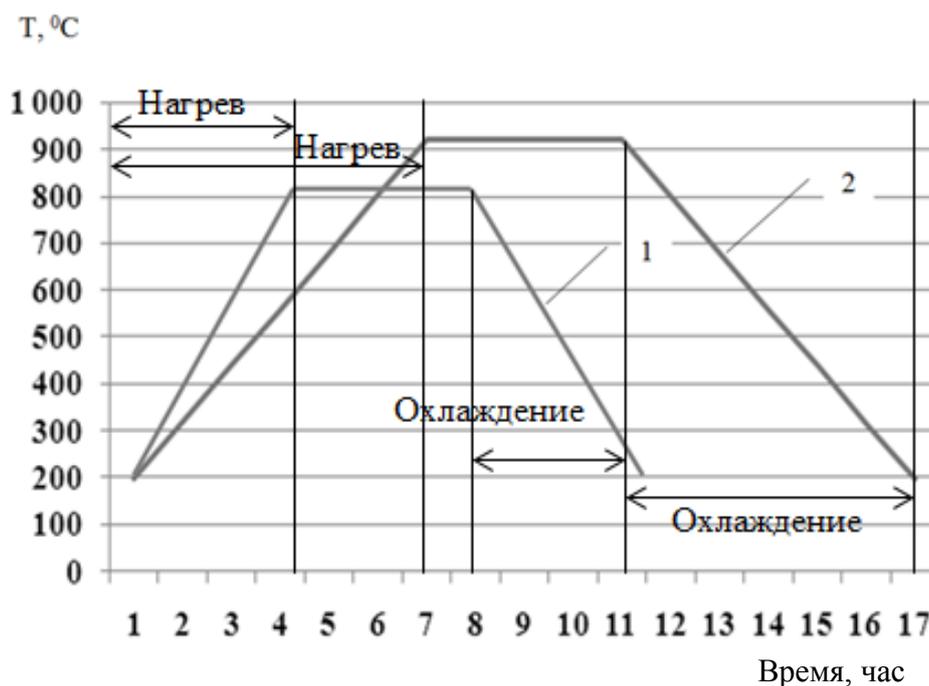


Рисунок 5.15 – Режимы отжига слитка для расчета дислокаций и напряжений: 1 – режим № 1; 2 – режим № 2.

Первый режим характеризуется температурным градиентом 150 °С/час и максимальной температурой 800 °С, второй режим – температурным градиентом 100 °С/час и максимальной температурой 900 °С.

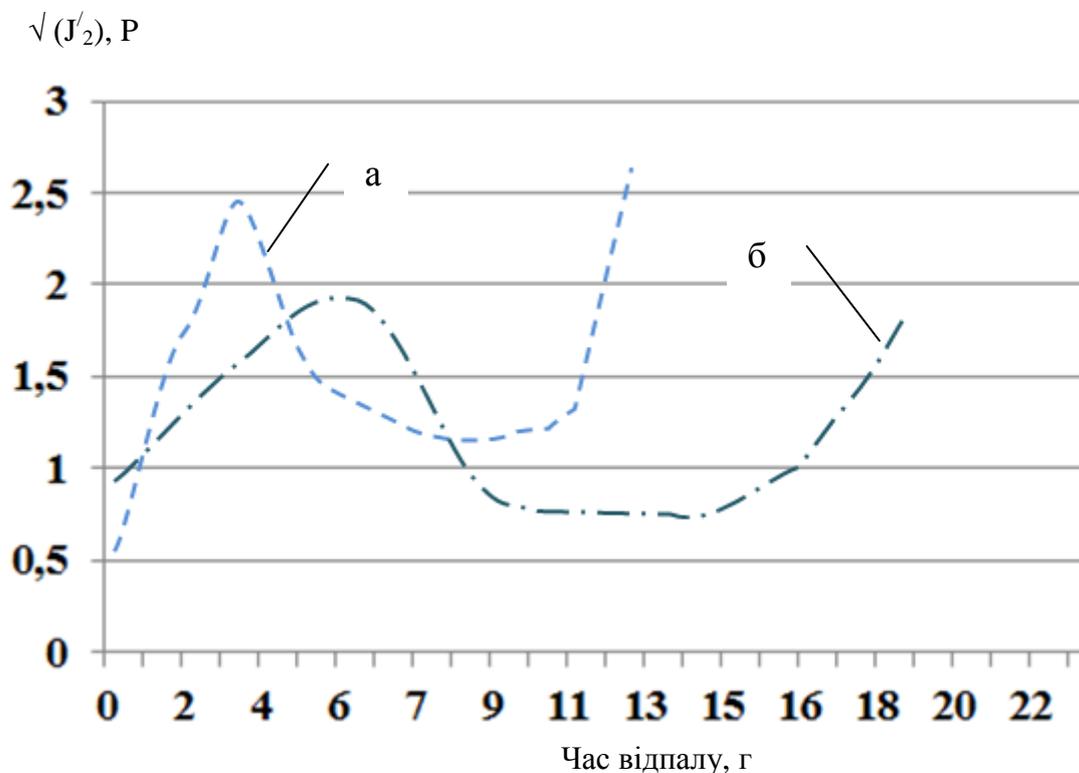


Рисунок 5.16 – Результаты расчета влияния параметров отжига на тепловое напряжение  $\sqrt{J'_2}$ : а) - режим № 1 (градиент температуры = 150 °С/час нагрев, 150 °С/час охлаждение, время отжига 11 час,  $T_{\text{макс}} = 800$  °С.); б) - режим № 2 (градиент температуры = 100 °С/час нагрев, 100 °С/час охлаждение, время отжига 17 час,  $T_{\text{макс}} = 900$  °С).

Можно сделать вывод, что в процессе нагрева слитка температурный градиент внутри слитка увеличивается, за счет температурных зависимостей арсенида галлия, что приводит к увеличению теплового напряжения  $\sqrt{J'_2}$ . Нагрев в течение 4 часов для режима 1, и 6 часов для режима 2 приводит к первоначальному размножению дислокаций (см. рис. 5.16) вызванному превышением величины теплового напряжения, значения напряжения торможения дислокаций.

Когда слиток выдерживается при максимальной температуре, напряжение, которое снималось во время процесса прогрева, остается в слитке остаточным напряжением. Направление остаточных напряжений сдвига становится обратным, тому направлению напряжения сдвига, которое образовалось во время процесса нагрева. Тепловое напряжение всегда положительно, поэтому, когда значение  $\sqrt{(J'_2)}$  превышает  $\tau_d$ , формируется резкое снижение значения  $\sqrt{(J'_2)}$  и как следствие к релаксации напряжения и уменьшению плотности дислокаций.

В начале процесса охлаждения слитка температура понижается, и тепловое напряжение опять увеличивается за счет градиента температур в слитке. Это приводит к росту дислокаций, и впоследствии значение плотности дислокаций стабилизируется. При этом остаточные напряжения остаются в слитке.

Если в процессе отжига не создается условий для появления деформации ползучести, то существуют только упругие деформации и остаточные напряжения не создаются. В том случае если происходит размножение дислокаций, то это вызывает большую релаксацию напряжения, и, следовательно, остаточные напряжения остаются в слитке после процесса отжига.

Сравнивая параметры отжига для режима № 1 и режима № 2, можно видеть что, чем больше градиент температуры  $dT/dt$ , тем выше тепловое напряжение, и, следовательно, тем выше плотность дислокации. Влияние максимального значения температуры оказывает не такое большое значение как градиент.

Для подтверждения расчетных данных нами были проведены практические исследования слитков арсенида галлия диаметром 100 мм, марки АГЧХ, выращенных в направлениях [100] и [111].

При исследовании остаточных напряжений нами использовалась автоматизированная установка измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs «Полярон-4», которая реализует метод SIRP и предложенная

авторами экспрессная методика определения структурного совершенства в пластинах GaAs [185].

Исследование остаточных напряжений проводилось на специально подготовленных шлифовано-травленных пластинах толщиной  $650 \pm 15 \mu\text{м}$  вырезанных из верхней части слитка.

При исследовании плотности дислокаций мы применили автоматизированный телевизионный метод подсчета дислокаций.

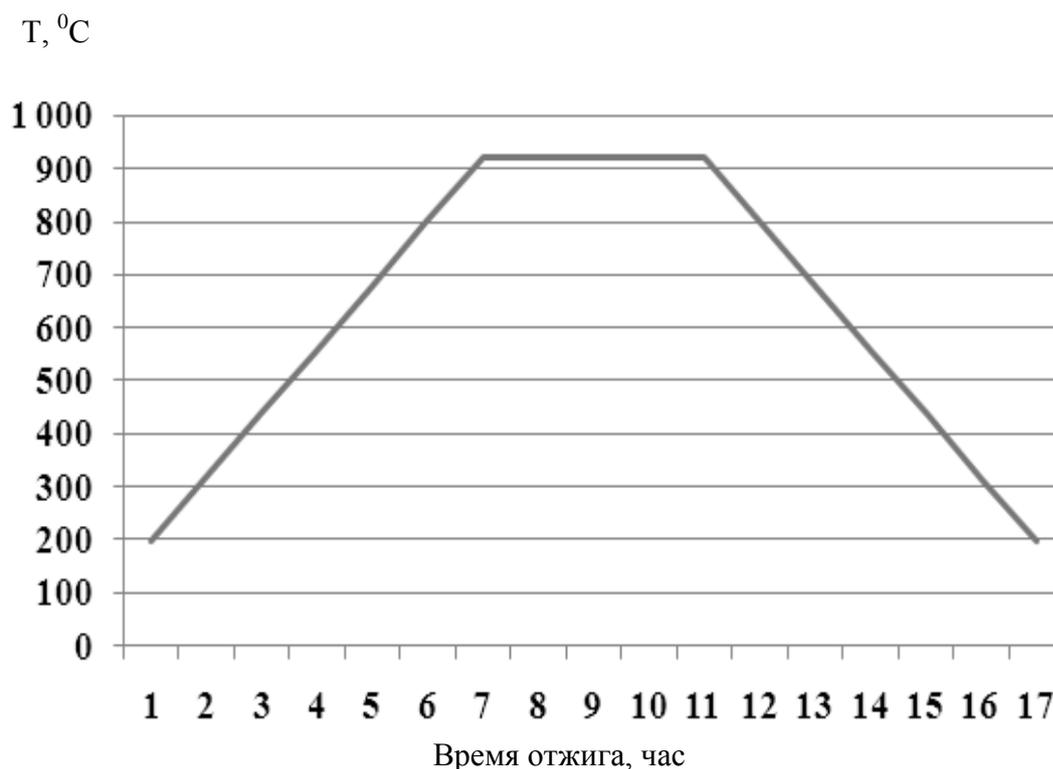


Рисунок 5.17 – Температурный режим усовершенствованной технологии отжига слитка GaAs.

Выполненный анализ расчетных данных по плотности дислокаций и остаточным напряжениям позволил усовершенствовать технологический режим отжига слитка путем использования определенных улучшенных параметров процесса как с точки зрения градиента температуры, так и времени процесса отжига. Температурный режим отжига по усовершенствованной технологии представлен на рисунке 5.17.

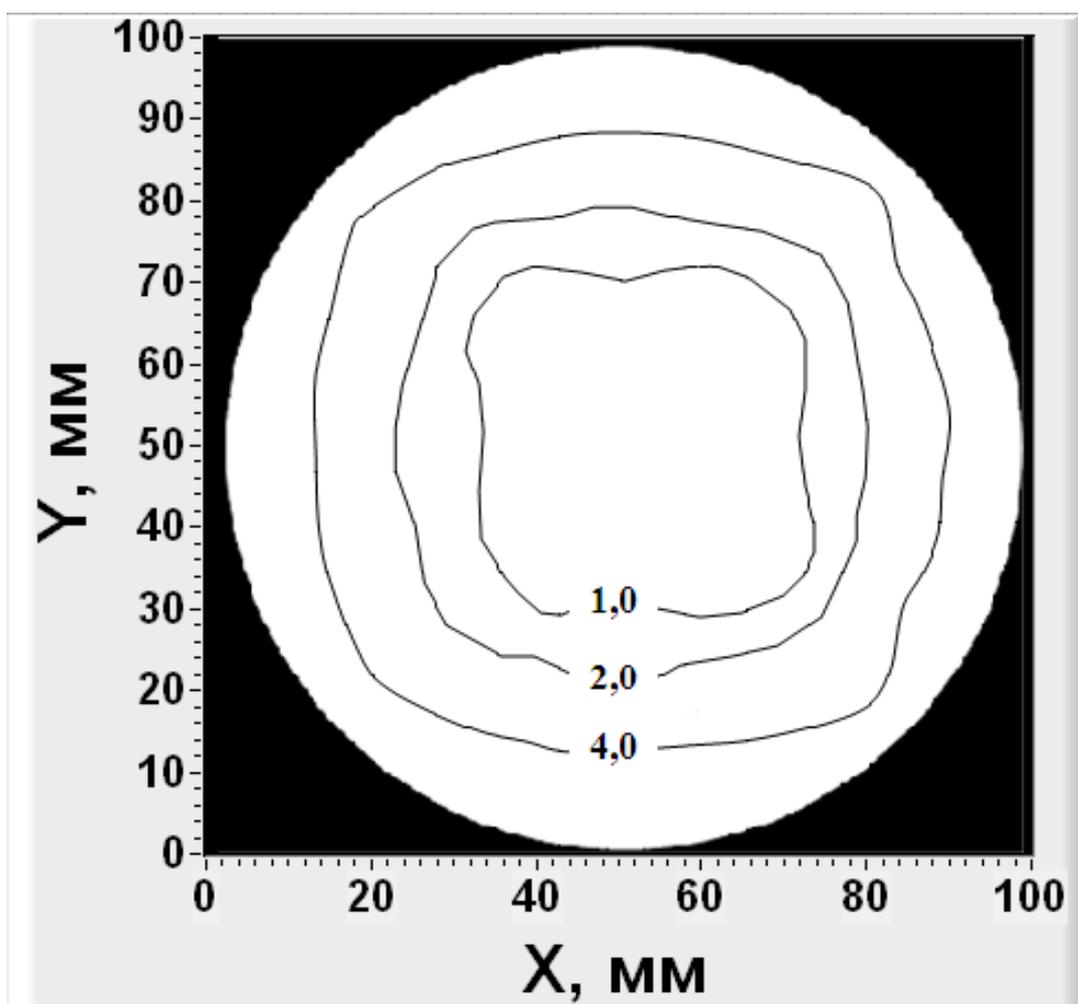


Рисунок 5.18 – Линии изонапряжения [ $\text{Pa} \times 10^7$ ] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [100].

Результаты измерения величины остаточных напряжений и плотности дислокаций в слитках, отожженных по усовершенствованной технологии, показаны на рисунках 5.18, 5.19.

Можно видеть, что слитки ориентации [111] имеют более высокий уровень остаточных напряжений, чем слитка в ориентации [100]. Это связано с различием значений упругих постоянных  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{44}$  для этих ориентаций.

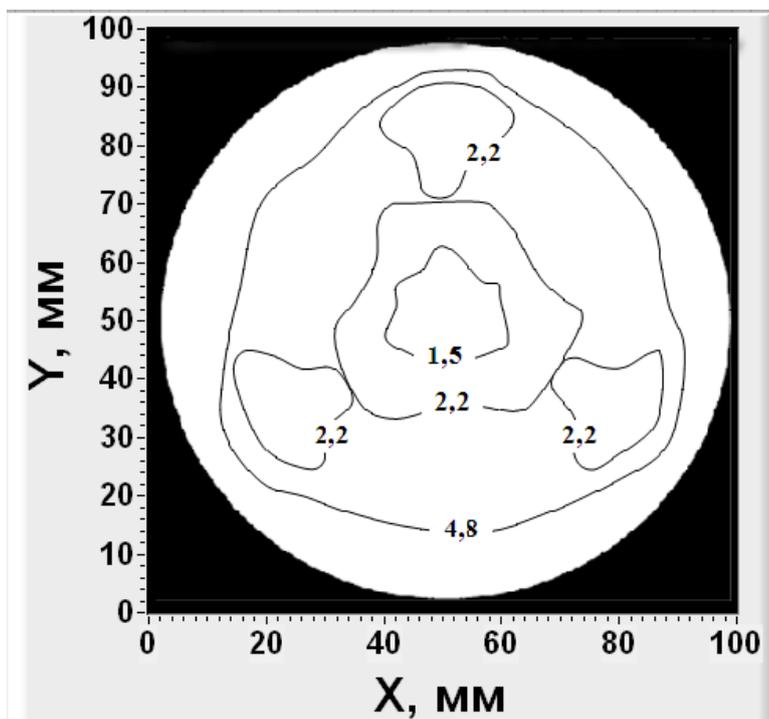


Рисунок 5.19 – Линии изонапряжения [ $\text{Pa} \times 10^7$ ] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [111].

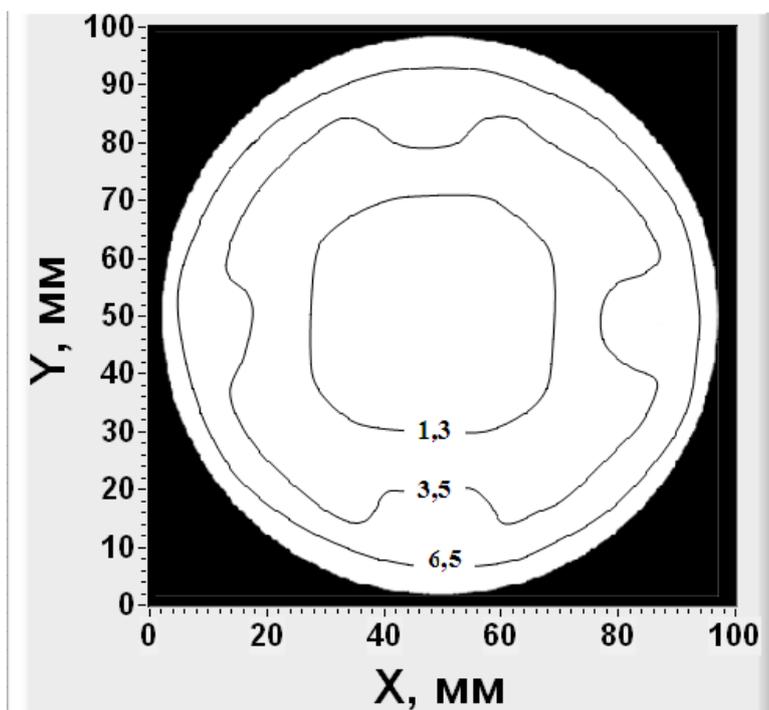


Рисунок 5.20 – Линии изоплотности дислокаций [ $\text{см}^{-2} \times 10^5$ ] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [100].

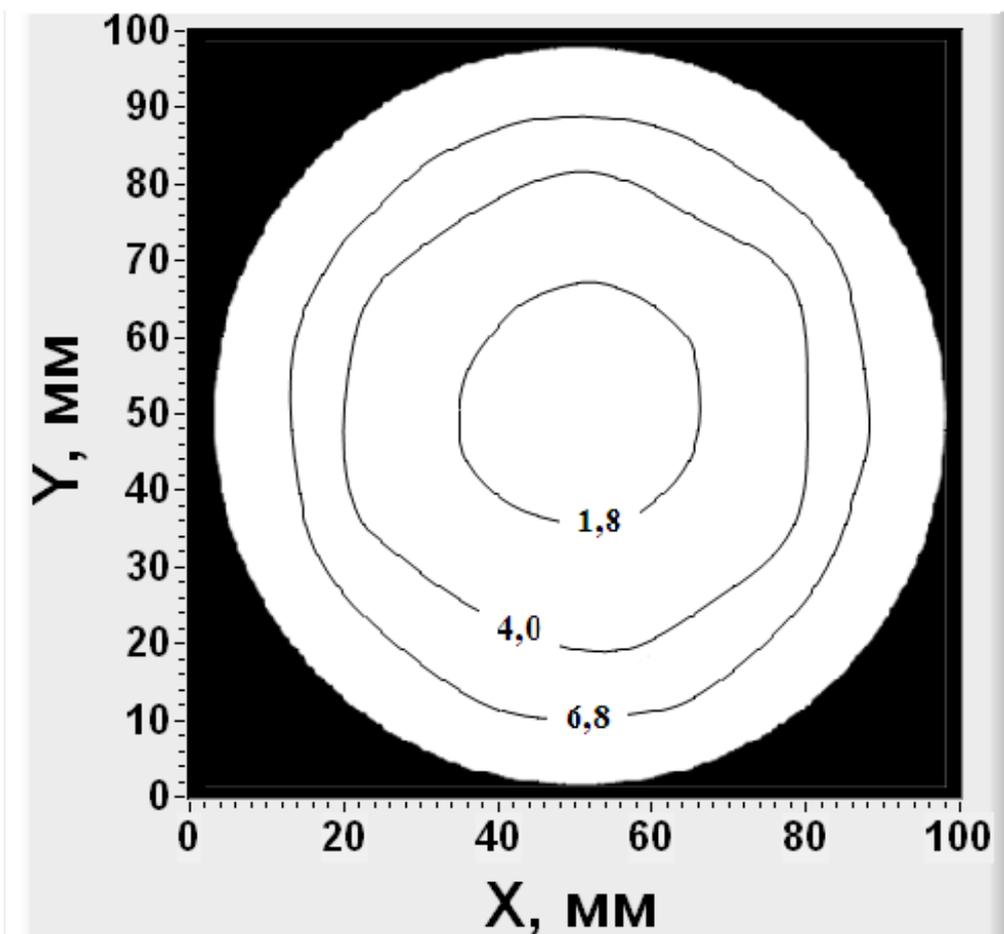


Рисунок 5.21 – Линии изоплотности дислокаций [ $\text{см}^{-2} \times 10^5$ ] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [111].

Измеренные авторами значения плотности дислокаций для этих же слитков приведены на рисунках 5.18, 5.19.

Экспериментальные результаты подтверждают теоретические расчеты, касающиеся соотношения между плотностью дислокаций и остаточными напряжениями в слитках GaAs подвергнутых отжигу.

Усовершенствование технологии отжига снижает на 10 – 15 % уровень остаточных напряжений, что уменьшает вероятность растрескивания подложек при механической обработке, и улучшает пропускание подложек в ИК части спектра.

### 5.3 Разработка технологии шлифовки подложек GaAs.

Одной из стадий технологии производства подложек является резка слитка на пластины. Как правило эта операция производится набором алмазных кругов с режущей кромкой расположенной снаружи. Диски могут собираться в кассеты состоящие из нескольких кругов, что повышает производительность получения пластин. Использование таких кассет позволяет получить толщину дисков до 0,2 мм, при толщине дисков 0,1 мм.

После резки пластин производится операция шлифования и полировки. Для шлифования и полирования в качестве абразива используются кристаллы корунда, алмаза, окиси хрома и т.д. в виде порошков различной зернистости, паст или суспензий.

В процессе операции шлифования, которая выполняется на механических станках, вследствие воздействия шлифовального материала на подложку, формируются структурные и механические дефекты, связанные с процессом обработки в виде микрорельефа, микротрещин и областей скопления дислокаций [196].

Дефекты, возникающие в процессе подготовки подложек, оказывают большое влияние на последующие процессы диффузии, эпитаксиального наращивания, а также непосредственно на параметры микроэлектронных приборов.

Особенностью процесса шлифования подложки GaAs является вариация скорости погружения зерна  $V_t$  которая определяется взаимным положением шлифовального круга и подложки. Так как от ее величины зависят силы, действующие со стороны круга на подложку, определим значение  $V_t$ . Запишем  $V_t$  в виде:

$$V(t) = \frac{1}{l(t)} \frac{dS(t)}{dt}, \quad (5.24)$$

где,  $l(t)$  – длина дуги контакта,  $S(t)$  сошлифованная площадь.

В первом приближении движение подложки можно считать прямо-

линейным, тогда можно записать [197]:

$$R_{кр} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) + R_n \left(1 - \cos \frac{\beta}{2}\right) = b,$$

$$R_{кр} \sin \frac{\alpha}{2} = R_n \sin \frac{\beta}{2}, \quad (5.25)$$

где  $R_{кр}$  – радиус шлифовального круга,  $R_n$  – радиус подложки,  $\alpha$  – угол между нормалью круга и точкой соприкосновения подложка-круг,  $\beta$  – угол между нормалью подложки и точкой соприкосновения подложка-круг.

