

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

ПАЛАГИН ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ

УДК.621.3.049.77

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРОИЗВОДСТВА КОМПОНЕНТОВ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант
Невлюдов Игорь Шакирович,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники
Украины, Лауреат Государственной
премии в области науки и техники
Украины

Харьков 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Список условных обозначений, сокращений и терминов.....	5
Введение.....	8
1 Анализ уровня развития микроэлектромеханических систем.....	19
1.1 Основные конструктивно технологические решения компонентов МЭМС.....	19
1.2 Материалы для МЭМС.....	24
1.2.1 Механические свойства кремния.....	25
1.2.2 Углеродные формы материалов.....	26
1.2.3 Ферромагнитные жидкости.....	35
1.2.4 Керамика.....	36
1.2.5 Полимерные материалы.....	38
1.2.6 Фотонные кристаллы	39
1.2.7 Дезоксирибонуклеиновая кислота	41
1.2.8 Интеллектуальные материалы.....	44
1.3 Технологии МЭМС.....	45
1.4 Технологии изготовления внешних выводов МЭМС и корпусирования компонентов BGA/CSP.....	70
Выводы по разделу 1.....	75
2 Конвергенция и масштабирование компонентов микроэлектромеханических систем.....	78
2.1 Анализ изменения сил при пропорциональном уменьшении линейных размеров.....	78
2.2 Электромеханические аналогии.....	102
2.3 Микроробототехника.....	107
Выводы по разделу 2	112
3 Математические модели компонентов микроэлектромеханических систем.....	117

3.1 Математическая модель микробалок.....	117
3.2 Математические модели емкостных элементов.....	125
3.3 Расчет встречно-штыревого микрорезонатора.....	134
3.4 Моделирование пьезопреобразователя.....	137
Выводы по разделу 3.....	140
4 Разработка метода принятия решений для выбора стратегии мониторинга технологического процесса.....	141
4.1 Выбор стратегии управления с использованием марковских процессов...	141
4.2 Идентификация функции переходных вероятностей.....	166
Выводы по разделу 4.....	172
5 Выбор лучшего варианта технологического процесса по критерию стоимости	174
5.1 Метод выбора лучшего варианта ТП из множества рассмотренных альтернатив.....	174
5.2 Расчет выхода годных компонентов МЭМС по конструктивным элементам	198
5.3 Пример расчета выхода годных структур.....	204
Выводы по разделу 5.....	210
6 Создание МЭМС многозондовых подключающих устройств на основе принципа конвергенции.....	211
6.1 Разработка метода и технологии изготовления многозондовых подключающих устройств.....	211
6.2 МЭМС многозондового подключающего устройства с контролем наличия контакта зондов.....	216
6.3 Разработка многозондовых контактирующих устройств для входного контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами.....	217
6.4 Моделирование напряженно-деформированного состояния прижимающей пластины многозондового подключающего устройства	226

6.5 МЭМС-интерфейс автоматического измерительного комплекса	232
Выводы по разделу 6.....	233
Основные результаты и выводы	234
Перечень ссылок.....	239
Приложение А. Электромеханические аналогии	265
Приложение Б. Функциональная электроника.....	267
Приложение В. Технологии микроэлектромеханических систем.....	269
Приложение Г. Обобщенный технологический процесс изготовления ИТП давления.....	271
Приложение Д. Типовой технологический процесс изготовление толсто- пленочных микросборок.....	273
Приложение Е. Изготовление шариковых выводов.....	275
Приложение Ж. Характеристики BGA/CSP выводов.....	277
Приложение И. Процессы изготовления перевернутого кристалла.....	279
Приложение К. Растровая акустическая микроскопия	281
Приложение Л. Виды изображений при РАМ.....	283
Приложение М. Технологический процесс HARPSS.....	285
Приложение Н. Методы наноимпринтинга	287
Приложение П. Акты внедрения результатов НИР в учебный процесс.....	289
Приложение Р. Акты внедрения результатов НИР в производство.....	296

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

- АСМ – атомный силовой микроскоп;
- АТФ – аденозинтрифосфат (натрия/кальция);
- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
- БГИС – большая гибридная интегральная схема;
- БМС – баллистическое магнитное сопротивление;
- ВАК – травитель кремния;
- ГМО – генетически модифицированные объекты;
- ГМС – гигантское магнитосопротивление;
- ГМХ – габаритно-массовые характеристики;
- ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота;
- ДУС – датчик угловой скорости;
- ЕМС – емкостные микромеханические системы;
- ИК – инфракрасный;
- ИМС – интегральная микросхема;
- ИС – интегральная (полупроводниковая) микросхема;
- КБЭ – конденсат Бозе-Эйнштейна;
- КНС – кремний на сапфире;
- КФТП – корпускулярно-фотонные ТП;
- ЛС – линии связи;
- МАЭМС – микроакустоэлектромеханические системы;
- МКП – многослойная коммутационная плата;
- МОЛ – магнитная оптическая ловушка;
- МОЭМС – микрооптоэлектромеханические системы;
- МПУ – многозондовое подключающее устройство;
- МС – микросистемы;
- МСБ – микросборка;
- МСЛ – микростереолитография;

МСМ – магнитно-силовая микроскопия;

МСТ – микросистемная техника;

МХЭМС – микрохэмоэлектромеханические системы;

МЭА – микроэлектронная аппаратура;

МЭМС – микроэлектромеханические системы;

НЖМД – накопитель на жестком магнитном диске;

НТ – нанотехнологии;

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство;

ПМВ – преобразователь механических величин;

ПММА – полиметилметакрилат (фоторезист);

ПНК – пептид-нуклеиновая кислота;

ПФВ – преобразователь физических величин;

РНК – рибонуклеиновая кислота;

САПР – система автоматизированного проектирования;

СНК – система на кристалле;

ТМАН – гидроксид тетраметиламмония $[(CH_3)_4NOH]$ анизотропный
 травильный реагент для кремния;

ТСМ – туннелирующий сканирующий микроскоп;

УНТ – углеродные нанотрубки;

УФ – ультрафиолетовый;

ЭА – электронная аппаратура;

ЭДП – этилендиамин и пирокатехин (травящий раствор);

АСР – air cushion press (прессование с воздушной прокладкой);

AMANDA – Abformung, Oberflächen mikromechnik, Membranu bertragung
 (микрообработка, литье и перемещение диафрагмы);

CISC – complete integrated schemes commands;

DARPA – defense advanced research projects agency;

DMD – digital micromirror devices;

DRAM – dynamic random access memory;

DSP – digital processor;

- EDP – этилендиамин и пирокатехин (анизотропный травитель);
- iMEMS – integrated MEMS, интегрированная в одном чипе MEMS;
- IP – intellectual property;
- LIGA – lithographic, galvanofornung, abformung (немецкие – литография, гальваника, формовка (литье));
- LPCVD – low pressure chemical vapor deposition;
- MUMPS – Multi User MEMS Process Silicon (универсальные процессы для МЭМС);
- NIL – nanoimprint lithography (наноимпринтинговая литография);
- P. NIL – photo – curable NIL (фотостимулированная NIL);
- T.NIL – thermo NIL (термическая NIL);
- NGL – next generation lithography (сведения ITRS, 2003);
- PECVD – plasma enhanced chemical vapor deposition (улучшенный процесс химического парового осаждения);
- PDMS – polydimethyl siloxane (прозрачный полимер для изготовления наностампов);
- RiE – Reactive Ion Etching (реактивно-ионное травление);
- RISC – reduce integrated schemes commands;
- RTL – register transfer level;
- SCREAM – Single Crystal Reactive Etching and Metallization – вертикальное объемное травление кремния с металлизацией, которая является комбинацией анизотропного и изотропного плазменного травления;
- SLIGA – Sacrificial LIGA, LIGA с жертвенным слоем;
- SPICE – simulation program with integrated circuit emphasis (моделирующая программа с ориентацией на ИС);
- SRAM – static random access memory;
- VHDL – very high device language;
- VHSIC – very high speed IC;
- VLIW – very long instructive word (процессоры).

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Микроэлектромеханические системы (МЭМС) являются одним из прогрессивных направлений микросистемной техники (МСТ), которое вместе с нанотехнологиями (НТ) считаются во всем мире революционными, определяющими тенденции развития современного производства электронной техники. Об этом свидетельствует большое количество государственных, общенациональных программ, первая из которых принята в Германии в 1998 году. В дальнейшем аналогичные долгосрочные программы появились и в других странах мира: Япония 1999 «Национальная программа МСТ»; США 2000 «Национальная нанотехнологическая инициатива»; Россия 2006 национальная целевая программа «Наноиндустрии и микросистемы», Украина 2007 в рамках седьмой рамочной программы Евросоюза подпрограммы «Нанонауки, нанотехнологии, материалы и новые технологии производства».

Под эгидой НАНУ в данной программе участвует значительное количество институтов, академий и университетов Украины. Институт проблем материаловедения г. Киев и Донецкий физико-технический институт разработали медицинские материалы и носители целевой доставки лекарств в организме. Институт монокристаллов (г. Харьков) разрабатывает сцинтилляционные материалы и порошки для низкотемпературного спекания керамики. «Научно-исследовательский технологических институт приборостроения» (г. Харьков) разработал технологию изготовления микрошлейфов. Институт электросварки (г. Киев) разработал уникальное оборудование и технологию нанесения термо-, износо- и коррозионностойких покрытий электронным лучом (EB PVD). Во Львовском национальном политехническом университете на высоком уровне развита школа систем автоматизированного проектирования (САПР) МСТ.

Конструктивно-технологическим особенностям компонентов микросистемной техники посвящены труды многих зарубежных и отечественных ученых. Можно назвать такие известные имена, как Павлос Аливисатос, Ауази Ф.А., Варадан В. [1],

Вернер В.Д. [2,3], Борщев В.Н. [4 – 6], Ваганов В.И. [7 – 11], Гордиенко Ю.Е. [12, 13, 15], Дружинин А.А. [14], Лепих Я.И. [15], Лобур М.В. [16], Лучинин В.В. [17], Невлюдов И.Ш. [18-20], Рожицкий Н.Н. [21], Стасюк З.В. [22], и другие.

Между собой МСТ и нанотехнологии тесно связаны: с одной стороны, МЭМС-актюаторы используются как микроинструменты для манипулирования нанообъектами, микро- и нанороботами и их изучения, с другой стороны, квантовомеханические эффекты, новые материалы, связанные с наноструктурами, практическое применение часто получают в виде изделий МЭМС.

Объединение на уровне узлов и блоков в единую микросистему механических, электронных, оптических, акустических, магнитных, жидкостных и других компонентов позволяет значительно повысить электрофизические характеристики, но и одновременно приводит к сложности технологий, разнообразию процессов, высокому уровню требований к стабильности и контролю производства.

Интерес к МЭМС связан не только с принципиально новыми техническими возможностями, но и с экономическими, которые обеспечивают значительное снижение затрат на производство продукции в процессе массовых выпусков за счет использования групповых методов изготовления и ресурсосбережения. Но массовость производства сложных конструкций МЭМС требует разработки эффективных методов проектирования технологических процессов и их мониторинга при производстве.

Широкое внедрение технологий производства МЭМС сдерживается отсутствием методологических основ, которые учитывали бы различия проектирования микроразмерных компонентов и совместное использование явлений различной физической природы в одном устройстве, что образует противоречие между традиционными подходами проектирования и новыми направлениями высоких технологий.

К сожалению, методологических основ проектирования технологий производства компонентов микроэлектромеханических систем учитывающих специфику техники микроминиатюризации композиционных устройств не существует.

Отсюда возникает научно-прикладная проблема повышения эффективности проектирования технологических процессов производства компонентов МЭМС с использованием явлений различной физической природы и изменения соотношений действующих сил в процессе масштабирования, которые требуют использования знаний ряда смежных технических направлений.

Таким образом, тема посвящена разработке методологических основ проектирования технологий компонентов МЭМС, обусловленная сложностью объединения в рамках одного изделия принципиально различных систем и технологических процессов и направлена на решение актуальной научной проблемы.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа связана с планами научных исследований кафедры «Технологии и автоматизации производства радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры» Харьковского национального университета радиоэлектроники по темам:

– «Теоретические основы создания перспективных компонентов и новых технологий их производства для широкого класса волоконно-оптических систем». Срок выполнения 1.01.2005 г. – 31.12.2007 г. (Гос. Регистрация № 0105U002739);

– «Конструктивно-технологические основы создания перспективных компонентов микроэлектромеханических систем и технологий их производства». Срок выполнения 1.01.2008 г. – 31.12.2009 г. (Гос. Регистрация № 0108U002216);

– «Теоретические основы микроэлектромеханических систем, проектирование и технологии их производства гибких интегрированных систем». (Гос. Регистрация 0113U000358). Срок выполнения 1.01.2010 г. – 31.12.2012 г. (Гос. Регистрация №0110U002594);

– «Создание экспериментальных образцов компонентов микросистемной техники для производств с интеллектуальными свойствами и их внедрения». Срок выполнения 1.01.2013 г. – 31.12.2014 г. (Гос. Регистрация № 0113U0003582).

Соискатель в этих работах обобщил теоретические положения электромеханических аналогий, использовал теорию подобия и размерностей

физических величин, байесовских статистических решений для выбора лучшего варианта технологического процесса, рекуррентных методов оптимальных решений для выбора стратегии мониторинга стохастических технологических процессов, исследовал конструктивно-технологические решения электронных и механических компонентов МЭМС.

Соискатель выполнил работы по ряду хозяйственных договоров, направленных на совершенствование и развитие технологии изделий электронного приборостроения: договор № 03 – 19 от 2003 г., Договор № 4 – 37 от 2004 г., договор № 5 – 30 от 2005 г., № 19 от 2013 г., № 01 от 2014 г., № 04 от 2014 г., № 11 от 2014г., № 03 – 04 от 2015 г. и других.

Цель работы и задачи исследований. Целью диссертационной работы является повышение эффективности проектирования технологий производства компонентов микроэлектромеханических систем путем создания методологических основ, которые учитывают изменения электрофизических характеристик изделий за счет конвергенции явлений различной физической природы, изменения соотношения действующих сил в процессе масштабирования, возможности прогнозирования выхода годных компонентов, выбора варианта и мониторинга технологического процесса.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- анализ реакции на внешние воздействия механических, электрических (электронных) компонентов, входящих в МЭМС;
- обобщение теории электромеханических аналогий для разработки компонентов МЭМС, содержащих микромеханические и электронные устройства с учетом влияния масштабных коэффициентов на их свойства;
- разработка рекуррентного метода принятия решений в стохастических системах для мониторинга технологических процессов производства компонентов МЭМС;
- использование байесовских статистических решений для выбора лучших вариантов технологических процессов;

- разработка метода прогнозирования выхода годных компонентов по их конструктивным элементам;
- использование принципа конвергенции для моделирования конструкторско-технологических решений (КТР) многозондового подключающего устройства с самомониторингом любого зонда для контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами;
- моделирование КТР многозондового подключающего устройства для автоматизации электрического контроля многослойных коммутационных структур с возможностью самоконтроля контакта каждого зонда;
- проведение анализа эффективных областей создания МЭМС.

Объектом исследования являются технологические процессы производства компонентов микроэлектромеханических систем.

Предметом исследования являются математические модели, методы и физические явления в компонентах и методологии проектирования технологий компонентов МЭМС.

Методы исследования. В работе использованы математические методы теории подобия и размерностей физических величин для выявления изменения соотношений сил, действующих одновременно в МЭМС компонентах; электромеханических аналогий в математических моделях компонентов МЭМС; матрично-векторных операций и марковских процессов при построении стратегии мониторинга технологических процессов; байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса и идентификации функции переходных вероятностей; сопряженных распределений вероятностей для упрощения перерасчетов выхода годных изделий; теория напряженно-деформированного состояния материалов и элементов МЭМС в процессе расчетов деформаций и упругости компонентов; САПР для разработок топологии многозондовых подключающих устройств.

Научная новизна полученных результатов. Впервые методологическими основами разработки микроэлектромеханических систем предложено определить конвергенцию необычных физических явлений в микроминиатюрных изделиях с

учетом уменьшения линейных размеров компонентов и изменения соотношений действующих различных видов сил, что дает возможность создания принципиально новых технических решений для улучшения электрофизических характеристик микрокомпонентов и технико-экономических показателей их производства.

Впервые предложен метод и технология создания МЭМС многозондового подключающего устройств (МПУ) для контроля электрических параметров многослойных коммутационных структур, а также выходного и функционального контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами, основанных на сочетании технологий гибких полимерных шлейфов, матричных шариковых выводов и прессования с воздушной подушкой, что обеспечивает повышение плотности размещения зондов на плоскости, надежность контакта и интеллектуальные свойства, исключает ошибки контроля.

Получил дальнейшее развитие:

- метод проектирования МЭМС путем использования обобщенных сил, массы, координат и учета миниатюризации механических и электрических компонентов, что позволяет составить единую систему уравнений для статического и динамического режима работы МЭМС;

- математические модели чувствительных элементов на основе балок сложной конструкции, резонаторов в виде встречно-штыревых систем, пьезопреобразователей механической энергии в электрическую, что позволяет улучшить электро-физические свойства компонентов;

- метод управления электрофизическими параметрами компонентов, при различных сочетаний действующих в МЭМС сил, позволяет повысить быстродействие механических и тепловых актюаторов и датчиков, чувствительность и добротность микромеханических резонансных систем;

- положения теории байесовских статистических решений, которые объединяют экспертные оценки и результаты экспериментов, обеспечивают выбор лучшего варианта ТП среди альтернативных;

– положения теории рекуррентных методов принятия решений в стохастических процессах с доходами, что позволяет оптимизировать стратегии мониторинга сложных технологических процессов;

– метод прогнозирования и расчета выхода годных компонентов МЭМС на основе базовых элементов конструкции, который позволяет учитывать влияние технологий изготовления, конструкций, материалов, оборудования и организационных требований производства на выход годных.

Практическое значение научных результатов. Разработаны методологические основы проектирования технологических процессов производства компонентов МЭМС, которые обеспечивают:

- выбор лучшего варианта ТП по показателям минимальных затрат;
- выбор оптимальной стратегии мониторинга ТП;
- прогнозирование выхода годных компонентов.

Определены эффективные конструкторско-технологические решения МЭМС, в частности:

– изготовление матричных структур чувствительных элементов (сенсоров температуры, давления, ИК-излучения, мультисенсоров, бесконтактных датчиков высокой температуры, микромощных источников питания, в том числе, утилизирующих неиспользуемые виды энергии (вибрации, тряски, удары и т.п.), микромеханических узлов в виде бесборочных конструкций с распределенной, сосредоточенной податливостью, управляемой конфигурацией.

Созданы макетный и опытный образцы МЭМС МПУ для контроля электрических параметров многослойных структур, а также входного и функционального контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами, которые обладают интеллектуальными свойствами, а именно, возможностью самотестирования любого контакта из всего множества; получены патенты Украины № 82405, 95190, 97538, 98539). Их испытания в опытном производстве показало исключения ошибок первого и второго рода (пропуск бракованных и забраковки пригодных плат), уменьшение себестоимости и ГМХ (габаритно-массовых характеристик) примерно на 1 – 2 порядка.

Даны рекомендации по конструктивно-технологическим решениям МПУ по результатам математического моделирования структур с различными элементами нерегулярности расположения точек контроля на плоскости изделий.

Разработан МЭМС-интерфейс для автоматических контролирующих комплексов с многозондового подключающего устройства (патент Украины № 98539 МПК H05K опубл. 25. 05. 2012 г., бюллетень № 10), который уменьшает количество разъемных соединений на пути от контролируемого изделия к автоматическому контролируемому устройству от двух до трех раз.

Создана материально-техническая база для подготовки специалистов по направлению проектирования и производства микросистемной техники, которая послужила основой для открытия новой специальности подготовки бакалавров, специалистов и магистров «Интеллектуальные технологии микросистемной радиоэлектронной аппаратуры».

Создана кооперация ряда предприятий г. Харькова для работ в направлении микросистемной техники; лабораторная база ХНУРЭ, общий научно-учебно-производственный центр ХНУРЭ – «Хартрон-Энерго ЛТД» (приказ № 208, от 24.10.2008 г.), выполнены совместные разработки МПУ с НИТИ Приборостроение, «Хартрон-Энерго ЛТД» и Львовским институтом прикладных проблем математики и механики (НАНУ), НТ СКБ «Полисвет» ГНПП «Объединение Коммунар».

На предприятии ГНПП «Коммунар» внедрены МЭМС многозондовые подключающие устройства с расщепленными зондами и метод прогнозирования выхода годных печатных плат, на ГП «Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» - метод выбора лучшего варианта ТП, на ООО НПФ «ВЕСТ ЛАБС ЛТД», Корпорация ТРИОЛ ООО НПО «Вертикаль», «Titan Machinery Limited» – МЭМС МПУ для контроля компонентов BGA/CSP, о чем свидетельствуют соответствующие акты внедрения.

Создана научно-техническая база для подготовки бакалавров, специалистов, магистров и специалистов высшей квалификации по направлению микросистемной техники:

- опубликована 1 монография, 2 учебника для вузов, которые используются рядом ведущих университетов Украины;
- поставлены новые лабораторные работы по курсу «Компоненты и технологии МЭМС»;
- подготовлены новые дисциплины «Высокие технологии», «Компоненты и технологии микросистемной радиоэлектронной аппаратуры», «Введение в микросистемную технику и нанотехнологии», читаемые студентам отдельных специальностей ХНУРЭ.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены непосредственно соискателем. В печатных научных работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит: в [23] – выбор метода байесовских статистических решений и марковских процессов для отработки технологических решений, принятых на этапах проектирования изделий и мониторинга технологических процессов их производства; в [24] – расчет выхода годных функциональных узлов электронной аппаратуры по известным конструктивным элементам с использованием аппарата сопряженных распределений; в [25 – 29] – метод последовательного выбора лучшего варианта разработки по критерию стоимости на дереве решений, который использует экспертные оценки для корректировки исходных распределений вероятности по формуле Байеса; в [30 – 32] – использование марковских цепей с доходами для прогнозирования (поиска) оптимальной стратегии мониторинга в динамических системах с дискретными состояниями, перерасчета параметра дискретного распределения; в [33 – 37] – рассмотрение новых тенденций интеграции в одном чипе компонентов механических, электронных, оптических, технико-экономических преимуществ микросистемной техники; в [38] – уточнение уравнений взаимодействия электростатических сил и упругих свойств микробалочной конструкции; в [39] – возможности МЭМС для микроминиатюризации исполнительных механических устройств и роботов; в [40] – сравнение возможностей элементов солнечных батарей на коллоидном полупроводнике TiO_2 с элементами на основе кремния в [41 – 48] – решение о замене широко

используемого многозондового устройства, для подключения изделий в виде «ложе гвоздей», стержней с потерей устойчивости и «летающих зондов» на нетрадиционные МЭМС с матричными шариковыми выводами на гибком полиимидном шлейфе с прижатием сжатым воздухом, а также разделением каждого зонда на несколько элементов для получения возможности контроля контакта зондов с контактными площадками контролируемых БКП и электронных компонентов BGA/CSP; в [49 –50] – оценка влияния линейных размеров компонентов на скорость изменения различных физических сил; в [36, 37, 51, 52] – классификация технологических процессов изготовления компонентов МЭМС и оценка возможностей технологий МСТ; в [53] – положение, что конвергенция особенностей различных физических явлений является основным принципом создания компонентов МЭМС; в [54] – предложена конструкция пьезоэлектрического циклического преобразователя механической энергии веса подвижного объекта в электрическую; в [55] – проведена оценка возможностей наноимпринтинга и использования принципа равномерной передачи давления с использованием воздушной подушки; в [56] – оценка параметров диэлектриков для изготовления МЭМС; в [37] – расчет матриц жесткости микробалок сложной конструкции; в [45, 58] – связь компонентов функциональной электроники и микросистемной техники; [59] – обобщение теории электромеханических аналогий для систем «сила-ток», «сила-напряжение»; в [52, 60 – 63] – варианты повышения технологичности и надежности многозондового подключающего устройства; в [64, 65] – построение дерева решений для выбора лучшего варианта ТП из альтернативных; в [61, 66] – использования теории подобия и размерности физических величин для анализа соотношения действующих в микроэлектромеханических устройствах сил, возможности улучшения электрофизических параметров на основе ЕМА; в [67] – перечень особенностей различных физических явлений, которые пригодны для использования в МЭМС актюатора.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и публиковались на таких конференциях:

The International Workshop on Optoelectronic. Physics and Technology (Kharkiv, 2007 г.); 2-м Международном радиоэлектронном форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития » МРФ-2005 (Харьков, 2005 г.); 3-й МРФ «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» (Харьков – Судак, 2008 г.); 4-й МНК «Функциональная база нанoeлектроники» (Харьков – Кацивели, 2011 г.); East-West Design and Technology Systems (EWDTS '2012) / IEEE Computer Society (Kharkiv, 2012); VI МНПК «Современные проблемы и достижения в области радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий» (г., Запорожье, 2012); V МНК «Функциональная база нанoeлектроники» (Харьков – Крым, 2012); VII Международном симпозиуме «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (Москва, РАН, 2012 г.); а также на научно-технических семинарах и конференциях ХНУРЭ (всего на 19 МНК).

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликована 1 монография, 2 учебника с грифом МОН для студентов ВУЗов, опубликовано 26 статей в научных изданиях Украины, 5 публикаций, входящих в наукометрические базы «Scopus», «Ulrich`s Periodicals Directory», «Index Copernicus», «РИНЦ», рецензируемых зарубежными изданиями, 18 публикаций в сборниках материалов и тезисов научно-технические конференции, получено 9 патентов Украины.

Структура работы. Диссертация является рукописью и состоит из введения, 6 глав, заключения, 15 приложений. Полный объем диссертации составляет 302 страницы, включая 78 рисунков, 8 таблиц, список использованных источников из 253 наименований на 25 страницах, 15 приложений на 38 страницах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1 Основные конструктивно технологические решения компонентов МЭМС

Микроминиатюризация электронной аппаратуры по-прежнему остается важным направлением ее совершенствования. При этом ориентиром в темпах развития конструктивно-технологических решений для разработчиков и производителей аппаратуры является эмпирический закон Мура, предсказывающий двукратное увеличение степени повышения интеграции и снижения габаритно-массовых характеристик (ГМХ) аппаратуры каждые два года [245].

Так, прогноз уменьшения ГМХ в авионике с 2000 г. до 2030 г. составляет 50000 раз (рис. 1.1).



Рисунок 1. 1 – Прогноз развития авионики

При этом во многих случаях улучшение известных технологий уже находится на грани физических возможностей (субмикронные размеры элементов, изоляция из двух-трех молекулярных слоев, одноэлектронные транзисторы, усложнение

межсоединений, тепловых режимов и др.).

Эффективными областями использования МЭМС стали: космическая, военная, медицинская, IT-техника, приборы для научных исследований, микроробототехника. Возрастает производство МЭМС для пользовательской электроники (мобильных телефонов, планшетов, ноутбуков, мониторов, средств GPS-навигации и др.). Наиболее эффективными МЭМС-компонентами оказались пьезорезистивные датчики давления медицинского назначения, струйные термо- и пьезопечатающие устройства, емкостные акселерометры, микрозеркальные цифровые устройства. Массовое производство акселерометров для автомобильной промышленности дало значительные средства для развития работ по МЭМС в целом.

Компоненты МЭМС выполняют функции прецизионных и интеллектуальных датчиков физических и химических величин, актюаторов микророботов, микрофлюидных устройств, отдельных микроэлектронных компонентов для различных диапазонов частот, преобразователей различных видов энергии.

Современные актюаторы включают: микродвигатели (электростатические, пьезо-, вибрационные, жидкостные и твердотельные реактивные, импульсного действия), микродозаторы, микропозиционеры, средства интроскопии, неинвазивные средства изучения внутренних органов и мозга человека, целевой доставки лекарств и другую уникальную медицинскую аппаратуру.

Отдельным направлением можно считать микроробототехнику и ее медицинские, военные, космические микро- и наноустройства, мобильные роботы для различных сред, распределенные робототехнические устройства, биологические и биоподобные роботы.

Наблюдается устойчивый рост объемов и темпов развития МЭМС-компонентов в мире.

Прогресс МЭМС обеспечивается успехами материаловедения, разработками специального технологического оборудования, научно-исследовательских приборов, элементной базы, созданием систем автоматизированного проектирования, охватывающих разработку конструкции, выбор технологических процессов

изготовления, расчет характеристик изделий в статическом, динамическом режимах.

Использование новых физических эффектов, свойств материалов, в частности интеллектуальных, может обеспечить быстрый прогресс в сфере создания высокоинформативных интегрированных датчиков, а учитывая низкую стоимость и трудоемкость их массового изготовления, микро- и наносенсоры станут основой глобальной информатизации жизни общества, состояния внешней среды, в том числе экологии, воспитания и образования.

По линейным размерам компонентов изделия разной степени миниатюризации принято делить следующим образом [68]:

- электромеханика и мехатроника (механические компоненты) >1 мм;
- МЭМС – $1 \dots 1000$ мкм;
- НЭМС (нано- ЭМС), нанотехнологии (НТ) – $1,0 \dots 100,0$ нм;
- атомный масштаб расположен ниже – порядка $0,1$ нм (10^{-10} м), еще ниже лежит ядерный масштаб – порядка фемтометра (10^{-15} м).

Известно, что только массовое производство может обеспечить низкую стоимость изготовления изделий. Поэтому на этапе разработки, изготовления опытных образцов трудно обеспечить экономическую эффективность работ, необходима государственная поддержка исследований, создания экспериментальной базы и материально-технического производства [69].

В общем случае в составе МЭМС можно выделить следующие составляющие (рис.1.2): источники энергии и передачи движения – активаторы (актюаторы), электронные подсистемы (системы на кристалле (СНК), микропроцессоры, ЗУ, микроконтроллеры), сенсоры, объемные электрорадиоэлементы с управляемыми параметрами, системы внутренних межсоединений и телекоммуникационных связей. Каждая система может использовать для своего функционирования разные эффекты (электромагнитные, оптические, механические, молекулярно-квантовые, мезаскопические, химические, биохимические, биологические). Электронные подсистемы МЭМС – это интеллектуальные устройства, которые реализуются на базе универсальных микросхем (СНК, микропроцессоры, память, АЦП, ЦАП, ОУ и др.), на базе микросхем, которые программируются изготовителем микросхем, а

также программируемых потребителем и на базе заказных микросхем, разработанных специально для конкретных устройств. Основной идеей развития проектирования заказных микросхем является использование в проекте готовых сложно-функциональных (СФ) блоков или IP (intelligent property)-блоков [70].



Рисунок 1. 2 – Обобщенный состав МСТ

Так как в технологиях МЭМС по сравнению с микроэлектронными новыми элементами являются микроминиатюрные подвижные механические детали и узлы, перечислим наиболее употребляемые из них. Это – микроантенны, балки, валы, волноводы, двигатели, дисплеи, дозаторы, зажимы, затворы, зеркала, зубчатые колеса и передачи, кабели, кантиливеры, консоли, линзы, мембраны, микроманипуляторы, микророботы, оптомодуляторы, оптосоединители и коммутаторы, пинцеты, подшипники, позиционеры, полосковые линии, поршни, пружины, резонаторы, сенсоры физических величин, столы, струны, транспортеры, фильтры и др.

Наличие электронных схем в устройствах и системах МЭМС требует

использования на определенных этапах производства технологических процессов полупроводниковой техники. Если ТП микроэлектроники используется и для изготовления механических устройств, то это чистая технология МЭМС; если присутствуют и оптические (оптико-механические) компоненты, имеем технологию МОЭМС; с акустическими компонентами – МАЭМС и т.д. Характерным признаком для технологий этой группы является изготовление всех видов компонентов, входящих в состав устройств, систем, с использованием технологических процессов микроэлектроники, которые являются групповыми процессами.

Конструктивно изделия МЭМС желательно реализовывать на единой подложке, т. е. полупроводниковой. Но возможно получение готовых приборов и по гибридной технологии, когда механические и электрические части изготавливаются на разных подложках, а затем собираются в единое устройство, например, с использованием термокомпрессорной сварки, обеспечивающей соединение частей на молекулярном уровне.

Технологии МЭМС не только являются способом миниатюризации электронных и механических компонентов устройств или их изготовления из кремния, но и представляются парадигмой разработки и создания сложных электромеханических устройств с использованием групповых методов изготовления, промышленных технологий.

Как промышленные технологии МЭМС являются междисциплинарными технологиями, они применимы для изготовления изделий самых разных отраслей промышленности и жизнедеятельности человека; позволяют получить изделия более высокого качества и надежности при малых ГМХ и стоимости; являются базой для производства ряда изделий, которые невозможно получить другими методами, например, инструментов и научно-исследовательских приборов для нанотехнологий.

Однако существует и множество трудностей и проблем, которые необходимо решить, прежде чем МЭМС проявит все свои преимущества.

Нанотехнологии являются более глобальным по сравнению с МЭМС направлением, затрагивающим все мыслимые стороны жизни человека. Создание

материалов с заданием их свойств на атомно-молекулярном уровне, синтез любых сложных веществ вплоть до органических (в будущем) живых организмов полностью изменит условия жизни людей.

Оценивая уровень развития МЭМС в мире, следует отметить быстрое развитие и достаточно высокий уровень, достигнутый этим видом техники за рубежом: существует довольно обширный перечень выпускаемых МЭМС-компонентов, объемы выпуска датчиков давления медицинского и технического назначения достигли десятков миллионов штук в год, автомобильные акселерометры выпускаются десятками крупных зарубежных фирм.

Различными производителями поставляется специализированное технологическое оборудование для изготовления изделий МСТ. Кроме того, наметилась тенденция разделения фирм на разрабатывающие и производящие. Первые эффективно владеют системами автоматизированного проектирования (SPICE, COVENTOR WARE, TANNER PRO, ANSYS, CADENCE, CAEMEMS, EM3, DS4.2, 3 – DANISO TROPIC ETCH SIMULATION ON LINE, NODAL Design of Actuator and Sensors т.д.) и могут иметь лишь оборудование для финишных операций и сборки устройств.

Фирмы-производители имеют технологическое оборудование для всех основных операций технологического процесса. Производство МЭМС использует групповые методы, что обеспечивает достаточно низкую стоимость выпуска изделий.

1.2 Материалы для МЭМС

На уровень развития технологий существенно влияют используемые материалы, технологии, технологическое и научно-исследовательское оборудование доступное производителям.

В производстве МЭМС и нанотехнологий используются различные виды материалов. Основными видами технологий МЭМС являются процессы, заимствованные из производств полупроводниковых приборов и интегральных

схем, поэтому и основными материалами являются группы материалов этих технологий: металлы, полупроводники (чаще всего кремний), керамика, полимеры. Кроме основных, в технологии используются различные вспомогательные материалы: фоторезисты, моющие и травильные растворы и др.

Новые конструктивно-технологические решения компонентов МЭМС также создаются на основе современных материалов, обладающих уникальными свойствами. К ним относятся:

- аллотропные формы углерода: графен, графан, искусственные;
- фуллерены, фуллериты;
- углеродные нанотрубки;
- ферромагнитные жидкости;
- фотонные кристаллы;
- нанопористая керамика;
- полимерные материалы, в том числе биологические;
- интеллектуальные материалы; в том числе с переключаемыми свойствами [183].

1.2.1 Механические свойства кремния

Кремний обеспечил бурное развитие электроники, а теперь начинает изменять и представления о миниатюрных механических компонентах и устройствах, требующих обеспечения высокой точности получения размеров элементов [71].

Широкое использование кремния объясняется следующими его свойствами:

- это активный материал, дешев и доступен, а технология его получения обеспечивает высокую степень чистоты и совершенства структуры;
- технология изготовления кремниевых приборов основана на использовании тонких осажденных пленок, удобных для целей миниатюризации;
- методы фотолитографии [132, 141] используемые в производстве полупроводниковых приборов обеспечивают высокую точность.
- кремниевые микроэлектронные схемы изготавливаются по групповой технологии, что обеспечивает их низкую стоимость.

Перечисленные характеристики кремния позволят оптимизировать механические свойства приборов, изготавливаемых из него, подобно тому как оптимизируются их электронные свойства с целью улучшения характеристик, повышения надежности и воспроизводимости параметров. Современные методы фотолитографии позволяют создавать разнообразные миниатюрные и высокоточные механические структуры.

Кроме того, методы высокопроизводительной интегральной технологии, интеграции механических и электронных устройств создают новые концепции конструирования и производства гибридных устройств [133], таких как интегральные датчики и др.

При этом кремниевую микромеханику нужно рассматривать как ее естественное и неизбежное продолжение тенденции к более сложной, разнообразной и полезной интеграции приборов на основе кремния.

1.2.2 Углеродные формы материалов

Низкоразмерные аллотропные формы чистого углерода включают: графен, графит, графан, фуллерены и тубулены, алмаз (рис.1.3) [72].

Первичным элементом графена является ячейка из шести атомов углерода, объединенных прочными химическими связями в правильный шестиугольник, называемый бензольным кольцом. Собственно графен – представляет двумерную систему колец, образующую лист. Другие графитообразующие формы образуют пространственные поверхности из свернутых листов графена, обернутых вокруг шаров, вытянутых сфероидов, цилиндров и др.

Уникальным материалом графен делают два его свойства. Во-первых, графен отличается исключительно высоким качеством, сочетающим его химическую чистоту и совершенство структуры.

Исключительно высокая электропроводность графена также обусловлена его идеальной кристаллической решеткой. Электроны могут перемещаться по ней, не испытывая рассеяния на несовершенствах структуры или чужеродных атомах.

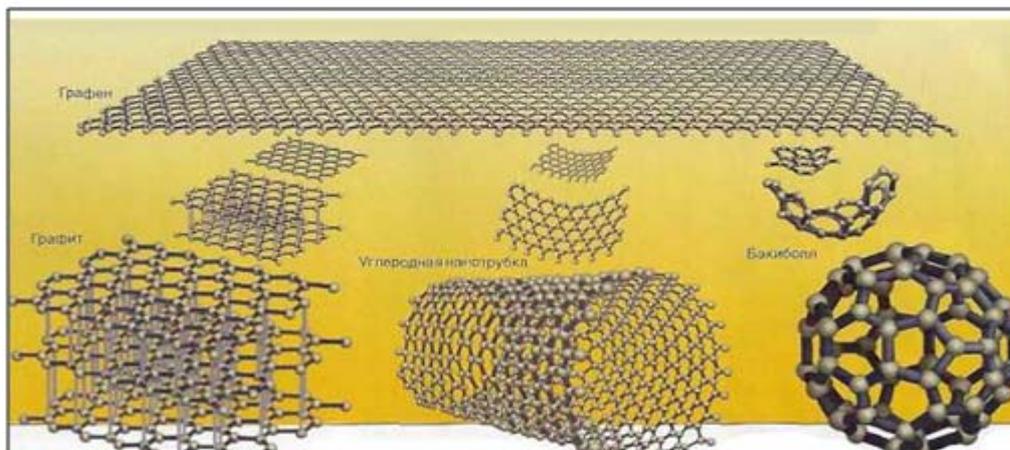


Рисунок 1.3 – Аллотропные формы углерода

Второе уникальное свойство графена состоит в том, что электроны проводимости движутся в нем намного быстрее, чем в обычных металлах и полупроводниках, как если бы они имели гораздо меньшую массу.

Электроны, несущие заряд квазичастицы в графене, движутся с очень большими постоянными скоростями (\sim в 300 раз меньшими скорости света). При этом их поведение близко к релятивистскому поведению нейтрино, что делает обычную (нерелятивистскую) квантовую механику непригодной для описания взаимодействий квазичастиц. Необходимо использование релятивистской квантовой механики, называемой квантовой электродинамикой.

Порошок графена уже сейчас можно производить в больших количествах, но получать листовой графен пока очень трудно, вследствие чего он становится самым дорогим материалом на планете.

Перспективными областями использования графена считается создание высокопрочных композитных материалов, автоэмиссионных катодов, создание сверхпроводящих транзисторов сверхбыстродействующих устройств и транзисторов, со спиновыми клапанами, сверхчувствительных химических детекторов, прозрачных и проводящих покрытий для ЖК-дисплеев и солнечных элементов. Использование графеновой электроники позволит продлить время действия закона Мура. Исключительная стабильность и электропроводность

графена даже в нанометровом диапазоне позволяют рассчитывать, что возможно создание отдельных транзисторов с размерами меньше 10 нм, а возможно, что и в размере всего в одно бензольное кольцо. В перспективе возможно даже формирование интегральной схемы в пределах одного листа графена.

Присоединением к каждому атому углерода по атому водорода получен новый материал графан, обладающий такой же кристаллической решеткой, что и графен, лишь с меньшими размерами ячеек. Графан является изолятором. Нагревом (отжигом) графана восстанавливается исходный материал графен.

Алмаз является второй диморфной формой углерода и обладает целым рядом выдающихся свойств.

Алмаз проводит тепло лучше, чем любой другой твердый материал.

Алмаз имеет высокий коэффициент преломления 2,4 по сравнению с 1,5 для стекла.

Чистый алмаз – диэлектрик, но при введении примесей он может стать полупроводником.

Поскольку энергетический зазор (ширина запрещенной зоны равна 5,5 эВ) между зонами связанных электронов проводимости в полупроводящем алмазе велик, он прозрачен для ультрафиолетового света, это позволяет использовать при производстве УФ датчиков и светодиодов.

Ввиду высокой теплопроводности еще одной эффективной сферой применения алмазов является силовая электроника. Широкое использование алмазов в электронике и, в частности, спинтронике, где алмаз может сыграть роль кремния наших дней, связан с синтетическими алмазами – полупроводниками.

При добавлении к алмазу атомов примеси может создать дискретные состояния, лежащие в запрещенной зоне, как дополнительные тонкие ступеньки в лестнице. Энергетический зазор алмаза достаточно велик. Поэтому свет с оптической длиной волны может возбуждать электрон атома примеси из одного дискретного состояния в другое, не переводя его в зону проводимости. Когда электрон возвращается в свое более низкое состояние, он испускает фотон с частотой соответствующей разности уровней энергии, т.е. флуоресцирует. При

непрерывном освещении оптическое возбуждение и релаксация повторяются снова и снова, и атомы примеси могут испускать миллионы фотонов в секунду.

Квантовая спинтроника может дать практический способ выполнения квантовой обработки информации, при которой 0 и 1 обычных вычислений заменяются квантовыми битами, или кубитами, способными иметь значения 0 и 1 (квантовая суперпозиция). Спинтроника позволит расшифровывать любые современные шифровальные коды, моделировать поведение вещества в наномасштабе, создавать новые материалы и др. [143].

Атомы углерода могут образовывать высоко симметричную структуру C_{60} . Такая молекула состоит из 60 атомов углерода, расположенных на сфере с диаметром примерно в один нанометр.

Фуллерены – многогранники из углеродных атомов: C_{60} , C_{84} , объединяющиеся в сферические структуры «Бакиболы» (рис. 1. 4) [166].

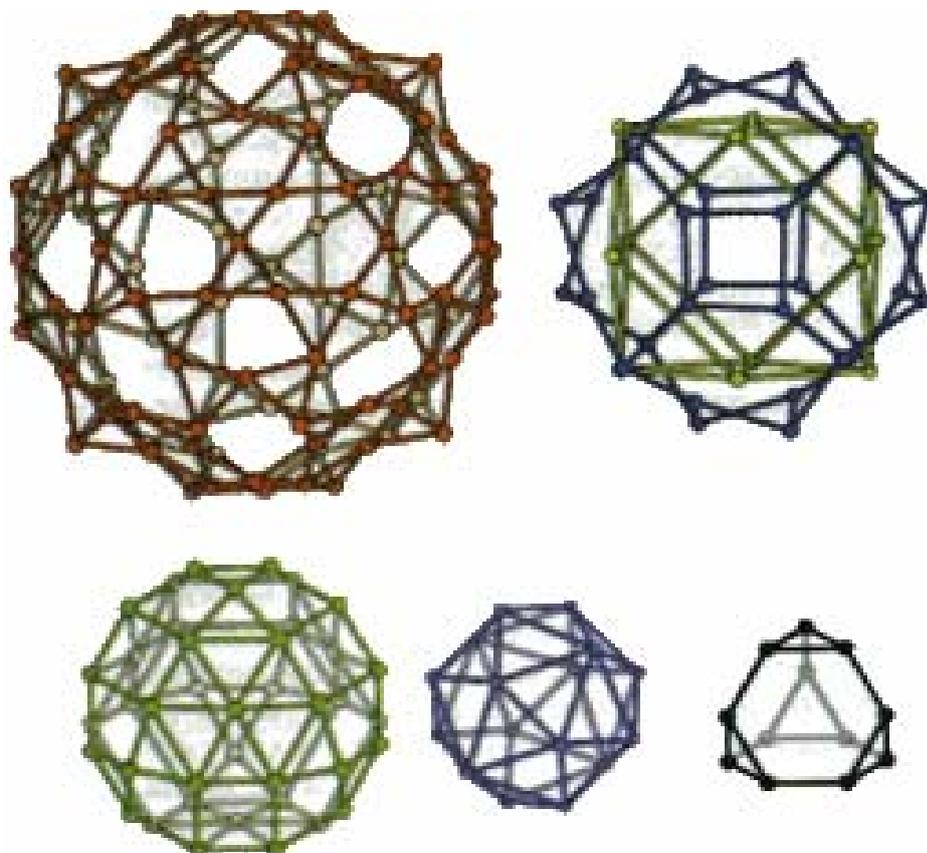


Рисунок 1. 4 – Бакиболы

Молекулы C_{60} , в свою очередь, могут образовывать кристалл фуллерен с гранцентрированной кубической решеткой и достаточно слабыми межмолекулярными связями. В этом кристалле имеются октаэдрические и тетраэдрические полости, в которых могут находиться посторонние атомы. Если октаэдрические полости заполнены ионами щелочных металлов (K – калий, Rb – рубидий, Cs – цезий), то при температурах ниже комнатной структура этих веществ перестраивается и образуется новый полимерный материал $1C_{60}$.

Если заполнить также и октаэдрические полости, то образуется сверхпроводящий материал $3C_{60}$ с критической температурой $20 - 40 K$. Существуют фуллериты и с другими присадками, дающими материалу уникальные свойства, уже к 1997 г. насчитывалось более 9000 фуллереновых соединений.

На рис. 1.5, рис. 1.6 приведены структуры вкладывающихся сфер легирующих материалов полученного оксида.

Для сборки наноструктур используются полумолекулярные компоновочные блоки. Двумя такими наноструктурами являются углеродные нанотрубки и наностержни.

Нанотрубки и наностержни можно изготовить также из кремния, других полупроводников, металлов или даже диэлектриков. Данные наностержни производятся с использованием методов химии растворов или дугового разряда, а затем они могут самособираться в большие наноразмерные структуры, например, нанотрубки длиной в единицы мкм.

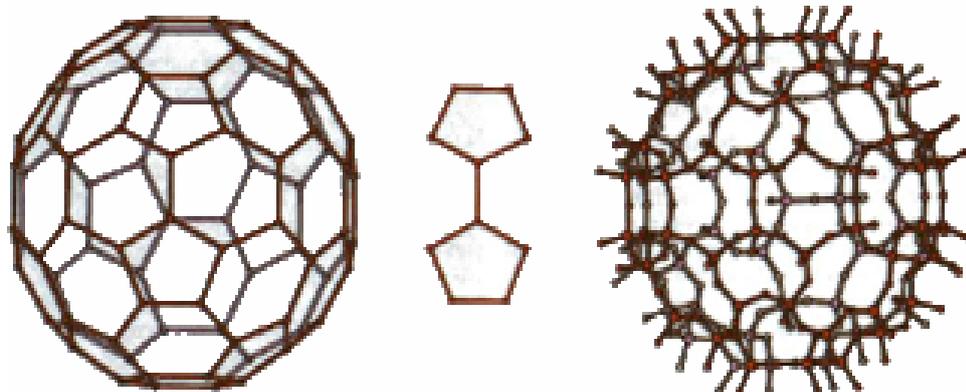


Рисунок 1. 5 – Фуллериты

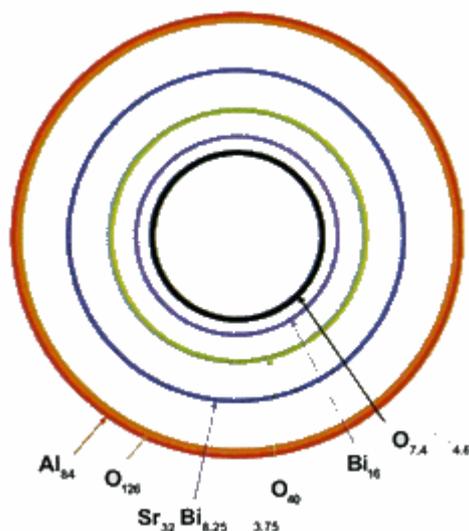


Рисунок 1.6 – Вкладывающиеся сферы легирующих элементов

Атомы углерода, связанные шестиугольной сеткой и образующие цилиндры, называются углеродными нанотрубками. Если толщина трубки равна всего одному слою атомов углерода, она называется однослойной углеродной трубкой.

Нанотрубки – это одни из первых наноструктур, построенных на молекулярном уровне, они обладают исключительными физическими и электрическими свойствами. Структура многослойной нанотрубки приведена на рис. 1.7.