Из (5.24) получаем изменения углов  $\alpha$ ,  $\beta$  в процессе шлифовки и  $l(t)$ :

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{a^2 + (1 + a - 2y)^2 - 1}{2a(1 + a - 2y)},$$

$$\sin \frac{\beta}{2} = a \sin \frac{\alpha}{2} = a \sqrt{1 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}},$$

$$a = \frac{R_{кр}}{R_n}, \quad y = \frac{b}{2R_n}, \quad l(t) = R_{кр} \alpha,$$

$$t = \frac{2R_n y}{V_n}. \quad (5.26)$$

Максимальная длина дуги контакта достигается при максимальном значении  $\alpha$ . Максимальное значение  $y$  может быть получено поиском экстремума в выражении (5.26):

$$y^* = \frac{1 + a - \sqrt{a^2 - 1}}{2}. \quad (5.27)$$

Зависимость  $S(t)$  можно представить в виде:

$$S(t) = \begin{cases} \frac{R_{kp}^2}{2}(\alpha - \sin \alpha) + \frac{R_n^2}{2}(\beta - \sin \beta), \\ \beta \leq \pi, \left( y \in [0, y^*] \right) \\ \frac{R_{kp}^2}{2}(\alpha - \sin \alpha) + \frac{R_n^2}{2}(2\pi - \beta + \sin \beta), \\ \beta > \pi, \left( y \in [y^*, 1] \right). \end{cases} \quad (5.28)$$

Если принять  $\cos \frac{\alpha}{2} = x$  для вычисления  $\frac{\partial S(t)}{\partial t}$  получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \tau} &= \left( \frac{\partial S}{\partial \alpha} + \frac{\partial S}{\partial \beta} + \frac{d\beta}{d\alpha} \right) \frac{d\alpha}{d\tau}, \\ \frac{d\alpha}{d\tau} &= \frac{d\alpha}{dx} \cdot \frac{dx}{dy} \cdot \frac{dy}{d\tau}. \end{aligned} \quad (5.29)$$

С помощью (5.24) – (5.29) окончательно получим:

$$V(y) = V_n \psi(y), \quad (5.30)$$

где

$$\psi(y) = \begin{cases} \frac{1}{2 \arccos x} \left( 1 + \frac{ax}{\sqrt{1-a^2(1-x^2)}} \right) \left( 1 - \frac{a^2-1}{(1+a-2y)^2} \right), \\ y \in [0, y^*] \\ \frac{1}{2 \arccos x} \left( 1 + \frac{ax}{\sqrt{1-a^2(1-x^2)}} \right) \left( 1 - \frac{a^2-1}{(1+a-2y)^2} \right), \\ y \in [y^*, 1] \end{cases}, \quad (5.31)$$

$$x = \frac{a^2 + (1+a-2y)^2 - 1}{2a(1+a-2y)}, \quad y^* = \frac{1+a - \sqrt{a^2-1}}{2}, \quad x^* = \frac{\sqrt{a^2-1}}{a}$$

Выполнив анализ выражения (5.31) можно видеть, что  $\psi(0) \rightarrow \infty$ ,  $\psi(1) \rightarrow \infty$ , тогда:

$$\psi(y^*) = \frac{1}{(a^2 - 1) \arccos \frac{\sqrt{a^2 - 1}}{a}}. \quad (5.32)$$

Определим суммарную силу  $P$ , с которой шлифовальный круг действует на подложку. Если разложить суммарную силу на две составляющие, и выполнить интегрирование их проекций, можно получить следующие выражения:

$$P_x = \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} q_n t R_{кр} \cos \varphi d\varphi = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot q_n t R_{кр}, \quad (5.33)$$

$$P_z = \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} q_n t R_{кр} \sin \varphi d\varphi = K_M P_x.$$

Примем значение  $q_n$  - в виде [199]:

$$q_n = \frac{0,37 A_1 \psi_0 \frac{W}{V_{кр}}}{K_{ш} (1 + 0,37 \mu K_1 \psi_0)}$$

где  $W$  – зерно круга;  $V_{кр}$  – угловая скорость круга;  $K_1$  – коэффициент усадки стружки;  $K_{ш}$  – коэффициент = 0,5;  $\mu$  – константа.

Тогда значение суммарной силы запишется в виде:

$$P = \frac{0,74 A_1 \psi_0 \varphi(y)}{K_M (1 + 0,37 \mu K_1 \psi_0)} R_{ст} \frac{n_{ст}}{n_{кр}}, \quad (5.34)$$

$R_{ст}$  – радиус шлифовального стола;  $n_{ст}$  – угловая скорость вращения стола;  $n_{кр}$  – угловая скорость вращения круга.

Определение значения суммарной силы резанья позволяет определить кинематические режимы шлифования.

В свою очередь, кинематические режимы шлифования определяют глубину погружения зерна во время его прохождения по дуге контакта. В горизонтальном направлении глубина погружения определяется выражением:

$$\begin{aligned} h_3 &= \frac{L(\tau)}{V_{кр}} W(\tau) = 2 \frac{V_g}{V_{кр}} R_{кр} \alpha \Psi(y) = \\ &= 2 \frac{V_g}{V_{кр}} R_{кр} \xi(y), \quad \xi(y) = \Psi(y) \arccos X \end{aligned} \quad (5.35)$$

где  $\Psi(y)$  – функция геометрических параметров.

Распределение вершин зерен подчиняется нормальному закону с максимальным вылетом, равным:

$$\Delta_{\max} = (\bar{x} + 3\sigma)(1 - \varepsilon) \approx 0,4\bar{x} \quad (5.36)$$

При выполнении условия  $h_3 < \Delta_{\max}$  будет отсутствовать трение детали о связку круга.

Выражения (5.35) и (5.36) позволяют получить ограничение на отношение угловых скоростей вращения шлифовального круга и стола, которое может быть представлено в виде:

$$\frac{n_{ст}}{n_{кр}} < \frac{0,2x}{R_{ст} \bar{\xi}(y)} \quad (5.37)$$

Подставив значения параметров шлифовального станка, которые составляют:  $\bar{\xi}(y)_{\max} = 2$ ,  $n_{ст} = 0,3 \div 1,0$  об/мин,  $n_{кр} = 6000$  об/мин,  $R_{ст} = 300$  мм, получим:

$$\frac{n_{ст}}{n_{кр}} = (5,55 \div 7,15) \cdot 10^{-5}. \quad (5.38)$$

Для операции шлифования подложек арсенида галлия используются алмазные шлифовальные круги с органической связкой профиля 100/80,

80/63, 40/25. Для этих кругов значения правой части выражения (5.38) составляют  $4,75 \times 10^{-5}$ ,  $3,73 \times 10^{-5}$  и  $1,79 \times 10^{-5}$  соответственно. Таким образом, условие (5.38) не выполняется, что накладывает ограничение на глубину шлифования подложек.

Задаваясь максимальным вылетом зерна из связки, равным  $0.4x$ , получим ограничение по глубине шлифования  $t=0.9x$ . Таким образом, нами получены следующие ограничения на режим шлифования: для круга 100/80 –  $t < 81$  мкм, для круга 80/63 –  $t < 61$  мкм и для круга 40/28 –  $t < 30$  мкм.

Выполним оценку производительности процесса шлифовки подложек GaAs.

Как показано в работе [200] толщина нарушенного слоя  $h$  пропорциональна диаметру зерна основной фракции  $D$  алмазного круга:

$$h = \alpha D \quad (5.39)$$

где  $\alpha$  – константа, зависящая от типа абразива и режима обработки.

Таким образом, при использовании нескольких кругов разной абразивности, толщина удаляемого следующим кругом слоя должна равняться или быть больше толщины нарушенного слоя получившегося после обработки предыдущим кругом:

$$D_{n-1} = \alpha D_n t_n \quad (5.40)$$

где  $t_n$  – время обработки подложки данным кругом,  $D_n, D_{n-1}$  – диаметры абразивов кругов.

Тогда общее время операции можно выразить как:

$$T = \sum_{n=1}^n t_n = \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^n \frac{D_{n-1}}{D_n} \quad (5.41)$$

Следовательно, можно определить размер зерен основной фракции

круга, чтобы минимизировать  $T$ :

$$\frac{dT}{dD} = \frac{1}{\alpha} \left( -\frac{D_{n-1}}{D_n^2} + \frac{1}{D_{n+1}} \right) = 0 \quad (5.42)$$

Откуда условием минимального времени процесса шлифования является:

$$D_n^2 = (D_{n-1})(D_{n+1}) \quad (5.43)$$

Учитывая, что станок шлифования подложек САШ-АМ производит шлифовку тремя кругами, задавшись толщиной нарушенного слоя после резки пластин и зерном третьего круга, который должен обеспечивать минимальную толщину нарушенного слоя после шлифования, из (5.42) можно получить значения для зерен первого и второго круга:

$$D_1^2 = D_0 D_2; \quad D_2^2 = D_1 D_3; \quad (5.44)$$

Откуда:

$$D_1^2 = D_0 \sqrt{D_1 D_3} = \sqrt[3]{D_0^2 D_3} \quad (5.45)$$

$$D_2^2 = \sqrt[3]{D_0^2 D_3} D_3 = \sqrt[3]{D_0 D_3^2} \quad (5.46)$$

Глубина нарушенного слоя  $D_0$  после разделения слитка на пластины составляет 30 – 50 мкм, [199]. Третий шлифовальный круг, для обеспечения требуемой глубины нарушенного слоя после завершения операции шлифования устанавливается с зерном 28 мкм. Тогда вычисления по вы-

ражениям (5.45) и (5.46) дают результат 32 мкм для первого круга и 10 мкм для второго круга соответственно.

Полученные нами ограничения параметров процесса шлифования подложек GaAs позволили модернизировать станок САШ-АМ. В схему станка были добавлены датчики вращения стола и шпинделей, датчики перемещения шпинделей, система управления приводами. Управление станком, которое реализует неравенство (5.38) с учетом выражения (5.43) выполняет промышленная ЭВМ. Структурная схема модернизированного станка показана на рисунке 5.22.

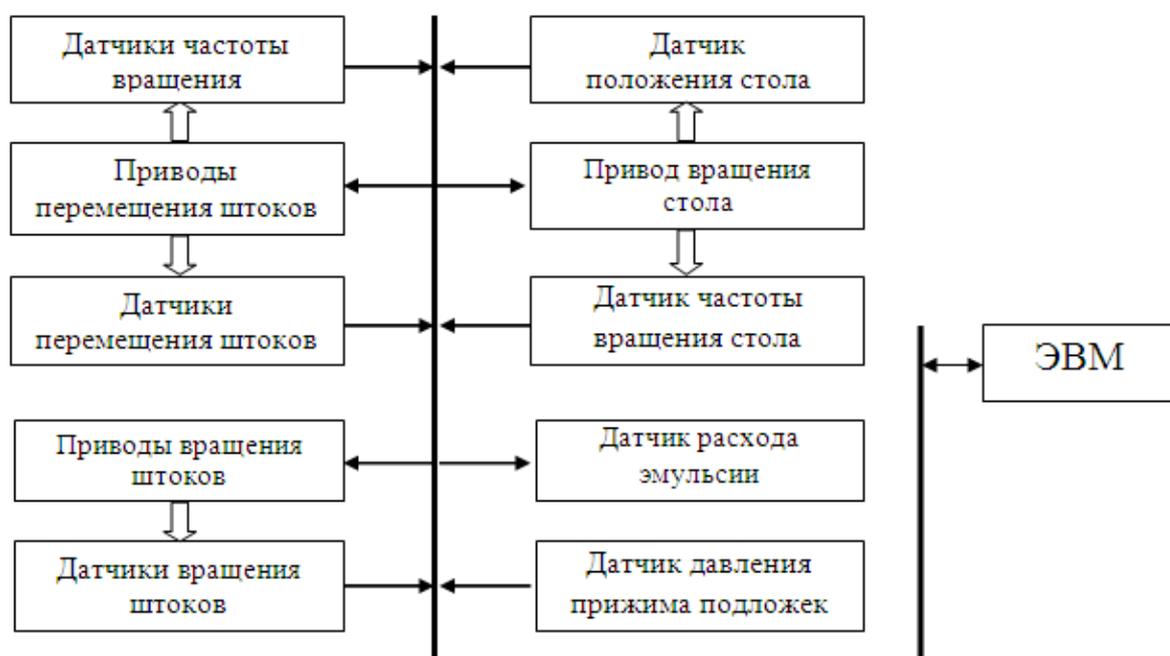


Рисунок 5.22 – Структурная схема модернизированного станка шлифовки подложек GaAs - САШ-АМ.

Как было показано выше на соотношение скоростей вращения стола и шпинделей накладывается ограничение (5.37). Выполнение этого ограничения обеспечивает оптимальную нагрузку на пластину и оптимальные условия реза. Как показано выше, оптимальное отношение должно быть различным для различных кругов, следовательно, оптимизированный ал-

горитм должен учитывать эти ограничения.

Глубина шлифовки за один проход, одним шлифовальным кругом, не должна превышать 31 мкм. Этот параметр регулируется величиной перемещения шпинделя круга, которая, в свою очередь определяется расстоянием от края круга до поверхности стола.

Станок САШ-АМ оснащен вращающимся столом и тремя шпинделями со шлифовальными кругами. Каждый из трех шпинделей устанавливается на определенное значение, которое определяет усилие шлифования. Подложки укладываются на присоски стола, при ходе шпинделя до 25 мм. Обороты шпинделя регулируются автоматически в диапазоне 50 – 12000 об/мин, а обороты стола в диапазоне 0,5 – 5 об/мин. Максимальная величина снимаемого припуска за один оборот стола каждым шпинделем при шлифовании алмазными кругами зернистостью 100/80 концентрации 200% не более 0,3 мм.

Скорость вращения стола,  $n_{ст}$ , определяется напряжением на двигателе привода вращения стола,  $U_{вст}$ , а скорость вращения круга,  $n_{кр}$ , напряжением на двигателе вращения круга  $U_{вкр1}$ ,  $U_{вкр2}$ ,  $U_{вкр3}$  для соответствующего шпинделя круга. Напряжение, которое подается на двигатели, формируется ЭВМ в зависимости от управляющих сигналов  $\delta_{икр1}$ ,  $\delta_{икр2}$ ,  $\delta_{икр3}$  для кругов, а напряжение, поступающее на двигатель вращения стола формируется в зависимости от управляющего сигнала  $\delta_{ист}$ .

Следовательно, должно выполняться равенство:

$$\frac{n_{ст}}{n_{кри}} = \frac{U_{вст}}{U_{вкри}} = \frac{\delta_{ист}}{\delta_{икр}}, \quad (5.47)$$

где  $i$  – номер круга ( $1 \div 3$ ).

Таким образом (5.47) можно переписать в виде:

$$\frac{\delta_{уст}}{\delta_{укрi}} < \frac{0,2x}{R_{см}\xi(y)} = \begin{cases} 4,75 \times 10^{-5} & \text{для } 100/80 \\ 3,75 \times 10^{-5} & \text{для } 80/63, \\ 1,79 \times 10^{-5} & \text{для } 40/26 \end{cases}, \quad (5.48)$$

где  $\delta_{уст}$  - управляющее воздействие на двигатель вращения стола,  $\delta_{укрi}$ , - управляющее воздействие на двигатель вращения шпинделя соответствующих кругов.

Глубина шлифовки определяется величиной перемещения приводов, перемещения кругов [201]. Величина перемещения в свою очередь определяется напряжением на приводах перемещения  $U_{пкр}$  и зависит от управляющего сигнала  $\delta_{усп}$ . Требуемая величина перемещения кругов для обеспечения заданной глубины шлифования получается путем обработки сигналов с датчиков положения алмазных кругов. Следовательно, перемещение кругов  $h_{п}$  должно выполняться до тех пор, пока не выполнится равенство  $h_{п} = h_{i1} - h_{т} + t$ , где  $h_{i1}$  - расстояние от поверхности стола до края соответствующего шлифовального круга. Тогда для вычисления управляющего воздействия можно записать:

$$\delta_{успi} = K \times (h_{i1} - h_{т} + t), \quad (5.49)$$

где  $\delta_{успi}$ , - управляющие воздействия на приводы перемещения соответствующих кругов,  $K$  - коэффициент усиления системы управления электродвигателем, лежащий в диапазоне (1÷100). Управление станком шлифования подложек выполнено в соответствии с решениями, описанными в работе [202].

С точки зрения производительности процесса шлифования глубина шлифования должна быть максимально возможной. Поэтому рассмотрим ряд факторов, ограничивающих ее величину.

Как было показано выше, кинематические параметры ограничивают максимальную глубину шлифования. Задаваясь максимальным вылетом зерна из связки, равным  $0,4z$ , и шлифовальной поверхностью зерна равным  $0,4z$  примем ограничение по глубине шлифования, которое не должно

превышать 0,9z.

Определим максимальную глубину шлифования, на которой будет проходить разрушение. Этот параметр определяется выражением [203]

$$d = \frac{2P't}{\pi[\sigma]h} \quad (5.50)$$

где  $[\sigma]$  – предел прочности при сжатии;  $h$  – толщина пластины;  $P'$  – сила, пропорциональная глубине шлифования.

Следовательно, глубина, на которой напряжения в подложке превосходят допустимые, прямо пропорциональна глубине шлифования. Анализ выражения (5.49) дает ограничение на глубину шлифовки при заданной толщине нарушенного слоя и предела прочности, который определяется выражением:

$$t < \frac{\pi[\sigma]hd_0}{2P'} \quad (5.51)$$

где  $d_0$  – толщина нарушенного слоя.

В том случае, если предел прочности  $[\sigma] \approx 80 \text{ кг/мм}^2$ , и приняв  $d_0 \approx 20 \text{ мкм}$ , получим для  $h \approx 0,9 \text{ мм}$ ,  $t \approx 47 \text{ мкм}$ .

#### 5.4. Разработка устройства для шлифовки подложек GaAs.

Процесс шлифования подложек арсенида галлия заключается в последовательной обработке подложки 3 –мя алмазными шлифовальными кругами разной зернистости. Подложки закрепляются на вращающемся столе, а вращающиеся круги на перемещающихся шкивах. Каждый круг снимает определенную часть подложки, таким образом, чтобы привести толщину подложки к заданному значению [204].

После абразивной обработки (шлифовки) пластины на ее поверхности остаются микроповреждения (микротрещины) (см. рис.5.23).

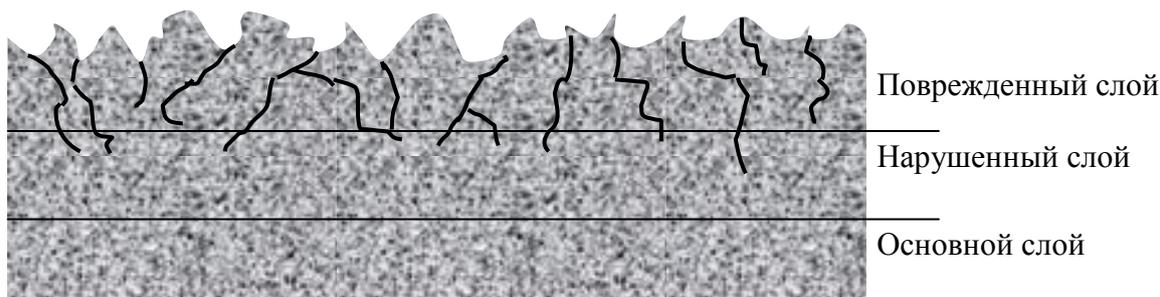


Рисунок 5.23 – Схематичное изображение подложки арсенида галлия после резки.

Уровень шершавости и величина повреждения напрямую зависят от величины зерна алмаза. Такие повреждения становятся причиной изгиба, появления трещин и разлома пластины. В рельефном слое, созданном в результате шлифовки, в бугорках и трещинах оседает пыль. Микротрещинки проникают глубже, в приповерхностный слой.

Как показано в работе [205] качество шлифовки подложек определяется кинематическими параметрами шлифовального станка. Для обеспечения оптимизированной процедуры шлифовки необходимо соблюдение ограничений на отношение скоростей вращения стола и кругов  $n_{ст}/n_{кр}$  в соответствии с выражением (5.37)

С учетом того, что после резки слитка на пластины, толщина пластин может отличаться, для обеспечения оптимального режима шлифования необходима информация о толщине пластин установленных на стол шлифования. С учетом того, что существующие станки подготовки подложек не оборудованы датчиком измерения толщины пластины, в схему разрабатываемого комплекса необходимо ввести соответствующий датчик.

Тогда толщину подложки можно определить по следующему соотношению:

$$h = s_{nc} - s_{nn} \quad (5.52)$$

где  $s_{nc}$  – расстояние от стола до датчика,  $s_{nn}$  – расстояние от поверх-

ности до датчика.

Как показано в работе [206] при резке слитка на пластины допускается непараллельность сторон, что может вызвать термоудар за счет разницы усилия шлифования стороны с большей высотой и стороны с меньшей высотой. Для определения непараллельности поверхности подложки необходимо провести измерение толщины по всей поверхности, то есть повернуть стол на такой угол, который обеспечит прохождение датчика измерения высоты по диаметру подложки. Этот угол можно определить по следующему выражению:

$$\alpha = 2\arctg\left(\frac{R_{cm}}{r}\right), \quad (5.53)$$

где  $R_{cm}$  радиус окружности проходящей через центр подложки,  $r$  – радиус подложки.

Тогда максимальная толщина подложки арсенида галлия может быть определена как:

$$h_{\max} = \max(h_{ni}) \quad (5.54)$$

где  $h_{ni}$  – матрица измеренных  $i$ -х значений  $n$ -й подложки.

Толщина сошлифованного слоя для обеспечения заданной толщины подложки будет определяться как:

$$H = h_{\max} - h_{set} \quad (5.55)$$

где  $h_{set}$  – заданная толщина подложки арсенида галлия равная для подложек диаметром 4'' - 650 мкм.

Как было показано выше, процесс шлифования состоит из последовательного прохода подложки 3-мя кругами разной зернистости, и, следовательно, толщина сошлифованного слоя равняется сумме толщин сошлифованных слоев каждым кругом. Как было показано в работе [207] на глубину шлифовки каждым кругом накладываются конструктивные ограни-

чения. Это приводит к необходимости соблюдения условия (5.56):

$$H \leq h_{k1} + h_{k2} + h_{k3} \quad (5.56)$$

В том случае если условие (5.56) не выполняется, шлифовку следует производить за несколько проходов, при этом число проходов шлифовки,  $N$ , определится как:

$$N = \text{int}\left(\frac{H - \sum_{i=1}^3 h_i}{\sum_{i=1}^3 h_{i\max}}\right), \quad (5.57)$$

На основе вышеизложенного и с учетом выведенных ограничений на процесс шлифования можно определить состав входных и выходных сигналов для комплекса подготовки подложек арсенида галлия.

Требуемой входной информацией является толщина исходной пластины размещенной на столе, положение шпинделя шлифовального круга и угол поворота шлифовального стола.

Исполнительными устройствами комплекса являются электроприводы обеспечивающие вращение стола, вращение шпинделей и перемещение шпинделей. Таким образом, выходными данными комплекса должны являться сигналы задания частоты вращения электродвигателей.

Анализ процесса шлифования подложек, разработанные ограничения на процесс шлифования и состав входной информации и выходных данных позволили разработать структурную схему комплекса подготовки подложек арсенида галлия, которая приведена на рисунке 5.24.

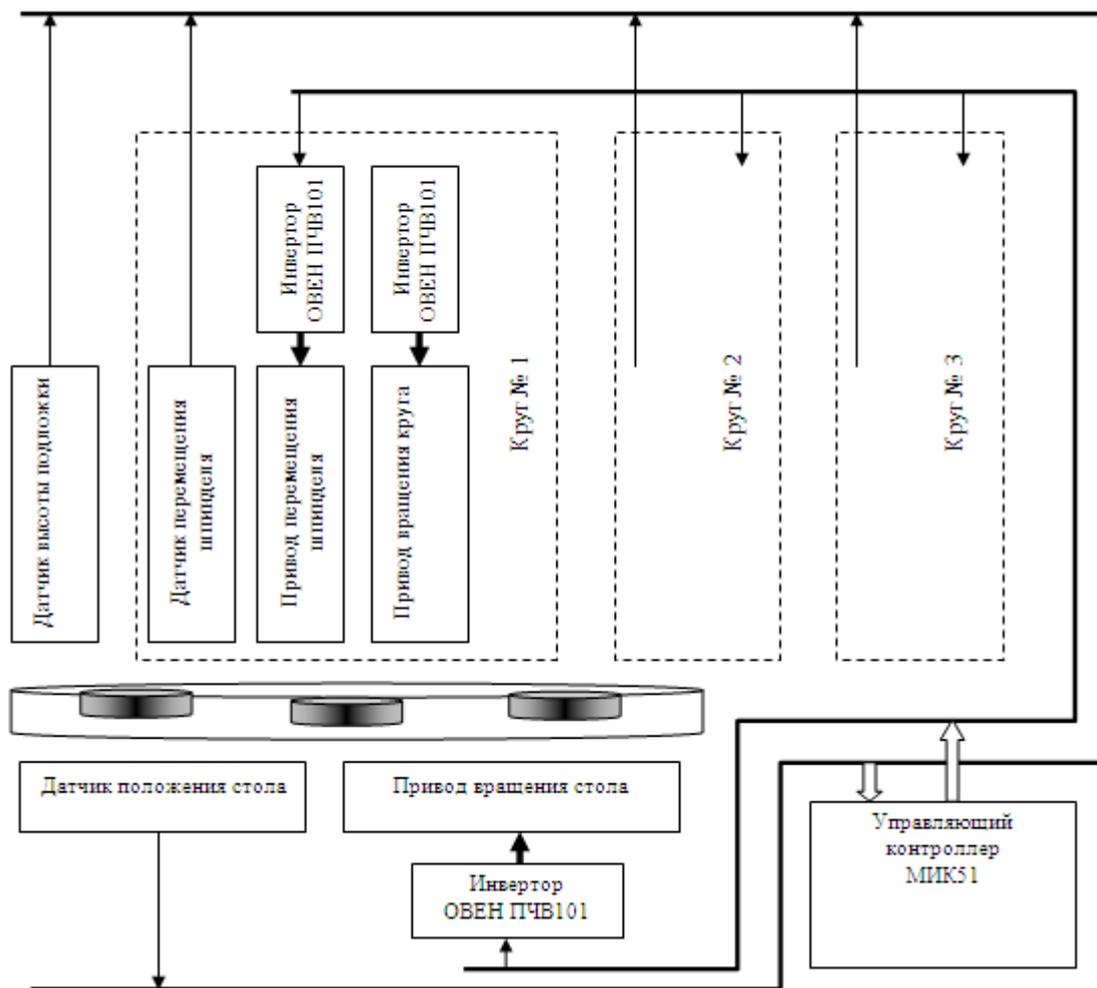


Рисунок 5.24 – Структурная схема, микроконтроллерного комплекса шлифовки подложек арсенида галлия.

Комплекс состоит из приводов перемещения шпинделей кругов, основой которых является электрошпиндель управляемый частотным инвертором ОВЕН ПЧВ103-3К0-В. Каждый привод снабжен датчиком обратной связи, позволяющим организовать автоматическое независимое управление величиной перемещения шпинделя. Формируемый управляющий сигнал на эти приводы является функцией, зависящей от требуемой величины перемещения шпинделя, определяемой требуемым значением снимаемого припуска и необходимым давлением на структуру. Для измерения величины перемещения шпинделей в схему введены датчики перемещения шпинделей на базе оптического датчика положения «Лабракон». Вращение шпинделей задается инвертором ОВЕН ПЧВ103-3К0-В и поддерживается

постоянным на всем протяжении процесса шлифования. Стол приводится во вращение приводом на базе инвертора ОВЕН ПЧВ103-3К0-В. Для контроля положения стола в схему введен датчик положения стола на базе энкодера типа MZ-51.

Взаимодействие всех управляемых элементов комплекса осуществляется микроконтроллером МИК 51 (производитель «Микрол», Украина), который представляет собой компактный малоканальный многофункциональный высокопроизводительный микропроцессорный контроллер, обеспечивающий автоматическое регулирование и логическое управление технологическими процессами и устройствами. Программирование контроллера выполняется с помощью клавиш передней панели или по интерфейсу с помощью специального программного обеспечения - визуального редактора FBD-программ АЛЬФА. В качестве языка программирования в системе реализован язык функциональных блокочных диаграмм Function Block Diagram (FBD), предоставляющий пользователю механизм объектного визуального программирования.

Программа микроконтроллера на языке FBD приведена на рисунке 5.25.

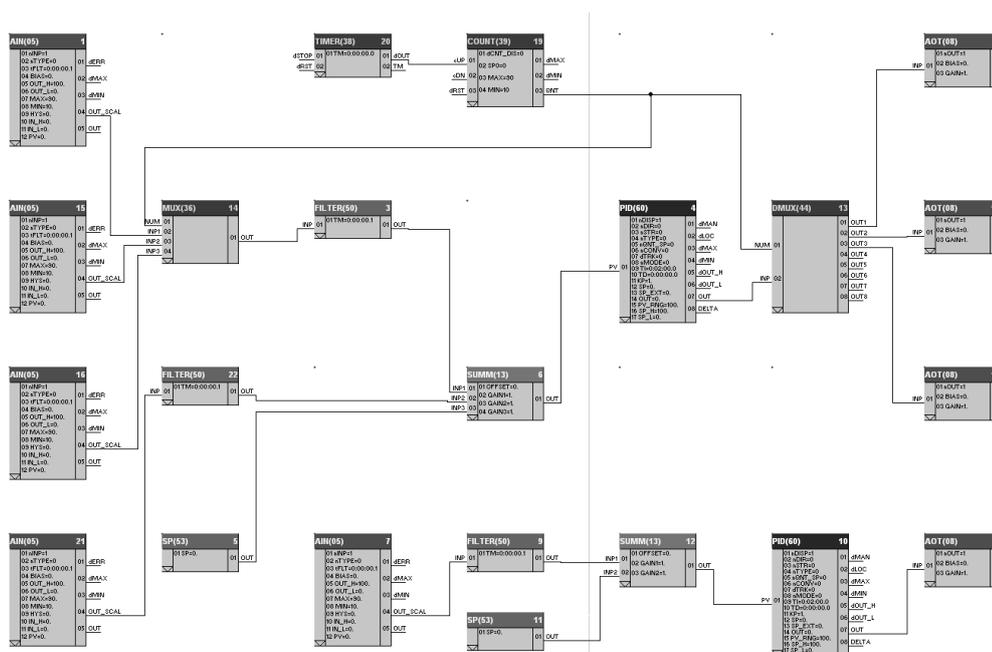


Рисунок 5.25 – Программа управляющего микроконтроллера, устройства шлифовки подложек арсенида галлия.

Для обеспечения автоматического управления, обеспечивающего оптимальный режим шлифования, алгоритм управления станком должен, строится таким образом, чтобы максимально автоматизировать все виды операций с учетом требований и ограничений, указанных выше.

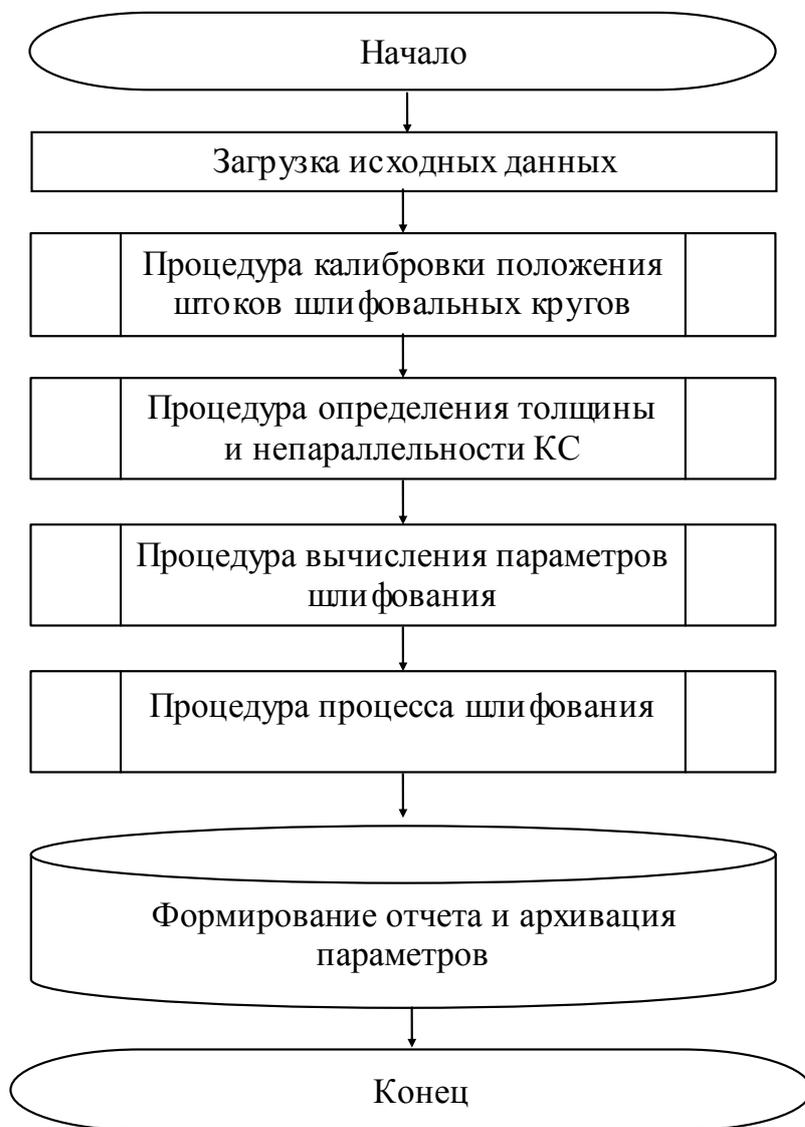


Рисунок 5.26 – Укрупненный алгоритм, микроконтроллерного комплекса подготовки подложек арсенида галлия.

Определим операции подготовки подложек подлежащих автоматизации:

- определение толщины пластины;
- вычисления числа проходов шлифования;

- вычисление глубины шлифования для каждого круга;
- включение приводов вращения кругов;
- вычисление и установка скорости вращения приводов кругов;
- включение привода вращения стола.
- вычисление и установка скорости вращения привода стола;
- перемещение шпинделей кругов в вычисленную позицию.

Таким образом, учитывая операции, выполняемые в автоматическом режиме, можно разработать алгоритм управления процессом шлифовки подложек арсенида галлия.

Основой алгоритма является формирование управляющих воздействий на положение стола и величину перемещения кругов. Входной информацией при этом является измеренная толщина подложек с учетом непараллельности их сторон.

Укрупненный алгоритм комплекса приведен на рисунке 5.26.

Алгоритм реализует выполнение следующих функций:

- высокоточное измерение толщины пластины с помощью лазерного метода;
- высокоточное измерение непараллельности сторон пластин с помощью лазерного метода;
- вычисление оптимальных параметров шлифования обеспечивающих отсутствие термоудара в процессе шлифовки и минимальную глубину нарушенного слоя;
- обеспечение идентичности условий шлифования пластин;
- регулирование оборотов вращения стола и кругов;
- поддержание заданных параметров шлифования;
- архивацию текущих параметров шлифования.

Процедура калибровки положения штоков шлифовальных кругов выполняется в полуавтоматическом режиме. Она предназначена для определения положения режущей кромки шлифовальных кругов относительно поверхности шлифовального стола.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1 – выполняется калибровка датчиков положения шлифовальных кругов.

Шаг 2 – выполняется процедура позиционирования и поворот стола на 360 градусов. В процессе поворота выполняется процедура измерения толщины и непараллельности пластин, в рамках которой производится определение пластины с максимальной высотой, включая непараллельность сторон.

Шаг 3 – начинается цикл шлифовки пластин. На основе исходных данных и результатов вычислений, выполненных на шаге 1 и 2, определяются число проходов по выражению (9) и глубина шлифования каждым кругом в соответствии с выражением (3) и ограничением (8). По окончании определения параметров шлифования выполняются процедуры управления перемещением кругов.

Шаг 4 – шаг выполняется после завершения шлифовки всех пластин. На этом шаге осуществляется послеоперационный контроль толщины всех пластин, формирование отчета о результатах операции шлифования и сохранение параметров шлифования в архиве. Выполняется завершение работы программы.

Для проверки правильности принятых аппаратурных и программных решений нами были проведены эксперименты по подготовке подложек арсенида галлия. Измерение нарушенного слоя проводились на сколах подложек шлифованных и полированных алмазными пастами с последовательным изменением размера зерна, вплоть до 0,25 мкм.

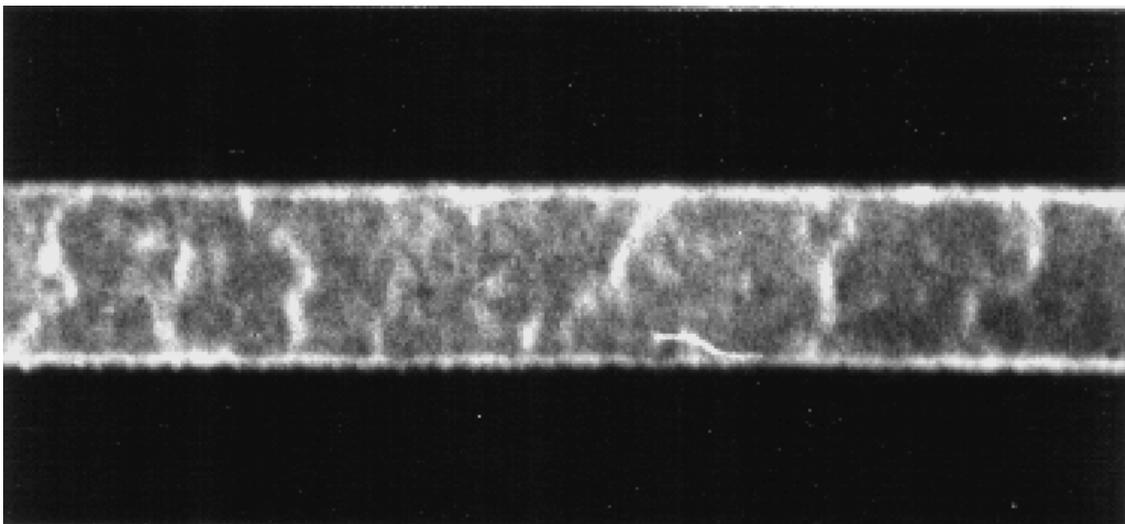


Рисунок 5.27 – Проекционная топограмма скола подложки GaAs ориентации [100] подготовленного на существующем оборудовании. Метод Барго-Баррета, излучение  $C_uK_\lambda$ , увеличение  $18^x$ .

Методом проекционной топограммы были получены снимки нарушенного слоя при шлифовании подложек по существующей технологии и шлифовании подложек на разработанном микроконтроллерном комплексе. На рисунке 5.27 приведен снимок скола подложки шлифованной по существующей технологии, и на рисунке 5.28 – скола подложки шлифованной на микроконтроллерном комплексе.

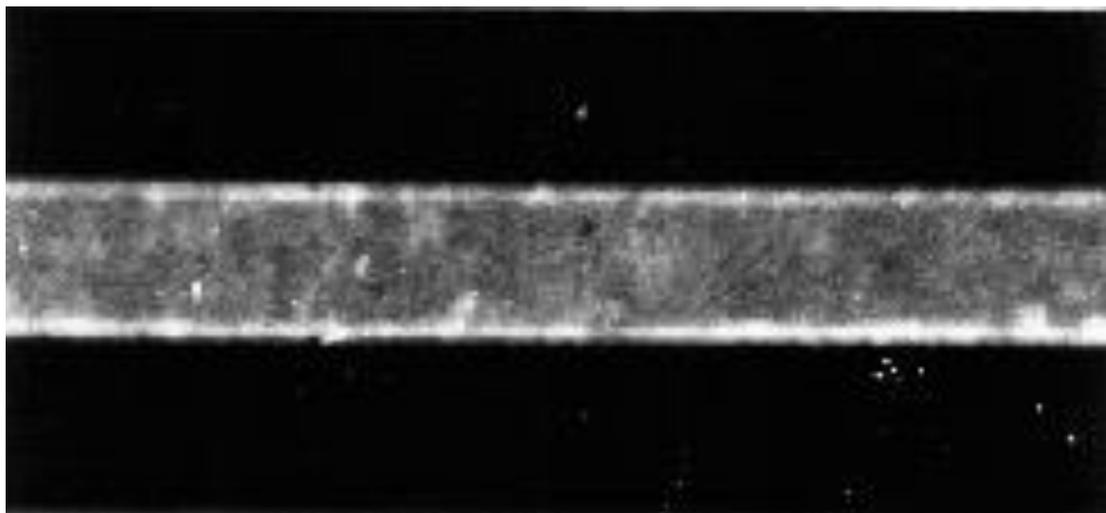


Рисунок 5.28 – Проекционная топограмма скола подложки GaAs ориентации [100] подготовленного на микроконтроллерном комплексе. Метод Барго-Баррета, излучение  $C_uK_\lambda$ , увеличение  $18^x$ .

Можно видеть, что в результате шлифования подложек на разработанном станке САШ-АМ, структурное совершенство нарушенного слоя значительно улучшилось. Это вызвано оптимизацией параметров шлифования, учетом ограничений и учетом непараллельности пластин. При этом глубина нарушенного слоя уменьшилась с 30 до 10 мкм.

Для оценки качества шлифовки и глубины нарушенного слоя нами было проведено исследование подложек GaAs.

Измерения нарушенного слоя проводились на сколах подложек шлифованных и полированных алмазными пастами с последовательным изменением размера зерна, вплоть до 0,25 мкм.

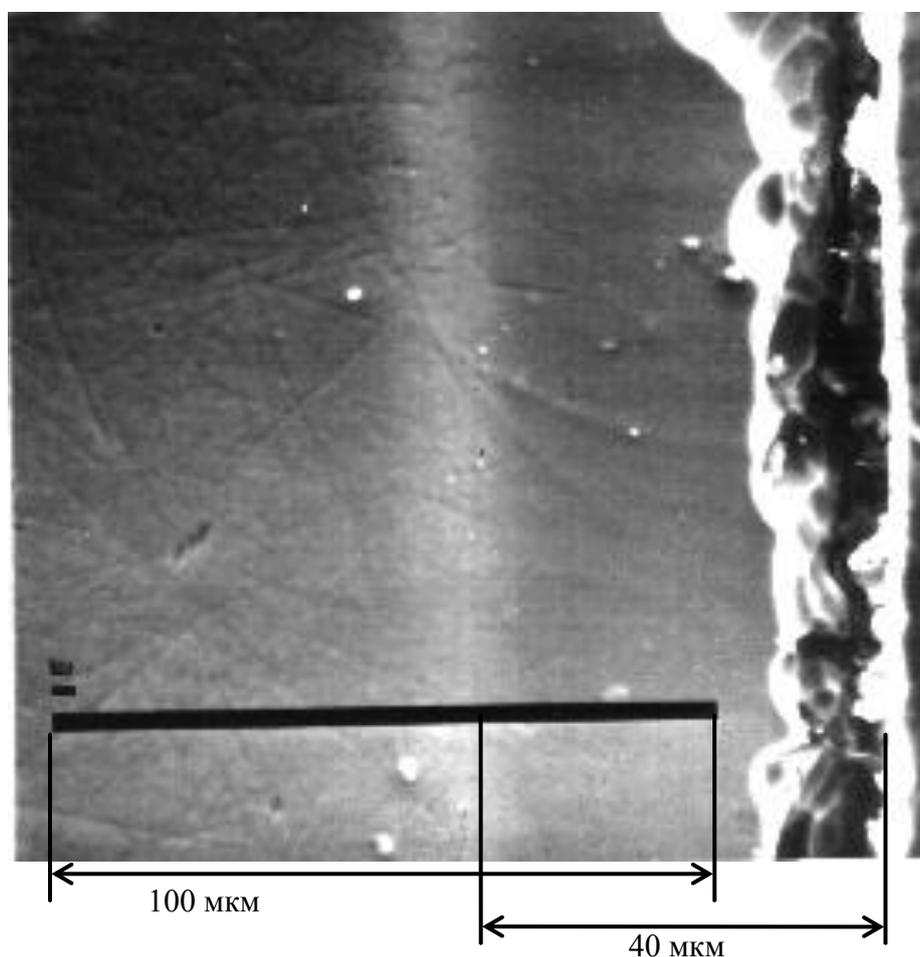


Рисунок 5.29 – Нарушенный слой в подложке GaAs после подготовки по существующей технологии. Растровый электронный микроскоп-микроанализатор «КАМЕБАКС».

Избирательное травление производилось травителем  $HNO_3:H_2SO_4:H_2O=1:2:2$ . Время травления составляло 7 минут, при температуре травителя  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 5.28 показано изображение нарушенного слоя подложки, полученное при помощи растрового электронного микроскопа Камебакс. Можно видеть, что нарушенный слой глубиной 40 мкм состоит из двух слоев. Слой, состоящий из микротрещин и шероховатостей, глубиной 15 мкм, и слой повышенных механических напряжений, глубиной 35 мкм.

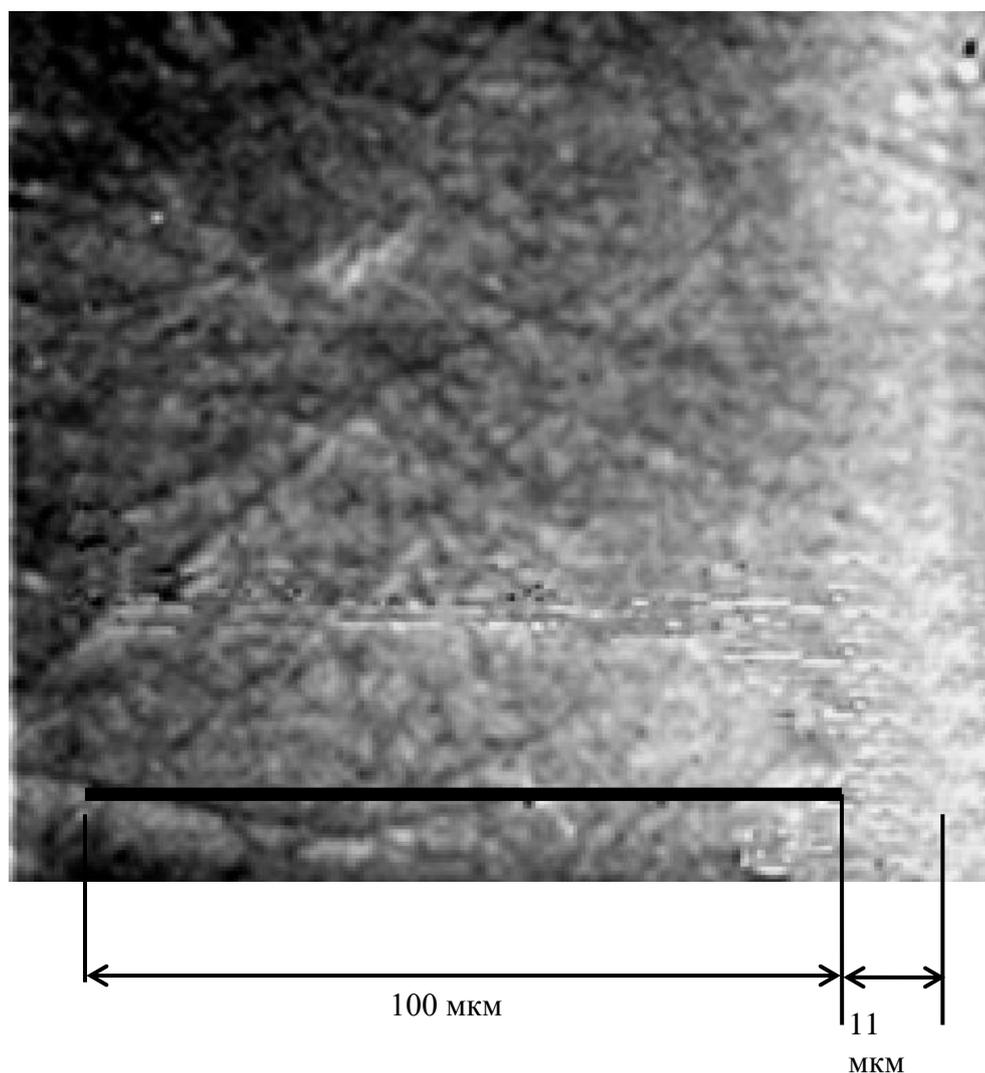


Рисунок 5.30 – Нарушенный слой в подложке GaAs после шлифовки по усовершенствованной технологии. Растровый электронный микроскоп-микроанализатор «КАМЕБАКС».

На рисунке 5.30 показан снимок подложки GaAs шлифованной по

усовершенствованной технологии. Порядок обработки подложки описан выше. Можно видеть, что глубина нарушенного слоя уменьшилась до 10 мкм, при этом слой микротрещин и шероховатостей оказался сошлифованным.

### **Выводы по разделу.**

1. Усовершенствована технология отжига слитков арсенида галлия, которая позволяет снизить остаточные напряжения в слитке до значения не более 40 МПа.

2. Определены режимы отжига слитков, значения которых составляют – нагрев с температурным градиентом  $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$  до температуры  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка при температуре  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 5 часов, охлаждение подложек с температурным градиентом  $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$ .

3. На основе анализа процесса шлифования подложек арсенида галлия определены ограничения на режим шлифования с учетом минимизации глубины нарушенного слоя. Синтезирована архитектура микроконтроллерного комплекса, подготовки подложек арсенида галлия.

4. Показано, что для обеспечения оптимального режима шлифования необходим учет непараллельности поверхности подложки и корректировка режима шлифования с учетом этого параметра.

5. Разработана структурная схема и алгоритм устройства шлифовки подложек, автоматизирующая процесс шлифования и обеспечивающая оптимальные режимы шлифования с уменьшением глубины нарушенного слоя до 10 мкм.