К свойствам нанотрубок следует отнести [70]:

- электрические – нанотрубки могут быть диэлектриками, полупроводниками и сверхпроводниками, причем на одном материале, например, углероде. При легировании свойства могут значительно изменяться как количественно, так и качественно;

- магнитные – от идеального диамагнетика до ферромагнетика;

- механические – прочность нанотрубок на два порядка выше прочности лучших сталей, коэффициент упругого удлинения достигает 16%, многократный изгиб (на частотах в сотни ГГц) не приводит к усталостному разрушению, внутри закрытых наноструктур могут храниться газообразные вещества под огромными давлениями;

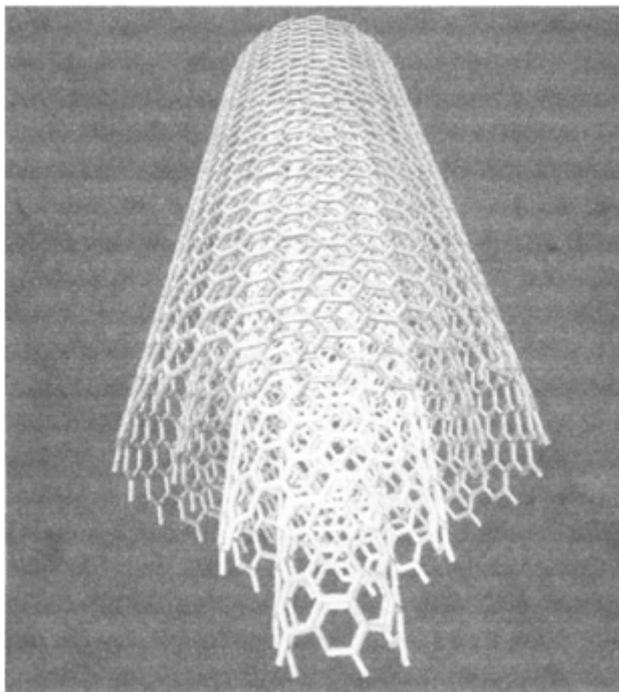


Рисунок 1. 7 – Структура многослойной нанотрубки

– теплофизические – теплопроводность и теплоемкость лежат в широком диапазоне значений от аномально малых до аномально высоких;

– химические – широкий спектр химических реакций с различными веществами; растворимость в растворителях; возможность замены или достраивания в решетку отдельных атомов; возможность построения наноструктуры атом за атомом; выдающиеся абсорбционные свойства;

– оптические – нанотрубки обладают электронной эмиссией, что позволяет строить на их основе излучающие приборы, например, сверхтонкие дисплеи; при облучении или освещении нанотрубки меняют свое сопротивление или геометрические размеры, что создает предпосылки получения сверх малых фотоприемных устройств с высоким разрешением. Обнаружена способность нанотрубок воспламеняться при облучении их видимым светом.

Связи между атомами углерода в графитовом листе являются самыми сильными среди известных, поэтому бездефектные углеродные трубки на два порядка прочнее стали и приблизительно в четыре раза легче. Одна из важнейших задач технологии в области новых углеродных материалов заключается в создании

нанотрубок «бесконечной» длины. Из таких трубок можно изготавливать легкие композитные материалы предельной прочности для нужд техники нового века.

Модуль Юнга УНТ колеблется от 1,28 до 1,80 ТПа, а у стали $E=0,21$ ТПа, т. е. модуль Юнга УНТ почти в десять раз больше, чем у стали. Несмотря на высокую жесткость, из-за малой толщины нанотрубки она очень упруга при изгибе. Отклонение Δz пустого цилиндрического стержня длиной l , с внутренним радиусом r_1 и внешним r_0 – под действием силы F , приложенной к концу перпендикулярно оси трубки, равно:

$$\Delta z = \frac{Fl^3}{3EI'}$$

где I – момент инерции сечения стержня, равный $(r_0^4 - r_1^4) \cdot \pi/4$.

Толщина стенки нанотрубки составляет примерно 0,34 нм и $r_0^4 - r_1^4$ очень мало. УНТ гнется легко, но не ломается при изгибе, и выпрямляется без повреждений. Большинство материалов ломается при изгибе из-за присутствия дефектов, таких как дислокации и границы зерен. Так как стенки УНТ имеют мало структурных дефектов, этого не происходит. Другая причина того, что они не ломаются, состоит в том, что углеродные кольца стенок в виде почти правильных шестиугольников при изгибе изменяют форму, но не рвутся. Это является уникальным следствием того факта, что углерод-углеродные связи sp^2 гибридизированы и могут перегибридизироваться при изгибе. Степень изменения и коэффициенты s - p смешивания зависят от того, насколько изогнуты связи [74].

Предел прочности однослойной УНТ составляет 45 ГПа, в то время как стальные сплавы разрушаются при 2 ГПа. Таким образом УНТ примерно в 20 раз прочнее стали.

Известно, что в кристаллическом графите проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных материалов и, напротив, в направлении перпендикулярном листу, мала. Поэтому ожидается, что электрические провода из

нанотрубок, при комнатной температуре будут иметь электропроводность на два порядка выше, чем медные. Дело за технологией, позволяющей производить трубки достаточной длины и в достаточном количестве, а также способах образования монтажных соединений.

Структура нанотрубок описывается двумя целыми числами (m, n) , указывающими координаты шестиугольника, который в результате сворачивания плоскости должен совпасть с шестиугольником, находящимся в начале координат. Некоторые из таких шестиугольников вместе с соответствующими обозначениями отмечены на рис. 1.8.

Хиральность состоит в указании угла между направлением сворачивания нанотрубки и направлением, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону.

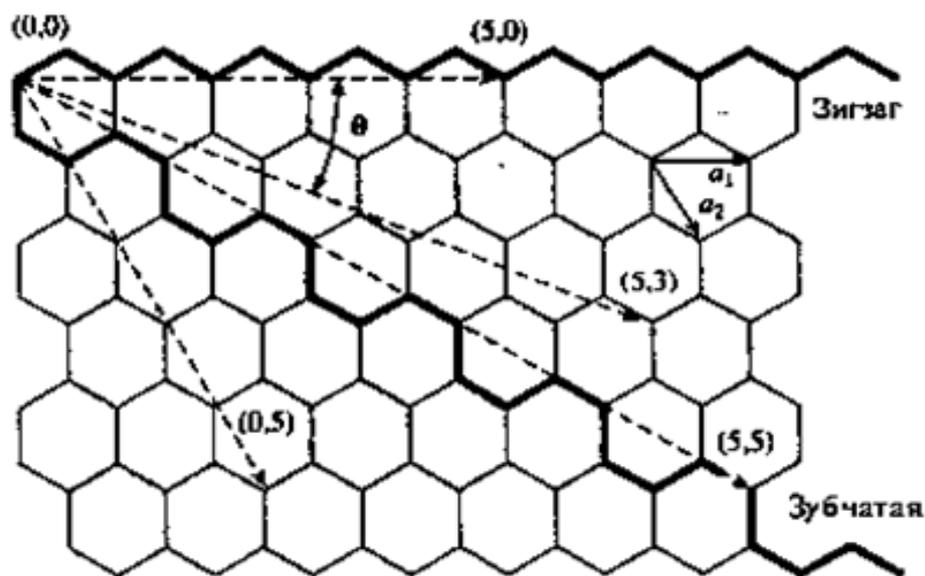


Рисунок 1. 8 – Часть графитовой плоскости, сворачивание которой в цилиндр приводит к образованию однослойной нанотрубки

Многослойные нанотрубки отличаются от однослойных значительно более широким разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и в поперечном направлении.

1.2.3 Ферромагнитные жидкости

Ферромагнитные жидкости представляют собой коллоиды из магнитных наночастиц (диаметром около 10 нм), покрытых поверхностно активным веществом (ПАВ) и взвешенных в каком – либо носителе (дисперсионной среде). ПАВ обеспечивает стабильность коллоида, а в качестве носителя может использоваться трансформаторное масло, вода или керосин.

Наночастицы ведут себя как полностью независимые постоянные магниты, поэтому полная намагниченность такой ферромагнитной жидкости равна нулю до тех пор, пока к ней не прикладывается магнитное поле.

Поведение коллоида в магнитном поле определяется характером поля. Например, во вращающемся магнитном поле наночастицы начинают вращаться, вовлекая в свое движение и жидкость – носитель.

Принципиальное отличие ферромагнитных наножидкостей от обычных жидкостей состоит в том, что внутри этих жидкостей при наличии поля возникают объемные и поверхностные силы, а также связанные с ними вращающие моменты, в результате чего наблюдаются необычные гидромеханические явления [74].

Магнитное манипулирование наночастицами в ферромагнитных жидкостях создает уникальную возможность дистанционного регулирования их параметров (давления, вязкости, электро-, теплопроводимости и оптической проницаемости).

Обычно в качестве ферромагнитных жидкостей используются частицы магнетита Fe_3O_4 . Ферромагнитные жкости уже коммерчески используются в нескольких приложениях [75].

В одном из них жидкость используется для герметизации щели между вращающимся валом и поддерживающей его опорой (рис. 1.9).

Уплотнение между вращающимся валом из материала с высокой магнитной проницаемостью и неподвижными полюсами постоянного магната состоит из нескольких капель ферромагнитной жидкости в промежутке между шпинделем и втулкой, в качестве которой используется цилиндрический постоянный магнит. Жидкость образует вокруг оси непроницаемое кольцо, не вызывающее, однако, заметного трения.

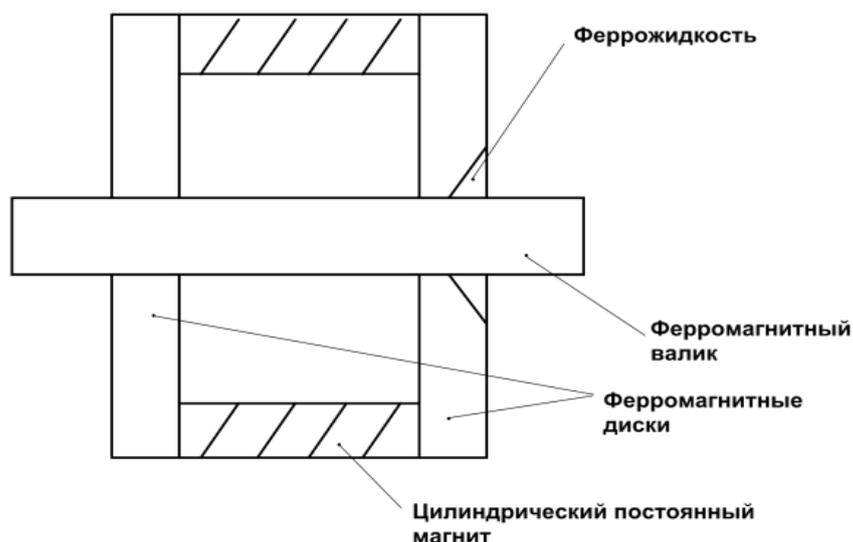


Рисунок 1. 9 – Ферромагнитная наножидающая в качестве вакуумной заслонки

Аналогичные уплотнения используются в акустических динамиках для демпфирования мембраны, оборудовании для выращивания полупроводниковых кристаллов, устройствах для получения ЯМР-изображения и компьютерной сканирующей томографий. Анизотропия оптических свойств ферромагнитных жидкостей зависит от магнитного поля, что используется в магнитоуправляемых оптических переключателях и дифракционных решетках.

Когда линейно поляризованный свет падает на пленку ферромагнитной жидкости, находящейся в магнитном поле, он выходит с другой стороны пленки эллиптически поляризованным. Это называют эффектом Коттона-Мутона. Он может быть положен в основу оптических переключателей.

Магнитное манипулирование наночастицами в ферромагнитных жидкостях создает уникальную возможность дистанционного регулирования их параметров (давления, вязкости, электро-, теплопроводности и оптической проницаемости).

1.2.4 Керамика

Керамические материалы обладают многими важными свойствами, определяющими их роль в материаловедении и электронике. Огнеупорность,

износостойкость, твердость, прочность, иногда и пористость делают их незаменимыми во многих применениях.

Керамикой часто являются оксиды – структуры, в которых один из атомов является кислородом. Керамические материалы построены из нескольких типов атомов.

Керамика обычно является электроизоляционным материалом. При очень сильном охлаждении некоторые керамические материалы имеют свойства сверхпроводников.

Материалы с порами менее 2 нм относятся к микропористым, от 2 до 5 нм – мезопористым, а более 5 нм к макропористым структурам. Высокопористые керамические материалы используются для протезирования костей, керамических фильтров.

Нанофазные керамические материалы позволяют изготавливать горячей штамповкой изделия готовой формы с размерами, определяемыми параметрами штампа, без дополнительной механической обработки. Нанопорошки керамики и керметов, выпускаемые в промышленном масштабе, могут использоваться в качестве износостойких покрытий металлообрабатывающих инструментов, наносимых методом термического напыления.

Известно об использовании биокерамических фильтров из пористой керамики, заселенной бактериями, для поглощения быстро и в больших количествах урана из воды, просачивающейся сквозь керамику. Поглощается от 86 до 99% урана. Уран для бактерий не ядовит, т. к. в их клетках имеется белок, связывающий этот тяжелый металл. Известны радиационноустойчивые виды керамики, огнеупорные, сверхтвердые, сверхпрочные, с высокой теплопроводностью и др.

Большинство рассмотренных выше групп материалов, начиная с кремния, нитрида кремния и др. могут выполнять функции конструктивных деталей и узлов МЕМС.

Керамика в виде цеолитов применяется для направленного катализа в среде химического синтеза и химического машиностроения. Его можно использовать при

переработке нефти для более эффективного использования сырья и получения меньшего количества отходов [76].

1.2.5 Полимерные материалы

Области использования полимеров постоянно расширяются. По прогнозам [77] вскоре появятся жесткие диски на полимерах с тепловой записью информации. Наряду со стеклами полимеры используются в волоконной технологии МЭМС [78]. ПММА – полиметилметакрилат, материал входящий во многие составы фоторезистов, позволяет получать 3D-компоненты на кремниевых подложках.

Полимеры состоят из большого числа однотипных молекул – мономеров. Различают природные, искусственные и синтетические полимеры [79]. В свою очередь они могут иметь различные размеры, определяемые степенью полимеризации n – числом звеньев в цепи.

Если $n=10...20$, вещества представляют собой легкие масла. С увеличением n повышается вязкость, вещество становится воскообразным. При $n \approx 1000$ образуется твердый полимер. Степень полимеризации неограничена. При $n \approx 500...1000$ образуются короткие цепочки – олигомеры, обладающие низкой вязкостью. Часто используются для пропитки, приклеивания.

Для получения полимеров используются следующие методы: термическая, фотополимеризация, электрохимическая, вакуумная, СВЧ, лазерная, стереополимеризация и др.

Полимеры используются в качестве фоторезистов, клеев, а также для пропитки, заливки, обволакивания, функциональных слоев и корпусов приборов. Кроме этих традиционных функций, разработаны различные аналоги механических и электрических компонентов на основе полимеров.

Различают два основных метода синтеза полимеров: полимеризация и поликонденсация. При полимеризации молекулы просто присоединяются одна к другой. Мономеры в этом случае при включении в полимер сохраняют свою первоначальную структуру. Поликонденсация – процесс образования полимеров, при котором соединение исходных мономерных молекул сопровождается

выделением простых веществ, таких как HCl , H_2O , NH_3 и др. В этом случае повторяющиеся звенья полимера и исходные мономеры не являются химически идентичными.

Полимеры могут образовывать короткие цепи, длинные цепи, длинные ветвящиеся цепи, звездные структуры, сетчатые структуры, объемные 3-D структуры.

Для процессов фотолитографии МЭМС и НТ важен механизм фотополимеризации. Технология фотополимеризации обладает следующими достоинствами:

- высокой скоростью процесса и, следовательно, его большой производительностью;
- простотой, экономичностью, возможностью автоматизации;
- процесс не требует высоких температур нагрева;
- низким потреблением энергии;
- экологичностью, благодаря малым выбросам органических веществ;
- низкой стоимостью оборудования.

Специальный негативный фоторезист SU-8 разработан для систем с очень толстыми слоями, имеющих высокие аспектные отношения (>20). Фоторезист относится к эпоксидным смолам. Фоторезист экспонируется УФ лучами, широко используется для изготовления таких микромеханических элементов как шестеренки, катушки индуктивности, консоли и бороздки, мембраны. В сочетании со стереолитографией применяется для получения 3D систем из полимерных материалов [80].

1.2. 6 Фотонные кристаллы

Фотонные кристаллы – трехмерные суперрешетки или материалы с фотонной запрещенной зоной – трехмерные наносистемы, в которых обнаружены квантоворазмерные и другие наноэффекты, такие как, например, нелинейное взаимодействие между индивидуальными нанокластерами электронной подсистемы.

Разработана технология изготовления правильных кубических упаковок

монодисперсных наносфер SiO_2 и заполнения межсферического пространства полупроводниками, сверхпроводниками оптически усиливающими, ферромагнитными и другими материалами [81]. Фотонные кристаллы – это новый класс диэлектриков, в которых осуществляется формирование и контроль электромагнитных излучений на микроскопическом уровне.

Последнее свойство определяется новым фундаментальным оптическим явлением, обусловленным эффектом локализации оптических мод, что приводит к запуску спонтанной эмиссии в определенных случаях, формированию зонных состояний, снижению порогов нелинейных явлений, лазерной генерации.

Применение опаловых матриц в качестве подложек позволяет увеличить облучаемую поверхность полупроводниковой структуры при том же объеме устройства. Следует отметить, что в 1 см^3 опаловой матрицы с диаметром наносфер SiO_2 , равным 200 нм , суммарная поверхность составляет 10 м^2 . Локализация света приводит к подавлению спонтанной эмиссии, формированию зонных состояний, низкопороговым нелинейным явлениям, к низкопороговому переключающему действию коллектива атомов.

Легированный материал с фотонной запрещенной зоной может быть использован как ультрабыстрый оптический переключатель и оптический транзистор. В этом случае переход между режимами поглощения и усиления может управляться слабым вторым лазерным полем (в фазе и в резонансе с основным полем накачки).

Фотонные кристаллы обычной пространственной размерности – одномерные дифракционные решетки (1D), двумерные матрицы неоднородностей – слои (2D) и трехмерные кристаллы (3D) – по сути своей статичны.

Применение динамических неоднородностей в структуре кристалла позволяет добавить еще одну размерность – время. Таким образом, задание закона изменения во времени оптических свойств элементов фотонного кристалла позволяет получить среду для фиксации полной пространственно-временной передаточной функции объекта.

Кроме того, поведение во времени оптических свойств элементов фотонного кристалла может зависеть от пространственного распределения электромагнитного поля (света) в нем.

В фотонных кристаллах, зачастую являющихся существенно нелинейными оптическими средами, способны возникать явления самоорганизации структурных неоднородностей, что может означать принципиальную возможность функциональной самоорганизации кристалла как устройства.

1.2.7 Дезоксирибонуклеиновая кислота

Кроме синтетических, существуют биологические полимеры – молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), хранящие генетическую информацию (ДНК и РНК – нуклеиновые кислоты), белки, углеводы и полисахариды.

Существует четыре больших класса биологических молекул. Первые три – нуклеиновые кислоты, белки и углеводы.

Четвертый класс биологических молекул состоит из очень малых молекул. В их число входит вода, кислород, диоксид углерода и оксид азота. Вода необходима для функционирования практически всех биологических организмов, кислород является основным источником энергии, двуокись углерода служит сырьем для построения растений, а окись азота выполняет в биологии много функций – от обеспечения внутриклеточной системы связи до участия в функции сокращения.

Существуют и другие молекулы, важные в биологических приложениях: простой сахар, все молекулы медикаментов. Лекарства обычно действуют, связываясь либо с белком, либо с ДНК и вызывая изменения в функциях этих структур.

Биологические клетки содержат внутри себя совершенные «молекулярные двигатели» F_1 – АТФазу с размерами менее 10 нм, являющихся хранителями и переносчиками энергии по биологическим объектам.

Из четырех основных полимерных биологических структур: нуклеиновых (ДНК – дезоксирибонуклеиновых и РНК – рибонуклеиновых) кислот, белков, углеводов (полисахаридов) и «малых молекул» особое место в НТ играют ДНК.

ДНК является уникальной молекулой и выглядит как двойная спираль.

Составляющие их молекулы располагаются на двойной спирали в определенном порядке и кодируют все биологические функции живого организма. Многие биологические процессы протекают на наноуровне.

Ряд химических процессов, а также биохимических с ДНК цепочками позволяют создавать интеллектуальные материалы.

Структура материалов, состоящих из ДНК, может быть выверена с молекулярной точностью. Спираль ДНК диаметром примерно в 2 нм делает полный оборот (шаг спирали) за 3,5 нм (рис. 1. 10).

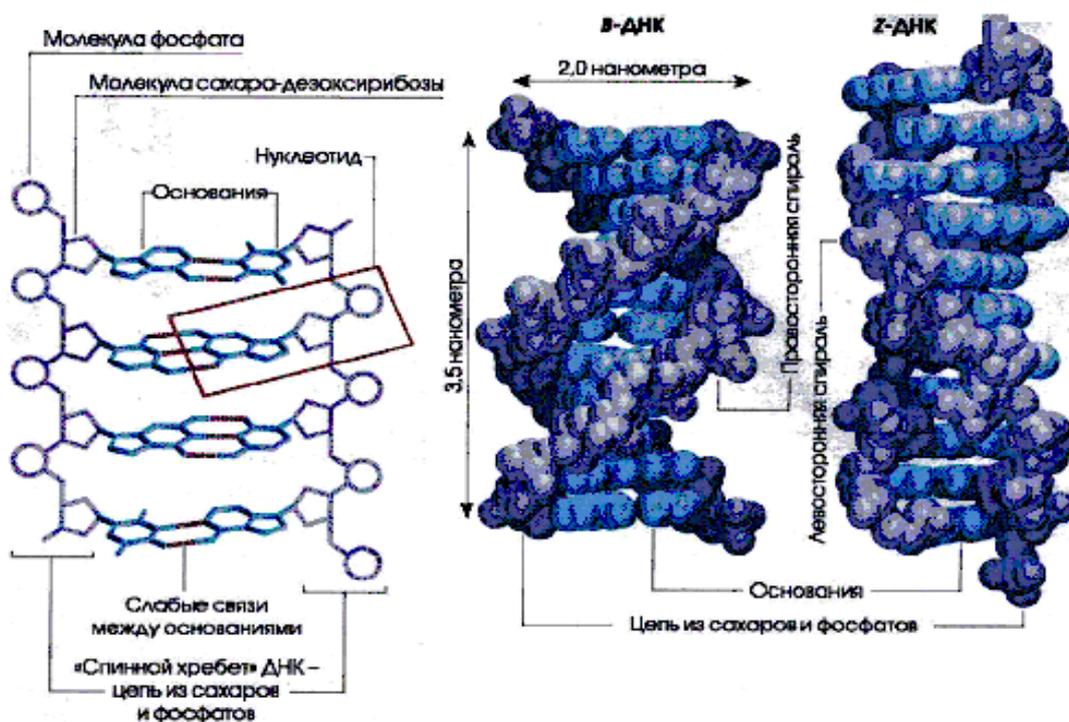


Рисунок 1. 10 – Двойная спираль структуры ДНК

ДНК может иметь одно из четырех строений (АТ, ТА, ЦГ, ГЦ). Для каждого положения в цепи можно контролировать, какая комплементарная пара присутствует, так как они образуются из набора всего четырех молекул, которые называются аденином (А), тиминном (Т), гуанином (Г) и цитозином (Ц). А и Т подходят только друг к другу и не подходят ни к Г, ни к Ц. Г и Ц также подходят

только друг к другу и не подходят ни к А, ни к Т. Таким образом, единственными возможными парами являются АТ и ГЦ и противоположные им – ТА и ЦГ.

Генетический код – это просто упорядоченные комплементарные пары в двойной спирали ДНК, и это – код, который считывается РНК и белками, которые используют эту информацию для создания белковых биологических структур, составляющих основу жизни.

ДНК цепи можно запрограммировать так, чтобы они самособирались в необходимые структуры. Они могут поддерживать электронные устройства молекулярных размеров или использоваться для создания материалов с точно заданными молекулярными конфигурациями.

Машины из ДНК могут совершать движения, которыми можно управлять химическим путем или при помощи специальных цепей ДНК (рис. 1.11).

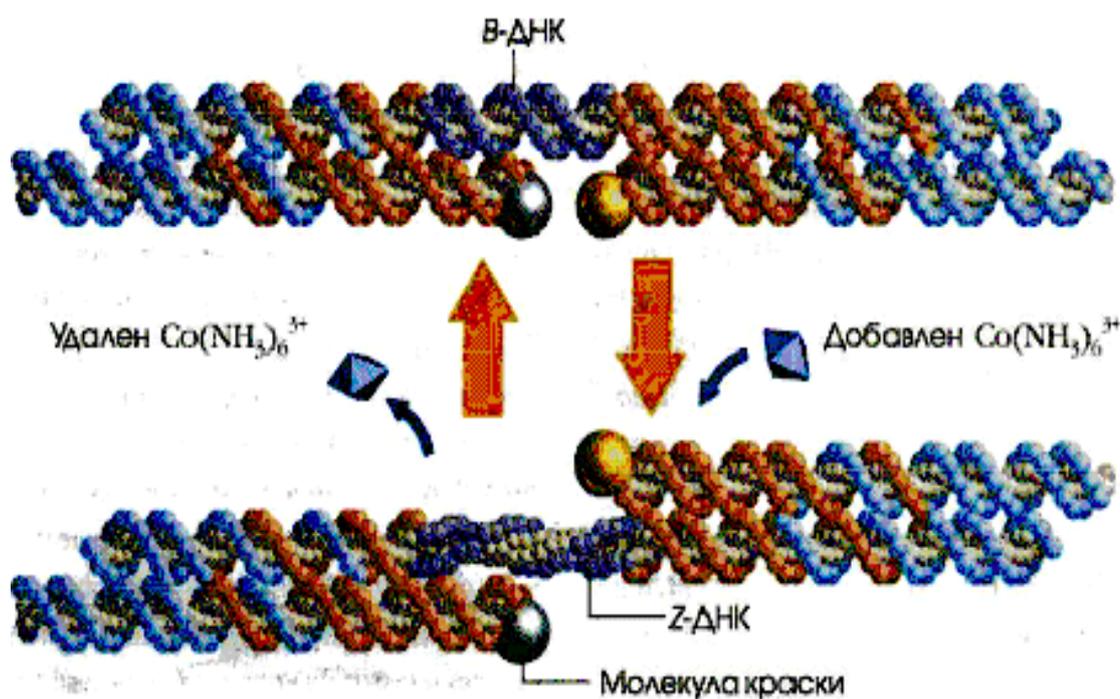


Рисунок 1. 11 – Машины из ДНК, совершающие движения

Наномеханическое В-Z устройство, которое демонстрирует управляемое движение, состоит из двух блоков ДХ, соединенных «валом» из 20 пар оснований. В состоянии В (сверху) «вал» – это обычная правосторонняя спираль В-ДНК, и обе ДХ-молекулы находятся по одну сторону «вала». Когда к раствору добавляется

гексамин кобальта, «вал» преобразуется в левостороннюю Z-ДНК и DX-блоки поворачиваются на 3,5 оборота относительно друг друга, оказываясь по разные стороны от «вала» [147].