## Раздел 6

### ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЛОЖЕК GaAs ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАЗРАБОТАНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

#### 6.1. Исследование остаточных напряжений в подложках GaAs возникающих в процессе их производства.

Для оценки влияния технологических параметров, процесса производства подложек GaAs на уровень остаточных напряжений, в частности контроля диаметра и технологии отжига и технологии шлифования был проведен ряд промышленных испытаний подложек GaAs марок АГЧХ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП, АГЧП-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП, АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП по ТУ 6365-01-52692510-2010. Подложки изготавливались из слитков марки АГЧП(100) 100 к 5, АГЧХ(100) 100 к 5 и АГЧТ (100) 100 к 5 по ТУ 48-4-276-92.

Выращивание производилось в соответствии со стандартной технологической картой, под слоем герметика, в качестве которого использовался борный ангидрид  $B_2O_3$ . В процессе выращивания применялись следующие значения технологических параметров:

температура расплава, °С – +1248;

скорость вращения тигля, об/мин – 4;

давление инертного газа, атм. –  $2 \div 2,5$ ;

продолжительность выращивания, ч. – 12.

Исследования проводилось на серии из 36 подложек, вырезанных из верхней, средней и нижней части 12-ти слитков, из которых по 2 слитка каждой марки выращивались без устройства контроля диаметра, а по 2 слитка каждой марки выращивались с применением устройства контроля диаметра.

После выращивания слитки калибровались, и разрезались на пластины толщиной 650 мкм. В дальнейшем отбирались три пластины, вырезан-

ные соответственно из верхней, средней и нижней части слитка для дальнейшего изготовления подложек.

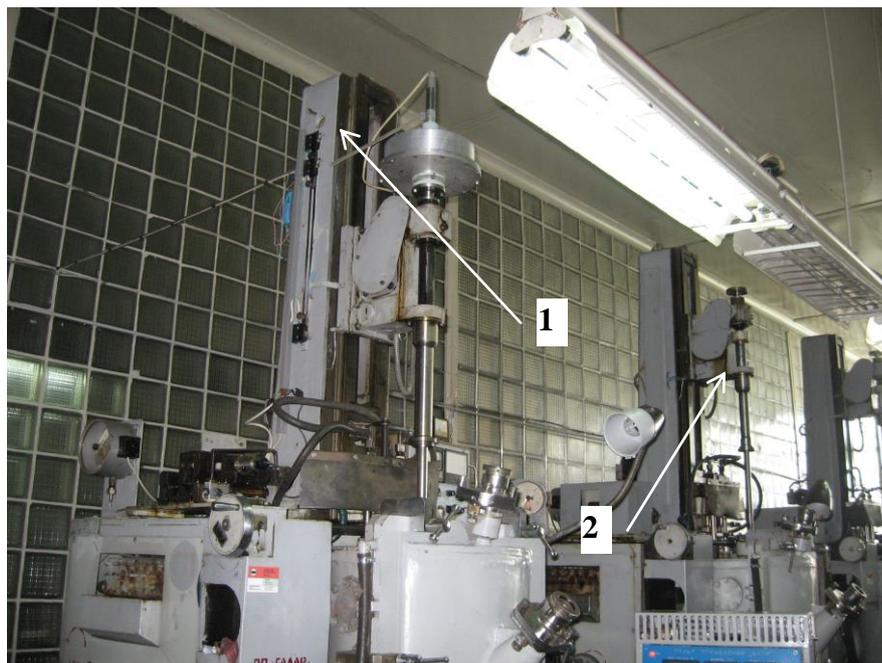


Рисунок 6.1 – Ростовые установки выращивания GaAs: 1 – «Арсенид 1»; 2 – «Арсенид».

Полученные слитки приведены на рисунке 6.2.



а)



б)

Рисунок 6.2 – Слитки GaAs диаметром 4 $\frac{1}{2}$ : а) – установка «Арсенид»; б) «Арсенид 1».

Выращивание слитков производилось на ЧП “Галар”, г. Светловодск, на установках “Арсенид” не оборудованных устройством контроля диаметра, и “Арсенид 1” с устройством контроля диаметра, которые показаны на рисунке 6.1.

Калиброванный слиток показан на рисунке 6.3.



Рисунок 6.3 – Калиброванный слиток GaAs диаметром 4<sup>м</sup>.

Подготовка подложек вырезанных из слитков № 1 – 6 проводилась по существующей технологии, подготовка подложек вырезанных из слитков 7 – 12 по разработанной технологии.

Измерение уровня остаточных напряжений выполнялось на установке «Полярон – 4», в соответствии с методикой, разработанной в разделе 3 данной работы.

Для оценки качества подложек использовалось значение уровня остаточного напряжения и плотности дислокаций подложек, вырезанных из верхней части слитка, как имеющие максимальные структурные нарушения.

Результаты измерения, сведенные в таблицу и отображенные в виде гистограммы приведены соответственно в табл. 6.1 и на рис. 6.4.

Таблица 6.1.

Результаты измерения уровня остаточного напряжения в подложках GaAs изготовленных по различным технологиям.

Существующая технология			Разработанная технология			
Марка слитка	Место реза	$\sigma$ , МПа	Марка слитка	Место реза	$\sigma$ , МПа	
1-й слиток	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	45	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	37
		сред.	40		сред.	32
		низ	42		низ	35
	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	47	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	40
		сред.	45		сред.	28
		низ	42		низ	25
	АГЧП(100) 100 к 5	верх	52	АГЧП(100) 100 к 5	верх	40
		сред.	46		сред.	35
		низ	42		низ	30
2-й слиток	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	47	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	35
		сред.	41		сред.	28
		низ	40		низ	27
	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	44	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	38
		сред.	40		сред.	32
		низ	37		низ	30
	АГЧП(100) 100 к 5	верх	52	АГЧП(100) 100 к 5	верх	28
		сред.	46		сред.	20
		низ	46		низ	18

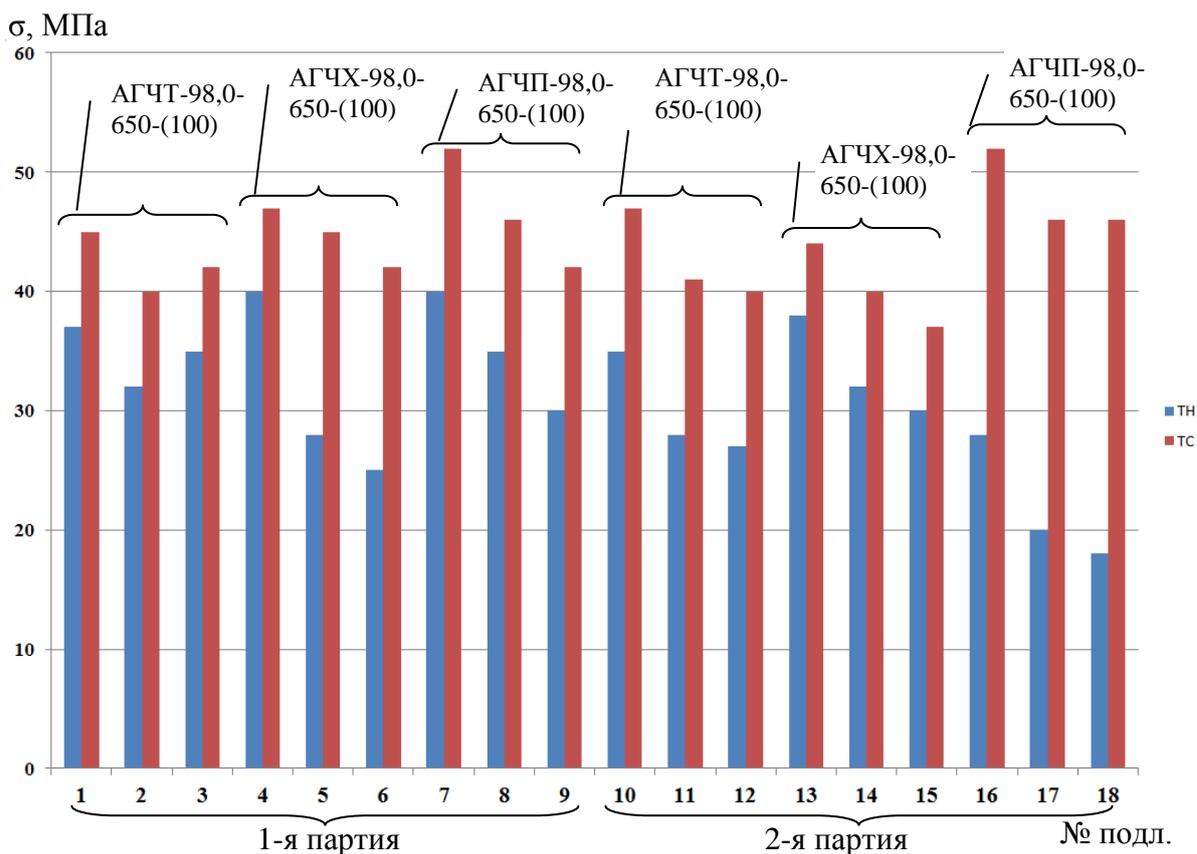


Рисунок 6.4 – Уровень остаточных напряжений в подложках изготовленных по существующей и разработанной технологии.

Можно видеть, что полученное распределение остаточных напряжений по длине слитка имеет большее значение в начале слитка, снижается к центру слитка, и опять увеличивается к нижней части слитка. Полученные данные хорошо согласуются с результатами полученными авторами работ [99].

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что использование устройства контроля диаметра слитка в процессе роста и предложенной технологии и устройства отжига подложек позволили добиться уменьшения остаточных напряжений в подложках GaAs не менее чем на 10 %.

## 6.2. Исследование отклонения от плоскостности в подложках GaAs.

Для оценки влияния технологических параметров процесса производства подложек GaAs на их отклонение от плоскостности, был проведен ряд промышленных испытаний подложек GaAs которые использовались для оценки уровня остаточного напряжения.

Определение отклонения от плоскостности подложек выполнялось в соответствии с методом, методикой и с использованием устройства предложенных в данной работе.

Отклонение от плоскостности подложек определялось по трем кристаллографическим направлениям, соответствующим осям с наибольшей и наименьшей жесткостью.

Ориентация подложки при проведении измерений показана на рисунке 6.5.

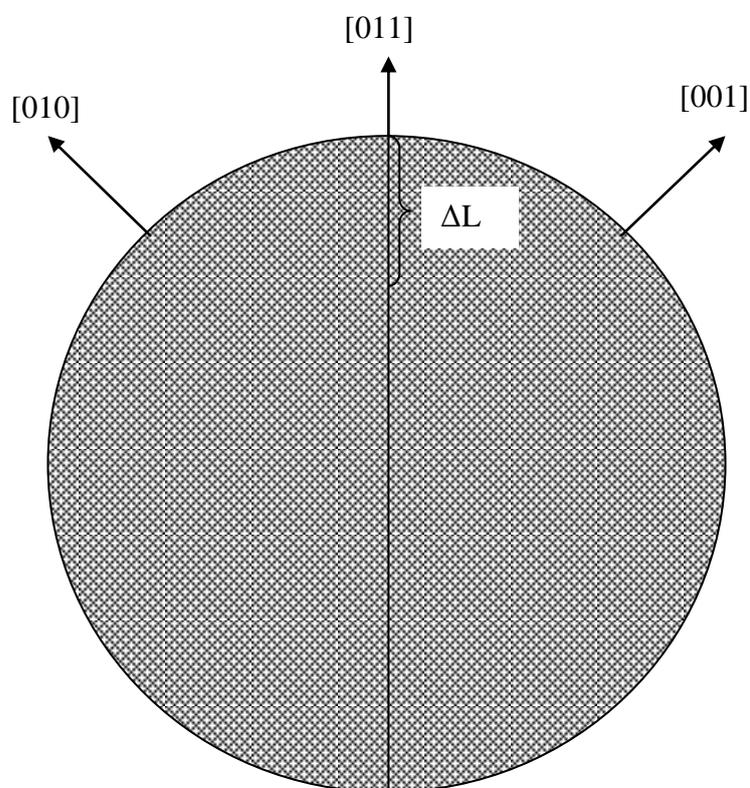


Рисунок 6.5 – Схема измерения отклонения от плоскостности подложки GaAs.

Измерения проводились в точках расположенных на линиях совпадающих с указанными кристаллографическими направлениями с шагом  $\Delta L$  равным 10 мм.

Результаты измерения отклонения от плоскостности приведены в таблицах 6.2 и 6.3.

Таблица 6.2.

Результаты измерения отклонения от плоскостности в подложках GaAs изготовленных по существующей технологии.

Марка слитка	Место реза	Направление	Отклонение от плоскостности подложки, мкм								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
АГЧТ(100) 100 к 5	верх	[010]	1,0	2,5	3,5	4,0	5,0	5,0	4,0	2,0	1,0
		[011]	0,0	-0,5	-1,5	-1,0	-0,5	0,0	0,5	0,5	0,0
		[001]	-0,3	-2,0	-3,0	-3,5	-3,0	-3,0	-2,5	-1,0	0,0
	серед.	[010]	1,7	2,7	2,6	3,4	5,9	5,7	3,8	1,4	0,9
		[011]	0,8	-1,5	-1,1	-0,9	-1,1	-1,0	0,8	-0,1	-0,9
		[001]	-1,0	-3,0	-2,2	-5,0	-4,9	-3,9	-2,6	-0,2	0,3
	низ.	[010]	2,7	2,9	1,8	3,1	5,1	6,4	4,1	0,6	0,8
		[011]	-0,1	-2,4	-0,2	-1,1	-0,9	-0,5	1,7	0,5	-0,2
		[001]	-0,7	-2,6	-1,5	-4,7	-5,1	-4,7	-3,4	0,1	1,2
АГЧХ(100) 100 к 5	верх	[010]	0,0	-1,0	-1,0	-1,5	-1,2	-1,0	-0,5	0,1	0,2
		[011]	-1,0	0,2	-0,1	-0,3	-0,3	0,0	-0,2	0,0	0,2
		[001]	0,3	1,2	2,5	3,0	3,0	3,5	2,5	2,0	1,0
	серед.	[010]	0,0	-1,1	-1,1	-1,3	-2,0	-0,3	-0,6	0,7	-0,1
		[011]	-2,0	-0,1	-0,3	-0,7	0,2	0,9	0,7	0,3	0,9
		[001]	-0,6	2,1	2,7	3,7	1,5	1,6	1,5	2,7	0,5
	низ.	[010]	0,9	-1,8	-0,4	-1,3	-1,0	-1,2	-0,9	1,4	-0,2
		[011]	-1,4	-0,7	-1,0	-0,9	0,1	0,6	0,7	0,9	1,2
		[001]	-0,2	3,8	3,6	2,8	1,8	1,0	1,7	2,3	-0,2
АГЧЦ(100) 100 к 5	верх	[010]	-1,0	-1,5	-2,0	-2,0	-2,2	-2,2	-1,5	-1,0	0,0
		[011]	0,0	0,2	0,2	0,0	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	-0,1
		[001]	1,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	3,0	2,0	1,0
	серед.	[010]	-1,2	-0,7	-1,1	-1,6	-2,8	-2,8	-0,8	-1,1	0,3
		[011]	-0,3	0,8	1,2	-0,4	-1,1	0,7	-0,2	-0,4	-0,2
		[001]	1,9	2,3	3,4	1,2	2,9	3,6	1,4	2,8	0,4
	низ.	[010]	-2,2	0,0	-1,5	-2,4	-3,5	-3,0	-1,0	-2,1	-0,2
		[011]	-0,2	0,0	1,5	0,0	-1,6	1,4	0,0	-0,7	-1,2
		[001]	2,1	2,3	4,2	1,2	2,9	4,2	1,1	2,0	0,6

Таблица 6.3.

Результаты измерения отклонения от плоскостности в подложках GaAs изготовленных по разработанной технологии.

Марка слитка	Место реза	Направление	Отклонение от плоскостности подложки, мкм								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
АГЧТ(100) 100 к 5	верх	[010]	0,0	1,5	0,5	-1,0	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0	0,0
		[011]	-1,2	0,0	-1,0	-1,0	-2,0	-2,0	-1,0	-0,5	1,0
		[001]	0,0	2,0	3,0	3,5	3,0	3,0	2,5	1,0	0,0
	серед.	[010]	-0,4	1,9	1,1	-0,1	-1,2	-2,3	-2,0	-0,1	0,9
		[011]	-1,9	-0,7	-0,9	-0,2	-1,9	-2,1	-0,2	-1,1	0,8
		[001]	-0,4	2,7	3,8	3,5	1,5	1,9	1,0	1,5	0,6
	низ.	[010]	-0,4	2,3	0,2	0,3	-1,3	-1,6	-2,1	-0,6	1,3
		[011]	-2,1	-1,1	-1,5	-0,2	-1,9	-2,8	0,4	-1,2	0,6
		[001]	-0,6	2,7	4,0	3,3	2,1	2,7	1,2	1,6	1,5
АГЧХ(100) 100 к 5	верх	[010]	0,0	-1,0	-0,5	-0,5	-1,0	-1,0	-1,5	0,0	0,0
		[011]	-1,2	0,0	-0,5	-0,5	-0,5	-1,0	-1,0	0,0	0,0
		[001]	0,0	1,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,0	1,0
	серед.	[010]	-0,8	-1,9	-1,0	0,4	-0,6	-0,5	-0,8	-0,4	0,9
		[011]	-1,4	-0,5	-0,7	-0,1	-0,9	-1,8	0,0	0,4	0,1
		[001]	-0,4	1,1	1,6	1,7	1,9	0,7	1,0	0,6	0,0
	низ.	[010]	0,0	-2,6	-1,5	-0,5	-0,2	-1,0	-1,0	0,4	1,3
		[011]	-2,0	-1,2	-0,4	0,0	-0,7	-0,8	-0,6	1,4	0,5
		[001]	-0,5	3,0	2,0	2,6	1,1	0,9	1,8	1,2	-0,7
АГЧП(100) 100 к 5	верх	[010]	1,0	1,8	2,5	3,0	3,0	4,5	3,5	2,0	1,0
		[011]	0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-0,5	-0,2	-0,1
		[001]	-1,0	-1,5	-2,0	-2,0	-2,2	-2,2	-1,5	-1,0	0,0
	серед.	[010]	0,0	2,0	2,6	2,1	3,8	3,7	3,3	1,8	0,3
		[011]	1,0	-0,8	0,4	-0,5	-0,4	-1,6	0,2	0,1	-0,8
		[001]	-0,3	-2,2	-2,2	-3,6	-3,8	-3,4	-3,2	-0,1	-0,3
	низ.	[010]	-0,1	1,9	3,3	1,8	4,4	3,1	3,7	1,0	0,6
		[011]	1,0	-1,7	0,5	0,4	-1,0	-1,9	-0,3	-0,8	-1,1
		[001]	0,7	-1,6	-1,7	-3,2	-4,2	-2,5	-2,9	0,0	-0,1

Анализ полученных результатов показывает, что отклонение от плоскостности подложек имеет сложный характер изгиба. Максимальный изгиб происходит по кристаллографическим направлениям [001] и [010], что

соответствует результатам моделирования, полученным в разделе 2.1 и практическим результатам измерения распределения остаточного напряжения приведенным в разделе 4.1.

Подложки, изготовленные из верхней части слитка имеют более высокую степень отклонения от плоскостности, чем в средней и нижней части, что подтверждает связь между уровнем остаточных напряжений и деформаций [271].

Максимальное значение отклонения от плоскостности имеют полужолирующие нелегированные слитки марки АГЧП(100)100к5, что объясняется более высоким уровнем остаточных напряжений.

Для сравнения степени отклонения от плоскостности подложек GaAs полученных с использованием существующей и новой технологии были определены максимальные значения изгиба и среднее значение по всем подложкам.

Таблица 6.4.

Граничные значения отклонения от плоскостности подложек GaAs

	Максимальное отклонение от плоскостности +	Среднее отклонение от плоскостности	Максимальное отклонение от плоскостности -
Существующая технология	4,4	0,26	- 4,1
Разработанная технология	1,5	0,10	- 1,2

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных можно утверждать, что предлагаемые в работе технологические решения позволяют уменьшить отклонение от плоскостности подложек GaAs не менее чем на 20%.

### 6.3. Исследование влияния режимов технологических параметров процесса производства подложек GaAs на плотность дислокаций.

Для оценки влияния технологических параметров процесса, производства подложек GaAs на плотность дислокаций, был проведен ряд промышленных испытаний подложек GaAs которые использовались для оценки уровня остаточного напряжения и определения отклонения от плоскостности.

После отжига и измерения уровня остаточных напряжений подложки GaAs подвергались подготовке в соответствии с предложенной в работе методикой контроля плотности дислокаций.

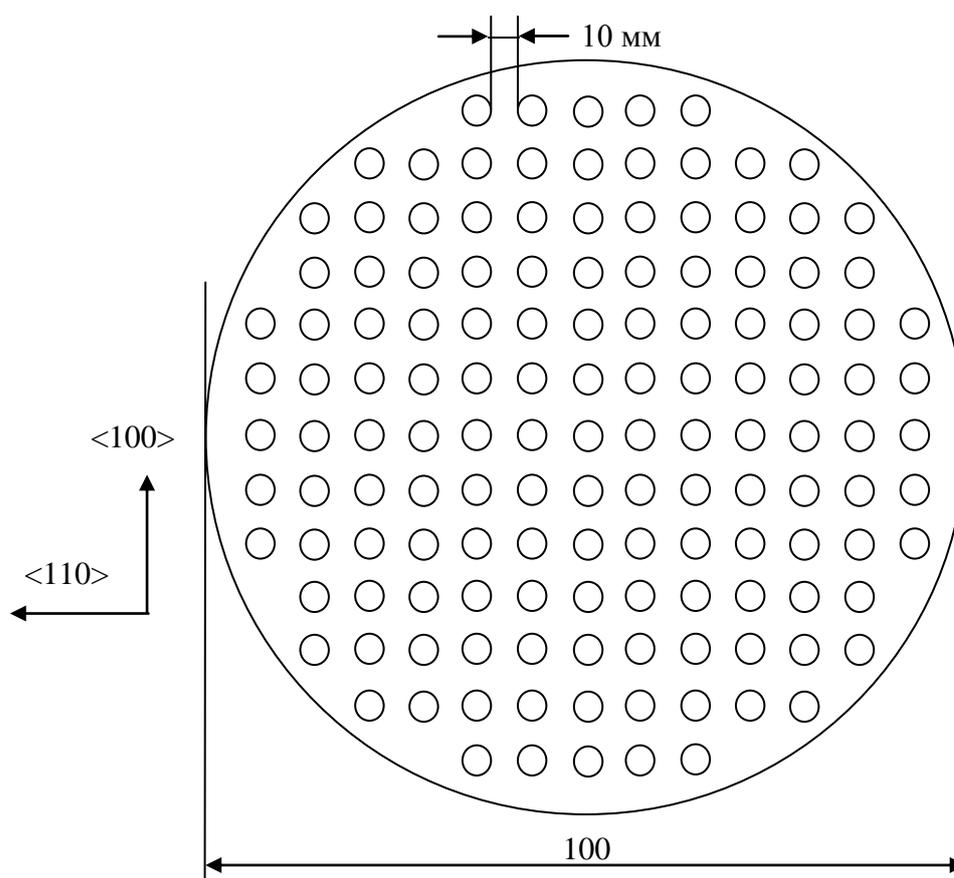


Рисунок 6.6 – Схема размещения зон измерения в подложке GaAs при измерении плотности дислокаций.

Выращивание слитков производились на ЧП “Галар”, г. Светловодск, на установках “Арсенид” не оборудованных устройством контроля диаметра, и “Арсенид 1” с устройством контроля диаметра.

Таблица 6.5.

Результаты измерения плотности дислокаций в подложках GaAs изготовленных по различным технологиям.

Существующая технология				Разработанная технология		
Марка слитка		Место реза	N, см <sup>-2</sup> x 10 <sup>-5</sup>	Марка слитка		N, см <sup>-2</sup> x 10 <sup>-5</sup>
1-й слиток	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	1,32	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	1,00
		сред.	1,23		сред.	0,92
		низ	1,20		низ	0,92
	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	1,62	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	1,30
		сред.	1,33		сред.	0,80
		низ	1,33		низ	0,88
	АГЧП(100) 100 к 5	верх	1,32	АГЧП(100) 100 к 5	верх	1,12
		сред.	0,98		сред.	0,85
		низ	0,91		низ	0,80
2-й слиток	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	1,00	АГЧТ(100) 100 к 5	верх	0,87
		сред.	0,82		сред.	0,76
		низ	0,80		низ	0,72
	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	1,16	АГЧХ(100) 100 к 5	верх	1,05
		сред.	0,85		сред.	0,76
		низ	0,86		низ	0,72
	АГЧП(100) 100 к 5	верх	0,80	АГЧП(100) 100 к 5	верх	0,73
		сред.	0,73		сред.	0,66
		низ	0,75		низ	0,60

Измерение плотности дислокаций проводилось устройством «ТВ-Дислок 1», в соответствии с предложенной в разделе 3.2 методикой контроля плотности дислокаций, используя полный план измерения (см. рис. 6.6).