Из ДНК можно строить трехмерные структуры. ДНК управляется с помощью ферментов расщепления, раскалывающих ДНК в нужных местах, которые катализируют соединение двух молекул ковалентными связями (рис. 1. 12). Синтез выполняется средствами биотехнологической промышленности.

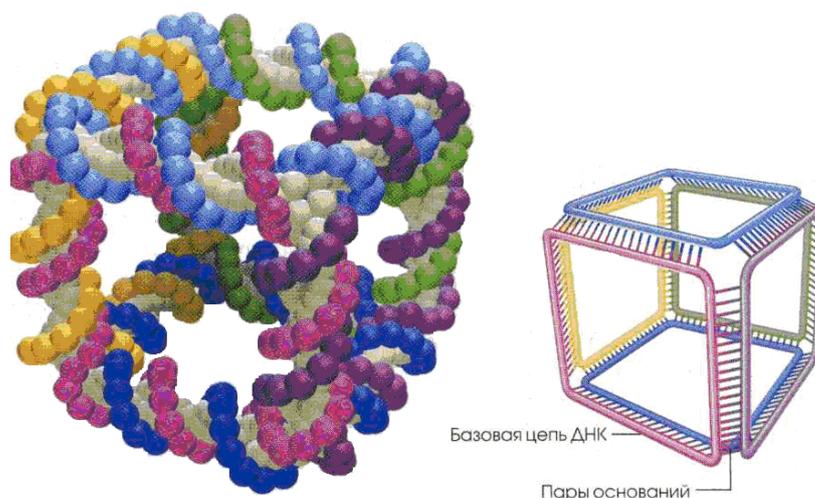


Рисунок 1. 12 – Трехмерная ДНК-структура

1.2.8 Интеллектуальные материалы

Способность работать на атомном и молекулярном уровне дает возможность создавать новые, «интеллектуальные» материалы, т. е. материалы, обладающие в статическом или динамическом режиме свойствами самовосстановления, распознавания, разделения, саморепликации, катализаторов, нанокompозитов с несколькими особенностями.

Интеллектуальные материалы могут работать статически или динамически, то есть постоянно сохраняя определенные свойства, или меняя их в зависимости от изменения окружающей среды или воздействий на материал [76].

Так, фторопласт постоянно сохраняет свойства низкого сцепления (адсорбции и трения), то есть является статическим интеллектуальным материалом, а покрытие

самолетов-невидимок «Стеллс» меняют электромагнитные свойства и цвет при воздействии на него внешнего облучения, то есть реагируя динамически.

Практически все биологические структуры являются интеллектуальными материалами, обладая какими-либо свойствами самовосстановления, развития, самоорганизации, репликации, метаболизма, распознавания.

Наноскопическим примером самовосстановления может быть биологическая мембрана, самовосстанавливающаяся в наномасштабе. Подобное свойство можно встроить во многие материалы, например, полимеры.

Самовосстановление тела после порезов, кровеносных сосудов в биологических объектах может имитироваться и в синтетических средах.

1.3 Технологии МЭМС

В настоящее время уже определился ряд типовых технологических методов изготовления МЭМС, которые используют достижения различных отраслей техники и представлены в приложении В.

Среди этих методов, в первую очередь необходимо отметить распространение традиционной полупроводниковой КМОП-технологии на изготовление микроэлектромеханических устройств на кристаллах кремния с использованием подложки одновременно как конструкционного материала для механических деталей и сборочных единиц и как материала для электронных схем. Но если в обычной полупроводниковой технологии структура материала изменяется лишь в поверхностном слое, то для МЭМС необходимы трехмерные (3D) структуры, которые вызывают необходимость совершенствования стандартных процессов. Такие технологические процессы можно характеризовать как направление «сверху-вниз» [82], т. е. от больших размеров к меньшим за счет улучшений исходной технологии.

Все методы можно отнести к одному из следующих классов (приложение Г):

– объёмной обработке с получением высокого аспектного отношения глубины к латеральным размерам;

- поверхностной обработке;
- смешанной технологии, использующей первые две;
- гибридной технологии со сборкой механических и электронных частей, в том числе на уровне атомно-молекулярного сращивания;
- прочие (волоконные, микромеханической обработки, объемные полимерные);
- многослойные плёночные структуры.

К объемным технологиям относятся: LIGA, SLIGA, AMANDA, HARM, LPCVD.

Поверхностные процессы используются с MUMPS, SUMMIT, SUMMIT-V, IMEMS.

Смешанные технологии SCREAM, HARPSS.

Известно около 20 методов изготовления МЭМС – изделий с использованием полупроводниковых технологий и их количество непрерывно увеличивается. Перечислим наиболее известные методы:

- LIGA – Lithographic, Galvanofornung, Abformung (литография, гальваника, формовка (литье));
- SLIGA – Sacrificial LIGA, LIGA с жертвенным слоем;
- MUMPS – Multi User MEMS Process Silicon, универсальные процессы для МЭМС;
- SEIMS – Sandia Embedded Integrated, встраиваемые интегрированные МЭМС фирмы Sandia National Laboratory;
- SUMMIT – Sandia Ultra – Planar Multi-layer MEMS Technology;
- HARM – High Aspect Ratio Machining, обработка (с обеспечением) высокого аспектного отношения (глубины к латеральным размерам);
- HARPSS – High Aspect Ratio Polysilicon Silicon, обработка структур поликремний – кремний с обеспечением высокого аспектного отношения;
- SEM – Simultaneously Electroplating Machining;
- SCREAM – Single Crystal Reactive Etching and Metallization – вертикальное объемное травление кремния с металлизацией, которая является комбинацией

анизотропного и изотропного плазменного травления;

- LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition, ХОГФ;

- iMEMS – integrated MEMS (система ЧЭ датчиков и схема обработки сигналов изготавливается на одном кристалле;

- LIGA+SEB – LIGA плюс Selective Electroplate Bonding сборка-монтаж методом селективного электроосаждения и сборки;

- EDM – Electrical Discharge Machining, электроэрозионная обработка;

- RiE – Reactive Ion Etching (реактивно-ионное травление);

- AMANDA – Abformung, Oberflächen mikromechnik, Membranübertragung (микрообработка, литье и перемещение диафрагмы. Эта технология объединяет LIGA – технологию (или прецизионную обработку и микрообработку кремния).

Объемная обработка заключается в выборочном удалении кремния с одной стороны подложки для формирования мембран, бороздок, отверстий и других структур.

Объемные МЭМС – технологии позволяют получать структуры до 2 мм при латеральных размерах элементов порядка несколько микрон.

Объемные методы обработки кремния нашли широкое применение при изготовлении различных микроструктур: датчиков давления, кремниевых акселерометров, объемных микромеханических деталей с использованием литографии мощными рентгеновскими источниками излучения – синхротронами (технологии LIGA, SLIGA), и методами травления, включающими жидкостные методы изотропного и анизотропного травления, плазменного и реактивно ионного травления (RIE- reactive ionic etching, DRIE – Deep Reactive Ionic Etching).

К объемным относятся так же методы соединения частей внутри микросхемы методами анодной, прямой термокомпрессии и термокомпрессии с промежуточным слоем.

К числу объемных технологий относятся методы микростереолитографии сфокусированным лазерным лучом с поперечными размерами порядка 1мкм на поверхности полимерного материала (например, смолы) для инициализации полимеризации [83].

Трёхмерная структура формируется последовательным сканированием слой за слоем материала.

Двухфотонная микростереолитография реализуется двумя лазерными лучами (расщеплённым лучом, фокусируемым в заданной точке объёма) с точностью позиционирования по осям $X, Y - 0,3$ мкм, $Z - 0,5$ мкм [84].

Технологии интегральных тензопреобразователей [11] применяются для производства большинства датчиков давления и кремниевых клапанов и акселерометров.

При помощи этих технологий можно получать микроструктуры толщиной от долей микрометра до 200...500 мкм с поперечными размерами от долей микрона до величины ширины/длины самой дорожки.

Поверхностные технологии МЭМС используют процессы массового производства ИС, которые включают нанесение или удаление двухмерных слоев на подложках методами литографии и химического травления. В результате 3D-структура МСТ получается по шаблонам 2D-слоев. Дополнительные слои получают в виде тонких пленок после травления (стравливанием) жертвенных (защитных) дистанционирующих слоев. Потенциальная сложность различных МЭМС, получаемых добавлением независимых структурных слоев, показана на рис. 1. 13 [183 –187].

В процессах поверхностной обработки подложка используется как основа, на которой что-то должно строиться. На подложку (обычно кремниевую) наносятся тонкие пленки, которые образуют структурные слои, либо служат для получения промежутка между элементами конструкции, для чего они позднее удаляются и называются жертвенными слоями. Следовательно, в процессе используются пленки 2-х различных материалов. Для структурных слоев обычно используют МКК, поликристаллический кремний, нитрид кремния или алюминий, для жертвенных слоев, наносимых либо на любые открытые участки или на отдельные механические структуры, где необходимо, обычно используется двуокись кремния.

Эти слои (или тонкие пленки) наносятся и затем травятся сухим способом, после чего окончательно мокрым травлением удаляется жертвенный слой для

получения окончательной структуры.

Каждый дополнительный слой приводит к повышению уровней сложности и трудоемкости производства.



Рисунок 1. 13 – Сложность МСТ-устройств, определяемая структурными слоями

На рис. 1. 14 приведена типовая схема процесса изготовления балочного кантилевера с использованием технологии поверхностной обработки. Здесь жертвенный слой SiO_2 наносится на кремниевую подложку с применением шаблона и фотолитографии. Затем наносится поликремниевый слой и через маску производится его реактивное ионное травление для получения балки кантилевера и контактной площадки.

Подложка подвергается травлению мокрым способом для удаления жертвенного слоя в местах разъединения и с сохранением опоры консоли кантилевера на подложке.

Кроме того, для получения микромеханических деталей используются следующие методы: микрообработка фрезерованием, алмазная и микроэрозионная обработка, методы формовки (микролитье под давлением, штамповка, спекание) [85], волоконная технология [78], корпускулярно-фотонное формообразование (осаждение из газовой фазы – LPCVD, испарение,

фотостимулирование полимеризации, обработка ионным лучом) [87,88], 3D-МЭМС термокомпрессионная сварка [86], использование биологических объектов в качестве микромеханических деталей, вакуумная технология автоэмиссионных углеродных нанотрубок. Для получения механических наноструктур пригодны нанотехнологии с использованием наноимпринтинга [76], процессов химического распознавания, самоорганизации и самосборки [89], создания подвижных компонентов биологическими методами на основе ДНК-структур, использования оболочек углеродных, кремниевых нанотрубок и фуллереноподобных материалов [90] с их заполнением газами, жидкостями, твердыми веществами, фотонных кристаллов и др.

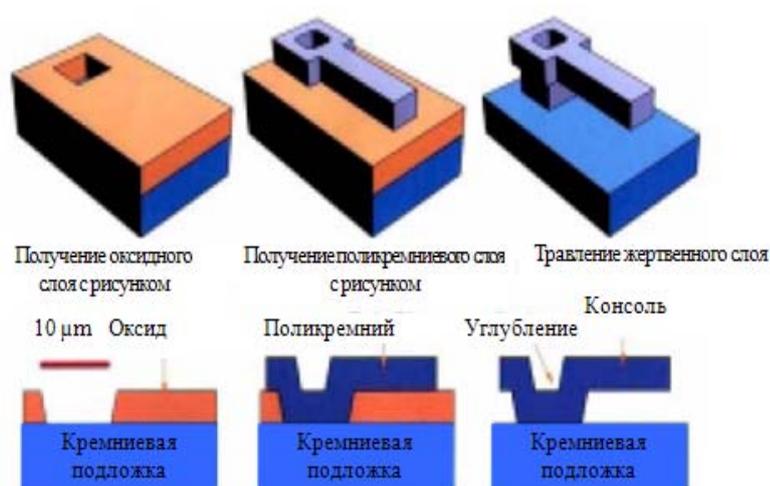


Рисунок 1. 14 – Процесс изготовления балочного кантилевера с использованием жертвенных слоев

Относительно методов получения МЭМС и НЭМС необходимо отметить перспективность только тех из них, которые обеспечивают групповое изготовление, а для НЭМС также самосборку, саморепликацию, самоорганизацию, распознавание, потому что только эти свойства могут обеспечить их массовое изготовление и низкие цены продукции.

Методы механической микрообработки дают возможность индивидуального изготовления элементов и могут использоваться лишь в таких областях как

аэрокосмическая, военная, где важны, прежде всего, габаритно-массовые характеристики, а не экономические показатели. Возможно их применение для изготовления инструмента и технологической оснастки.

При изготовлении формовочного инструмента по LIGA технологии возможно получение многоместных матриц и, соответственно, обеспечение группового литья сложных тонкостенных деталей из полимерных материалов: полиамидов, полибутилентерефталата, поликарбоната, полиэтилена, полиметилметакрилата (ПММА), полиоксиметилена, полипропилена, полифениленсульфона, полиэфиркетона, полиэфиримида. Гладкие поверхности стенок инструмента обеспечивает извлечение литых деталей из матриц, которые изготавливаются без литьевых уклонов.

Процессы осаждения из газовой фазы и газофазного травления, основанные на активации химических реакций сфокусированным электронным или лазерным лучом позволяют непосредственно создавать 3D микрообъекты сложной формы с субмикронным разрешением.

Процессы химического осаждения, основанные на использовании лазерного излучения в качестве источника энергии, называются лазерохимическими и относятся к наиболее управляемым и контролируемым.

При изготовлении керамических деталей из окиси алюминия, окиси циркония, нитрида кремния, пьезокерамики сначала льется ленточная заготовка, затем производится штамповка полуфабрикатов, удаление материала связки и конечная операция – спекание. Недостатками технологии является большая усадка и шероховатость поверхности.

Для формирования устройств микромеханики литьем используют толстые слои резиста ПММА, при обработке которых обычно применяют интенсивные рентгеновские пучки, получаемые в синхротронных источниках.

Существует два направления корпускулярно-фотонных технологических процессов (КФТП) [138]: локально-стимулированное наращивание (осаждение или полимеризация) и локально-стимулированное травление вследствие действия на материал концентрированного потока энергии (светового, электронного,

ионного лучей).

Основными направлениями стимулированного роста 3D структур сложной конфигурации является лазерное осаждение из газовой фазы и фотополимеризация. Используются криптоно-фторовые лазеры с длиной волны $\lambda=248$ нм. Длительность импульса десятые доли наносекунды, частота – около 2 кГц.

Волоконная технология развилась из технологии микроканальных пластин. До 60 – 70 % (и даже 90 %) объема полимерных или стеклянных структур составляют идентичные цилиндрические каналы диаметром от единиц до десятков микрометров.

Получены пластины с диаметром каналов и толщиной стенок между ними ~ 33 нм. При этом плотность каналов составляет $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Каналы структуры могут быть заполнены различными материалами (полимерами, металлами, полупроводниковыми, магнитными составами т. д.).

Суть волоконной технологии состоит в перетягивании пучка плотноспеченных волокон. Волокна изготовлены из двух марок стекла, которые значительно отличаются друг от друга растворимостью в водном растворе *HCl*. Масштаб перетягивания (см. рис. 1. 15 и 1. 16) не превышает соотношения 1:20 и может повторяться многократно.

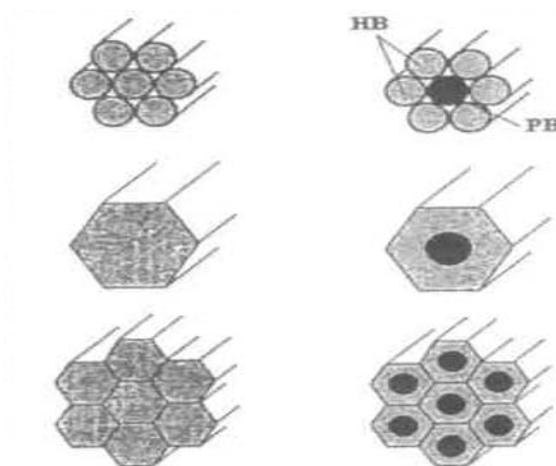


Рисунок 1. 15 – Варианты упаковки волокон в пучок

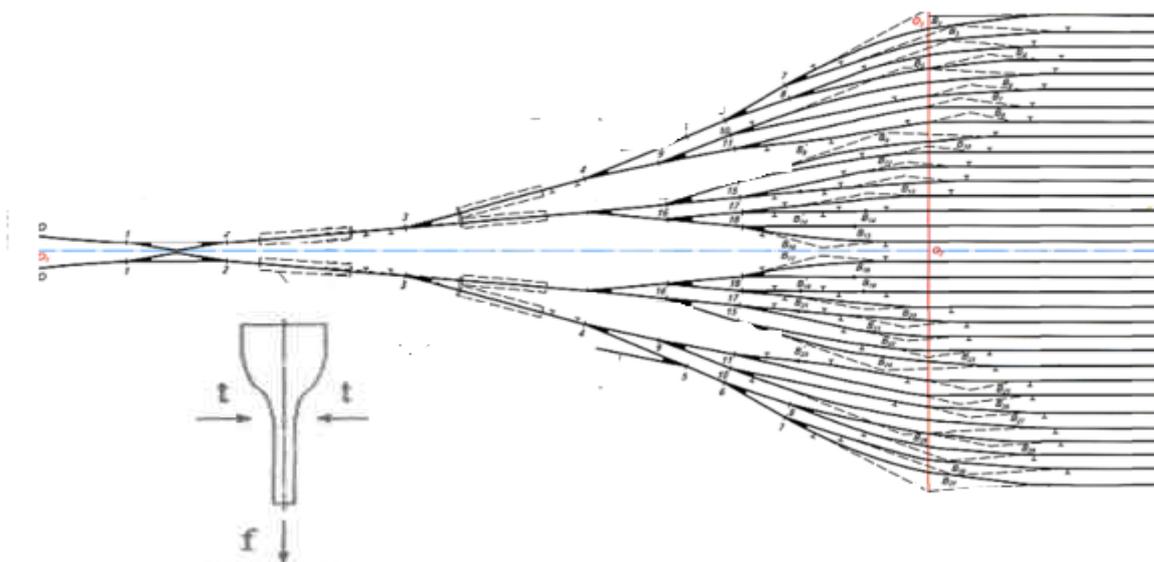


Рисунок 1. 16 – Перетяжка пучка

Технология волоконных МЭМС может обеспечивать перетягивание в одном цикле геометрически подобных микроструктур с множеством типоразмеров волокон; возможность интегрального и группового изготовления изделий одновременно; перетянutoму пучку можно придать сложную 3D геометрию (рис. 1. 17 и рис. 1. 18).

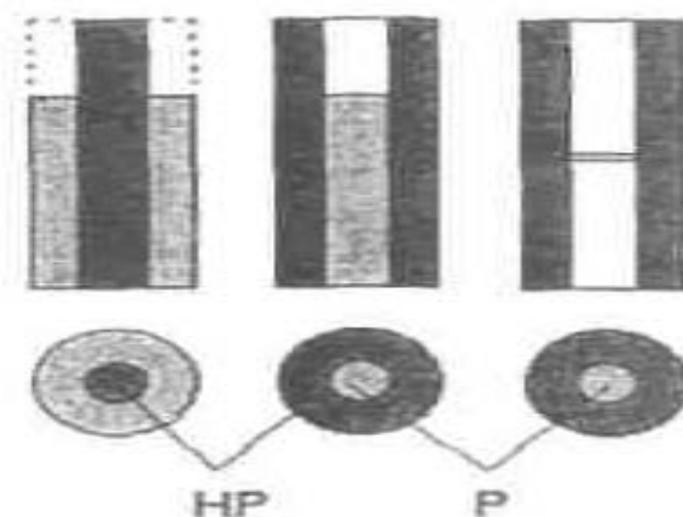


Рисунок 1. 17 – Получение объемных элементов типа «штырь», колодка, мембрана

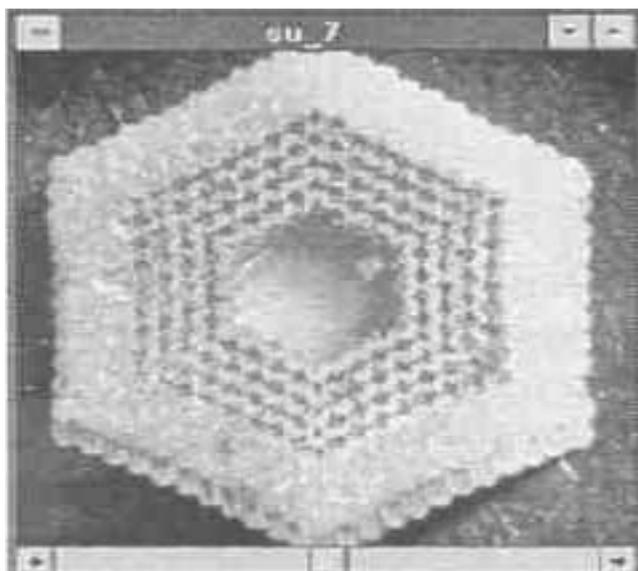


Рисунок 1. 18 – Многовитковая спиральная обмотка

По этой технологии могут изготавливаться электродвигатели, летательные аппараты, солнечные батареи и множество других микроструктур с высоким отношением объема отверстий к общему объему конструкции.

Волоконная технология не требует помещений с контролируемым микроклиматом, не нужны специалисты высокой квалификации.

Существуют три метода термокомпрессионной сварки кремниевых пластин для изготовления 3D-МЭМС:

- анодная термокомпрессия – процесс взаимной приповерхностной диффузии частиц пластин кремния и пирекса (боросиликатное стекло с 3,5% окиси натрия) под действием приложенного напряжения и механического давления (рисунок. 1.19);

- прямая термокомпрессия – спекание двух плотносоединенных кремниевых пластин, одна из которых имеет гидрофильную, а вторая гидрофобную поверхности, что обеспечивает хороший контакт перед высокотемпературным спеканием (1000°C);

- термокомпрессия с промежуточным слоем в виде эвтектики низкотемпературного стекла (температура плавления 363°C при содержании в эвтектике 2,85 % Si и 97,15 % Au).

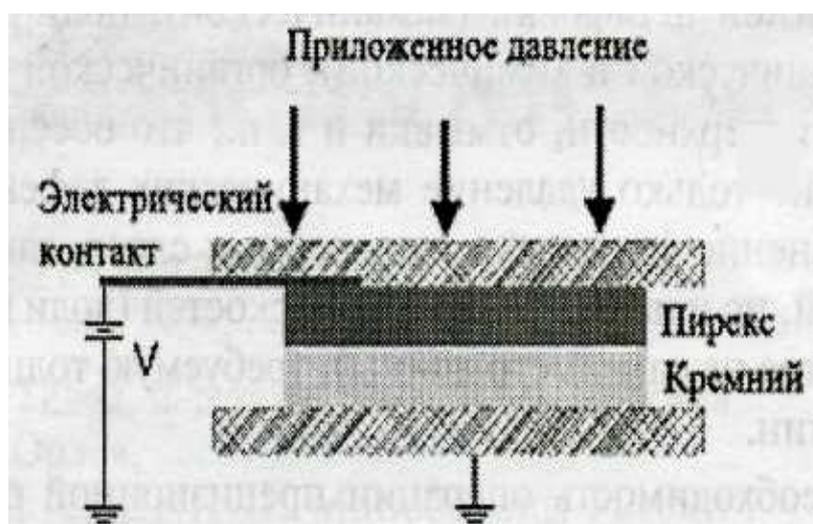


Рисунок 1. 19 – Анодная термокомпрессия

При применении термокомпрессионной сварки необходимо анализировать совместимость процесса технологией изготовления электронной системы управления.

Этот метод открывает возможности изготовления гибридных МЭМС и корпусов готовых изделий. Сварка является ключевой операцией производства МЭМС в объеме кремния или в приповерхностных слоях поликремния. Она представляет широкие возможности массового производства компонентов МСТ, как микромеханических так и электронных. С использованием этой технологии изготавливаются сенсоры ускорения, резонансные гироскопы, датчики давления, в том числе для автомобильных систем управления подачей топлива.

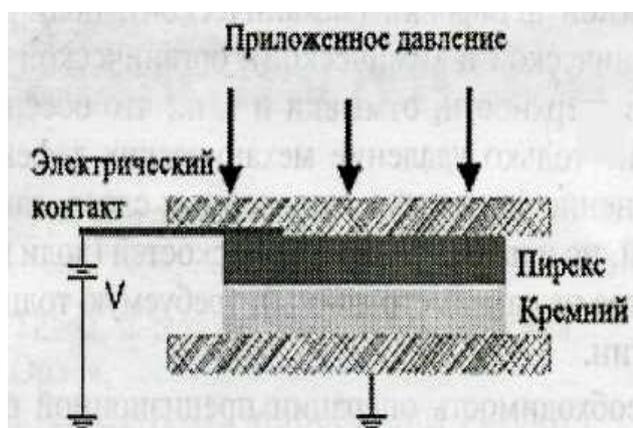


Рисунок 1. 20 – Анодная термокомпрессия

Кроме того, под действием сильного электрического поля ионы кислорода высвобождаются из пирекса и мигрируют в область раздела «пирекс-кремний». Окисление кремния формирует слой SiO_2 , чем и заканчивается термокомпрессия пластин.

Высокий отрицательный потенциал электрода вызывает миграцию ионов Na^+ к нему и их нейтрализацию. На границе раздела «кремний-пирекс» образуется область электрического заряда, который определяет силу электрического притяжения во всей площади контакта. Нагрев перехода до $+500\text{ }^\circ\text{C}$ усиливает миграцию ионов, вызывая увеличение силы притяжения свариваемых пластин.

Процесс термокомпрессионной сварки требует прецизионной обработки поверхностей, обеспечения контакта по плоскости спекания.

Прецизионная обработка поверхностей кремния (после порезки слитков) и пирекса может включать полный набор операций шлифования (механического), полирования (механического и химического), очистка органическими растворителями, отмывки и т. д. Это обеспечивает удаление механических дефектов, физических повреждений слоев, загрязнений, а также параллельность поверхностей (доли $\mu\text{м}/\text{см}$ длины), необходимую толщину пластин.

Метод прямой термокомпресии обеспечивает спекание двух предварительно обработанных и плотно соединенных кремниевых пластин. Одна из них имеет гидрофобную, а другая гидрофильную поверхность, что обеспечивает хороший контакт перед высокотемпературным спеканием. Гидрофобная поверхность получается в результате предварительной высокочастотной обработки, которая упорядочивает структуру поверхности и обеспечивает притяжение и контактирование пластин.

Присутствие гидроксильных радикалов на зеркально отполированной кремниевой поверхности обеспечивает надежное схватывание пластин после контакта. Оно усиливается дополнительным прижимом в средней точке одной из пластин, чтобы создать исходную точку контакта в момент, когда механические распорки по краям обеспечивают отсутствие физического контакта между пластинами (рис. 1. 19).

Удаление боковых механических распорок вызывает «волну схватывания пластин», которая распространяется от середины к краям со скоростью, которая определяется вязкостью и давлением окружающей среды. Жесткое механическое схватывание кремниевых пластин после удаления распорок важно и для полного выдавливания воздушных прослоек между ними.

Последующее нагревание обезвоживает поверхность и стимулирует ряд новых процессов. Гидроксильные группы образуют молекулы воды, которые в свою очередь вызывают окисление поверхностей спекания кремниевых пластин и образование слоя *Si-O-Si*. При температуре спекания больше 1000°C кислород внедряется в кристаллическую решетку, что обеспечивает образование границы раздела, которая не отличается по физико-химическим свойствам от других составляющих всей кремниевой структуры.

Термокомпрессия с промежуточным слоем выполняется нанесением на пластины непосредственно перед спеканием эвтектики или стекла.

Важным в этом случае является контроль равномерности поверхностного взаимодействия компонентов в его начальной стадии и при температуре плавления.

Сплав формируется на границе раздела компонентов путем взаимного проникновения материалов и затвердевания после охлаждения.

Для обеспечения качественного спекания на всей площади кремниевых пластин производится их предварительная подготовка – удаление окисных пленок, которые могут мешать проникновению золота в кремний при формировании эвтектического слоя.

После нанесения пленки, содержащей золото (эвтектика), непосредственно перед спеканием образовавшуюся поверхность обрабатывают ультрафиолетом, чтобы удалить органические примеси, которые снижают качество поверхностного контакта.

Как и при анодной и прямой термоэмиссии к кремниевым пластинам прикладывается внешнее давление и создается необходимый температурный режим.

Сравнительно низкая температура образования эвтектического слоя делает метод термокомпрессии с использованием промежуточного слоя привлекательнее

других методов сварки, но, как и при анодном спекании, этого еще недостаточно для полной совместимости процесса с серийной технологией изготовления СБИС.

Этот метод пригоден для герметизации и корпусирования готового изделия.

Все перечисленные выше методы относятся к технологиям «сверху-вниз», а также, в основном, к «сухим технологиям» в противоположность химическим, биохимическим и биологическим процессам, которые создают компоненты, начиная с атомно-молекулярного уровня, и классифицируются как технологии «снизу-вверх» и мокрые технологии.

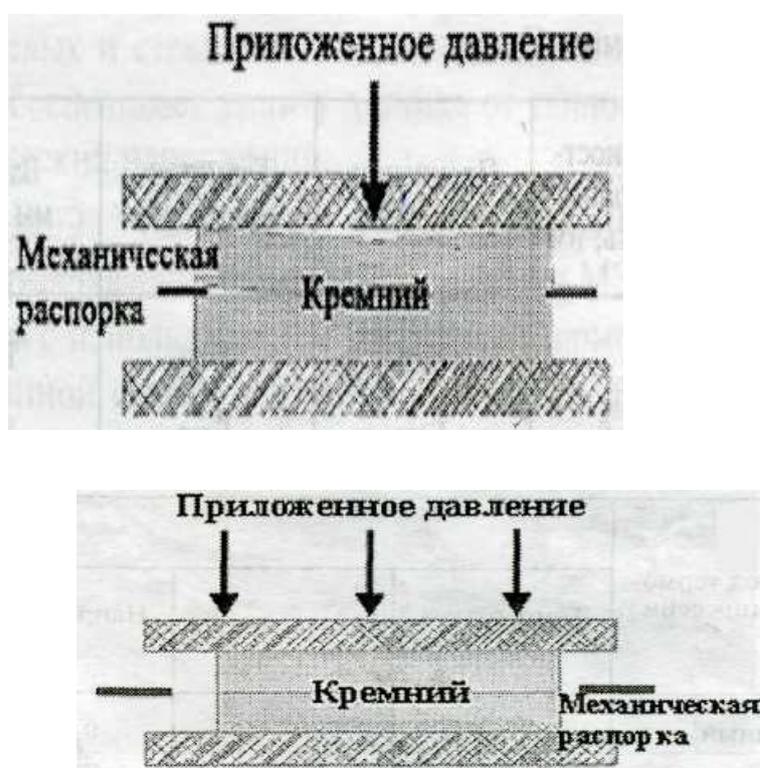


Рисунок 1. 21 – Начальная фаза сварки

Хотя такое деление и условно, но имеет принципиальные различия в методах изготовления и сборки. В современных промышленных технологиях основным является принцип «сверху-вниз», но количество процессов «снизу-вверх» будет постоянно увеличиваться, принимая во внимание все большее количество работ по молекулярным и нанотехнологиям, в которых решающую роль играют процессы химического, биохимического синтеза, самоорганизации, самосборки, самовосстановления, самораспознавания, саморепликации, направленного

информационно-химического синтеза. Принцип «снизу-вверх» означают создание приборов и устройств собранных из молекул или атомов.

В МЭМС кремний, кроме электрических функций, выполняет роль конструкционного материала, для которого важны механические свойства. Свойства кремния достаточно высоки, а для сохранения их в процессе технологической обработки следует минимизировать появление объемных, поверхностных и краевых (угловых) дефектов.

Кремний прочный, но хрупкий материал, сравнимый по показателям со сталью и даже превосходящий ее.

Высококачественный МКК в принципе является прочным, наблюдаемая на практике прочность механических компонентов или приборов будет зависеть от кристаллографической ориентации и геометрии, от количества и размера краевых, поверхностных и объемных нарушений и от напряжений, индуцированных и накопленных во время роста, резки, полировки и последующей обработки. Зная причины снижения прочности материала, можно принять меры по их снижению или исключению, чтобы получать механические компоненты, превосходящее по прочности самые качественные легированные стали.

Общие правила, которые следует соблюдать, могут быть сформулированы следующим образом:

- кремний должен иметь возможно меньшую плотность объемных, поверхностных и краевых дефектов, чтобы число потенциальных областей концентраций напряжений было минимальным;

- компоненты, которые могут подвергаться сильному трению, абразивному воздействию или механическим напряжениям, должны иметь минимальные размеры. От ударов предохранять механической опорой, например, соединением со стеклом методом анодного окисления;

- все процессы механической обработки исключить, заменив их травлением;

- в случае резки, шлифовки и других механических операций после них следует обтравить края и поверхность, подвергшиеся механическим воздействиям;

- при образовании острых углов, краев во время анизотропного травления их необходимо скруглять последующим изотропным травлением;
- во избежание непосредственных механических контактов с Si следует наносить прочные, твердые, коррозионностойкие тонкопленочные покрытия SiC или Si_3N_4 методом химического парофазного осаждения;
- низкотемпературные ТП, например плазменное окисление, химическое парофазное осаждение при изготовлении микромеханических элементов, позволят избежать напряжений, вызванных термическим рассогласованием ТКЛР различных легированных, осажденных слоев и кремния.

Удалять фоторезист и отходы травления, а также остатки травителей в порах материала становится все труднее с уменьшением пор и элементов. Поэтому разрабатываются специальные составы моющих жидкостей и новые методы очистки. Так, углекислый газ при значениях давления и температуры, находящихся выше критической точки, ведет себя почти как жидкость, но сохраняет низкую вязкость. Сверхкритическая двуокись углерода легко проникает под частицы загрязнений и удаляет их эффективнее любого жидкого химиката. Более того, смещав ее с подходящим растворителем, можно легко удалить фоторезист. А когда промывка завершена, достаточно понизить давление до атмосферного, и перегретая жидкость испаряется и улетучивается, как обычный газ. Это один из наиболее эффективных методов удаления химических загрязнений [91].

В значительной степени избежать неблагоприятных конструктивных и механических воздействий на МКК можно путем осаждения тонких пассивирующих пленок. Это придает микромеханике большую гибкость технологии.

Высокотемпературное пиролитическое осаждение и низкотемпературное высокочастотное осаждение позволяют получать тонкие пленки высокой твердости, практически беспористые, с высокой стойкостью к химической коррозии и высоким сопротивлением истиранию. Так, Si_3N_4 уступает по твердости только алмазу.

Пассивация МКК может осуществляться полимерными пленками (парилен, полиимид).

Образование усталостных трещин МКК структур почти всегда начинается с поверхности напряженных элементов конструкции, степень усталости сильно зависит от подготовки поверхности, ее морфологии и плотности дефектов. Конструктивные элементы с хорошо полированными поверхностями имеют более высокую усталостную прочность, чем элементы с грубой обработкой поверхности

Высокое кристаллическое совершенство МКК в сочетании с высокой гладкостью и чистотой поверхности, достигаемыми с помощью химического травления кремния, дают возможность получать механические структуры с высокой усталостной прочностью.

Гидростатическое давление повышает усталостную прочность. Так, пленки Si_3N_4 находятся на поверхности МКК в состоянии натяжения и потому создают напряжение сжатия в находящейся под ней поверхности кремния и должны повышать усталостную прочность компонентов.

В поверхностных технологиях одним из основных видов дефектов является залипание слоёв после травливания «жертвенных» слоёв и промывки.

Успех процесса поверхностной микрообработки зависит от возможности успешного удаления всех «жертвенных» слоёв, для освобождения структурных элементов и их возбуждения. Этот этап процесса влияет на выход годных и надёжность изготовленных МЭМС. Капиллярные силы промывающих жидкостей так же, как и электростатические, и силы Ван-дер-Ваальса, могут создать адгезию слоев после сушки системы. Для исключения залипания слоев возможно использование нескольких конструкторских и технологических решений:

- предусмотреть обеспечение зазоров между слоями за счёт локальных (точечных) выступов на одном из слоёв;
- выполнять промывку после травления специальными (antysticking) химическими составами, которыми обрабатываются поверхности пространственно разнесённых слоёв, после подтравливания «жертвенных» слоёв: например, $(CH_3)_2SiCl_2$ (диалкилдихлорометилсилан для обработки поликремниевых поверхностей);
- использовать для промывки перегретых жидкостей, например, углекислого

газа, при повышенном давлении и температуре, который сохраняет низкую вязкость, быстро улетучивается при снижении давления.

Эффективный контроль качества удаления является растровая акустическая микроскопия (приложение К, Л) [134].

К смешанным технологиям относится технология HARPSS (приложение М).

HARPSS (High Aspect-Ratio Poly Silicon-Silicon) технология объединяет высоко-аспектное глубокое сухое травление объемного кремния с поверхностной поликремниевой микрообработкой с целью получения полностью кремниевых толстых микроструктур, которые изолированы от других структур малыми емкостными зазорами. Обеспечивается глубина травления кремния порядка 100 мкм и такого же порядка ширина поликремниевого кольца и поддерживающих кольцо полусферических плоских пружин.

По этой технологии изготавливаются гироскопы с вибрирующим кольцом на монокремниевой подложке.

Так как МК имеет анизотропные свойства, в МК подложке вытравливаются глубокие канавки, затем заполняются поликремнием, обладающим изотропными механическими свойствами. Центральная ось удерживает вибрирующее кольцо, вокруг него по окружности размещены электроды возбуждения, управления и измерения.

Технология позволяет реализовать на единой кремниевой подложке одновременно поли- и монокремниевые структуры размерами от десятков до сотен микрометров электрически изолированные друг от друга.

Высокоаспектные поликремниевые структуры создаются травлением глубоких узких траншей в монокремнии, с последовательным нанесением методом химического испарения при низком давлении (LPCVD – Low-pressure chemical vapor deposition) слоев двуоксида кремния (жертвенный слой), нитрида кремния (изоляция) и поликремния .

Этой технологией (рис.1.22, рис.1.23) могут быть реализованы различные воздушные емкостные, промежутки, от субмикронных до десятков микрометров.

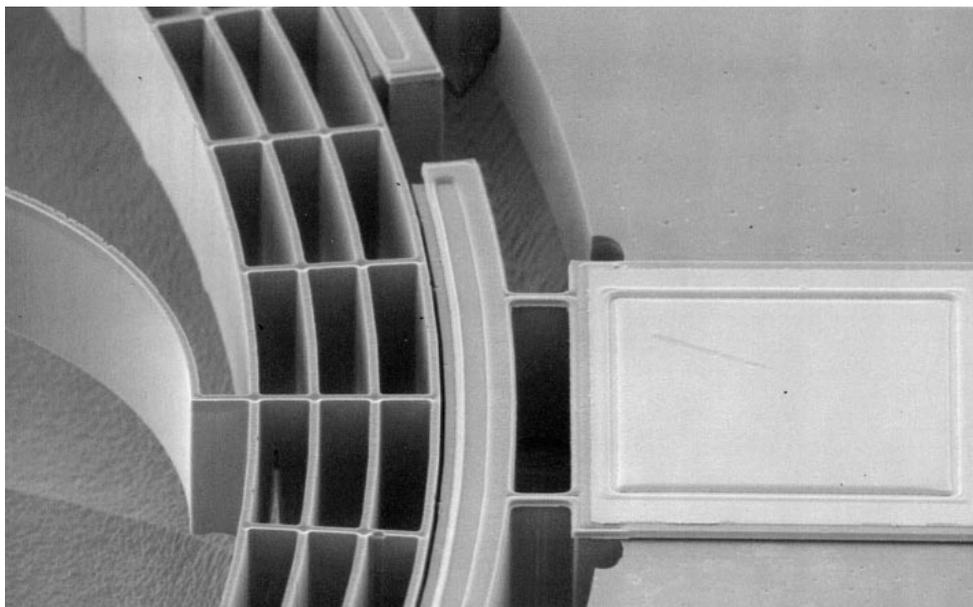


Рисунок 1.22 – Узкий и высокий (по вертикали) чувствительный кремниевый электрод, отделенный от толстого (80 мкм) поликремниевого кольцевого резонатора воздушным промежутком 1,2 мкм

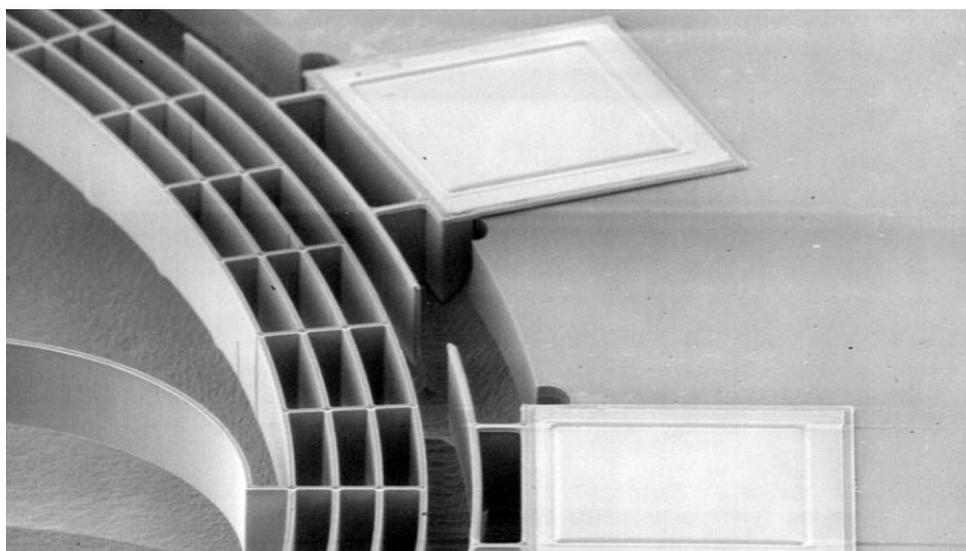


Рисунок 1.23 – Узкий и высокий поликремниевые возбуждающий и управляющий электроды, отделенные от толстого (80 мкм) поликремниевого резонатора широкими (10-20 мкм) воздушными промежутками

Их величина определяется величиной жертвенного слоя между моно- и поликремнием. Полностью кремниевая технология обеспечивает долгосрочную стабильность и температурную нечувствительность при изготовлении вертикальных

электродов большой площади. Субмикронные промежутки между электродами повышают чувствительность МЭМС на порядки.

На рис. 1.23 показан электрод из монокремния, отделенный от кремниевой структуры емкостным зазором и прикрепленный изоляционным слоем нитрида кремния к подложке. Такие монокристаллические, монокремниевые электроды равны по длине поликремниевым структурам защищены по бокам глубокими наполненными траншеями и отделенными от подложки операцией сухого травления SF_6 , которая вся целиком выполняется методом глубокого реактивного ионного травления (DRJE).

Плоские электроды, которые разделяются более широкими воздушными зазорами, также выполнены вне поликремния.

Эта технология, также, позволяет одновременно получать электрически изолированные двухразмерные (планарные) (2-D) и трехразмерные (3-D) (вертикальные) поликремниевые структуры на одной и той же подложке.

Последовательность операций шестимасочного технологического процесса приведена на приложении М, перечислим основные операции процесса:

1) нанесение на поверхность кремниевой подложки слоя нитрида кремния, и получение площадок изоляции под электроды планируемой структуры проводников;

2) ГРИТ - глубокое реактивно-ионное травление траншей будущей структуры в низко- резистивной кремниевой подложке ($50 \dots 100 \text{ мкм}$, $90^\circ \pm 1$) (Фоторезист AZ 4400), 4 мкм ;

3) нанесение (LPCVD) жертвенного слоя SiO_2 на поверхность и внутренние поверхности траншей и его легирование расчетной дозой бора;

4) нанесение защитного покрытия;

5) нанесение (LPCVD) поликремния;

6) травление соединительных частей поликремния (на поверхности);

7) формирование рисунка двуокиси кремния;

8) защита и формирование рисунка поликремния;

9) нанесение и получение рисунка проводника Cr / Au ;

10) ГРИТ (SiF_6) - глубокое вертикальное травление и подрезание дна для высвобождения структуры электродов (как маска используется толстый слой резиста);

11) нанесение пленочного резиста, травление жертвенного SiO_2 для полного освобождения структуры, с целью получения необходимого качества стенок траншей.

LPCVD двуокиси кремния происходит при достаточно высокой температуре ($920^{\circ}C$) путем взаимодействия дихлорсилана (SiH_2Cl_2) и окиси азота (N_2O).

LPCVD поликремния происходит при температуре $588^{\circ}C$. Для уменьшения электрического сопротивления поликремний легируется бором, который в этом случае имеет значительные преимущества над фосфор-легированным поликремнием при достаточно долгом взаимодействии с HF.

Применяется новый метод легирования поликремния, в котором легирование расчетной дозой бора сначала применялось к жертвенному слою SiO_2 .

После заполнения траншей поликремнием, легирующий бор при нагревании до $1050^{\circ}C$ в течение двух часов за счет диффузии, обеспечивал необходимый уровень легирования поликремния.

Глубокое реактивно-ионное травление (двухступенчатое: вертикальное и изотропное) происходит последовательно как в поверхностной технологии травления кремния и индуктивно связанной плазменной системе.

В технологиях МЭМС реализуется ряд специфических операций обработки материалов:

- с использованием принципа самосборки возможно получение 3-D структур;
- технологические процессы термомиграции и эпитаксиального наращивания для получения сквозных отверстий и скрытых каналов в кремнии (для струйных печатающих головок).

Самосборочная фотолитография позволяет получить регулярную структуру наноточек на подложке, которая в дальнейшем может использоваться для построения более сложных наноточечных структур.

Два полимера полистирол и полиметилметакрилат (плексиглас) соединены в

двухблочный сополимер с химическими связями. При нанесении такого фоторезиста на вращающуюся кремниевую подложку компоненты сегрегируют, как масло и вода, но связи между ними сохраняются (рис.1.22).

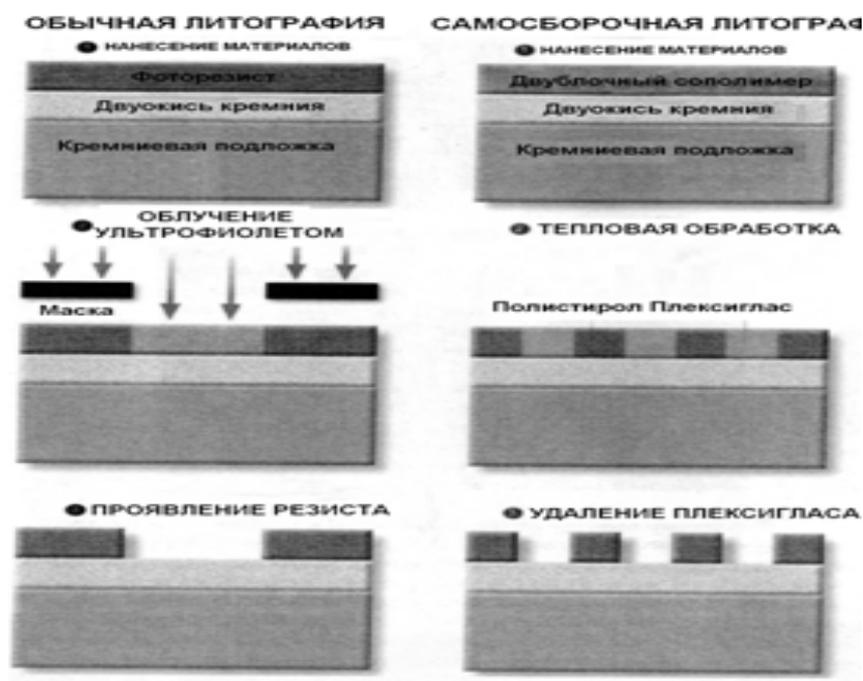


Рисунок 1. 24 – Самосборочная литография

Последующая термообработка усиливает этот процесс, и в результате образуются маленькие цилиндры из плексигласа, окруженные со всех сторон полистиролом. Таким образом, двухблочный сополимер сам по себе формирует готовый сотообразный шаблон.

ПММА удаляется органическим травящим раствором, и в полимерном покрытии появляются поры диаметром 20 нм. Следующий этап селективного травления переносит сотовый рисунок на площадку из двуокиси кремния. Затем на плату наносится слой аморфного кремния. Травящим газом кремний удаляется отовсюду, кроме пор. Таким образом, остаются только нанокристаллические цилиндры, окруженные двуокисью кремния. На последнем этапе поверх полученной структуры наносится изолирующий слой. Получается кремниевый блок, работающий как затвор полевого транзистора. Такая структура может быть

использована для производства флэш-памяти, запоминающие элементы которой являются трехмерными (рис. 1.23).