Для оценки качества подложек использовалось интегрированное значение плотности дислокаций.

Результаты измерения, сведенные в таблицу и отображенные в виде гистограммы приведены соответственно в табл. 6.5 и на рис. 6.6.

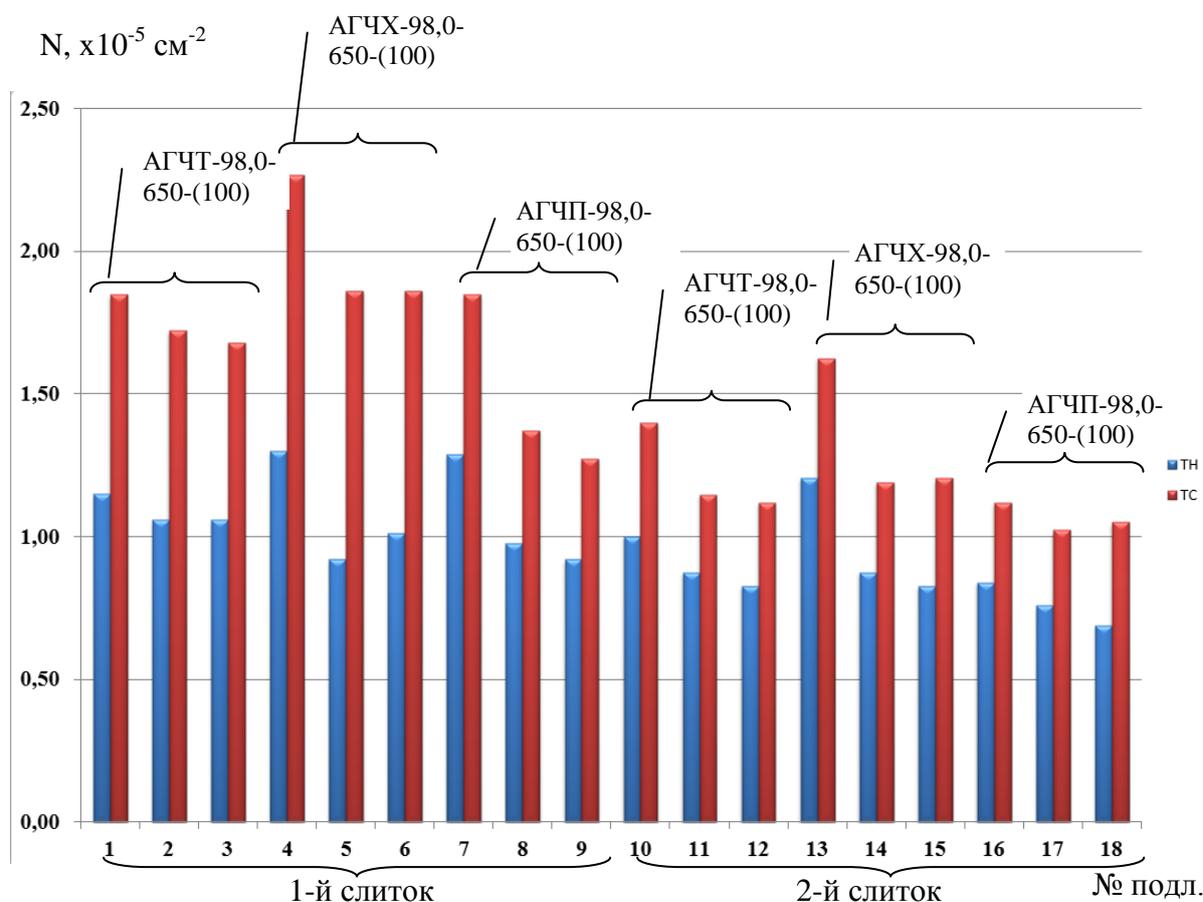


Рисунок 6.6 – Плотность дислокаций в подложках изготовленных по существующей и разработанной технологии.

Как показывают экспериментальные исследования плотность дислокаций в подложках изготовленных по старой технологии из верхней части слитка имеет большее значение (среднее значение  $1,68 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$  при максимальном значении  $2,27 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ ) чем изготовленные из средней ча-

сти ( $1,39 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ ) и нижней части ( $1,47 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ ). Подложки, которые изготавливались по разработанной технологии, повторяют картину распределения плотности дислокаций. Значение плотности дислокаций подложек изготовленных из верхней части составило  $1,13 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ , из средней части  $9,4 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ , и  $9,0 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$  из нижней части соответственно.

Увеличенное значение плотности дислокаций как в подложках изготовленных по существующей технологии, так и в подложках изготовленных по предложенной технологии вырезанных из верхней части слитка объясняется повышенными температурными градиентами при выращивании слитка, которые возникают вследствие изменения скорости выращивания при переходе стадии выращивания прямого конуса к стадии выращивания цилиндрической части.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что использование предложенной технологии позволило добиться уменьшения плотности дислокаций в подложках GaAs до значения менее  $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

#### **6.4. Исследование влияния качества подложек GaAs на элементы ИК-оптики.**

Для исследования повышения деградационной стойкости пластин GaAs были подготовлены 3 образца из подложек марки АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП.

Удельное сопротивление образцов составляло  $1 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Часть образцов подвергалась обработке в плазме водорода с использованием установки PE-CVD. Потом образцы подвергались ВЧ-обработкам (на частоте 13,56 МГц) на той же установке и микроволновым обработкам (МВО) (на частоте 2,45 ГГц). Для МВО использовалась установка на основе магнетрона с удельной исходной мощностью  $1,5 \text{ Вт/см}^2$ . МВО проводилась в рабочей камере магнетрона на воздухе в свободном пространстве.

Кроме исходной подложки, исследовались образцы № 1, и № 4, прошедшие такие обработки: № 1 - обработка в плазме водорода в течение 30 мин + двухстадийная ВЧ-обработка общей продолжительностью 119 мин + поэтапная МВО общей продолжительностью 10 мин; № 4 - двухстадийная ВЧ-обработка общей продолжительностью 119 мин + поэтапная МВО общей продолжительностью 10 мин. Спектры ИК-пропускания и отражения измерялись на фурье-спектрометре Infracum FT-801 в спектральном интервале 4-16 мкм при комнатной температуре. Спектры комбинационного рассеивания света (КРС) измерялись при возбуждении аргоновым лазером на длине волны  $\lambda = 488$  нм также при комнатной температуре.

Параметры подгонки спектров комбинационного рассеивания света образцов GaAs гауссианами занесены в таблицу 6.6.

Таблица 6.6.

Параметры подгонки спектров КРС.

Образец GaAs	Площадь полосы, отн. ед.	Положение максимума полосы, см <sup>-1</sup>	Полуширина полосы, см <sup>-1</sup>	Примесь
Исходный	13715,15	293,10	6,1032	Te
Образец № 4	48556,00	293,46	6,2389	Te
Образец № 1	47831,85	293,61	6,7867	Te
Исходный	1808,10	292,64	4,1073	Cr [2]
После обработки в плазме водорода	1635,40	291,62	4,4308	Cr [2]

Для ненапряженного кристалла GaAs положение полосы КРС на LO-фононе - 291,3 см<sup>-1</sup>.

Замена компенсирующей примеси <sup>24</sup>Cr на <sup>52</sup>Te с ковалентными радиусами 118 пм и 136 пм, соответственно, должна повлиять на кинетику изменения уровня ВМН в подложках ПИН GaAs. На рис. 6.7 приведены спектры КРС подложек, легированных Te, а в таблице 6.6 – результаты подгонки этих спектров КРС гауссианами. Таким образом, изменение типа легирующей примеси должно существенно повлиять на стойкость подлож-

ки к дальнейшим обработкам, способным изменить уровень ВМН в ней и, соответственно, состояние дефектной подсистемы.

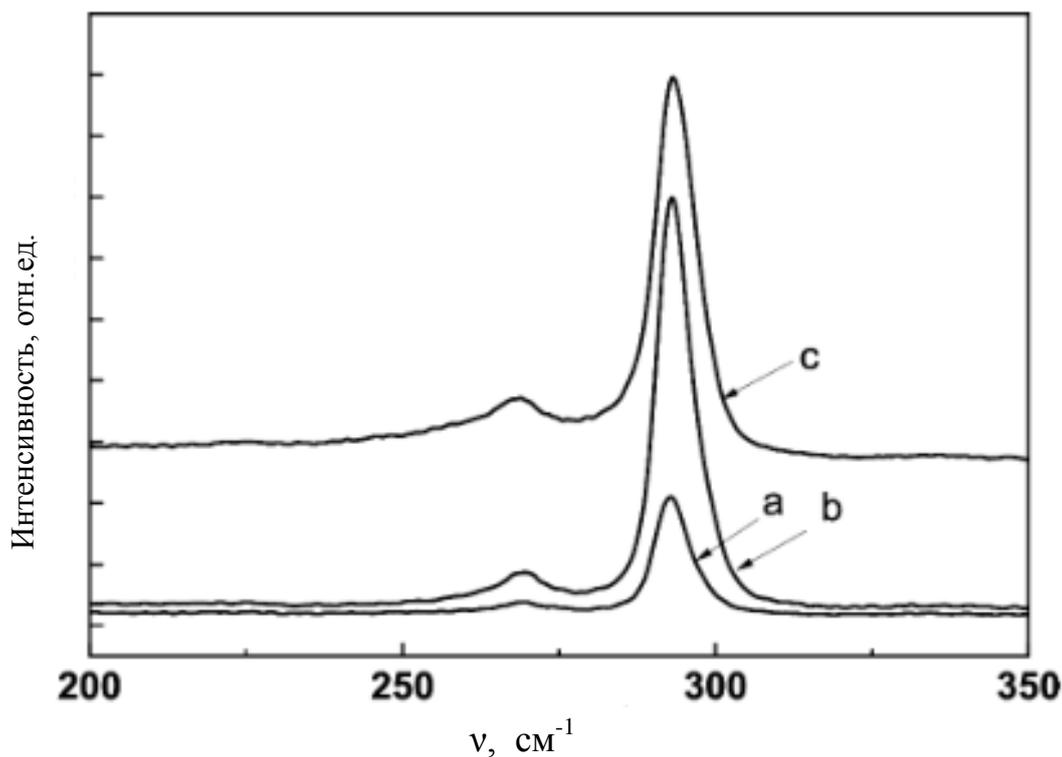


Рисунок 6.7 – Спектры КРС образцов GaAs: а – исходный образец; б – образец №4; с – образец №1 в таблице 6.6 .

Как видно, напряжение в исходных подложках, легированных Те, выше, чем в подложках, легированных Cr, но степень их релаксации при обработках меньше. Первое вытекает из значения энергии LO-фонона для исходных образцов, легированных хромом -  $292,64 \text{ см}^{-1}$  и теллуром -  $293,10 \text{ см}^{-1}$  (см.табл. 6.6), по отношению к ненапряженному кристаллу GaAs -  $291,3 \text{ см}^{-1}$ . Второй вывод подтверждается результатами, полученными для обработанных образцов. Действительно, из рис. 6.7 и таблицы 6.6 видно, что полоса в спектре КРС подложки, легированной теллуром, ответственная за рассеивания на LO-фонон и, несущественно, смещается даже после многостадийных обработок (образцы 1, 4 в табл. 6.6). В то же время, даже непродолжительная плазменная обработка подложки, легированной Cr, вызывает существенное изменение положения пика LO-фонона и, следовательно, релаксацию ВМН.

Очевидно, что большие напряжения в подложках могут приводить к появлению большего количества структурных дефектов в материале, например, дислокаций. Анализ таблицы показывает что полуширина полосы LO-фонона в спектре КРС образца, легированного теллуром ( $\Delta\omega = 6,1032 \text{ см}^{-1}$ ) значительно больше, чем для образца, легированного хромом ( $\Delta\omega = 4,1073 \text{ см}^{-1}$ ).

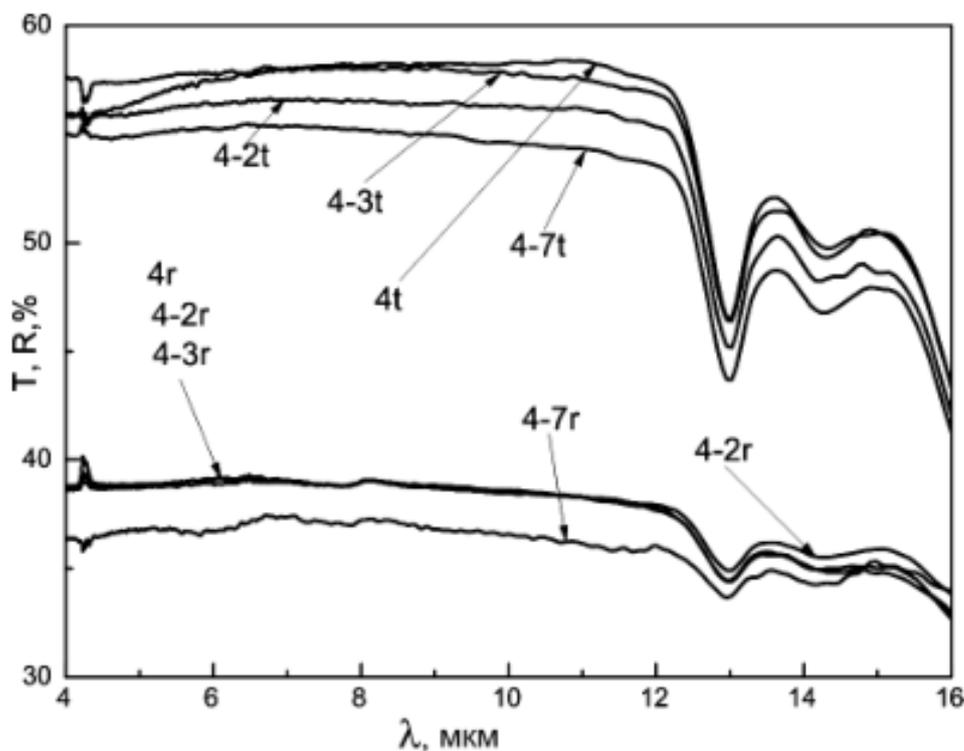


Рисунок 6.8 – Спектры пропускания (t) и отражения (r) ИК излучения подложек GaAs, легированных теллуром: 4 – исходный образец; 4-2 – образец 4 после ВЧ-обработки под маской (мощность разряда – 250 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки – 62 мин); 4-3 – образец 4-2 после ВЧ-обработки под маской (мощность разряда – 250 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки – 57 мин); 4-7 – образец 4-3 после микроволновой обработки в течение 10 мин.

На рис. 6.8 приведены спектры пропуска и отражение в ИК - области спектра подложки GaAs, легированной Te, после серии активных обработок. Сначала кристалл подвергали ВЧ-обработке под маской, в режиме

плазменного разряда на протяжении двух этапов продолжительностью 62 и 57 мин соответственно. Как видно из рис. 6.8, после первого этапа ВЧ-обработки, пропускание кристалла падало во всем исследованном спектральном диапазоне примерно на 1,5% (рис. 6.8, 4-2t). При этом как можно видеть на графиках, отражение после первого и второго этапов ВЧ-обработки не менялось. Это означает, что все изменения пропускания обусловлены изменением свойств объема подложки, вследствие процессов релаксации ВМН в нем под действием обработок. Необходимо заметить, что второй этап ВЧ-обработки несколько улучшил пропуск кристалла (рис. 6.8, спектр 4-3t). В то же время, все следующие обработки приводили только к ухудшению пропускания кристалла. Такими обработками были микроволновые обработки на частоте 2,45 ГГц. Видно, что МВО общей продолжительностью 10 мин приводила к существенному падению пропуска кристалла во всем исследованном спектральном диапазоне (рис. 6.8, спектр 4-7t). Учитывая то, что использование МВО приводит к быстрому разогреву подложки, можно предположить что падение пропуска также обусловлено разогревом кристалла вследствие частичной релаксацией в нем ВМН через генерацию дополнительных структурных дефектов. Однако, поскольку свойства исходного кристалла GaAs, легированного Te, отличаются от свойств GaAs, легированного Cr [208], эффект падения пропускания, вследствие релаксации ВМН значительно отличается. Как видно из рис. 6.8, пропускание исходного образца подложки, легированного Te, падает после ВЧ-обработки только на ~1,5%, тогда как подложки, легированной Cr, после ВЧ-обработки падает на ~6% (рис. 6.9, спектр 3,[ 208]).

В работе [208] было показано, что быстрый термический отжиг АГПИ, компенсированного Cr, приводит к катастрофической деградации кристалла (рис. 6.9, спектр 4,[ 208]), а из рис. 6.8 видно, что МВО на протяжении 10 мин образца компенсированного Te уменьшает его пропускание только на ~3% (рис. 6.8, спектр 4-7t). Более того, даже продолжительный термический отжиг при 550 °С на протяжении 30 минут подложки, ле-

гированной Те не вызвал такого катастрофического падения пропускания (спектры не приведены), как быстрый термический отжиг подложки, компенсированной Cr.

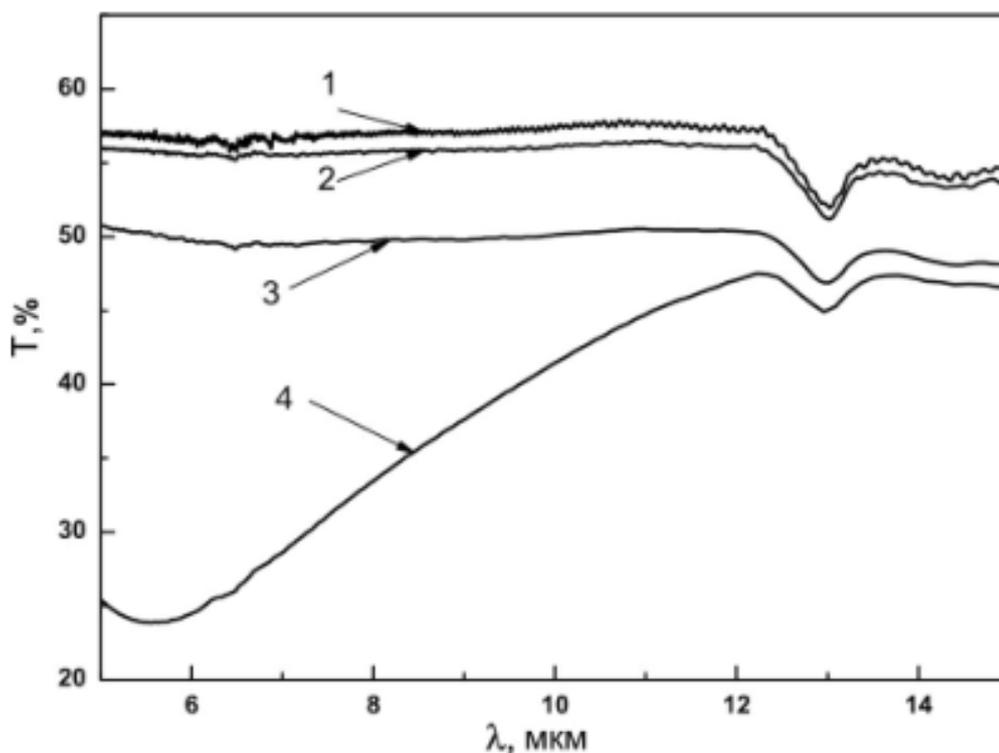


Рисунок 6.9 – Спектры пропускания ИК-излучения подложек GaAs, легированных хромом по результатам [208]: 1 – исходный образец; 2 – образец № 1 после ВЧ-обработки под маской (мощность разряда – 250 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки – 15 мин); 3 – образец № 2 после ВЧ-обработки под маской (мощность разряда – 250 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки – 47 мин); 4 – образец № 3 после отжига при 600 °С в течение 30с в атмосфере аргона.

Проведенные нами исследования показали, что отражение подложки меняется только после продолжительной (10 мин) МВО (рис. 6.8, спектр 4-7г). Это, по нашему мнению, обусловлено тем, что только в течение такого времени МВО подложка разогревается до температур, при которых на его поверхности могут формироваться пленки других фаз, например, GaN [209]. В результате, отражение от структуры будет падать по причинам,

описанным в [209]. Источником азота, необходимого для формирования GaN, является атмосфера, поскольку МВО выполнялись на воздухе.

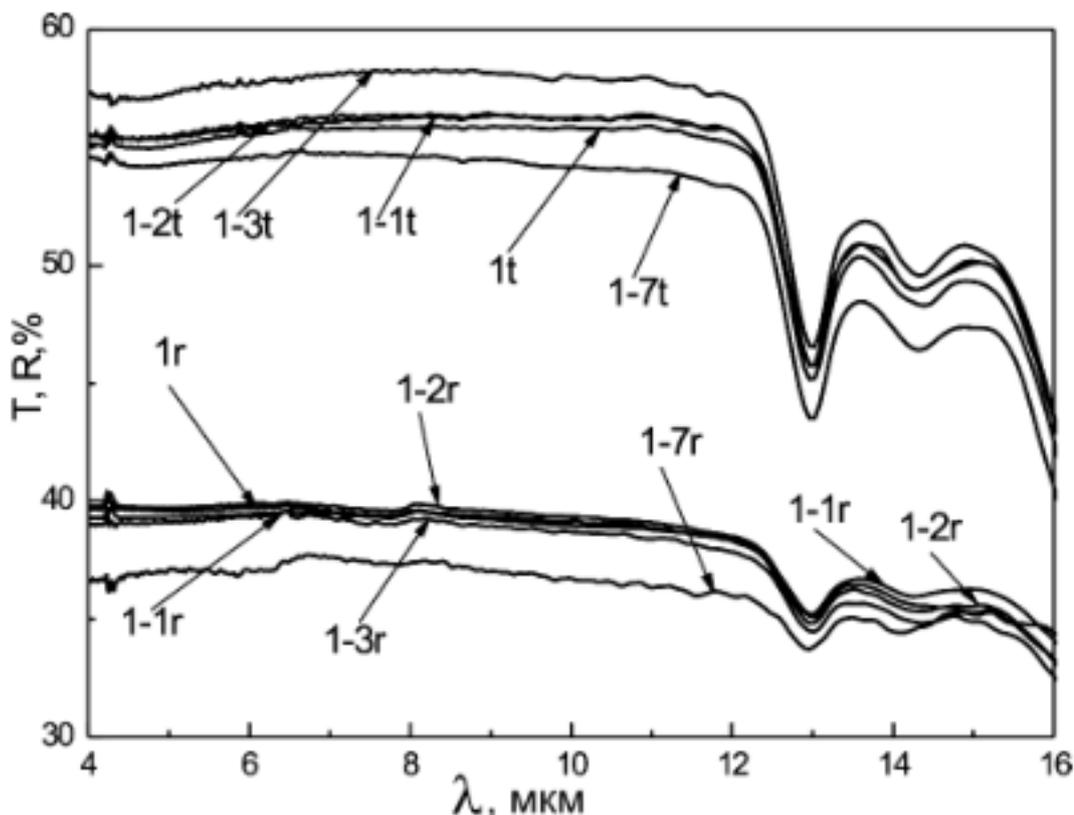


Рисунок 6.10 – Спектры пропускания (t) и отражения (r) ИК излучения подложек GaAs: 1 - исходный образец; 1-1 – после обработки в плазме Н + (мощность разряда – 175 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки - 30 мин); 1-2 – образец 1-1 после ВЧ-обработки под маской (мощность разряда – 250 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки - 62 мин); 1-3 – образец 1-2 после ВЧ-обработки под маской (мощность разряда – 250 Вт, давление газа – 106,6 Па, время обработки - 57 мин); 1-7 – образец 1-3 после микроволновой обработки в течение 10 мин.

Обработка подложек GaAs, легированных Te, в плазме водорода не только не ухудшала его пропускание, а даже несколько улучшала (рис. 6.9, спектр 1-1t). Это обусловлено изменением свойств приповерхностной области подложки, а не его поверхности. Данный вывод подтверждается тем фактом, что отражение после плазменной обработки практически не изменилось (рис. 6.8, спектры 1r, 1-1r). Кроме того, дополнительно было уста-

новлено, что структурирование поверхности образцов вследствие плазменной обработки, которое могло бы привести к уменьшению отражения, также не происходит. Из исследований, выполненных методом атомно-силовой микроскопии, было установлено, что средняя шершавость поверхности после обработки даже уменьшалась с 1,567 нм до 1,090 нм.