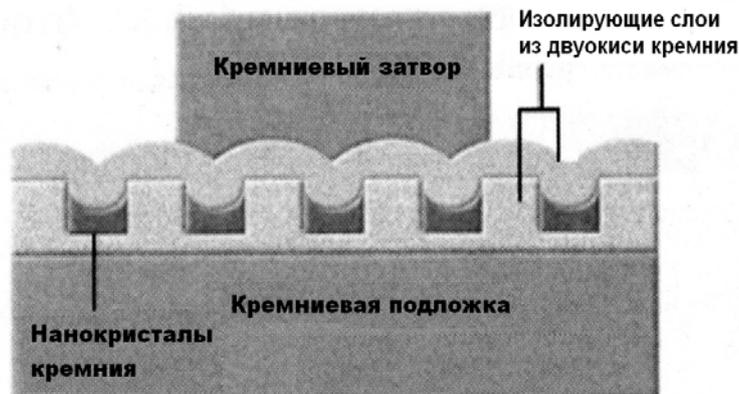


Рисунок 1. 25 – Флэш-память

С помощью такой технологии можно создать дополнительные отверстия в кремниевой подложке и сформировать развязывающие конденсаторы, сглаживающие флуктуации напряжения питания. Применение самособирающегося полимера также позволяет разместить на подложке тонкие цилиндрические кремниевые выступы. Каждый из них представляет собой канал транзистора, по которому ток течет не вдоль чипа, как в современных устройствах, а перпендикулярно поверхности. Затвор выполняется в виде кольца, окружающего канал. Такая конструкция препятствует утечке электронов в подложку, которая неизбежна при сокращении размеров устройства.

С ростом количества слоев увеличиваются неровности (рельефность) каждого последующего слоя. Для уменьшения этого в процессе изготовления применяется химико-механическая полировка верхних слоев поликремния.

Поверхностная технология изготовления MEMS структур из поликремния. Пригодна для производства многослойных структур до 4 слоев (SUMMIT-V – до 5-ти). С ростом количества слоев увеличиваются неровности (рельефность) каждого последующего слоя. Для уменьшения этого в процессе изготовления применяется химико-механическая полировка верхних слоев поликремния.

Последовательность операций изготовления и параметры слоев приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Последовательность операций изготовления и параметры слоев

Технологические слои	Толщина, мкм
Оксид кремния	0,63
Нитрид кремния	0,80
Поликремний (Поли-0)	0,30
Жертвенный слой (Окс-1)	2,00
Поликремний (Поли-1)	1,00
Жертвенный (Окс-2)	0,50
Поликремний (Поли-2)	1,50
Жертвенный (Окс-3)	2,00
Поликремний (Поли-3)	2,25

Пятый слой в SUMMIT-V позволяет создавать элементы МСТ на подвижной платформе.

Положительным свойством SUMMIT-технологии, как и других поверхностных методов, является возможность изготовления разнообразных элементов МЭМС и простота их интеграции с электронными схемами на одной подложке. Но из-за малых размеров элементов, получаемых по поверхностной технологии, их масса оказывается малой, что в ряде случаев не дает возможности их использования в качестве механических датчиков и приводов.

Рассмотрим ТП изготовления МЭМС электростатического двигателя по технологии MUMPS (рис.1.26).

Процесс начинается с создания диффузионного слоя нитрида кремния и осаждения слоя поликремния (Поли 0). Затем наносится слой Оксид 1 с углублениями для последующего образования выступов на роторе микродвигателя, предохраняющих от залипания ротора и основания (слоя Поли 0), а также рисунок

якоря двигателя и выводов фаз статора (слой Поли 1). После этого наносится слой Оксид 2.

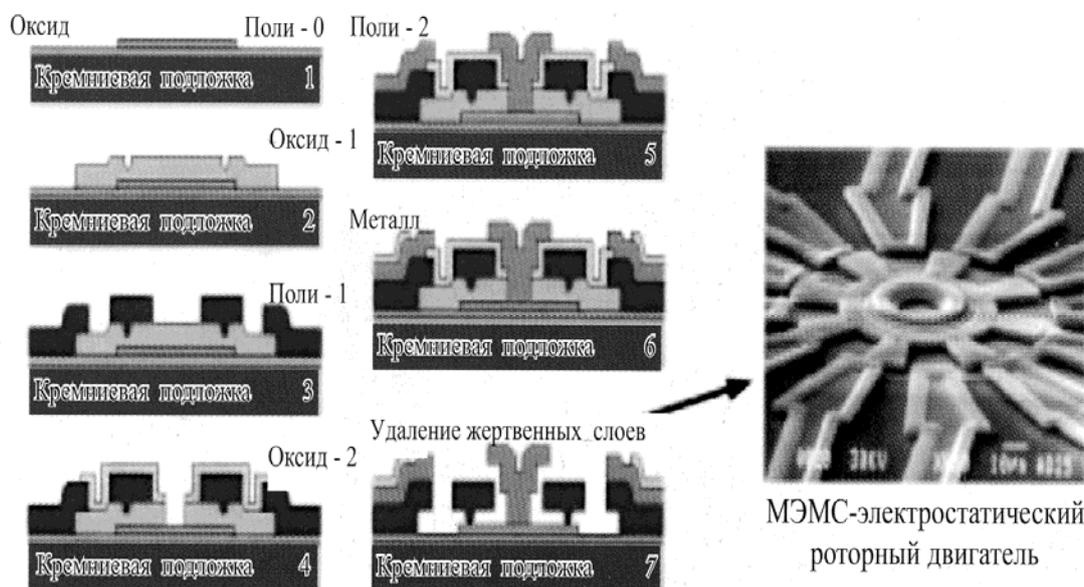


Рисунок 1.26 – Последовательность операций изготовления микродвигателя с использованием технологии MUMPS

В центре системы вытравливается отверстие в слоях Оксид 2, Оксид 1 под ось – опору для вращающейся части (якоря) двигателя. Осаждение слоя Поли 2 образует неподвижную ось – опору, которая центрирует свободно сидящий на ней якорь, а также расположенные по периферии контакты фаз статора. Последняя аддитивная операция процесса – нанесение металла на выводы микродвигателя. Завершается процесс удалением (селективным травлением) жертвенных слоев Оксид 2 и Оксид 1.

Выступы снизу ротора предотвращают его залипание с основанием.

По технологии MUMPS изготавливаются различные планарные элементы МСТ. Поликремний обладает хорошими механическими свойствами и достаточной электропроводностью. Отлаженная технология и методы фотолитографии позволяют изготавливать сенсорные и актюаторные элементы в одном технологическом процессе с электронными компонентами ИС.

Последовательность и принцип создания структур различного назначения

являются типовыми и пригодны для получения различных функциональных узлов.

1.4 Технологии изготовления внешних выводов МЭМС и корпусирования компонентов BGA/CSP

Наряду с многочисленными полимерными и керамическими корпусами (приложение Д) для МЭМС перспективными являются многовыводные матричные выводы и корпуса (приложение Ж).

Матричные выводы выполняются в виде шариков, столбиков цилиндрической и прямоугольной формы, штифтов. В разъемных матричных соединениях выводы выполняются в виде проволочных штырей, а ответные части в виде колодок (вставок, розеток, «sockets») с нулевым усилием соединения.

Необходимым условием обеспечения контактирования всех шариковых выводов кристалла (платы) является их деформация при пайке, а также расположение всей совокупности контактных площадок полупроводникового кристалла и подложки в одной плоскости. В данной конструкции контактного узла жесткие требования предъявляются к допускам на размер шарикового вывода и на неровности поверхности подложки и полупроводникового кристалла.

При максимальной высоте неровности подложки Δh_1 , поверхности полупроводникового кристалла Δh_2 , диаметра шариковых выводов Δd нарушение контактов (при числе выводов более трех) будет происходить при выполнении неравенства:

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta d < \delta \quad (1.1)$$

где δ – деформация единичного шарикового вывода, устанавливаемая в зависимости от материала шарика и технологического режима образования контактного соединения.

Поэтому в качестве материалов для шариковых выводов применяют такие

пластичные материалы, как золото, алюминий и низкотемпературные металлические припои.

Высота микронеровности поверхности полупроводникового кристалла и подложки не должна превышать 3 мкм, высота шариковых выводов на полупроводниковых кристаллах в различных конструкциях контактных узлов ИМС должна составлять 15...50 мкм, диаметр выводов чипа 100...300 мкм.

Метод перевернутого кристалла обеспечивает:

- самые малые размеры присоединяемых устройств – это непосредственно размер кристалла;
- наилучшие электрофизические параметры, в том числе быстроедействие за счет минимальной длины соединений;
- максимальное количество соединений за счет матричного расположения КП;
- надежность контактных узлов соединений (отсутствуют проволочные соединения);
- потенциально самую низкую стоимость при больших объемах производства;
- максимальное увеличение числа внешних соединений – 50%;
- высокую производительность монтажа, т.к. это процесс параллельный и групповой.

Сравнительные характеристики различных вариантов монтажа приведены в таблице 1.3 и таблице 1.4.

Процессы изготовления перевернутых кристаллов приведены на рисунке (приложение И).

Формирование матрицы выводов на кристалле и плате-корпусе CSP производится различными методами, наиболее распространенными среди которых является: трафаретная печать и гальваническое осаждение припоя, впрыскивание капель припоя, термокомпрессионная и лазерная припайка шариков припоя, оплавление проволоки (приложение Д).

Самым распространенным и давним является метод получения шариковых выводов из припоя. Метод позволяет использовать различные методы пайки и осаждения припоев разного состава: эвтектического - олово/свинец, с высоким

содержанием свинца, без свинца, с присадками и другими металлами, что позволяет модифицировать свойства выводов.

Таблица 1.3 – Количество входов/выходов и дополнительная площадь, необходимая при монтаже

Соединение	Максимальное количество входов/выходов	Дополнительная площадь
Проволочные соединения	300 – 500	
Кристалл на ленточном носителе «лицевой стороной вверх»	500 – 700	89%
Кристалл на ленточном носителе «лицом вниз»	500 – 700	69%
Flip Chip	> 5000	8%

Таблица 1.4 – Параметры выводов при монтаже перевернутым кристаллом

Параметр	Значение
Индуктивность, $nГн$	5,6...0,3
Емкость, $nФ$	9,1...2,5
Сопротивление, $МОм$	20,1...1,7
Время задержки, $нс$	508...51

Дозированное нанесение припоя может выполняться гальваническим осаждением, распылением, трафаретной печатью паст, разбрызгиванием, механической установкой шариков припоя и их оплавления. Разработано и может использоваться разнообразное оборудование для изготовления столбиковых выводов.

Эта технология совместима с технологией поверхностного монтажа, пригодна для крупносерийного и массового производства, обладает свойством

самовыравнивания элементов относительно КП платы – основания, снижает требования к точности установки компонентов с перевернутым кристаллом.

К недостаткам следует отнести: высокую температуру пайки, необходимость смещения металлизированных отверстий относительно КП платы и кристалла, чувствительность выводов к воздействиям окружающей среды, усталостные напряжения, ломкость выводов (необходим заполнитель зазора).

Столбиковые выводы из никеля осаждаются гальванически, покрываются золотом напылением или гальванически и характеризуются высокой надежностью, имеют отличную плоскостность, обеспечивают потенциально самые низкие затраты на изготовление.

На кристаллах ИС контактные площадки, на которые наносится пастообразный припой, выполняются в виде многослойных структур.

Наиболее распространенным материалом проводниковой системы на кремниевых кристаллах является алюминий.

Он обеспечивает высокие электрофизические параметры проводников, технологичен и дешев, но он легко окисляется, плохо паяется большинством припоев, может корродировать с течением времени.

Поэтому на КП кристалла для нанесения припоя наносится барьерный слой металла (БСМ): $Ni(P)$ (рис. 1.26) $Ni-Au$ (рис. 1.27), или др.

Использование барьерных покрытий обеспечивает хорошую адгезию и электрический контакт с алюминием, предотвращает диффузию металлов контактного столбика в интегральную схему, создает малонапряженную механически прочную структуру.

В зависимости от материала контактных площадок кристалла и платы могут использоваться различные материалы шариковых выводов для контактирования с кристаллом и платой.

Особенно удобно использование низкотемпературных припоев, свойства и состав которых можно варьировать в широких пределах.

Различные варианты изготовления шариковых выводов из припоя обеспечивает трафаретная печать (приложение Е):

– столбиковые выводы из припоя трафаретной печатью могут быть сформированы на вакуумно-напыленных Ni или Ni-Au слоях БСМ – припойная паста через трафарет наносится на КП и оплавляется, формируя шарик припоя;

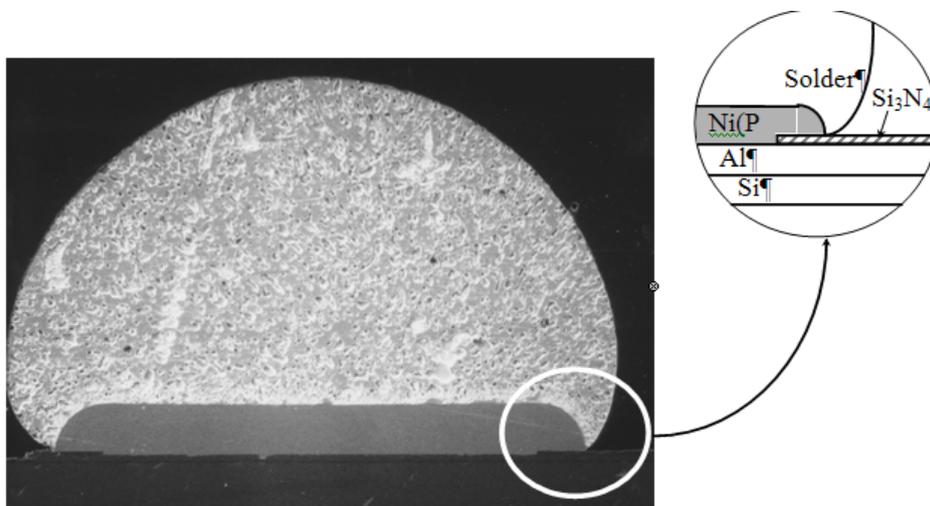


Рисунок 1. 26 – Столбиковый вывод из припоя над БСМ, полученный гальваническим осаждением

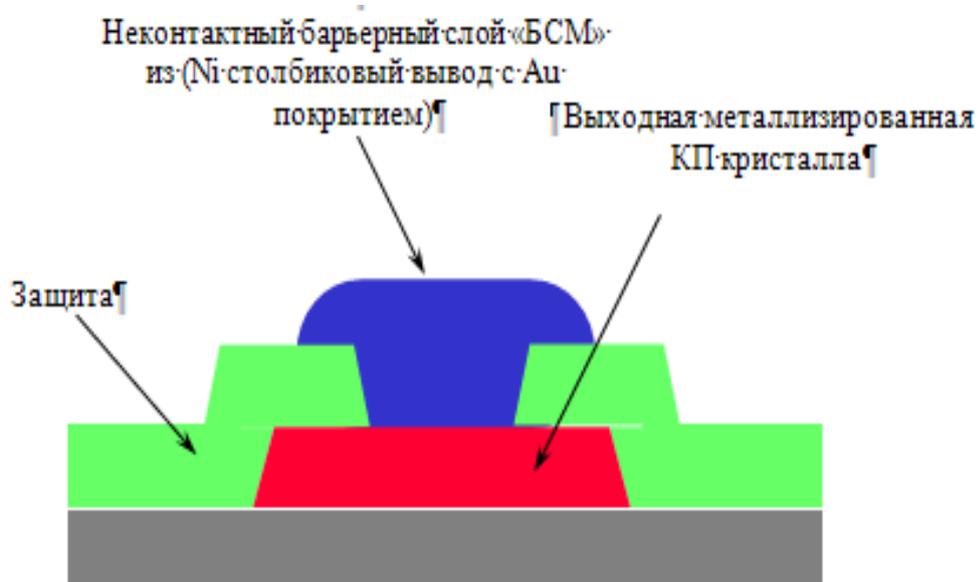


Рисунок 1.27 – Столбиковый вывод из никеля над поверхностью барьерного слоя металла (БСМ)

– трафаретной печатью и оплавлением изготавливаются шарики припоя, которые используются для автоматической подачи на КП кристалла и оплавления.

Подготовленные шарики припоя, установленные на КП с БСМ вручную или автоматическим устройством подачи шариков, могут оплавляться также лазером.

Трафаретная печать позволяет использовать припои различного состава.

Для промышленной реализации конструкций BGA/CSP необходимо обеспечить выполнение комплекса требований, предъявляемых к используемым материалам, подложкам, печатным платам, компонентам (кристаллам), конструктивным решениям, техническим процессам и технологическому оборудованию, производственному микроклимату, а также организации системы обеспечения качества продукции.

Выводы по разделу 1

В МЭМС необходим учет взаимодействия микромеханических и микроэлектронных компонентов, что решается рассмотрением электромеханических аналогий и изоморфизма поведения механических элементов под действием сил и электронных компонентов под действием токов (зарядов) и напряжений.

Для обеспечения эффективности высокоавтоматизированного современного производства важными моментами являются: обоснованный выбор технологического оборудования, мониторинг жизненного цикла и этапа производства в частности, оценка стабильности технологического процесса; действия, направленные на интеллектуализацию производства.

На нижних уровнях управления производственными системами используются разнообразные технические критерии и задачи оптимизации носят многокритериальный характер. По мере подъема по ступеням структурной иерархии технические критерии уступают место экономическим, и в большинстве случаев для оценки эффективности интегрированных технологических систем используется однокритериальный экономический подход.

Для выбора оптимального варианта ТС или ее отдельных компонентов на всех

этапах жизненного цикла методологической базой может служить теория принятия решений. Решения могут приниматься в условиях определенности, риска или неопределенности. Одним из когнитивных решений является метод байесовских статистических решений, обладающий рядом преимуществ перед другими.

Статистические методы широко используются и при мониторинге сложных технологических процессов по критерию стабильности процесса во времени. В производстве МЭМС, гибридных интегральных и полупроводниковых микросхем действует большое число случайных, неуправляемых факторов, которые делают ТП «трудно управляемым», а ТС – динамической системой с дискретными состояниями (ДСДС).

Показателем уровня технологического процесса является выход годных изделий. Во многих видах производства этот показатель регламентируется соответствующими стандартами, из года в год планируется повышение выхода годных. К сожалению, планирование (прогнозирование) выхода годных по этим стандартам не связано с организационными и техническими мерами ТП, что приводит либо к невозможности достижения директивного значения показателя, либо он не полностью использует возможности производства.

Актуальной задачей является разработка технически обоснованного метода расчета выхода годных изделий МЭМС. Одним из возможных решений может быть метод, основанный на учете выхода годных конструктивных элементов (КЭ) изделий и их постоянного пересчета по результатам контроля текущего производства.

Перспективные планы совершенствования РЭА реализуются путем планомерного улучшения технологии производства, повышения точности и управляемости ТП. В этом направлении большие надежды возлагаются на создание интеллектуальных технологий, т.е. технологий, включающих в автоматизированные производственные системы элементы искусственного интеллекта.

Для интеллектуальных технологий необходимо создания высокого уровня информатизации хода ТП, т.е. наличие большого числа сенсоров, измеряющих (контролирующих) в реальном масштабе времени параметры процесса и

регулирующих их в нужном направлении, т.е. необходимы микро ИУС. Система датчиков может быть реализована на элементах МЭМС и нанотехнологий

К достоинствам МЭМС следует отнести малые габариты и групповые методы изготовления и, соответственно, низкую стоимость изделий при массовом производстве.

Компоненты МЭМС с успехом используются в высокочастотных устройствах. Пассивные компоненты: резисторы, индуктивности, конденсаторы, фильтры, фазовращатели, линии передач, антенны, микропереключатели, реле, ключи – из-за своей миниатюрности, надежности и простоты монтажа значительно снижают стоимость узлов ВЧ приборов. Разработаны многослойные индуктивности, переменные конденсаторы, резисторы, в том числе мемристоры.

По аналогии с устройствами функциональной электроники (ФЭ) компоненты МЭМС обеспечивают выполнение функций формирования, хранения и обработки сигналов, источниками которых являются акустические, механические, оптические, магнитные, тепловые, электрохимические и другие физические явления. Благодаря своей миниатюрности они позволяют получать матричные, мультисенсорные многофункциональные, многоцелевые прецизионные структуры, что улучшает характеристики и повышает надежность систем обработки информации, расширяет функциональные возможности радио-, акустических, оптических систем локации, навигации, управления, связи и защиты информации.

Создание мини- и микророботов [196], роботов для обследования больших территорий иерархически организованными коллективами роботов – перспективное направление для интеллектуальных МЭМС компонентов.

РАЗДЕЛ 2

КОНВЕРГЕНЦИЯ И МАСШТАБИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1 Анализ изменения сил при пропорциональном уменьшении линейных размеров

Свойства материалов могут изменяться не только в результате изменения химического состава, но также и в результате изменения формы и размеров частиц. Многие свойства твердых тел связаны с характерными размерами, выше и ниже которых эти свойства различны, что открывает возможность перехода к новому поколению материалов, свойства которых изменяются не путем изменения химического состава компонентов, а в результате целенаправленного регулирования их размеров и формы, что расширяет возможности материаловедения, а также фундаментальных наук и отраслей производства.

Такие характерные размеры имеются в диапазонах и микро-, и нанообъектов, с уменьшением размеров элементов меняются соотношения объемных и поверхностных сил, инерционных и сил упругости твердого тела, сил трения и инерции, изменяются условия теплопередачи, быстродействие и другие электрофизические параметры элементов. При размерах структур менее 100 нм многие фундаментальные свойства веществ (температура плавления, ширина запрещенной зоны полупроводников) определяются размерами кристаллов.

При изучении микросистем особый интерес представляют последствия пропорционального уменьшения размеров, при котором все размеры остаются в фиксированном соотношении друг с другом, а изменяется только масштаб длины.

Физико-математический анализ основ микроминиатюризации механических компонентов, входящих в состав МЭМС, приводящих к изменению электрофизических параметров систем, а также влияния объединения в одном чипе (корпусе) устройств различной физической природы: механических, электрических,

электронных, акустических, оптических, магнитных, термо-, аэро-, гидро-химических и других взаимодействующих компонентов, соответствующих системам: МЭМС, МАЭМС, МОЭМС, МЖЭМС необходим, как для понимания функционирования этих систем, так и для проектирования новых изделий.

К основам следует отнести принципы изоморфизма, электромеханических (и других) аналогий, теории подобия и размерностей физических величин (ТП и РФВ).

Изоморфизм процессов выражается во взаимоднозначном соответствии элементов, свойств, функций и отношений подсистем, состоящих из деталей и узлов различной природы.

Так, явления электро- и теплопроводности, диффузии, переноса количества движения при вязком течении жидкости и другие описываются производной соответствующей переменной (U – напряжение, T – температуры, C – концентрации вещества, v – скорости течения) по координате, умноженной на соответствующий коэффициент (σ – электропроводность, λ – теплопроводность, D – диффузия, η_a – динамическая вязкость). Поэтому при введении соответствующих коэффициентов пересчета каждое из перечисленных явлений можно моделировать любым другим с учетом реальных ограничений условий их протекания, удобства и точности измерения соответствующих переменных.

Для моделирования различных физических, химических, экономических, информационных и других процессов, а также технических объектов широко используются теории подобия и размерностей физических величин [92]. Исторически теория подобия в большинстве случаев использовалась для распространения экспериментальных данных, полученных на физической модели, имеющей размеры значительно меньше объекта, на свойства реальных объектов.

При проектировании устройств МЭМС разработчик должен учитывать изменение (скорость изменения) физических величин при уменьшении их размеров от макроразмеров до микроминиатюрных изделий. При этом естественно интересуют те преимущества миниатюризации, которые позволяют улучшить электрофизические, эксплуатационные и производственные характеристики

компонентов, приборов, систем.

Размеры микромеханических компонентов МЭМС находятся в пределах от 1 до 10^3 мкм. В этом диапазоне размеров многие физические величины значительно отличаются от соответствующих величин макродиапазона в части их влияния на функционирование компонентов и устройств. Важной является оценка этих отличий при пропорциональном уменьшении всех линейных размеров и сохранении неизменными угловых размеров, определяющих форму тел.

Физические процессы или системы подобны, если в соответствующие моменты времени в соответствующих точках пространства значения переменных величин, характеризующих состояние одной системы, пропорциональны соответствующим величинам другой системы.

Коэффициенты пропорциональности для каждой из величин называются коэффициентами подобия. При геометрическом подобии существуют пропорциональность соответствующих геометрических элементов подобных фигур и тел. При физическом подобии поля соответствующих физических параметров двух систем подобны в пространстве и времени [92].

Логической основой теории подобия является теория размерностей физических величин [93].

Пусть для описания изучаемых явлений используется система с r основными независимыми величинами. (В системе СИ для описания механических процессов достаточно трех основных единиц – длины l , м $[L]$; массы m , кг $[M]$; времени t , с $[T]$. Для электрических необходимо добавить силу тока, A $[J]$ или напряжение B , $[U]$). Производные единицы образуются по общему уравнению:

$$[x_{r+1}] = k [x_1]^{\alpha_1} [x_2]^{\alpha_2} \dots [x_r]^{\alpha_r}, \quad (2.1)$$

где $[x_i]$ – единица (размерность) величины x_i , $i = 1, 2, \dots, r$;

α_i – отвлеченные положительные или отрицательные числа;

k – числовой коэффициент.

Размерность любой физической величины представляет собой произведение

возведенных в степень размерностей первичных величин.

Выбор основных единиц системы связан с удобством и способами их измерения. Добавление новой основной единицы (или её исключение) добавляет (отбрасывает) некоторый размерный коэффициент.

Рассмотрим различные виды подобия для элементов МСТ при условии неизменности свойств материала: плотности ρ , модулей E , G , постоянных ε и μ , коэффициентов и др.

При механическом подобии упругих систем предполагается наличие геометрического, кинематического и динамического подобия:

- для геометрического подобия должна обеспечиваться пропорциональность соответствующих линейных размеров двух систем;
- при кинематическом подобии существует подобие полей скоростей двух систем;
- при динамическом подобии реализуется подобие систем действующих сил или силовых полей различной физической природы (силы тяжести, давления, силы вязкости и др.).

В электромеханическом подобии, электромеханических аналогиях (ЭМА) существует подобие изменения состояния (токов и напряжений в электрических цепях силам и скоростям в механических системах, содержащих элементы массы, упругости, механических потерь).

Пропорциональность в подобных явлениях приводит к тому, что все безразмерные комбинации (отношения), которые можно составить из их параметров, имеют для подобных явлений одинаковые численные значения и являются критериями подобия. Любая комбинация из критериев подобия также является критерием подобия рассматриваемых физических явлений [94]. Такие комбинации должны включать отношения величин, описывающих различные стороны процессов. Например, количество запасенного тепла и количество отводимого тепла, нагрузки и прочность элементов.

Размерные физические параметры, входящие в критерии подобия, могут принимать для подобных систем сильно различающиеся значения; одинаковыми

должны быть лишь безразмерные критерии подобия [95].

В устройствах МЭМС одновременно могут действовать силы различной природы: силы тяжести, инерции, поверхностного натяжения, электростатические, электромагнитные, магнитные, трения. Действие различных сил, меняющихся по разным законам при изменении линейных размеров, приводит к необычным для макроустройств эффектам, позволяющим существенно улучшить электрофизические параметры устройств.

Рассмотрим действие обобщенных сил (F , M) при механическом перемещении и уменьшении линейных размеров в l раз.

Площадь $S \sim [L^2]$ уменьшается в l^2 раз, объем $V \sim [L^3]$ в l^3 раз, масса объекта $m \sim [L^3]$ в l^3 раз.

Перемещение тела под действием силы F происходит с ускорением

$$a = \frac{F}{m} \sim [L^F][L^{-3}], \quad (2.2)$$

т.е. изменение ускорения на три порядка больше изменения масштаба сил $[L^F]$.

При перемещении тела за время t под действием силы F с линейным увеличением скорости до половины пути $l/2$ и линейным замедлением на остальной части пути:

$$\frac{l}{2} = \frac{a \left(\frac{t}{2} \right)^2}{2}; \quad (2.3)$$

$$l = \frac{at^2}{4} = \frac{Ft^2}{4m}; \quad (2.4)$$

$$t = \left(\frac{4ml}{F} \right)^{0,5} \sim \frac{\left([L^3][L]^{0,5} \right)}{[L^{0,5}F]} \sim [L^2][L^{-0,5F}]. \quad (2.5)$$

Быстродействие (уменьшение времени срабатывания) увеличивается обратно пропорционально квадрату линейного размера.

Обратим внимание на зависимость известных физических величин и сил при изменениях линейных размеров элементов МЭМС.

Рассмотрим законы смены разных сил.

1) сила поверхностного натяжения пропорциональна длине $[L^1]$ потому, что она зависит только от длины.

$$F = \alpha l \sim [L^1], \quad (2.6)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения.

В электрических цепях при постоянной напряженности электрического поля $E l = U \sim [L^1]$. Зависимость производных величин от линейных размеров приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость электрических величин от масштаба

Параметр	Формула	Масштаб
Сопротивление	$R = \frac{\rho l}{S}$	L^{-1}
Емкость	$C = \frac{\varepsilon S}{d}$	L^1
Индуктивность, взаимоиנדукция	L, M	L^1
Ток	$I = \frac{U}{R}$	L^2
Мощность	$P = U \cdot I$	L^3
Мощность потерь	$P_{nom} = \frac{U^2}{R}$	L^3

2) сила электростатического взаимодействия.

Потенциальная энергия плоского конденсатора рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{-CU^2}{2} = \frac{-\varepsilon_r \varepsilon_0 b l}{d} \frac{U^2}{2} \frac{[L^2]}{[L]} [L^2] \sim [L][L^3], \quad (2.7)$$

U – напряжение между пластинами конденсатора;

ε_0 – диэлектрическая постоянная;

b – ширина пластин.

При изменении взаимного положения (уменьшении зазора между пластинами или площади перекрытия) пластин конденсатора работа, выполняемая силой взаимодействия, зависит от изменения емкости конденсатора. Сила может определяться по формуле (2.8) для случаев, представленных на рисунке 2.1 ($U = const$) [19].

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial l} = \frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial l} \quad (2.8)$$

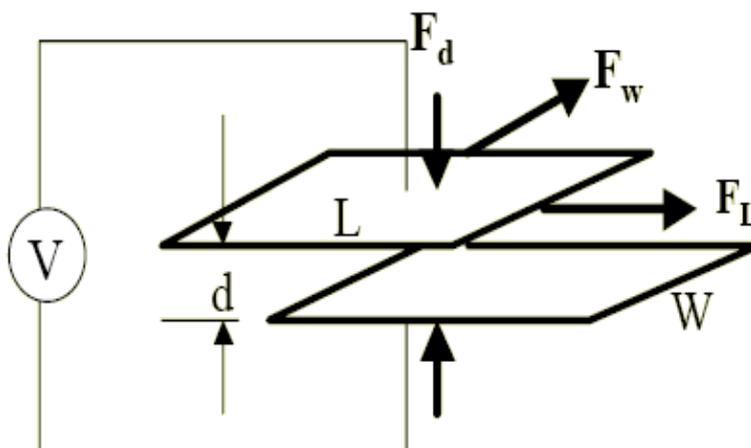


Рисунок 2. 1 – Электростатические взаимодействия

Потенциальная энергия будет пропорциональна $W \sim [L^1][L^{U^2}] \sim [L^3]$.

Электростатические силы при изменении одного из параметров конденсатора (зазора или смещении по одной из осей пластин) определяются соотношениями (2.9 – 2.11):

$$F_d = \frac{\partial W}{\partial d} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 b l}{d^2} u^2 \sim [L^2], \quad (2.9)$$

$$F_b = \frac{\partial W}{\partial b} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l}{d} u^2 \sim [L^2], \quad (2.10)$$

$$F_l = \frac{\partial W}{\partial l} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 b}{d} u^2 \sim [L^2]. \quad (2.11)$$

Таким образом, изменение размера по одной из координат в l раз приводит к изменению силы в l^2 раз.

Такую же зависимость имеют силы, создаваемые давлением жидкости и газа.

3) электромагнитная сила F возникает в результате взаимодействия тока I , протекающего через проводник, с магнитным полем с индукцией B , созданной магнитным потоком Φ . Согласно закону Фарадея, на проводник с током длиной l действует сила F , перемещающая проводник на расстояние dx . Если магнитное поле создается постоянным магнитом (рис. 2.2) [97].

$$F = i \frac{d\psi}{dx} = i \frac{B \cdot l \cdot dx}{dx} = B \cdot l \cdot i \sim [L^3], \quad (2.12)$$

где $d\psi = d\Phi$ – приращение потокосцепления, а $B = const$.

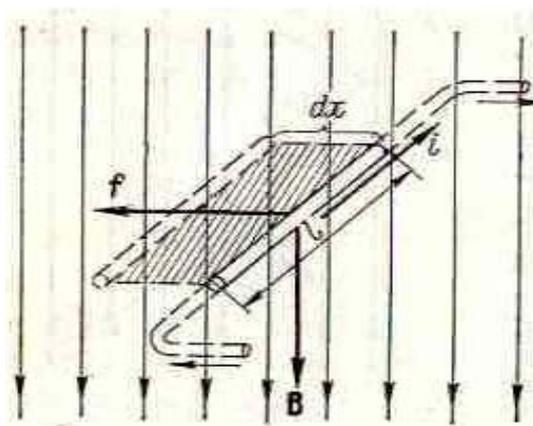


Рисунок 2.2 – Магнитоэлектрические взаимодействия

Силы гравитации также изменяются по кубическому закону в зависимости от размеров.

4) при электромагнитном взаимодействии между двумя контурами с током энергия магнитного поля системы равна:

$$W_M = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M \cdot i_1 i_2, \quad (2.13)$$

где L_1 , L_2 , L_3 и M – индуктивность первого и второго контура и их взаимоиנדукция соответственно.

Электромагнитная сила, стремящаяся изменить координату l , определяющую взаимное положение контуров, зависит только от M .

$$F_{ЭМ} = \left(\frac{\partial W_M}{\partial l} \right) \Big|_{U=const} = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial l} \sim [L^2][L^2][L^0] \sim [L^4]. \quad (2.14)$$

Т.е., при уменьшении длины проводника в 2 раза сила уменьшается в 16 раз. Изменение электромагнитной силы значительно резче, чем в случае действия электростатической силы $\sim [L^2]$ (см. формулу 2.9 – 2.11). Это является причиной того, что электромагнитные силы обычно не используются в МЭМС двигателях.

Более эффективными становятся электростатические двигатели. Такому переходу способствуют также сложность создания электромагнитного поля (сложность использования тонких проводов, их сопротивление и, соответственно, потери, увеличиваются), в то время, как уменьшение зазоров увеличивает электрическое взаимодействие и проще реализуется.

Итак, в МЭМС действуют силы, изменяющиеся пропорционально различным степеням линейного размера:

– $F \sim [L^1]$ – силы поверхностного натяжения;

– $F \sim [L^2]$ – электростатические силы; силы, создаваемые пневматическим и гидравлическим давлением; биологические силы, определяемые поперечным

сечением мышц;

– $F \sim [L^3]$ – электростатические силы, при использовании улучшенного теплоотвода для повышения плотности тока в проводниках, электромагнитные силы, вес;

– $F \sim [L^4]$ – силы электромагнитного взаимодействия.

В. Триммер предложил ввести «вектор сил», связанный зависимостью от линейного размера, в виде вектор-столбца [98]:

$$F = [L^F] = \begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ L^3 \\ L^4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

В производных величинах порядок их зависимости от масштаба сил определяется путем суммирования порядков основных величин для соответствующего порядка шкалы сил и формулам связи с основными величинами.

Таблица 2.2 – «Вектор сил» и производных величин: ускорение – a ; время – t ; плотность мощности – p/v_0 ; плотность мощности потерь – $p_{потерь}/v$

F	a	t	p/v_0	$p_{потерь}/v$
1	-2	1,5	-2,5	-
2	-1	1,0	-1,0	-2
3	0	0,5	0,5	-1
4	1	0	2,0	0

При различных исходных предпосылках основные и производные величины, характеризующие свойства системы, могут иметь различные зависимости от параметра масштаба. Точная зависимость электростатических сил зависит от изменений напряженности электрического поля E , электромагнитного взаимодействия – от параметров электрического и магнитного поля.

Для того, чтобы процессы остались неизменными, соответствующие

характеристические числа должны остаться постоянными. Некоторые характеристические числа зависят от основной единицы «длины», а другие независимы от неё. Характеристические числа, зависящие от масштаба длины, предоставляют информацию для получения общего высказывания об относительности физических процессов в микродиапазоне. Ниже представлены некоторые характеристические числа, которые особенно интересны для применения в микросистемах.

Число Коши (упругие колебания) $c_a = \frac{\rho}{E} \omega^2 l^2$ определяет соотношение инерционных сил и сил упругости в твёрдом теле. Оно характеризует движение или вибрацию, включая инерционные силы (массы) и силы упругости (пружины). Число Коши зависит от квадратов длины l и частоты колебаний ω , а также от свойств материала (плотности – ρ и модуля Юнга – E). При упругой вибрации, это соотношение показывает, что частота колебаний обратно пропорциональна длине. Из этого следует, что механические микросистемы обладают очень высокими частотами собственного резонанса и улучшенными динамическими характеристиками и малым временем реакции.

Типовое применение – это быстродействующий микромеханический сенсор ускорения для автомобильных систем безопасности, инерционная масса подвешена на балках, использующихся в качестве пружин (рис. 2.3).

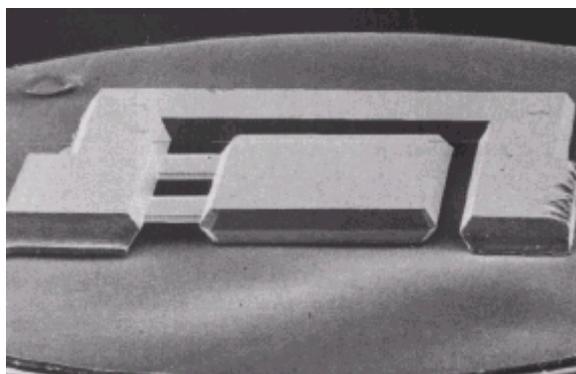


Рисунок 2.3.– Микромеханический сенсор ускорения

Число Вебера (инерция, поверхностное натяжение) $w_e = \frac{\rho v^2 l}{\sigma_s}$ определено, как

соотношение инерционных сил и поверхностного натяжения. Здесь v – это скорость, ρ – плотность и σ_s – поверхностное натяжение, для воды значение $\sigma_s = 0,073 \text{ Н/м}$. Для больших чисел Вебера инерционные силы играют главную роль, в то время как для малых чисел Вебера значительны силы поверхностного натяжения.

Число Вебера имеет значение при формировании волн на свободных поверхностях, для потоков жидкости в капиллярах и каналах, а также в формировании капель. Число Вебера связывает силу поверхностного натяжения с объёмными силами. При небольших размерах силы, связанные с поверхностью, доминируют.

В расчетах МЭМС компонентов важным является обеспечение теплового режима. **Число Фурье** F_0 указывает на соотношение между накопленной и передаваемой тепловой энергией. Переходные процессы при переносе тепла подобны, а числа Фурье одинаковы.

Характеристическое число Фурье является одним из критериев подобия нестационарных тепловых процессов, характеризующим соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки температуры внутри рассматриваемого тела, которая зависит от размеров тела и коэффициента его теплопроводности.

$$F_0 = \frac{at}{l^2} = \frac{\lambda t}{c_p \rho l^2}, \quad (2.16)$$

где $c_p \rho$ – тепловая энергия, накопленная единицей объема;

λ – коэффициент теплопроводности;

Актюаторы микродиапазона быстры в следствие малой тепловой инерции. Полагая $F_0=1$, число Фурье может служить для определения скорости рассеяния тепла через поверхность $l^2 = \lambda t / (c_p \rho)$, внутри которой температура может считаться

однородной.

Время переходного процесса уменьшается по квадратичной зависимости от линейного размера:

$$t = \frac{Fl^2}{a} \sim [L^2], \quad (2.17)$$

поэтому в микросистемах тепловые актюаторы достаточно быстры для того, чтобы выполнять механических функций. Так, термопары в виде консольных микро- и нанобалок могут служить безинерционными датчиками температуры и термочувствительными элементами в тепловидении (ИК-видение) [180], а так же для измерения температуры удаленных объектов.

На рисунке 2.4 зависимость частоты частота колебаний от квадрата величины обратной длине микробалки. На этой основе были разработаны термические датчики, при изготовлении которых на кантилевер наносился слой материала с коэффициентом теплового расширения, существенно отличающимся от значения для материала самого кантилевера (обычно – кремния).

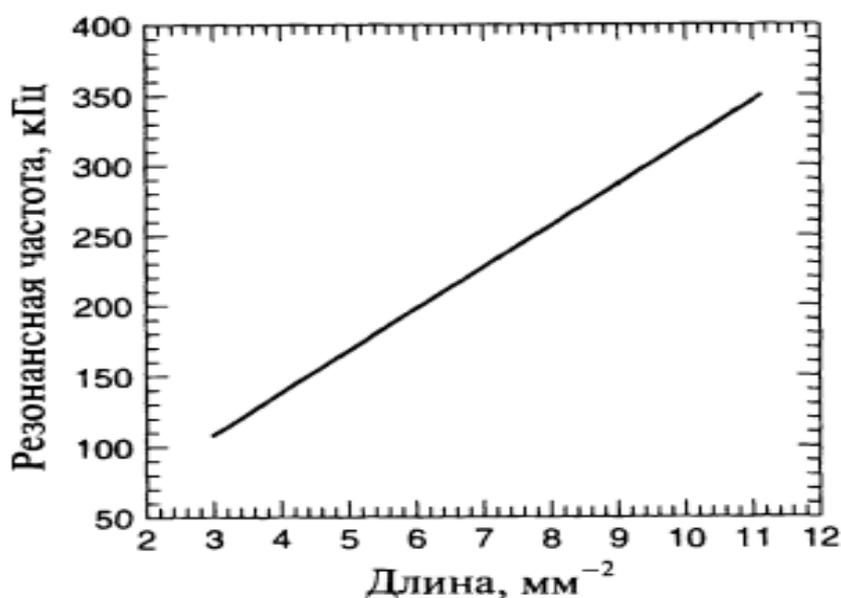


Рисунок 2.4 – Зависимость резонансной частоты MEMS-кантилевера от квадрата обратной длины балки

При нагреве микробалки из-за различия коэффициентов расширения покрытия и кремния она изгибается, а ее резонансная частота изменяется.

Чувствительность такого устройства находится в микроградусном диапазоне, [75], так что его можно использовать в качестве детектора инфракрасного излучения. Подобную конструкцию можно использовать и для изготовления чувствительного детектора постоянных магнитных полей. В этом случае одна из поверхностей микробалок покрывается материалом с хорошими магнитострикционными свойствами. При помещении в магнитное поле материал покрытия изменяет свои размеры, что приводит к изгибу кантилевера и изменению резонансной частоты его колебаний. Такие устройства могут обнаруживать магнитные поля всего 10^{-5} Гс (10^{-9} Тл).

Проблемы переходного процесса при переносе тепла подобны, если число Фурье одинаково. Число Фурье определяет степень проникновения и распространения тепла в случае переходного процесса при переносе тепла за счет коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c_p и плотности ρ .

Для $F_0 < 1$ тело имеет однородную температуру и переходной эффект не имеет значения.

Число Фруда (механика, конвекция, механика жидкости) – безразмерная величина $F_r = \frac{v^2}{gl}$ имеет важное значение для всех динамических перемещений в гравитационном поле [99]. Оно характеризует соотношение между инерционными силами и силами гравитации (вес) в зависимости от скорости v , ускорения из-за силы тяжести g и масштаба длины l .

При больших значениях числа Фруда эффектом силы тяжести пренебрегают, в то время как при малых значениях числа Фруда можно пренебрегать силами инерции.

Так как число Фруда обратно пропорционально величине длины, эффект гравитации уменьшается при уменьшении размеров.

Различный характер изменения силы тяжести пропорционально $[L^3]$ и силы давления на жидкость пропорциональны $[L^2]$ обеспечивает точность дозирования

краски в пьезоэлектрических печатающих головках струйных принтеров.

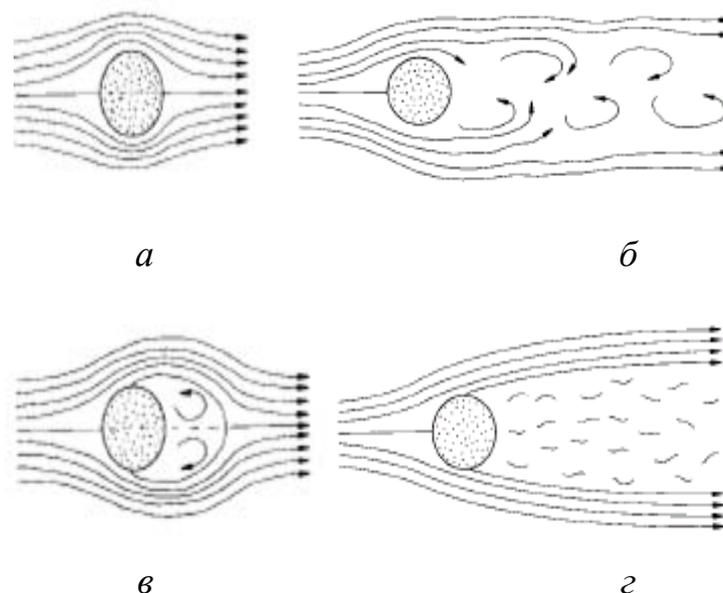
Число Рейнольдса (механика жидкости) – наиболее известное и наиболее часто используемое характеристическое число (v – средняя скорость текучей среды, l – определяющий линейный размер (равен диаметру, если поперечное сечение круглое), ν – кинетическая вязкость текучей среды: $\nu = \eta/\rho$, η – динамическая вязкость текучей среды, ρ – плотность текучей среды). Оно показывает соотношение между инерционными силами и силами трения или вязкости в потоке жидкости или газа [100, 101].

Число Рейнольдса главным образом используется для характеристики режима потока жидкой среды, как показано на рис. 2.5.

При числе Рейнольдса ниже критического, будет ламинарный поток; выше критического, развивается вихревой поток, скорость и давление которого изменяются стохастически около среднего значения. Часто зависящее от длины число Рейнольдса используется для того, чтобы вычислить точные размеры, при которых поток становится не ламинарным, а вихревым. Из формулы видно, что толщина граничного слоя в теории пограничного ламинарного слоя обратно пропорционально корню из числа Рейнольдса. Правила пропорциональной миниатюризации приводят к факту, что на микроуровне поверхностные силы по сравнению с объёмными имеют большее значение. Из этого следует, что для микроактюаторов трение имеет очень большое значение. Кроме того, из-за своей маленькой массы микромеханические элементы обладают малой силой инерции, что ведёт к высоким динамическим характеристикам, и следовательно они часто работают с высокой рабочей частотой и скоростью.

С одной стороны трение ведёт к потерям, которые являются причиной ухудшения функционирования элементов, с другой стороны трение приводит к износу, который негативно воздействует на функциональное поведение и ведёт к ускоренному старению и, в конечном счёте, поломке компонента. Трение является ключевым фактором, который определяет не только эффективность, но и долговечность.

Трение в механике – это результат взаимодействия контактных областей поверхностей. Важные факторы, влияющие на величину трения: состояние поверхности, поверхностная топология и взаимодействующие материалы. По сравнению с традиционным машиностроением в микросистемах появляется трение твердых тел (сухое трение).



a – ламинарный поток $Re < 4$;

б – формирование попутного потока $4 < Re < 40$;

в – периодический попутный поток $40 < Re < 300$;

г – нерегулярный попутный поток $5 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^5$

Рисунок – 2. 5 Зависимость режима потока жидкой среды от числа Рейнольдса

Переход между сухим трением и трением со смазкой характеризуется формулой Зоммерфельда:

$$S_0 = p\Psi^2 / \omega\eta, \quad (2.18)$$

где $p = F/(ld)$ – давление нагрузки; $\Psi = (D-d)/d$ – относительный радиальный зазор; D – внешний диаметр подшипника; d – внутренний диаметр подшипника; η – вязкость смазки; ω – это скорость и l – длина подшипника.

В формуле Зоммерфельда более чем где-либо присутствует сухое трение, которое является доминирующим в точном машиностроении и в микромеханических устройствах.

Поэтому гидродинамические подшипники скольжения, где вал движется по замкнутой смазочной плёнке, не применимы. К тому же для микромоторов сила поверхностного натяжения настолько велика, что существенно влияет на их функционирование. Поэтому в качестве подшипников скольжения используют подшипники сухого трения, которые, однако, могут быть снабжены молекулярными смазочными плёнками [102] для уменьшения трения и износа. В этом случае характеристики смазки и контактной поверхности становятся главными факторами. С одной стороны характеристики материалов для смазочных плёнок молекулярной толщины изменяются, с другой стороны адгезия смазок с поверхностью, которая объясняется химической и физической адсорбцией, приобретает большую важность. Следует заметить, что на сегодняшний день ещё не существует общепринятых методов применения молекулярных плёнок толщиной в несколько нанометров. В этом случае шероховатость поверхности имеет более высокую важность, чем толщина используемой в микросистемах плёнки, которая лежит в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров.

Классическая инженерная модель макроскопического трения имеет следующие существенные характеристики:

- а) сила трения зависит только от нормальной силы F_N и всегда действует в направлении противоположном направлению движения;
- б) сила трения не зависит от величины поверхности соприкосновения;
- в) сила трения зависит от скорости скольжения;
- г) сила трения покоя всегда больше силы трения движения;
- д) силы трения зависят только от двух материалов, которые скользят друг по другу.

Формула (2.19), названная законом Кулона-Амонтона (Coulomb-Amontons), выражает эти соотношения:

$$F_{\tau} = \mu F_N \quad (2.19)$$

где F_{τ} и F_N – это тангенциальная и нормальная составляющая силы и μ – кинематический коэффициент трения.

Любая поверхность имеет неровности и поверхностную волнистость, что приводит к тому, что фактическая область контакта состоит из отдельных контактных точек. Точки контакта или неровности составляют только малую долю общей площади поверхности, зависящую от нагрузки.