После первого этапа ВЧ-обработки пропускание плазменно-обработанного кристалла не ухудшалось (рис. 6.10, спектр 1-2t), в отличие от исходного, необработанного образца (рис. 6.8, спектр 4-2t). Второй этап ВЧ-обработки даже улучшает пропуск во всем спектральном диапазоне (рис. 6.10, спектр 1-3t), то есть снова наблюдается улучшение деградационной стойкости кристалла по механизму, аналогичному предложенному в [209] для подложки, легированной хромом. Согласно этому механизму, дефекты, которые генерируются в объеме кристалла во время ВЧ-обработки, могут двигаться в бок поверхности под действием градиента, механических напряжений и аннигилировать в плазменно-обработанном приповерхностном пласте с имеющимися там дефектами. И только продолжительная МВО ухудшает пропускание подложек (рис. 6.10, спектр 1-7t). При этом, динамика изменения спектров отражения (рис. 6.10, спектры 1r-1-7r) аналогична изменению спектров образца, который не проходил плазменной обработки (рис. 6.8). Можно предположить, что абсолютное значение падения пропускания плазменно-обработанного образца после продолжительной МВО (~1,2%) меньше, чем исходного (~3%). Это также свидетельствует о том, что плазменная обработка позволяет улучшить деградационную стойкость подложек GaAs к влиянию комбинированной ВЧ + МВО обработки.

### **Выводы по разделу.**

1. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что использование устройства контроля диаметра слитка в процессе роста и предложенной технологии и устройства отжига подложек позволили добиться уменьшения остаточных напряжений в подложках GaAs не менее чем на 10 %. Значения остаточных напряжений находятся в границах  $20 \div 40$  МПа.

2. На основе полученных экспериментальных данных можно утверждать, что предлагаемые в работе технологические решения позволяют уменьшить отклонение от плоскостности подложек GaAs не менее чем на 20%. Максимальные значения отклонения от плоскостности составили  $\pm 2$  мкм.

3. Использование разработанной технологии позволило добиться уменьшения плотности дислокаций в подложках GaAs не менее чем на 10 %. Значение плотности дислокаций подложек изготовленных из верхней части составило  $1.18 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2}$ , из средней части  $9,2 \times 10^{-4} \text{ см}^{-2}$ , и  $9,4 \times 10^{-4} \text{ см}^{-2}$  из нижней части соответственно.

4. Установлено, что введение в подложки лигатуры с большим ковалентным радиусом улучшает ее деградационную стойкость к влиянию дальнейших технологических обработок. Данный эффект наблюдается как для необработанных подложек, так и для подложек, которые прошли обработку в плазме водорода. Механизм улучшения деградационной стойкости плазменно-обработанных подложек GaAs не зависит от типа легирующей примеси.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Итог диссертационной работы - решение важной научно-практической проблемы повышение качества подложек арсенида галлия применяющихся для изделий микроэлектроники путем разработки и внедрения новой технологии изготовления подложек, а также усовершенствования и разработки методов, методик и аппаратуры неразрушающего контроля качества подложек.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Анализ специфики технологических процессов производства подложек показал, что дальнейшее повышение качества подложек, в частности уровня остаточных напряжений, отклонения от плоскостности и плотности дислокаций, можно достичь путем разработки и внедрения новой технологии производства подложек, усовершенствования и разработки методов, методик и аппаратуры неразрушающего контроля качества подложек.

2. Усовершенствована математическая модель описывающая влияние кристаллографической ориентации на механические свойства GaAs и рассчитаны значения модуля Юнга, коэффициента Пуассона для произвольных кристаллографических направлений. Разработан алгоритм и программное обеспечение для расчета механических параметров подложек GaAs в соответствии с разработанной моделью. Отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 4,7 %.

3. Усовершенствована математическая модель, позволяющая математически определить влияние величины остаточных напряжений на константы упругости  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  определяющие модуль Юнга и коэффициент Пуассона подложек арсенида галлия. Установлено что увеличения уровня остаточных напряжений до значения 60 МПа приводит к увеличению зна-

чения констант, при этом константа  $c_{12}$  имеет наибольшее приращение. Начиная со значения 60 МПа значение констант  $c_{11}$ ,  $c_{44}$  начинают уменьшаться, при этом значение константы  $c_{44}$  изменяется в большей степени. Определены условия, при которых обеспечивается механическая устойчивость подложки арсенида галлия при воздействии на нее остаточных напряжений. Показано, что нарушение устойчивости происходит при величине остаточных напряжений более 100 МПа.

4. Усовершенствована математическая модель описывающая влияние кристаллографической ориентации подложек GaAs на плотность дислокаций, которая позволяет оценить плотность и распределение дислокаций в подложках GaAs с учетом систем скольжения кристалла. Установлено, что механизм размножения дислокаций во всех 12 допустимых для арсенида галлия системах скольжения может быть описан 5-ю системами скольжения.

5. Внедрен в производство усовершенствованный метод измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия, разработана методика измерений и устройство “Полярон – 4” в котором учитывается сдвиг фазы входящего и выходящего ИК – излучения в подложку, а также несоосность оптической системы, что позволило увеличить точность измерения остаточных напряжений в подложках GaAs диаметром от 40 до 800 мкм. Разработано программное обеспечение на базе комплекса LabView, которое позволяет отображать результаты в виде распределения остаточных напряжений в 2D и 3D виде. Метод обеспечивает проведение неразрушающего контроля остаточных напряжений с абсолютной погрешностью  $\pm 2$  МПа, что по точности в 1,5 раза превышает существующий.

6. Разработана и внедрена в производство методика определения плот-

ности дислокаций в подложках GaAs. Установлено, что лучшие результаты выявления дислокаций достигаются при использовании травителя на основе щавелевой кислоты. Предложен план измерения, который позволяет получить карту распределения дислокаций в подложках GaAs. Усовершенствован и внедрен в производство метод измерения плотности дислокаций, в подложках GaAs в котором за счет применения методов обработки телевизионного изображения, возможно определять как одиночные дислокации, так и их скопления, что увеличивает точность метода. Метод поддерживает различные модели измерения дислокаций, включая модель по ГОСТ 19658-81 и модель по SEMI M83-1112. Разработано устройство «ТВ-Дислок1» реализующее усовершенствованный метод. Относительная погрешность метода составила 33%.

7. Разработана методика контроля отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия. Установлено что основные погрешности контроля вызывают погрешности механической конструкции, погрешность индуктивного датчика, погрешность распознавания линии интерференции. Усовершенствован и внедрен в производство метод неразрушающего контроля отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия позволяющий в отличии от существующих строить профиль отклонения от плоскостности подложки. Величина абсолютной погрешности метода равна 0,8 мкм. Разработано устройство контроля отклонения от плоскостности подложек «АКИДП – 1» реализующее предложенный метод.

8. Усовершенствован метод, разработано и внедрено в производство устройство контроля диаметра слитка GaAs в процессе его роста в составе ростовой установки «Арсенид 1», которое основано на весовом методе измерения веса слитка. С помощью полнофакторного эксперимента опреде-

лены факторы, влияющие на точность измерения веса слитка, и предложены программные и аппаратные решения по повышению точности. Устройство обеспечивает точность контроля не менее  $\pm 1.5$  мм для слитка диаметром до 100 мм, что уменьшает колебания скорости выращивания и как следствие приводит к снижению остаточных напряжений в верхней части слитка порядка на 15%, и в нижней части слитка приблизительно на 10%, плотность дислокаций снижается в верхней части слитка на 10%, и в нижней части на 5%

9. Разработана и внедрена технология отжига слитков GaAs. На основе анализа значения теплового напряжения для различных режимов отжига, определены режимы отжига, значение которых составляет: – нагрев с температурным градиентом  $100$  °C/час до температуры  $920$  °C, выдержка при температуре  $920$  °C в течении 5 часов, охлаждение с температурным градиентом  $100$  °C/час. Установлено, что повышение температурного градиента  $dT / dt$  приводит к более высокому уровню остаточных напряжений. Влияние температуры не оказывает такого значения как градиент. Использование технологии отжига позволило снизить уровень остаточных напряжений до 40 МПа на краях подложки.

10. Разработана технология шлифовки подложек GaAs. Определены ограничения на режим шлифования с учетом минимизации глубины нарушенного слоя. Разработано и внедрено устройство шлифования подложек арсенида галлия «САШ-АМ». Технология обеспечивает режимы шлифования с уменьшением глубины нарушенного слоя до 10 мкм.

11. Установлено, что введение в подложку лигатуры с большим ковалентным радиусом улучшает ее деградационную стойкость к влиянию дальнейших технологических обработок. Механизм улучшения деградаци-

онной стойкости плазменно-обработанных подложек GaAs не зависит от типа легирующей примеси.

12. Разработанные математические модели, методы, методики и устройства реализующие технологию изготовления подложек GaAs для изделий микроэлектроники, обеспечили повышение качества подложек GaAs, что заключается в частности, в уменьшенном уровне остаточных напряжений на 10 %; уменьшении плотности дислокаций в подложках на 12 %; уменьшении отклонения от плоскостности подложек не менее чем на 20 %; по сравнению с существующей технологией. Предложенная технология позволяет увеличить процент выхода годных приборов на 5 – 7 %. Внедрение разработанной технологии на предприятии ЧП «Галар» (г. Светловодск), позволило получить суммарный экономический эффект 200 тыс. грн. в год.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. K.Salazar, Marcia K. McNutt. Mineral commodity summaries 2012 // U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. – 2012 – p. 58 – 60.
2. Y. Fujisaki. Nonstoichiometry fluctuations along striations in undoped semi-insulating GaAs // J. Cryst. Growth. – 1993 – v. 126. – P. 77– 84.
3. D. Korytar. Point-like and extended defects in Si and GaAs // J. Cryst. Growth. – 1993 – v. 126. – P. 30 – 40.
4. G. Dlubek, A. Dlubek, R. Krause, O. Brümmer. Point defects in GaAs studied by correlated positron lifetime, optical, and electrical measurements. II. Point defects in GaAs irradiated with fast neutrons // J. Physica Status Solidi (a). – 1988 – v. 107. P. 111 – 121.
5. Q.-Y.Tong, U. Gosele , "Semiconductor wafer bonding: recent developments"// Materials Chemistry and Physics. – 1994 – v. 37, p. 101-27.
6. Наумов А. В. Обзор мирового рынка арсенида галлия. // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 6. С. 53 – 57.
7. Zinnes A. E. Automatic diameter control of Czochralski grown crystals./ A. E. Zinnes, B. E. Nevis C. D. Brandle.// Journal of Crystal Growth. – 1973. – Vol. 19, Issue 3. P. 187-192.
8. G.O. Meduoye, D.J. Bacon, K.E. Evans Computer modelling of temperature and stress distributions in LEC-grown GaAs crystals // Journal. of Crystal Growth. – 1991. – v 108. – С. 627-636.
9. K. Fujiwara, Y. Nishikawa, Y. Tokuda, T. Nakayama. Effects of substrate preparation conditions on GaAs oval defects grown by molecular beam epitaxy // J. Appl. Phys. Lett. – 1986. – v 48. – P. 701 - 704.
10. Pommier S. Plane strain crack closure and cyclic hardening / S.Pommier // Engineering Fracture Mechanics, volume 69, issue 1, January 2002, P. 25–44.
11. Aifantis E.S. On the Microstructural Origin of Certain Inelastic Models / E.S. Aifantis // J. Eng. Mater. Technol, volume 106, Issue 4, October 1984, p. 326.

12. Estrin Y. Dislocation based gradient plasticity model/ Y. Estrin, B. Sluys // *International Journal of Plasticity*, volume 22, issue 9, September 2006, P. 1784–1797.

13. Zuev L.B. Plastic deformation modelled as a self-excited wave process at the meso- and macro-level/ L.B. Zuev, V.I. Danilov // *Theor. Appl. Fract. Mech.* 30, 1998, p. 175.

14. H. Welker. Patent DE970420: Einrichtung zum Vergasen von flüssigen bzw. flüssigkeits-ähnlichen Brennstoffen. Angemeldet am 10. März 1951.

15. Miller W., Schröder W. Numerical modeling of the IKZ: an overview and outlook // *J. Crystal Growth* – 2001 – v. 230 – P. 1-9.

16. Thomas R.N., Hobgood H.M., Eldridge G.W. et al. High-purity LEG growth and direct implantation of GaAs for monolithic microwave circuits // *Semiconductors and Semimetals.* – 1984. – v. 23. – P. 1-87.

17. A. Seidl, et al., 200 mm GaAs Crystal Growth by the Temperature Gradient Controlled LEC Method, ACCG 12, August 13 - 18, 2000, Vail, Colorado, USA.

18. T. Flade, et al., State of the Art 6" SI GaAs Wafers Made of Conventionally Grown LEC Crystals, // *J. Cryst. Growth* – 1999 v. 188/189, P. 336 - 340.

19. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в кристаллах полупроводников. – М.: Металлургия. – 1984. – 256 с.

20. Большева Ю.Н., Кормилицын Д. В., Марков А. В. и др. Фоновые примеси в монокристаллах нелегированного арсенида галлия // *Высококачественные вещества.* — 1988. — №1. - С. 209-212.

21. Марков А. В., Большева Ю. Н., Освенский В. Б. Некоторые аспекты получения монокристаллов полуизолирующего арсенида галлия высокой чистоты. 1. Установление критериев необходимой очистки материала.

// Там же. 1993. № 1. С. 86-89.

22. D. T. J. Hurle, B. Cockayne. Handbook of crystal growth. Vol. 2: Bulk crystal growth. a: Basic techniques; b: Growth mechanisms and dynamics. // Acta Crystallographica Section A. — 1997 — Volume 53, Part 3.
23. Mihailova Ts. Structural defects in gallium arsenide // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 7, No. 1, February 2005, p. 521 – 524.
24. L. Pekarek. Apparatus for synthesis of gallium arsenide under liquid encapsulant.// Czechoslovak Journal of Physics B. — 1970, v. 20, Is. 7, p 857–858.
25. Г. П. Ковтун, А. П. Щербань. Ростовое оборудование для производства полуизолирующего GaAs методом Чохральского // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 6. С. 3 – 6.
26. Лайнер Б.Д., Мильвидский М.Г., Раков В.В. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1969. – Т. 5. – С. 1879-1885.
27. Morgan D.V. Heat cycling of un-passivated GaAs surfaces [Текст] / D.V. Morgan, D.R. Wood // Physica Status Solidi (a). – 1974. – V. 23. – P. 325-330.
28. Seeger A. Radial Damage and Defects Semicond [Текст] / A. Seeger, W.F. Frank // Bristol: The Inst. of Physics. – 1972. – P. 262-268.
29. Frank W. New liquid crystal method for revealing ferroelectric domains [Текст]/Frank W., Gösele U. // J. Appl. Phys. – 1980. – V. 23. – P. 303-309
30. Говорков А.В. Роль взаимодействия дислокация - точечный дефект - легирующая примесь в процессах рекомбинации в арсениде галлия/ Говорков А.В., Колесник Л.И. // ФТП. – 1978. – Т. 12. – С. 448-452.
31. Tabache M.G. Measurements of the critical resolved shear stress for indium-doped and undoped GaAs single crystals [Текст] / M.G. Tabache, E.D. Bourett // Applied Physics Letters. – 1986. – Vol.49. – P. 289-292.

32. K. Riedling. Autonomous liquid encapsulated czochralski (lec) growth of single crystal gaas by "intelligent" digital control. // J. of Crystal Growth. – 1988. – v. 89 – P. 435-446
33. D.Tj. Hurle. Control of diameter in czochralski and related crystal growth techniques // J. of Crystal Growth. – 1977. – v. 42 – P.473-482
34. M.A.Gevelber. Dynamics and control of the czochralski process II. Objectives and control structure design. / M.A.Gevelber, G. Stephanopoulos, M. J. Wargo// J. of Crystal Growth. – 1988. – v. 91 – P. 199-217
35. Баранов Ю.Л. Автоматизация производства полупроводниковых приборов/ Баранов Ю.Л., Круглов И.И.// Обзоры по ЭТ. (Сер. 2. Полупроводниковые приборы) – 1990. – Вып. 4 – с. 1556.
36. Burkman D. Optimizing the cleaning procedure for silicon wafers prior to high temperature operations // Semiconductor International. – 1981. – м. 14. № 14. Jul. – P. 104 – 116.
37. I.Bansal, Particle contamination during chemical cleaning and photoresist stripping of silicon wafer // MICRO. 1984. V. 2. №. 8. P. 35 – 40.
38. Суворов А.Л., Чаплыгин Ю.А., Тимошенко С.П., Графутин В.И., Залужный А.Г., Калугин В.В., Дьячков С.А., Прокопьев Е.П., Реутов В.Ф., Шарков Б.Ю. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологий производства структур КНИ // Препринт ИТЭФ 27–00. 2000. 51 с.
39. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 206 с..
40. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. – М.: Машиностроение. – 180 с.
41. Фукс М.Я., Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовской обработки. – К.: Выща школа.-, 1979. – 88 с
42. Iason H. Selection of Diamond. Greeding-Weels: Surface-Finishing and Diamond-Turning. – Ancraft Production. – 1963. – 25. – N3.

43. Чистяков Д.Ю., Пайнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. – М.: Металлургия, 1979. – 408 с
44. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. К расчету сил резания при шлифовании. // Изв. вузов. – Машиностроение. – 1979. – № 9. – с. 52-58.
45. Митрофанов В.В., Колпанова Л.И. Влияние качества поверхности при механической обработке на величину деформации пластин и структур. Электронное приборостроение / В.В. Митрофанов, Л.И. Колпанова. – М.: Энергия. – 1967. – 85 с.
46. Мильвидский М.Г. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников / М.Г. Мильвидский, В. Б. Освенский. – М.: Металлургия. – 1984. – 256 с.
47. Potts. H. Annealing and Arsenic Overpressure Experiments on Defects in Gallium Arsenide/ H. R. Potts, G. L. Pearson // J. Appl. Phys. – 1966. – v. 37. – p. 2099– 2105.
48. Seebauer E. G. Oxidation and annealing of GaAs (100) studied by photoreflectance/ E. G. Seebauer // J. Appl. Phys. – 1991. – v. 69. – p. 943– 948
49. Goldstein B. Diffusion in Compound Semiconductors/ B. Goldstein// Phys. Rev. – 1961. – v. 121. – p.1305 – 1311.
50. Nishizawa J. Nonstoichiometry of Te-Doped GaAs / J. Nishizawa, H. Otsuka, S. Yamakoshi, K. Ishida. // Jap. J. Appl. Phys. . – 1974. – v. 13. – p.46 – 52
51. S. Y. Chiang. Properties of vacancy defects in GaAs single crystals / S. Y. Chiang, G. L. Pearson // J. Appl. Phys. – 1975. – v. 46, p. 2986 – 2992.
52. Fitouri H. Surface analysis of different oriented GaAs substrates annealed under bismuth flow/ H. Fitouri, I. Moussa, A. Rebey, B. El Jani // J. Crystal Growth. – 2007. – v. 300. – P. 347– 352.
53. Caruso R. The Effect of Heat-Treatment on Photoluminescence Efficiency and Minority Carrier Lifetime in LEC - GaP(Zn, O) / R. Caruso, A. R. Von Neida // J. Electrochem. Soc. – 1974. – v. 121. – P. 1332 – 1337.

54. Музыкант А.Ф. Влияние неплоскостности подложек на выход годных ИС после фотолитографии / А.Ф. Музыкант, В.С. Сотников // Электр. Промышленность. – 1986. - Вып. 8. - С. 66-68.

55. Yamagishi S. Anticlastic Bending of Silicon wafers induced during thermal cycling / S. Yamagishi // Jap. J. Appl. Phys. – 1973. - Vol.12, №11. - P. 1748-1752.

56. Gallagher P.J. High temperature deformation of gallium arsenide/ P.J. Gallagher, F. Weinberg. // J. Crystal Growth. – 1989. – v. 94. – P. 299– 310.

57. Yonenaga I. Dislocation dynamics in the plastic deformation of silicon crystals I. Experiments / I. Yonenaga, K. Sumino // Phys. Status Solidi. A . – 1978. – vol 50. – p685 – 693.

58. Тимошенко С.П., Гере Дж. Сопротивление материалов. / С.П. Тимошенко, Дж. Гере – М.: Мир. – 1976. – с. 669.

59. Doig P. Non-destructive stress measurement using x-ray diffraction methods./ P. Doig, P.E.J. Flewitt // NDT International. – 1978. – v. 11(3) . – P. 127–131.

60. Shin S. Evaluation of error of x-ray residual stress measurement method. / S. Shin, H. Yano. // In Japan Soc. Instrum. & Control Eng, Tokyo, editor, Recent Advances in Weighing Technology and Force Measurement. 10th International Conference of the IMEKO Technical Committee TC-3 on Measurement of Force and Mass, Kobe, Japan. – 1984.

61. Munsif A. S. M. Y. A method for determining x-ray elastic constants for the measurement of residual stress. / A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker //Strain. – 2003. – v. 39(1) . – P. 3–10.

62. Kim K. Y. The theory of thermodynamic-acoustoelastic stress gauge./ K. Y. Kim and W. Sachse //J. Appl. Phys. – 1996. – v. 80. – P. 4934–4943.

63. Dorfi H. R. Acoustoelasticity: Ultrasonic stress field reconstruction./ H. R. Dorfi. H. R. Bushy, M. Janssen. // Experimental Mechanics. – 1990 . – v. 36

. – P. 320 – 332.

64. Schneider E. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods / E. Schneider . – 1997. – edited by V. Hauk (Elsevier, Amsterdam,), Chap. 4, pp. 522-563.
65. Lederhandler. S. R. Infrared Studies of Birefringence in Silicon / S. R. Lederhandler// J. Appl. Phys. – 1959. – v. 30. – P. 1631–1639.
66. Дюрелли А. Введение в фотомеханику: Пер. с англ./ А. Дюрелли, У. Райли. – М.: Мир. –1970. – 484 с.
67. Хесина Г. Л. Метод фотоупругости. Т. 1 – 3/ Г. Л. Хесина. М.: Стройиздат. – 1975.
68. Yamada M. Quantitative photoelastic measurement of residual strains in undoped semi insulating gallium arsenide/ M. Yamada// J. Appl. Phys. – 1985. – v. 47. – P. 365–369.
69. Оксанич А.П. Промышленные методы и устройства исследования напряженно-деформированного состояния полупроводниковых материалов: Монография. / А.П. Оксанич – Харьков: НТК "Институт монокристаллов". – 2001. – 210 с.
70. Dadgar A. Anisotropic bow and plastic deformation of GaN on silicon / A. Dadgar, S. Fritze, O. Schulz, J. Hennig, J. Bläsing, H. Witte, A. Diez, U. Heinle, M. Kunze, I. Daumiller, K. Haberland, A. Krost // J. Crystal Growth. – 2013. – v. 370. – P. 278– 281.
71. Устройство для контроля геометрических параметров полупроводниковых пластин: А.с. 1106983 СССР, G 01 В 7/28. / А.П. Оксанич, А.Л. Анистратенко, В.К. Кирилук, В.К. Ергаков (СССР). - № 3504194/18-28; Заявлено 13.09.82; Опубл. 07.08.84, Бюл. № 29.
72. Устройство для контроля геометрических параметров полупроводниковых пластин: А.с. 1048305 СССР, G 01 В 7/28. / А.П. Оксанич, А.Л. Анистратенко, В.К. Кирилук, С.А.Спектор (СССР). - № 3447075/18-28; Заявлено 01.06.82; Опубл. 15.10.83, Бюл. № 38.
73. Установка контроля геометрических параметров полупроводниковых пластин: Свидетельство на промышленный образец № 19574 СССР.

/ А.П.Оксанич, А.Л.Анистратенко, Б.И.Мовшиц (СССР). - Заявка № 35004, Заявлено 19.03.85; Зарегистр. 23.12.85.

74. Dash W. C. Copper precipitation on dislocations in silicon./ W.C.Dash // J. Appl. Phys. – 1956. – v. 27. – P. 1193–1195.

75. Mahajan S. Growth- and processing-induced defects in semiconductors/ S. Mahajan // Prog. Mater. Sci. – 1989. – v. 33. – 1–76.

76. Nye J. F. Physical Properties of Crystals/ J. F. Nye. – Clarendon Press, Oxford. – P. 329

77. S. Adachi. GaAs and Related Materials: Bulk Semiconducting and Superlattice Properties/ World Scientific. – 1994. – pp. 675

78. W. A. Brantley. Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices/ Brantley W. A. // J. Appl. Phys. – 1973. – vol. 44. – P. 534 – 536

79. S. Adachi. GaAs and Related Materials: Bulk Semiconducting and Superlattice Properties. / Adachi S.– World Scientific Publishing Company. – 1994. – 675 p.

80. M. E. Levinstein. Handbook series on semiconductor parameters. 1. Si, Ge, C (diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb/ Levinstein M. E., Rumyantsev S. L., Shur M.– World Scientific Publishing Company. – 1996. – 218 p.

81. T. B. Bateman. Elastic module of single-crystal Gallium Arsenide/ Bateman T. B., McSkimin H. J., Whelan J. M. // J. Appl. Phys. – 1979. – vol. 30. – P. 444 – 445

82. L. Louail. Calculation of elastic constants of 4d transition metals./ Louail L. Maouche D. Roumili A. Ali Shraoui F. // Materials Letters. – 2004. – vol. 58. – p. 2975-2978.

83. T. Litaka First-principles calculation of elastic properties of solid argon at high pressures./ Litaka T., Ebisuzaki T. // Phys. Rev. B. – 2001. – vol. 65. – p. 012103 – 012109.

84. O. Gulseren High Pressure Thermoelasticity of Body-centered Cubic Tantalum/ Gulseren O., Cohen R.E. // *Phys. Rev. B.* – 2001. –vol. 65. – p. 064103 – 064111.
85. R. Khenata. Full potential linearized augmented plane wave calculations of structural and electronic properties of GeC, SnC and GeSn / Khenata R., Baltache H., Sahnoun M., Driz M., Rerat M., Abbar B. // *Physica B: Physics of Condensed Matter.* – 2003. – vol. 336. – p. 321-328.
86. G. Lucazeau. Micro-Raman analysis of residual stresses and phase transformation in crystalline silicon under microindentation/ G. Lucazeau, L. Abello//*J. Mater. Res.* – 1997. – vol. 9. – p. 2262 – 2273.
87. Wang J. Mechanical instabilities of homogeneous crystals/ J. Wang. S. Yip. S.R. Phillpot, D. Wolf // *Phys. Rev. B.* – 1995. – vol.52. – p. 12627 – 12635.
88. Karki B.B. Elastic instabilities in crystals from ab initio stress - strain relations/ B.B. Karki, G.J. Ackland, J. Crain // *J. Phys. Condens. Matter.* – 1997. – vol. 9. – p. 8579 –8589.
89. Wallace D.C. Thermodynamics of crystals / D.C. Wallace. – Wiley, New York. – 1972. – 484 p.
90. Beardsley R. P. Coherent Terahertz Sound Amplification and Spectral Line Narrowing in a Stark Ladder Superlattice / R. P. Beardsley, A. V. Akimov, M. Henini, A. J. Kent // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – vol.104. – p. 085501 – 085505.
91. Luo Fen. Ab initio calculation of lattice dynamics and thermodynamic properties of beryllium / Fen Luo, Ling-Cang Cai, Xiang-Rong Chen, Fu-Qian Jing, and Dario Alfe. // *J. of Applied Physics.* – 2012. – vol. 11. – p. 053503-1 – 053503-10.
92. Rignanese G.-M. Ab initio study of the volume dependence of dynamical and thermodynamical properties of silicon/ G.-M. Rignanese, J.-P. Michenaud, X. Gonze // *J. Phys. Rev. B.* – 1996. – vol. 53. – p. 4488–4497

93. Wang J. Size and temperature dependence of Young's modulus of a silicon nano-plate/ J. Wang, Q. Huang and H. Yu // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – vol. 41. – p. 165406 – 165411.
94. Ram R. K. Phonon Dispersion Relations for GaAs and InSb / R. K. Ram S. S. Kushwaha// J. of the Phys. Soc. of Japan. – 1985. – vol. 54. – p. 617-624
95. Waugh J. L. T. Crystal Dynamics of Gallium Arsenide/ J. L. T. Waugh and G. Dolling // J. Phys. Rev. – 1963. – vol. 132. – p. 2410–2412
96. Blakemore J.S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide/ J.S. Blakemore // J. of Appl. Phys. – 1982. – vol. 53. – p. R123 - R181.
97. Jordan A. S. A comparative study of thermal stress induced dislocation generation in pulled GaAs, InP, and Si crystals/ A. S. Jordan, R. Caruso, A. R. VonNeida, J. W. Nielsen // J. Appl. Phys. – 1981 – v. 52. – P. 3331 - 3337.
98. Lambropoulos J. C. The effect of interface shape on thermal stress during Czochralski crystal growth/ J. C. Lambropoulos and C. N. Delametter // J. Cryst. Growth. – 1988 – v. 92. – P. 390 - 396.
99. Matsumura T. Low indium-doped LEC GaAs crystal growth employing thermal stress analysis/T. Matsumura, F. Sato, A. Shimura, T. Kitano, J. Matsui// J. Cryst. Growth. – 1986 – v. 78. – P. 533 - 537.
100. Rosch W. Computed stress fields in GaAs during vertical Bridgman growth/ W. Rosch, F. Carlson // J. Cryst. Growth. – 1991 – v. 109. – P. 75 - 81.
101. Оксанич А.П. Влияние тепловых условий на термоупругие напряжения в слитках ПИН GAAS, выращиваемых по LEC технологии. / А.П. Оксанич, I.B. Шевченко, В.А.Тербан // Прикладная радиоэлектроника. – 2011 –том 10. – №1. – С. 101-105.
102. Duseaux M. Formation of dislocations during liquid encapsulated Czochralski growth of GaAs single crystals/ M. Duseaux, G. Jacob // J. Appl. Phys. – 1982 – v. 40. – P. 790 - 794

103. Alexander H. Dislocations and Plastic Flow in the Diamond Structure./ H. Alexander, P. Haasen// J. Cryst. Growth. – 1991 – v. 109. – P. 75 - 81.
104. Tsai C.T. On the finite element modeling of dislocation dynamics during semiconductor crystal growth/ C.T. Tsai // J. Cryst. Growth. – 1991 – v. 113. – P. 499 - 507.
105. Jordan A. S. A Thermoelastic Analysis of Dislocation Generation in Pulled GaAs Crystals. / A. S. Jordan, R. Caruso, A. R. Von Neida //Bell system technical Journal. – 1980 – v. 59. – P. 593–637.
106. Мильвидский М.Г. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. / М.Г. Мильвидский, В.Б.Освенский. – М.: Металлургия. – 1984. – 256 с.
107. Барбашов В.И. Анизотропия подвижности  $60^\circ$   $\beta$ -дислокаций в кристаллах GaAs./ В.И. Барбашов// Физика твердого тела. – 1992 – №. 8. – С. 2671 - 2673.
108. Motakef S. A high temperature creep model for GaAs. // J. Cryst. Growth. – 1991 – v. 108. – P. 33 - 36.
109. Оксанич А.П. Численно-аналитическое решение задачи теплообмена с поверхности слитка в процессе выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского с жидкостной герметизацией / А.П. Оксанич, П.О. Хозя, И.В. Шевченко // Новые технологии. Научный вестник Кременчугского университета экономики, информационных технологий и управления. - 2008. - №4(22). - С. 10-17.
110. Choi S.K. Dislocation velocities in GaAs./ S.K. Choi, M. Mihara and T. Ninomiya // Jap. J. Appl. Phys. – 1977 – v. 16(5). – P. 737-745.
111. Weertman J. Dislocation based fracture mechanics./ J. Weertman – World Scientific. – P. 1996. – 524.
112. Suezawa M. Dislocation dynamics in the plastic deformation of silicon crystals 2- theoretical analysis of experimental results/ M. Suezawa, K. Sumino, and I. Yonenaga // Physica Solidi A. – 1979 – v. 51. – P. 21–22.

113. Оксанич А.П. Влияние тепловых условий на термоупругие напряжения в слитках ПИН GaAs, выращиваемых по ЛЕС технологии./ А.П. Оксанич, И.В. Шевченко, В.А. Тербан // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – т. 10, №1. – С. 101-105.

114. Tsai C. T. The constitutive equation for silicon and its use in crystal growth modeling./ C. T. Tsai, O. W. Dillon, R. J. De Angelis // J. Eng. Mater. Technol. – 1990 – v. 112. – P. 183 - 188.

115. Древесина. Метод определения остаточных напряжений ГОСТ 11603-73 – [Действителен от 01.01.1975]. М. Межгосударственный стандарт.– Издательство стандартов.– 1998.– 11с.

116. Колеса железнодорожного подвижного состава. Методы определения остаточных напряжений ГОСТ Р 54093-2010 – [Действителен от 01.07.19752011]. М. Национальный стандарт Российской федерации стандарт.– Издательство стандартов.– 2011.– 20 с.

117. Yamada M. Quantitative photoelastic measurement of residual strains in undoped semi-insulating gallium arsenide/ M.Yamada //Appl. Phys.– 1985.– Lett. 47. – P. 365–367.

118. Притчин С.Э. Автоматизированная система определения внутренних напряжений в пластинах полупроводников. / С.Э. Притчин, С.В. Ткаченко, А.С. Сиора, И.А. Деревянко // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського.– 2007.– Випуск 6, Частина 1.– С. 33-35

119. Born M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf.– Oxford: Pergamon. – 1970. – 718 p.

120. Lesniak J.R. An innovative polariscope for photoelastic stress analysis / J.R. Lesniak, M.J.Zickel, C.S. Welch, D.F. Johnson // SEM Spring Conference on Experiments Mechanics. – 1997. – P. 298-301.

121. Lu J. Handbook of measurement of residual stresses/ Jian Lu. – Fairmont Press: Society for Experimental Mechanics (U.S.) . – 1996. – 238 p.

122. Adachi S. Internal strain and photoelastic effects in  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$  and  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$  crystals/ S. Adachi , K. Oe // J. Appl. Phys. – 1983 – v54, – p. 6620 – 6628.

123. Patterson E. A. On image analysis for birefringence measurements in photoelasticity / E. A. Patterson, W. Ji, Z. F. Wang // Optics and Lasers in Engineering. – 1997. – v.28. – P. 17 – 36.

124. Patterson E. A. Simulation of errors in automated photoelasticity / W. Ji, E. A. Patterson // Experimental Mechanics. – 1998. – v.38. – P. 132 – 139.

125. Theocaris P. S. Matrix theory of photoelasticity/ P. S. Theocaris. – Springer-Verlag, New York. –1979. – P. 352

126. Кремний монокристаллический в слитках. Технические условия : ГОСТ 19658-81 [Действителен от 01.01.83].– ИПК Издательство стандартов, 2001. – с.61

127. Standard Guide for Identification of Structures and Contaminants Seen on Specular Silicon Surfaces. ASTM Designation: F 154 – 00. – Barr Harbor Drive, West Conshohockerv, 2000.– p. 13

128. Richards J. L. Etch Pits in Gallium Arsenide. J. L. Richards, A. J. Crocker // J. Appl. Phys. – 1960. – v. 31. – P. 611;

129. Grabmaier J.G. Dislocation etch pits in single crystal GaAs./ J.G. Grabmaier, C.B. Watson// Phus. Status Solidi. – 1969. – v. 32, . – P. K13–K15

130. Кулиш У.М. Травители для арсенида галлия на основе карбоновых кислот./ У.М. Кулиш.– Арсенид Галлия, сборник статей, Томск, изд, ТГУ . – 1968. – с.450.

131. Притчин С. Э. Усовершенствование технологии подготовки подложек арсенида галлия / С. Э. Притчин, В. И. Орел, В. А. Тербан, Н. В. Рылова //Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Випуск 3. – С. 25 – 30.

132. Установка контроля геометрических параметров полупроводниковых пластин: Свидетельство на промышленный образец № 19574 СССР.

/ А.П.Оксанич, А.Л.Анистратенко, Б.И.Мовшиц (СССР). - Заявка № 35004, Заявлено 19.03.85; Зарегистр. 23.12.85.

133. Ramesh K. Phase-shifting methodologies in photoelastic analysis—the application of Jones calculus/ K. Ramesh, V. Ganapathy, // J. Strain Anal. – 1996. – v.31. – p. 423–432.

134. Ramesh K. Data acquisition techniques in digital photoelasticity/K. Ramesh and S. K. Mangal//Opt. Lasers Eng. – 1998. – v.30. – p. 53–75.

135. Herms M. Residual strain in annealed GaAs single-crystal wafers as determined by scanning infrared polariscopy, X-ray diffraction and topography/ M. Herms, M. Fukuzawa, V. G. Melov, J. Schreiber, P. Môck, M. Yamada // J. Cryst. Growth. – 2000. – v. 210. – p. 172 – 176.

136. Fukuzawa M. Photoelastic characterization of Si wafers by scanning infrared polariscope/ M. Fukuzawa M. Yamada // J. Cryst. Growth. – 2001. – v. 229. – p. 22 – 25.

137. Yuzhong Wang. Measurement of residual stress in silicon induced by the fabrication of power rectifier using infrared photoelasticity/ Wang Yuzhong, Zhao Shounan, Huang Lan // J. Inf. Millim. Waves. – 1995. – v. 14 (6) . – p. 447 – 451.

138. Dutta S. Study of interface stresses in heterostructures using infrared piezobirefringence/ S. Dutta A. K. Dutta // J. Appl. Phys. – 1996. – v. 80. – p. 6984 – 6990.

139. Притчин С.Э. 3D-визуализация распределения внутренних напряжений в полупроводниковых пластинах / С.Э. Притчин, А.С. Сиора, И.А. Деревянко.// Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2007. – № 3(17) . – С. 13-17.

140. Оксанич А.П. Автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.Е. Краскевич, В.В. Батареев // Складні системи і процеси. – Запоріжжя. – 2006. – № 2. – С. 40-50.

141. Оксанич А.П. Усовершенствование метода измерения остаточных напряжений в подложках арсенид галлия./ А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.А. Тербан // Автоматизированные системы управления и приборы управления. – 2012. – № 161 . – С. 122-128.

142. Хряпов В.Т. Пороговые фотоприемники и матрицы ИК - диапазона. / В.Т. Хряпов, В.П. Пономаренко, В.Г. Буткевич, И.И. Таубкин, В.И. Стафеев, С.А. Попов, В.В.Осипов// Оптический журнал. –1992. – № 12. – С.33-44.

143. Mothenbacher C. Low-noise electronic system design./ C. Mothenbacher, J. Connelly. – New York, John Wiley and Sons, 1993. – p 431.

144. Bielecki Z. Maximisation of signal to noise ratio in infrared radiation receivers/ Z. Bielecki //Opto-Electronics Review. – 2002. – v. 10. – p. 209 – 216.

145. Bielecki Z. High Sensitivity Photoreceiver Design / Z. Bielecki, W. Kotosowski, E. Sedek// Elec. Energ . – 2004. – v. 17. – p. 121 – 131.

146. ОАО "ЦКБ "Ритм" [Электронный ресурс]. – Режим доступа : URL :<http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fotorezPbS.htm>. – Название с экрана

147. Pommier S. Plane strain crack closure and cyclic hardening / S.Pommier // Engineering Fracture Mechanics. –2002. – v. 69. – is. 1. – p. 25 – 44.

148. Aifantis E.S. On the Microstructural Origin of Certain Inelastic Models / E.S. Aifantis // J. Eng. Mater. Technol. – 1984. – v. 106. – is. 4. – p. 326.

149. Estrin Y. Dislocation based gradient plasticity model/ Y. Estrin, B. Sluys // International Journal of Plasticity. – 2006. – v. 22. – is. 9. – p. 1784–1797

150. Zuev L.B. Plastic deformation modelled as a self-excited wave process at the meso- and macro-level/ L.B. Zuev, V.I. Danilov // Theor. Appl. Fract. Mech. – 1998. – v. 30. – p. 175–179.

151. Ogawa H., Tensile testing of microfabricated thin films / H. Ogawa, K. Suzuki, S. Kaneko, Y. Nakano, Y. Ishikawa and T. Kitahara // *Microsystem Technologies*. – 1996. – v. 3. – p. 117–121

152. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. / В. А. Шушкевич. – Минск: Высшая школа, 1975. – 325 с.

153. Tsai Iting. Mechanical properties of intermetallic compounds on lead-free solder by moiré techniques / Iting Tsai, Enboa Wu, S. F. Yen and T. H. Chuang // *Journal of Electronic Materials*, 2006, Volume 35, Number 5, P. 1059–1066

154. Касаткин Б.С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. / Б.С.Касаткин, А.Б.Кудрин и др. – Киев: Наукова думка, 1981. – 228 с.

155. Финк К. Измерение напряжений и деформаций: пер. с нем. / К. Финк, Рорбах Х. – М: Машгиз, 1961. – 374 с.

156. Оксанич А.П. Аппаратура для контроля структурных дефектов и геометрических параметров КСДИ / А.П. Оксанич, В.К. Кирилюк // М.: Электронная промышленность. – 1986. – Вып.8. – С.36–39.

157. Тимошенко С.П. Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. под ред. Шапиро Г.С. – М.: Наука, 1979. – С. 34–53

158. Оксанич А.П. Разработка методик и устройств контроля структурного совершенства кремниевых структур/ А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, Е.А. Седин // *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. – 2012. – Вып.1 – с. 43 – 46.

159. Belyaeva A.L. Hydrogen ion bombardment damage in stainless steel mirrors / A.L.Belyaeva, Bardamid A.F., Davis J.W., Haasz A.A. // *JNM 345* (2005) p. 101-108.

160. Притчин С.Э. Усовершенствование метода и разработка аппаратуры бесконтактного контроля деформации полупроводниковых пластин и структур/ С.Э. Притчин // *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. – 2012. – Вып.2 – с. 35 – 39.

161. Mahajan S. Growth- and processing-induced defects in semiconductors/ S. Mahajan // Prog. Mater. Sci. – 1989. – v. 33. – P. 1 –76.

162. Roedel R. J. The Effect of Dislocations in  $Ga_{1-x}Al_xAs$ :Si Light-Emitting Diodes / R. J. Roedel, A. R. Von Neida, R. Caruso, L. R. Dawson // J. Electrochem. Soc. – 1979. – v. 126(4) . – P. 627 – 633.

163. Dutt B. V. Stacking Faults and Substructure in GaAs/ (Ga, Al) As Heteroepitaxial Layers: I . Origin and Elimination / B. V. Dutt, S. Mahajan, R. J. Roedel, G. P. Schwartz, D. C. Miller, L. Derick // J. Electrochem. Soc. – 1981. – v. 128(7) . – P. 1573 – 1578.

164. Guha S. Role of stacking faults as misfit dislocation sources and nonradiative recombination centers in II-VI heterostructures and devices./ S. Guha, J. M. DePuydt, J. Qiu, G. E. Hofler, M. A. Haase, B. J. Wu, H. Cheng// J. Appl. Phys. Lett. – 1993. –v.63. – P. 3023 – 3026.

165. Мильвидский М.Г. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников./ М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. – М: металлургия, 1984. – 275 с.

166. Pekárek L. Dislocations in GaAs single crystals grown by the Czochralski method. / L. Pekárek // Czechoslovak Journal of Physics B. – 1968. –v. 18. – P. 1172-1176.

167. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М.: Наука. ,1987. – 240 с.

168. Блад П. Методы измерения электрических свойств полупроводников: Пер. с англ. / П.Блад, Дж. В. Ортон. //Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 1. – С. 3—50;

169. Оксанич А.П. Промышленные методы и устройства исследования напряженно-деформированного состояния полупроводниковых материалов./ А.П. Оксанич. – Харьков: Институт монокристаллов, 2001. – 206 с.

170. Оксанич А. П. Усовершенствование метода и аппаратуры измерения плотности дислокаций в подложках кремния и арсенида галлия / А. П. Оксанич, С. Е. Притчин, В. А. Тербан. М. Г. Когдась // Автоматизи-

рованные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вып. 163. – С. 53–60.

171. Притчин С.Э. Автоматизированная система измерения плотности микродефектов в монокристаллическом кремнии и арсениде галлия. / С.В. Ткаченко, С.Э. Притчин, С.А. Сокун // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вып. 6 – с. 31-35.

172. Яшин В.С. Обработка изображений на языке Си для IBM PC/ В.С.Яшин //Алгоритмы и программы. – Мир.– 1994. – 240с.

173. Cullity B.D. Elements of X-ray Diffraction. / B.D. Cullity, Cohen M.//Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading. MA. – 1978. – p. 454.

174. Mullin J. B. The lattice parameter of GaAs and InP with reference to interfaces. / J. B. Mullin, B. W. Straughan, C. M. H. Driscoll//Critical Reviews in Solid State Sciences. –2006. –v. 5. – P. 441-456

175. Jordan A.S. An evaluation of the thermal and elastic constants affecting GaAs crystal growth. / A.S. Jordan // J. Cryst. Growth – 1980 v. 49, P. 631 – 642

176. Zinnes A. E. Automatic diameter control of Czochralski grown crystals./ A. E. Zinnes, B. E. Nevis C. D. Brandle.// Journal of Crystal Growth. – 1973. – Vol. 19, Issue 3. P. 187-192

177. M. Jurisch. The development of LEC technology for GaAs single crystal growth from laboratory scale to mass production / Jurisch M., St. Eichler.// Czochralski-Symposium 03, April 26 – 27, 2003.

178. Оксанич А.П. Определение телевизионным способом диаметра монокристалла кремния на разных стадиях его роста / Оксанич А.П. Притчин С.Э. // Научные труды КГПИ. – 2001. – № 2 (8). – Кременчуг: КГПИ. – С. 376–381

179. Oksanich A.P. Principles of the control system for dislocation-free silicon single crystal growing under maintaining the crystal diameter and melt temperature / A.P. Oksanich, S.E. Pritchichin, N.D. Vdovichenko // Functional materials. - 2001. - Vol. 8, № 2. - P. 377-380.

180. Dijk H. J. Diameter control of LEG grown GaP crystals/ Dijk H. J. A. Yochem C. M. Scholl G. J., Werf // *Journal of Crystal Growth*. 1974. Vol. 21, P. 310—312.
181. Pruet H. D. X-ray imaging technique for observing liquid encapsulation Czochralski crystal growth./ H.D. Pruet, S.I.Lien // *Journal Electrochom.* – 1974. Vol. 121, P. 822—826.
182. Johansen T.H. Analysis of the crystal weighing method applied to liquid encapsulated Czochralski growth. // *Journal of Crystal Growth*. – 1987. v.84. C. 609-620.
183. V.A. Antonov. Analysis of crystal-meniscus system behaviour under Czochralski crystal growth. // *J.Crystal Growth*. – 2001. – v.226. – P. 555-561
184. С.Г. Радченко Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении.// ЗАО «Укрспецмонтажпроект» – Киев. – 1998. – 274 с.
185. Сиргиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов // Питер. – 2006, - 750с
186. Taylor P. J. Optoelectronic device performance on reduced threading dislocation density GaAs/Si / P. J. Taylor, W. A. Jesser, J. D. Benson // *J. Appl. Phys.* – 2001 – v. 89. – P. 111 – 122
187. Volkl J. A new model for the calculation of dislocation formation in semiconductor melt growth by taking into account the dynamics of plastic deformation/ J. Volkl, G. Muller // *J. of Crystal Growth*. – 1989. – v 97. – C. 136 – 145.
188. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И.Безухов. – М.: Высшая школа. – 1961. – 532 с.
189. I. Yonenaga, K. Sumino. Dislocation Dynamics in GaAs Crystal Grown from Melt // *J. Appl. Phys.* – 1978 – v. 50 – P. 685 – 693.
190. Оксанич А.П. Моделирование процессов образования дислокаций под действием термических напряжений в слитках GaAs, выращиваемых из расплава методом Чохральского с жидкостной герметизацией /

А.П. Оксанич, Л.Г. Шепель, В.В. Батареев // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4 – № 2. – С. 185 – 194.

191. Suezawa M. Dislocation dynamics in the plastic deformation of silicon crystals. II. Theoretical analysis of experimental results/ M. Suezawa, K. Sumino, I. Yonenaga // J. Phys. Status Solidi (a) – 1979 – v. 51, P. 217 –226

192. I. Yonenaga, K. Sumino. Dislocation Dynamics in GaAs Crystal Grown from Melt // J. Appl. Phys. – 1978 – v. 50 – P. 685 – 693.

193. C.T. Tsai. Prediction of dislocation generation during Bridgman growth of GaAs crystals // J. Crystal Growth. – 1992 – v. 125. – P. 69 –80.

194. D. Maroudas, R.A. Brown. On the prediction of dislocation formation in semiconductor crystals grown from the melt: analysis of the Haasen model for plastic deformation dynamics // J. Crystal Growth. – 1991 – v. 108. – P. 399 – 415.

195. Оксанич А.П., Хозя П.А., Притчин С.Е. Розробка процедури визначення температурних полів і термопластичних напруг в злитках GaAs, вирощених LEC // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2008. - №1(19). – С. 4-10.

196. J. Ruzylo. Second look at role of dry water cleaning technology// in Proc. Svmp. Contam. Free Manuf. SEMICON. / San Francisco. USA. – 1998. – pp. L1-L6.

197. K. Fujiwara. Effects of substrate preparation conditions on GaAs oval defects grown by molecular beam epitaxy/ Fujiwara K., Nishikawa Y., Tokuda Y., Nakayama T.// J. Appl. Phys. Lett. – 1986. – v 48. – P. 701 – 704.

198. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических и сверхтвердых материалов. – Х.: Вища школа. – 1980. – 190 с.

199. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия. – 1970. – 376 с

200. C. Lee. Highly Reliable Die Attachment on Polished GaAs Surfaces Using Gold-Tin Eutectic Alloy/ C. Lee, G. S. Matijasevic, // IEEE Trans. Comp., Hybrids, and Manuf. Technol. – 1989. – v 12. – P. 406

201. Г.В. Шуваев. Применение алмазных инструментов для обработки полупроводниковых материалов. / Шуваев Г.В.// Электронная техника. – Сер. 2. – Вып. 3. – 1978. – с. 103-106.

202. А.П. Оксанич. Разработка автоматизированного устройства с программным управлением для шлифовки кремниевых структур с диэлектрической изоляцией/ Оксанич А.П., Притчин С.Э., Ткаченко М.А. // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков. – 2004. – Т. 3. – № 3. – с. 79-83.

203. А.П. Оксанич. Математическое моделирование механической обработки кремниевых структур на станке алмазной шлифовки САШ-420М / Оксанич А.П., Притчин С.Э., Ткаченко М.А. // Науковий вісник ІЕНТУ „Нові технології”. – 2004. – № 1-2(4-5). – с. 121-124.

204. Н. Hendriks. Back-side Processing of GaAs Wafers/ Hendriks H., Patel V., Crites J. // CS-MAX Compound Semiconductor. – 2010. – P. 1 – 7.

205. Моряков О.С. Устройство и наладка оборудования полупроводникового производства / О.С. Моряков.– М.: Высшая школа.– 1984.–186 с.

206. Маслов Е.Н. Высокопроизводительное шлифование/ Е.Н. Маслов. – М.: Наука. – 1964. –143 с.

207. А.П. Оксанич. Формирование математической модели определения кинематических параметров шлифования кремниевых структур с диэлектрической изоляцией. / Оксанич А.П., Притчин С.Э., Ткаченко М.А.// Фізика і технологія тонких плівок. – Матеріали Ювілейної Х Міжнародної конференції. – Т. 2. – Івано-Франківськ. – 2005. – с. 193-194.

208. Клюй Н.И. Повышение деградационной стойкости кристаллов полуизолирующего арсенида галлия плазменными обработками / Н.И. Клюй, А.И. Липтуга, В.Б. Лозинский, А.П.Оксанич, В.А.Тербан, Ф.В. Фомовский // Письма в ЖТФ. – 2012.– том 38. – вып. 22. – С.28–34.

209. Клюй Н.И. Влияние плазменных и ВЧ-обработок на оптические свойства полуизолирующего GaAs в ИК-области спектра / Н.И.Клюй, А.И. Липтуга, В.Б. Лозинский, А.П. Оксанич, В.А. Тербан, Ф.В. Фомовський // Технічна електродинаміка.- 2012. – тематичний випуск, частина 1. - С. 199-203.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Оксанич А.П. Разработка автоматизированного устройства с программным управлением для шлифовки кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / А.П. Оксанич, С.Е. Притчин, М.М. Ткаченко // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – т.3. – №3. – С. 79-83.
2. Оксанич А.П. Математическое моделирование механической обработки кремниевых структур на станке алмазной шлифовке САШ 420 / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, М.А. Ткаченко // Науковий вісник ІЕНТ. Нові технології. – 2004. – № 1-2 (4-5). – С. 121-124.
3. Притчин С.Е. Система идентификации микродефектов слитков кремния телевизионным методом / С.Е. Притчин, В.О. Полтавец // Нові технології. Науковий вісник ІЕНТ. – 2005. – №3 (9) . – С. 39-39.
4. Оксанич А.П. Автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.Е., Краскевич В.В. Батареев // Складні системи і процеси.– 2006. – № 2. – С. 40-50.
5. Притчин С.Э. Автоматизированная система определения внутренних напряжений в пластинах полупроводников / Притчин С.Э., Ткаченко С.В., Сиора А.С., Дерев'янку І.А. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського .– 2007.– Випуск 6 (47). Частина 1.– С. 33-35.
6. Притчин С.Е. 3D візуалізація розподілу внутрішніх напруг в напівпровідникових пластинах/ С.Е. Притчин, О.С. Сіора, І.О. Дерев'янку // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2007. – № 3(17) . – С. 13-17.
7. Оксанич А.П. Розробка процедури визначення температурних полів і термопластичних напруг в зливках GaAs, вирощених LEC / А.П. Оксанич, П.О. Хозя, С.Е. Притчин // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2008. – № 1(19). –С. 4-10.
8. Ткаченко С.В. Автоматизированная система измерения плотности микродефектов в монокристаллическом кремнии и арсениде галлия / С.В.

Ткаченко, С.Э. Притчин, С.А. Сокун // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського . – 2009. – Випуск 6(59). Частина 1. – С. 31-35.

9. Оксанич, А.П. Метод і пристрій вимірювання потужності графітового нагрівача ростової установки. / А.П.Оксанич, С.О. Волохов, В.А. Тербан //Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2009. - № 4(26). – С. 3-10.

10. Загірняк М.В. Разработка математической модели и прогнозного регулятора для процесса выращивания монокристаллов полуизолирующего арсенида галлия / М.В. Загірняк, А.П. Оксанич, В.Р. Петренко, В.А. Тербан, С.Э.Притчин //Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2011. – Вип. 155. – С. 33-42.

11. Притчин С.Э. Усовершенствование метода и разработка аппаратуры бесконтактного контроля деформации полупроводниковых пластин и структур / С.Э. Притчин // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Випуск 2/ (73) . – С. 35 – 39.

12. Ключой М.І. Оптичні властивості модифікованих кристалів GaAs в інфрачервоній області спектру / М. І. Ключой, А. І. Ліптуга, В. Б. Лозінський, А. П. Оксанич, С. Е. Притчин, Ф. В. Фомовський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Випуск 3 (74). – С. 15 – 19.

13. Оксанич А.П. Усовершенствование метода измерения остаточных напряжений в подложках арсенид галлия / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.Р. Петренко, В.А. Тербан. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Вип. 161. – С.122 – 128.

14. Оксанич А.П. Метод и устройство измерения диаметра слитка GaAs в процессе выращивания методом с жидкостной герметизацией / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.Р. Петренко, В.А. Тербан. // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – том 11, № 1. – С. 54 – 62.

15. С.Э. Притчин. Определение влияния кристаллографической ориентации на механические свойства арсенида галлия. Технічна електроди-

наміка//Науково-прикладний журнал: у 4-х ч. – Ч.3. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 209 – 211.

16. Притчин С.Э. Разработка математической модели влияния точечных дефектов монокристаллов арсенида галлия на его упругие характеристики / С.Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Випуск 1 (72). – С. 23 – 27.

17. Оксанич А.П. Усовершенствование технологии отжига слитков и подложек арсенида галлия для изделий микро - нано электроники и фотовольтаики / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Випуск 2 (79). – С. 14 – 19.

18. Оксанич А.П. Разработка устройств и систем выращивания слитков арсенида галлия для изделий микро, нано электроники и фотовольтаики / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.А. Тербан // Вісник Національного технічного університету України "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – №54. – С. 136 – 143.

19. Притчин С.Э. Усовершенствование технологии подготовки подложек арсенида галлия / С.Э. Притчин, В.И. Орел, В.А. Тербан, Н.В. Рылова // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – вип 3. – С.25–30.

20. Оксанич А.П. Усовершенствование метода и аппаратуры измерения плотности дислокаций в подложках кремния и арсенида галлия / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, М.Г. Когдась, В.А. Тербан // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вип. 163. – С.53 – 59.

21. Притчин С.Э. Микроконтроллерный комплекс подготовки подложек арсенида галлия / С.Э. Притчин // Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво ". – 2013. – Вип. 12. – С.134 –141.

22. Притчин С. Э. Математическое моделирование влияния остаточных напряжений на механические свойства подложек арсенида галлия /

С. Э. Притчин, В. В. Артамонов // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Випуск 4 (81). – С. 31 – 36.

23. Притчин С. Э. Усовершенствование математической модели зависимости модуля юнга и коэффициента пуассона от кристаллографической ориентации подложек GaAs / С. Э. Притчин, В. В. Артамонов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вип. 162. – С.68 – 73.

24. Притчин С. Э. Усовершенствование математической модели влияния кристаллографических направлений подложек арсенида галлия на плотность дислокаций / С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Випуск 5 (82). – С. 27 – 32.

25. Притчин С. Э. Вплив термічних відпалів на оптичні властивості пластин напівізолюючого арсеніду галію, легованих телуром/ С. Э. Притчин, М.Г. Когдась, А.І. Ліптуга, В.Б. Лозінський, А.П. Оксанич, М.І. Клюй // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вип.165.– С.136-141

26. Притчин С. Э. Уменьшение погрешности оптического тракта автоматизированного комплекса измерения остаточных напряжений / С. Э. Притчин, К. В. Макаров, А. П. Юрченко// Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Випуск 1 (84). – С. 29 – 33.

27. Притчин С. Э. Разработка методики измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия / С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Випуск 2 (85). – С. 21 – 25.

28. Klyui N.I. Tellurium effect on degradation stability of semiinsulating gallium arsenide crystals/ N.I. Klyui, A.I. Liptuga, V.B. Lozinskii, A.P. Oksanich, S.E. Pritchinn, F.V. Fomovskii, V.O. Yukhymchuk// Ukr. J. Phys. – 2014. – Vol. 59. – No. 11. – P. 1093 – 1097.

29. Деклараційний патент України на винахід №49479. Спосіб вирощування монокристала та пристрій для його здійснення./ Оксанич А.П., Притчин С.Е., Ларкін С.Ю., Слюсаренко О.О., Третьяков О.В., Немчин

О.Ф., Падалко В.Г., Аніщенко С.Є.; власник Товариство з обмеженою відповідальністю «Нова інтернаціональна корпорація» . – № u2001128633; заявл. 14.12.2001.; опубл. 16.09.2002 р., Бюл. № 9 "Промислова власність". – 2002 р.

30. Патент України на корисну модель № 99669, МПК (2006.01). Спосіб з'єднання струмопровідних шин з металевої фольги. / Макаров А. В., Ключ М. І., Авксентьєва Л.В., Оксанич А. П., Притчин С. Е.; власник Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України. – № u 201408876; заявл. 06.10.2014р.; опубл. 25.12.2014 р., Бюл. № 24 "Промислова власність". – 8 с.

31. Патент України на корисну модель № 97876, МПК (2006.01). Спосіб покращення пропускання ІЧ-світла та деградаційної стійкості оптичного елемента на основі GaAs. / Ключ М.І., Ліптуга А.І., Лозінський В.Б., Кабалдін О.М., Неймаш В.Б., Оксанич А.П., Притчин С.Е.; власник Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України. – № u 201410935; заявл. 06.10.2014р.; опубл. 10.04.2015 р., Бюл. № 7 "Промислова власність". – 6 с.

32. Оксанич А.П. Система автоматического управления процессом шлифовки кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / А.П. Оксанич, С.Е. Притчин, М.А. Ткаченко // III Международная научно-техническая конференция „Информационная техника и электромеханика (ИТЭМ-2005). 19-21 квітня 2005 р. Матеріали конференції., Луганськ. –.2005 р С

33. Оксанич А.П. Формирование математической модели определения кинематических параметров шлифования кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / А.П. Оксанич, С.Е. Притчин, М.А. Ткаченко // Фізика і технологія тонких плівок. – Матеріали Ювілейної Х Міжнародної конференції (МКФТТП-Х).– Івано-Франківськ. – 16-21 травня 2005. – С. 193-194.

34. Оксанич А.П. Разработка процедуры определения температурных полей и термических напряжений в слитках ПИН GaAs, выращенных из расплава. / А.П. Оксанич, П.А. Хозя, С.Э. Притчин // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології. Тези доповідей на Третій міжнародній науково-практичній конференції МЕТІТ-3, присвяченій 90-річчю НАНУ: 21-23 травня 2008 р., Кременчук. – С. 142-144.

35. Оксанич А.П. Повышение точности измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А.П. Оксанич, С.Е. Притчин // IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-4): Тези доповіді.– Запоріжжя.– 16 – 20 серпня 2009 р. – С.

36. Оксанич А.П. Синтез температурного профиля выращивания слитка GaAs по величине термоупругих напряжений в пластинах. / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин // III-я Международная научная конференция «ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА МИКРО-, ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ» Тези доповіді.– Харьков-Кацивели.– 28 серпня по 2 жовтня 2010г

37. Оксанич А.П. Высокочувствительный аппаратно-программный комплекс для измерения внутренних напряжений в полупроводниковых материалах/ А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, А.В. Вашерук.// “Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології”: Тези доповідей на Четвертій міжнародній науково-практичній конференції МЕТІТ-4. 19-21 травня 2010 р. – Кременчук: КУЕІТУ, 2010. – С. 115.

38. Оксанич А. П. Метод определения плотности распределения микродефектов в монокристаллах GaAs, применяемых для  $\gamma$ -детекторов / А. П. Оксанич, С.Э. Притчин // “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології”: Тези доповідей на Четвертій міжнародній науково-практичній конференції СЕМСТ-4. 28 червня - 2 липня. – Одесса. – 2010 р. С.

39. Оксанич А.П. Метод неразрушающего контроля внутренних напряжений в кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией. / А.П.

Оксанич, С.Э. Притчин // V Украинская научная конференция по физике полупроводников. 9-15 октября. – Ужгород. – 2011 г. С.

40. Оксанич А.П. Контроль структурных микронеоднородностей подложек GaAs применяемых для производства фото-электронных преобразователей / Оксанич А.П., Притчин С.Э. //«Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ – 2011). Тезисы докладов на IV-м Международном радиоэлектронном форуме. 18 – 21 октября. Харьков-Кацивели. – 2011 г. С.

41. Притчин С.Э. Применение поляризационно-оптического метода для исследования внутренних напряжений в кремниевых эпитаксиальных структурах / С.Э.Притчин // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка” (НМІТФ-2011). Тези доповідей на I - й міжнародній науково-практичній конференції. 5 – 7 травня. Кременчуг. – 2011 р. С. 77

42. Притчин С.Э. Связь термоупругих напряжений и плотности дислокаций в слитках германия применяемого для задач биомедицины / С.Э. Притчин, В.Ф. Шостак // “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Тези доповідей на X - і Міжнародної науково-технічної конференції. 7–9 листопада. Кременчуг. – 2011 р. С.

43. А.П. Оксанич А.П. Определение влияния кристаллографической ориентации на механические свойства арсенида галлия / А.П. Оксанич, С.Э.Притчин// “Силовая электроника и энергоэффективность”: Тезисы докладов на 18-й международной научно-технической конференции. 17 – 21 сентября. Алушта. – 2012. – С.

44. Автоматизированная система управления процессом выращивания монокристаллов арсенида галлия. Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління», Запоріжжя, 14-16 березня 2012. – С. 213-214

45. Создание современных технологий выращивания структурно-совершенных слитков электронного арсенида галлия. Зборник матеріалів

V Международной научной конференции «Функциональная база наноэлектроники», Харьков-Кацивели, 30 сентября – 5 октября 2012. – С. 5-8

46. Математическая модель зависимости Модуля Юнга в подложках арсенида галлия от кристаллографической ориентации. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2-4 листопада 2012. – С. 88-90

47. Математическое моделирование влияния дефектов в подложках арсенида галлия на механические свойства. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління», Запоріжжя, 13-16 березня 2013. – С. 214-216

48. Разработка устройства и систем выращивания слитков арсенида галлия для изделий микро, нано электроники и фотовольтаики. Киев, 11-15 марта 2013 г.: материалы конференции – Киев: 2013. – С. 204-205

49. Влияние параметров процесса отжига на плотность дислокаций в слитках арсенида галлия. II Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2013. – С. 37-38

50. Методи покращення деградаційної стійкості елементів ІЧ-оптики на основі напівізолюючого GaAs. VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. вересень – жовтень 2013.: тезидоповідей – Чернівці, 2013. С.116-117

51. Определение механических свойств арсенида галлия в произвольной кристаллографической ориентации. VI Международная научная конференция «Функциональная база наноэлектроники». Сборник научных трудов. – Харьков: ХНУРЭ.2013. – С. 109-112

52. Розробка методики вимірювання залишкових напруг в підкладках арсеніду галлія. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конфе-

ренції «Розвиток наукових досліджень 2013», 25–27 листопада 2013 р., м. Полтава. – Т. 6. – С. 67–68

53. Розробка методики вимірювання залишкових напруг у підкладах арсеніду галлія. III Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 20–23 травня 2014 р. – С. 91–92

54. Підвищення чутливості прийомного каналу поляриметру для визначення полів залишкових напруг у підкладках GaAs. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 55-56

55. Автоматизація вимірювання залишкових напружень у напівпровідникових структурах. I Міжнародний форум «ІТ-Тренди: великі дані, штучний інтелект, соціальні медіа»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2014. – С. 65–67

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## **Приложение А**

**Акт использования результатов диссертационной работы в  
производство на ЧП «Галар»**

УТВЕРЖДАЮ  
директор  
ЧП «Галар»



Березной А.Н.  
г.

**А К Т**  
**о внедрении в производство**  
**результатов диссертационной работы**  
**Притчина Сергея Эмильевича на тему**  
**«Разработка технологии производства подложек арсенида галлия для изделий**  
**микроэлектроники»**

Комиссия в составе: председатель – Тербан В.А., зам. директора ЧП «Галар», члены комиссии: главный метролог Холод А.Г., главный бухгалтер Омельянцева Е.О. составила этот акт о внедрении в производство разработанной в рамках диссертационной работы технологии производства подложек арсенида галлия, методов, методик и устройств неразрушающего контроля качества подложек.

Место внедрения: ЧП «Галар».

Состав внедрения:

Технология отжига подложек, которая обеспечивает уровень остаточных напряжений не более 40 МПа по краю подложки;

Технология подготовки подложек, которая обеспечивает глубину нарушенного слоя не более 10 мкм и отклонение от плоскостности подложки не более 2 мкм;

Устройство контроля остаточных напряжений в подложках арсенида галлия, которое обеспечивает абсолютную погрешность  $\pm 2$  МПа ;

Устройство контроля плотности дислокаций, которое обеспечивает относительную погрешность 30%;

Устройство контроля отклонение от плоскостности подложек арсенид галлия, которое обеспечивает абсолютную погрешность  $\pm 0,8$  мкм;

Устройство контроля диаметра слитка арсенида галлия в процессе выращивания, которое обеспечивает абсолютную погрешность  $\pm 1,5$  мм.

Суммарный экономический эффект от внедрения подсистем в производстве составляет 200 тыс. грн. в год.

Председатель комиссии

В.А. Тербан

Члены комиссии:

А.Г. Холод

Е.О. Омельянцева

**Приложение Б**

**Акт использования результатов диссертационной работы в институте  
физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Інституту фізики  
напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова  
НАН України, пл.-кор. НАН України

« 05 жовтня » 2015 р.  
Ідентифікаційний код  
05416952

**Акт**

використання результатів дисертаційної роботи "Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки" доцента кафедри інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Притчина Сергія Емільовича

Комісія у складі:

Голови — завідувача лабораторії нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України,

д.ф.-м. н., професора Клюя М.І.

Членів комісії — к. т. наук, с.н.с. лаб. №2 Лозінського В.Б.

к. т. наук, с.н.с. лаб. №2 Темченка В.П.

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Притчина С.Е. на тему "Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки" передані та використані співробітниками відділення фізики поверхні та мікроелектроніки Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України для проведення науково-дослідних робіт по темі № III-10-12 «Розробка сучасних напівпровідникових матеріалів і структур для опто-, мікро- і сенсорної електроніки» (Державний реєстр. №0112U002102), а саме:

1. Для встановлення кореляції між рівнем внутрішніх механічних напружень в кристалах напівізолюючого арсеніду галію, визначеного оптичними методами та їх дефектністю використано розроблену автором методику визначення густини дислокацій у підкладках арсеніду галію телевізійним методом.

2. Вдосконалений метод неруйнівного контролю відхилення від площинності підкладок арсеніду галію використано для коректного визначення оптичних констант арсеніду галію зі спектрів відбивання і пропускання.

Голова комісії  
д.ф.-м.н., професор

М.І. Клюй

Члени комісії  
к. т. наук, с.н.с. лаб. №2

В.Б. Лозінський

к. т. наук, с.н.с. лаб. №2

В.П. Темченко

**Приложение В**

**Акт использования результатов диссертационной работы в НИИ  
ОСОБО ЧИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**



Открытое акционерное общество  
**«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
 ОСОБО ЧИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

Юридический адрес: 124575, Москва, ул. Панфилова, 15А. ОГРН 5077746978062, ИНН 7735531138, КПП 773501001. Коды: ОКПО 11478118, ОКТМО 45332000, ОКВЭД 73.10, ОКОГУ 49001, ОКФС 12, ОКАТО 45272591000, ОКОПФ 47, р/сч 40702810638150102751 в Московском банке Сбербанка России ОАО, г. Москва, БИК 044525225, к/сч. 30101810400000000225  
 Адрес для переписки: 124575, г. Москва, ул. Гоголя, 116, тел. 499 731-60-60, E-mail: bor-gribov2009@yandex.ru



**АКТ**

о использовании результатов диссертационной работы  
 Притчина Сергея Эмильевича на тему  
 «Разработка технологии производства подложек арсенида  
 галлия для изделий микроэлектроники»

Комиссия в составе: председателя комиссии Тузовского Константина Анатольевича-генерального конструктора, к.т.н., начальтка НТО Минаждинова Максута Сафиуловича, к.т.н., главного специалиста Шевяковой Лидии Николаевны.

Составила настоящий акт в том что партия подложек GaAs изготовленных по технологии разработанной в рамках диссертационной работы «Разработка технологии производства подложек арсенида галлия для изделий микроэлектроники» марки АГЧХ-98, 0-650-(100) -ЕJ-ДСП, GaAs марки АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП и АГЧП-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП по 50 шт. в каждой партии, соответствуют следующим параметрам:

– остаточные напряжения:

АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – < 35 МПа;

АГЧХ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – < 35 МПа;

АГЧП-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – < 40 МПа;

– плотность дислокаций:

АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – <  $0,8 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ ;

АГЧХ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – <  $0,8 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ ;

АГЧП-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – <  $1,2 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

– отклонение от плоскостности:

АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – < 1,2 мкм;

АГЧХ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – < 1,2 мкм;

АГЧП-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП – < 2,0 мкм.

Остаточные напряжения, отклонения от плоскостности измерялись методом рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-4.

Специалистами ОАО « НИИ Материаловедения им. А.Ю.Малинина». Плотность дислокаций измерялась специалистами ОАО « Малахит», там же были изготовлены эпитаксиальные структуры.

По нашему мнению и оценкам специалистов ОАО «Малахит», использование данных подложек позволило увеличить процент выхода годных эпитаксиальных структур на 5-7% минимум.

Председатель комиссии

Члены комиссии:

 к.т.н. К.А. Тузовский  
 к.т.н. М.С. Минаждинов  
 Л.Н. Шевякова

## **Приложение Г**

**Акт использования результатов диссертационной работы в учебном процессе кафедры информационно - управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского**

ЗАТВЕРДЖУЮ



професор КрНУ з науково-педагогічної та методичної роботи

Костін В.В.

» 2015 р.

## АКТ

про впровадження в навчальний процес  
результатів дисертаційної роботи  
Притчина Сергія Емільовича на тему  
"Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію  
для виробів мікроелектроніки"

Комісія у складі:

голови: к.т.н., доцента, декана факультету електроніки та комп'ютерної інженерії Мосьпана В.О.;

членів комісії:

д.т.н., професора Левінзона Д.І.,

к.т.н., доцента Шевченко І.В.,

к.т.н., доцента Коноха І.С.

склала цей акт про впровадження в навчальний процес лекційних матеріалів і методичних вказівок щодо виконання лабораторних робіт, розроблених Притчиним С.Е. на основі результатів його дисертаційної роботи.

Місце впровадження: факультет електроніки та комп'ютерної інженерії КрНУ, кафедра інформаційно-управляючих систем.

Склад впровадження:

- лекції "Технологія вирощування арсеніду галію", "Термопружні напруження у зливках монокристалів" з курсу "Основи технології вирощування монокристалів напівпровідників";

- лекція "Методи вимірювання щільності дислокації" з курсу "Фізика та контроль параметрів напівпровідникових матеріалів";

- методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Фізика та контроль параметрів напівпровідникових матеріалів" (Лабораторна робота "Визначення густини та структурних дефектів оптичним методом").

Голова комісії

к.т.н., доцент Мосьпан В.О.

Члени комісії

д.т.н., професор Левінзон Д.І.

к.т.н., доцент Шевченко І.В.,

к.т.н., доцент Конох І.С.