Так как исключительно точки контакта вносят вклад в генерацию силы, напряжение в точках контакта соответственно высоко, и предел текучести материала σ_m может быть достигнут при относительно малых силах. В пределах контактных точек происходят эластичные и пластические деформации, посредством чего общая суммарная площадь контакта S становится прямо пропорциональной давлению и обратно пропорциональной пределу текучести: $S = p/\sigma_m$. В контактных областях силы межатомного взаимодействия действуют между смежными участками вещества, которые противостоят касательному напряжению σ_s . В этом случае силы трения переносятся только в область контакта. Таким образом, сила трения становится пропорциональной фактической площади контакта, и коэффициент трения находится по формуле $\mu = \sigma_s/\sigma_m$. Эта модель даёт возможность объяснить трение Кулона, так как трение становится пропорциональным нагрузке, и не зависит от кажущейся площади. Сумма точек области находящихся в реальном контакте возрастает с увеличением нагрузки, из-за вовлечения большей области в адгезионное взаимодействие деформацией. Модель также объясняет, почему различные поверхности материалов имеют различный коэффициент трения – атомные поверхности имеют разные межмолекулярные связи. Некоторые применения этой идеи могут подтвердить вывод о том, что грубые поверхности могут иметь меньшее трение, чем очень хорошо отполированные, поскольку большая часть поверхности находится в контакте. Главная роль смазки – держать поверхности раздельно.

Износ, который сопровождается трением, отчасти можно представить в виде следующей картины. Внутри точек контакта происходит сильная нагрузка на материал, которая приводит к пластическим деформациям с одной стороны и с другой стороны, из-за слипания точек контакта, к формированию трещин на поверхности контактирующего материала и в результате к необратимым изменениям. Для износа характерны следующие механизмы:

- а) адгезия (слипание);
- б) абразивный износ (истирание);
- в) эрозия из-за разрыва оксидных покрытий;
- г) усталость.

Межатомные взаимодействия – это результат разрушения и преобразования атомных связей. Внутри диапазона контактной области благодаря адгезионной силе может происходить перемещение вещества между точками контакта и искажение кристаллической решётки. Перемещение вещества становится более очевидным при комбинировании материалов, которые имеют большее взаимное адгезивное сходство или химическую растворимость, создавая больший износ при контакте похожих поверхностей, чем при разнородных. При абразивном износе, материал стирается из-за неровностей поверхностей взаимодействующих материалов или из-за твёрдых частиц. В основном более твёрдый материал удаляет верхний слой более мягкого материала во время трения. Поскольку поверхность металлических материалов покрыта оксидной плёнкой, высокие локальные нагрузки могут привести к разрыву оксидной плёнки. Это приведёт к открытию металлической поверхности и в результате к формированию новой оксидной плёнки. Усталость – это результат циклических напряжений, которые вызывают пластические деформации поверхности.

Изучение трения на атомном уровне названо нанотрибологией – это исследования, выполненные путём измерения силы трения при помощи растрового силового микроскопа [89]. Новые концепции были открыты с тех пор, когда эта техника была впервые представлена в конце 80-х годов. Силы трения порождают гармонические колебания атомной кристаллической решётки, которые различаются

в двух материалах. Энергия механических колебаний, в конечном счёте, производит тепло. Это показывает, что на атомном уровне трение это величина, которая зависит от материала и пропорциональна фактической, вместо кажущейся области контакта. Сила вдобавок пропорциональна степени своей необратимости, например, она зависит от коэффициента лёгкости с которой области слипаются друг с другом. Идеальным для предотвращения трения является материал, который сопротивляется образованию химических связей со множеством других материалов. Эта химическая инертность найдена в некоторых материалах, таких как тефлон. На атомном уровне было определено, что сухое трение иногда меньше, чем жидкое, потому что жидкость предоставляет больший фактический контакт между поверхностью и жидкостью, что приводит к гораздо большему адгезионному трению. Текстурирование может быть прежде всего использовано для уменьшения стикции (слипания) и трения покоя, так как более нерегулярные поверхности имеют меньшую стикцию. Текстурирование также может оказывать некоторую помощь смазочному материалу.

При уменьшении размеров частиц материалов увеличивается отношение площади частиц к ее объему S/V . Это приводит к повышению роли свойств поверхности частиц (поверхностных неуравновешенных сил) по сравнению с объемными (массой). Уже при размерах порядка единиц микрометров частицы при сближении слипаются – коагулируют и для их разъединения необходимо принимать специальные меры. Например, воздействовать УЗ-колебаниями для диспергации. В наноконпонентах отношение площади к объему может быть настолько велико, что поверхностные эффекты становятся превалирующими. Так, при напылении металлов на подложку наблюдается мгновенное стягивание частиц пленки в кластеры определенной формы, которая зависит от условий напыления и материалов подложки и диффузанта.

В микро- и наном мире на механическое поведение детали можно существенно повлиять, изменив тонкий слой материала на ее поверхности.

Молекулярные силы притяжения между нанообъектами могут превышать упругие силы отталкивания. Например, зонд АСМ может захватываться и прилипать

к поверхности в процессе сближения, что потребует усилий для отрыва зонда при удалении от нее. Для предотвращения этого на некоторые элементы микромашин, возможно, придется наносить специальные покрытия, препятствующие прилипанию.

Когда размеры частиц материала уменьшаются до значений 0,1...100 нм, все большую роль начинают играть и другие квантово-механические эффекты [103]:

- синергетические эффекты, которые заключаются в нелинейности изменений свойств частиц в зависимости от их размеров [139];

- размерное, зарядное, и энергетическое квантование (1, 2 атомных или молекулярных слоя изоляции, заряд 1, 2 электрона, малое количество квантов энергии, необходимых для изменения состояния устройства);

- неравномерность распределения примесей в объеме полупроводника (концентрация основных атомов 10^{23} атом/см³, а примесей $\sim 10^{17}$ - 10^{19} атом/см³);

- увеличение взаимного влияния соседних элементов из-за уменьшения промежутков между ними;

- волновая передача и связь;

- туннельный эффект;

- синергическое взаимодействие нескольких факторов;

- изменение оптических, магнитных или других свойств, и т. п.

Различный характер изменения сил, действующих в МЭМС, позволяет выбирать наиболее целесообразные принципы функционирования устройств для конкретных условий.

В качестве примера используем расчет крутящего момента M для вращения торсиона поворотного зеркала, дифференциального конденсатора и др.

Крутящий момент связан с осевым моментом инерции поворотного устройства и требуемым угловым ускорением (рис. 2.6) зависимостью:

$$M_{\text{эд}} = I_{yy} \varepsilon = p \frac{ltb^3}{12} \varepsilon \sim [l^5] \quad (2.20)$$

При уменьшении геометрических размеров поворотного устройства в два раза момент I'_{yy} будет равен:

$$I'_{yy} = \frac{1}{12} \rho \left(\frac{t}{2} \right) \left(\frac{l}{2} \right) \left(\frac{b}{2} \right)^3 = \frac{I_{yy}}{32}, \quad (2.21)$$

и крутящий момент для поворота устройства с прежним ускорением ε требуется в 32 раза меньший.

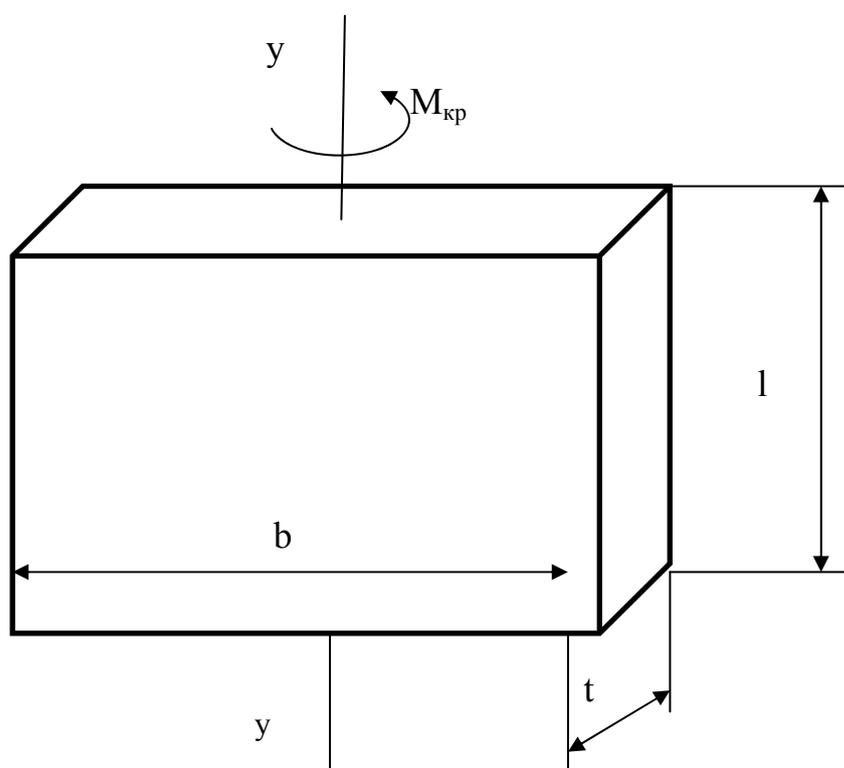


Рисунок 2.6 – Торсионный подвес

В механике жидкости важными величинами при течении в капиллярных трубках являются объем потока Q и падение давления Δp на единицу длины трубки, связанные с параметрами капилляров и коэффициентом вязкости μ (рис. 2. 7).

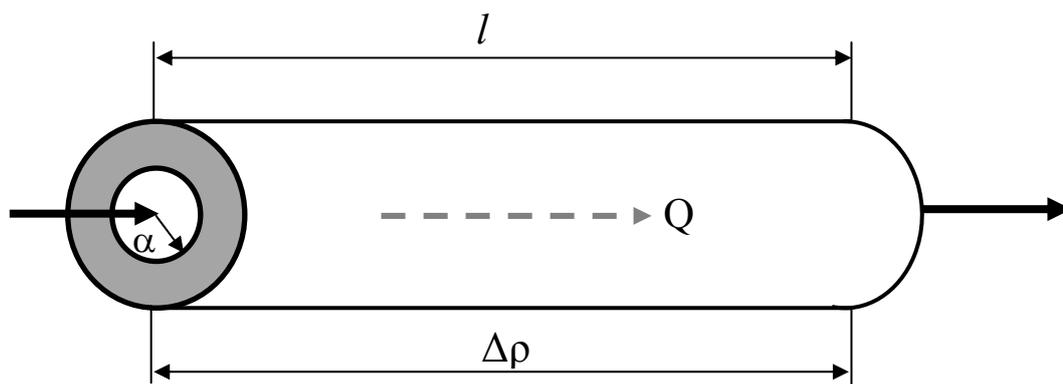


Рисунок 2.7 – Течение жидкости в капилляре

Объем потока Q по уравнению Хаген-Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta\rho}{8\mu l} \sim [L^4]. \quad (2.22)$$

Т.е. уменьшение радиуса в два раза уменьшает объем протекающей жидкости в 16 раз.

Откуда,

$$\Delta\rho = \frac{8\mu l V_{cp}}{a^2}. \quad (2.23)$$

И, соответственно, $\frac{\Delta\rho}{l} \sim [L^{-3}]$. Уменьшение радиуса трубки в 10 раз увеличивает давление в 10^3 раз на единицу длины.

Можно выделить ряд особенностей полезных для использования в устройствах МЭМС, присущих различным физическим явлениям (приложение Б):

– воздушные (аэро-, газовые) среды характеризуются статическим давлением, возможностью создавать подъемную силу, способны заполнять микро- и мезопоры, зазоры, передавать звуковые, электромагнитные и световые волны;

– акустические среды изменяют свои свойства под действием механических сил и электрического напряжения (прямой и обратный пьезоэффект,

электрострикция, интроскопия УЗ и мегазвуковыми волнами, преобразование энергии механической, электрической, звуковой, взаимодействие акустических и электромагнитных волн);

- гидравлические (жидкостные) – поверхностное натяжение, давление, капиллярные силы, кавитация, гидроудар, гидроакустические волны, малая сжимаемость, различные фазовые состояния, гидростатические силы;

- механические явления (вес (масса), инерция), жесткость, упругость при различных видах деформации (растяжение, изгиб, сдвиг, кручение, срез), обобщенные силы, зависящие от конфигурации деформируемых (движущихся) элементов, сосредоточенная и распределенные упругости, управляемая конфигурация деталей, увеличение быстродействия, бесборочные структуры, кристаллическое и аморфное состояние;

- оптические явления – прозрачность, поглощение, преломление, отражение, излучение, фотовозбуждение, управление характеристиками при помощи механических, электрических, магнитных, химических воздействий; преобразование солнечной энергии, ВОЛС, активные и пассивные компоненты телекоммуникаций, миниатюрные оптокамьи, развязка электрических цепей;

- фотонные явления – оптопары, возбуждение, инициализация, ионизация, полимеризация, фотосинтез, люминесценция, когерентное излучение;

- электрические явления, электрические силы, электромагнитные воздействия;

- электромагнитные силы убывают в разных случаях пропорционально третьей или четвертой степени уменьшения размеров;

- магнитные явления: особое поведение ферромагнитных жидкостей, различные виды магнитосопротивления (БМС, ГМС, КМС, ТМС, ЭМС);

- термоэффекты: (тепло) Джоуля-Ленца, Зеебека, Пельтье, тепловая запись информации, ИКВ, датчики высоких температур, перегретая жидкость, горение, взрыв, (крио) сверхпроводимость, конденсат Бозе-Энштейна, материалы с запоминанием формы, нулевые колебания, радиационная защита;

- хемоэффекты – микро- и нано- источники питания, датчики химических веществ, катализ;

- микроэлектроника, основные технологические операции: наноимпринтинг (приложение Н), термокомпрессия, лазерные методы, самосборочная и другие методы литографии;
- атомно-молекулярные – саморепликация, самоорганизация, катализ, самовосстановление, целенаправленный физико-химический синтез;
- новые материалы- материалы с интеллектуальными свойствами, новые состояния вещества («квантовые точки»), графен, графан, фуллерены, УНТ, пористые керамики, органические малодефектные полимеры, ДНК, фотонные кристаллы, микроструктурированные волокна;
- плазма, ионные реактивные двигатели;
- радиация – защита бездефектными органическими полимерами и др.

2. 2 Электромеханические аналогии

Электромеханические аналогии (ЭМА) позволяют описать взаимодействие в одном устройстве микромеханических сенсоров и (или) актюаторов совместно с микроэлектронной схемой обработки и передачи информации

Использование в одной микросхеме, корпусе элементов различной физической природы требует рассмотрения их взаимодействия, взаимовлияния, преобразования одних видов энергии в другие, использования свойств компонентов с целью достижения максимальных значений параметров устройств и систем.

Механические взаимодействия связаны с передачей обобщенных сил и напряженно-деформированным состоянием элементов конструкции, с преобразованием различных видов энергии и их дистанционной передаче.

Для моделирования устройств МЭМС необходима разработка моделей всех элементов, понимание механизмов взаимодействия системы в статических и динамических режимах, умение управлять параметрами компонентов и всей системы, учитывать влияние дестабилизирующих факторов внешней среды .

В аналитической механике механические элементы выступают в виде обобщенной массы (m , полярного, осевого момента инерции J_p или тензора

инерции J), упругости (жесткости) K_{MEX} элементов механических потерь (трения и др.) R_{MEX} . Параметры движения, вызванного действием обобщенных сил (F_i, M_i), выражаются в обобщенных координатах q_i и их производных \dot{q}_i, \ddot{q}_i [104, 135, 181].

Если сила действует на последовательно соединенные элементы массы, упругости и потерь, то она уравнивается совместной реакцией всех элементов (рис. 2.8).

$$\bar{F} = (j\omega m + \frac{K_{MEX}}{j\omega} + R_{MEX}) \cdot \bar{q}. \quad (2.24)$$

В электрической цепи, содержащей сосредоточенные элементы – индуктивность L , емкость C и активное сопротивление R , – под действием синусоидального напряжения возникают колебания, определяемые вторым законом Кирхгофа (рис. 2.9)

$$\bar{U} = (j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R) \bar{i}. \quad (2.25)$$

Между механическими величинами уравнения (2.24) и электрическими в уравнении (2.25) можно отметить взаимно однозначное соответствие, приведенное в таблице 2.2 Это соответствие образует первую систему аналогий или аналогий «сила – напряжение».

Для параллельного соединения электрических элементов L, C, R (рис. 2.9) согласно первому закону Кирхгофа суммарный ток $i(t)$, потребляемый цепью от питающего источника, распределяется по параллельным ветвям согласно равенству :

$$i(t) = C \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} + \frac{1}{L} \int U dt, \quad (2.26)$$

$$\frac{d\dot{x}(t)}{dt} = C \frac{d^2U}{dt^2} + \frac{dU}{Rdt} + \frac{U}{L}. \quad (2.26')$$

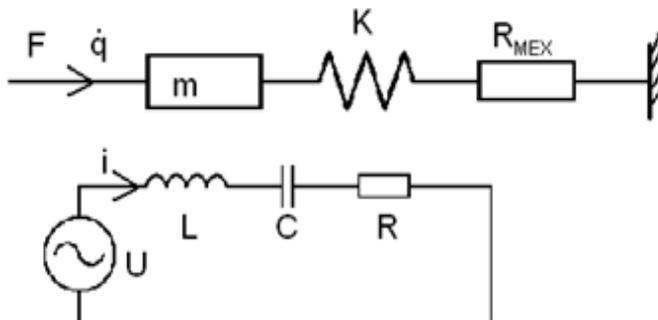


Рисунок 2. 8 – Первая система («сила – напряжение») электромеханических аналогий

Сравнением дифференциальных коэффициентов уравнений (2.24) и (2.25) устанавливаем аналогии системы «сила – ток»: силы F – производной $\frac{di}{dt}$, упругости – величине $\frac{1}{L}$, массы – емкости C , потерь – величине $\frac{1}{R}$ и др. (приложение А).

Оба варианта электрических аналогий являются двумя различными моделями одной и той же механической системы при соответствующих коэффициентах перед обобщенными координатами и их производными.

При анализе более сложных сочетаний электрических компонентов решается система уравнений, представленная матрицей, строки которой соответствуют узлам без одного, а столбцы – ветвям направленного графа электрической схемы, элементы которой равны нулю, единице или минус единице, если данная ветвь соответственно не соединена с данным узлом, направлена от данного узла, направлена к данному узлу [105].

Для исследования динамики механических систем чаще всего используются уравнения Лагранжа второго рода в обобщенных (независимых) координатах, которые содержат минимальное число уравнений, равное числу степеней свободы,

для голономных систем; решаются без учета реакций идеальных связей, по единому алгоритму.

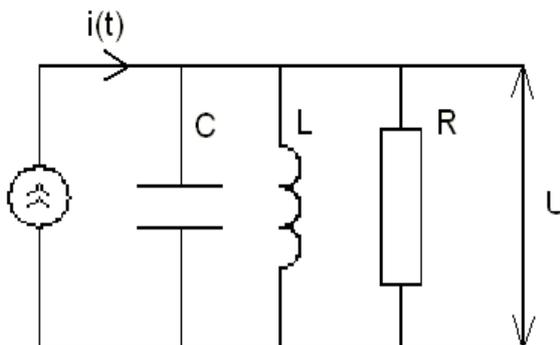


Рисунок 2. 9 – Параллельное соединение электрических элементов

Используя понятие кинетического потенциала $L=T-\Pi$, уравнения Лагранжа механической системы приводятся к виду

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_j \quad \text{для } i=1,2..m \quad (2.27)$$

При исследовании динамических процессов в электромеханических системах используются уравнения Лагранжа – Максвелла [104], в которых к системе m уравнений механической системы присоединяются $n-m$ уравнений, соответствующих электрическим обобщенным координатам.

В качестве таких обобщенных координат используются заряды q^e , представляющие количество электричества, протекшего через поперечное сечение проводника, начиная с некоторого момента $t=0$, образуя систему замкнутых контуров. Обобщенные скорости тогда будут равны контурным токам.

Более сложные электромеханические и другие аналогии имеют место в физических средах, свойства которых зависят от механических, электрических, магнитных и термодинамических величин [106].

Прежде всего, это относится к диэлектрикам, особенно кристаллическим, имеющим структуру в виде системы электрических заряженных элементарных

ячеек, оптических кристаллов и ферромагнитных материалов.

Пьезоэлектрики в электрической области по своим свойствам родственны ферромагнетикам (электрострикция и магнитострикция). Т.е. пьезоэффект как сложная совокупность эффектов является многосторонним и связывает упругие, диэлектрические и тепловые свойства пьезокерамики [106]. Состояние пьезокерамики может характеризоваться следующими параметрами: внешними – напряженностью электрического поля E , механическими напряжениями T , температурой θ (интенсивные величины), и внутренними, изменяющимися под воздействием внешних параметров – соответственно, индукцией D (или поляризацией P), механической деформацией S и энтропией σ (экстенсивные величины). Пьезоэлектрикам присущ нелинейный характер эффектов, имеют место эффекты второго и более высоких порядков взаимодействия (рисунок 2.10).

Процессы в пьезоэлектрической среде (в ПЭ) описывают методами тензорного и матричного анализ. Тензорная форма уравнений является более предпочтительной при решении задач, содержащих координатные преобразования и производные по длине.

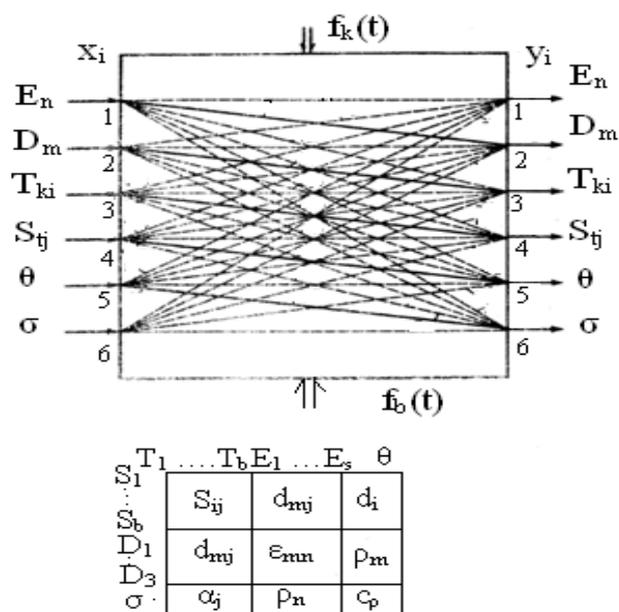


Рисунок 2. 10 – Пьезоэлемент как многомерный, многосвязный объект управления (а) и матрица 10-го порядка ПЭ (б) [106, 142].

2.3 Микроробототехника

Исследования в области микроробототехники ведутся во всех развитых странах мира. По оценкам специалистов в промышленном производстве и медицине 21 века микророботы будут играть ведущую роль. Анализ специалистов NASA показывает, что применение МЭМС позволяет приблизительно на порядок уменьшить ГМХ и потребление энергии аэрокосмических систем [137]. В качестве примеров успешного применения МЭМС в космической технике отмечаются кремниевые гироскопы, акселерометры, датчики давления, клапаны, микроисточники энергии, системы химического и биологического анализа, высокочастотные оптические и механических фильтры, высокочастотные ключи. Национальной нанотехнологической инициативой США предусматривается снижение ГМХ роботов на порядок. Приводы и двигатели, изготовленные по технологии МЭМС, будут способны обеспечить значительные силы и крутящие моменты. Они заменяют обычные механизмы. Такие технологии будут использоваться при создании микроспутников, микрозондов и микропланетоходов.

Технология МЭМС в настоящее время является технологической основой, на которой строится вся зарубежная микро- и миниробототехника. В основе развития и практического использования технологий микросистемной техники лежат технико-экономические факторы.

Перспективным, а также используемым уже в настоящее время, является применение мини- и микророботов в военной технике. Они обеспечивают новые формы ведения боевых, разведывательных обеспечивающих действий с помощью микроминиатюрных средств скрытого наблюдения, надежных и малоуязвимых средств разведки, освещения обстановки, связи, навигации, целеуказания, управления оружием, радиоподавления, охраны [107].

Наиболее интенсивные работы наблюдаются в США по линии проектного агентства перспективных оборонных исследований DARPA. Выполнение проектов по программе осуществляют около 50 фирм и университетов США.

Первыми результатами реализации данной программы явились создание и принятие на вооружение отдельных устройств на основе МЭМС для авиационно-космической техники и ракетно-артиллерийского вооружения. В ходе антитеррористической операции на территории Афганистана спецподразделения армии США активно использовали малогабаритные мобильные переносные роботы «Hermes» для проведения общей разведки, поиска и обезвреживания противопехотных мин. Основные работы в области военной микро - и миниробототехники проводятся по трем программам [108 – 111]:

- управляемые биологические системы (Controlled Biological Systems);
- биоподобные системы (Biomimetic Systems);
- распределенные робототехнические системы (Distributed Systems).

Живые биологические системы обладают сложными и уникальными способностями и взаимодействуют с окружающей средой, что может быть успешно использовано в военной области. Работы по созданию микророботов на основе природных биологических организмов (преимущественно насекомых) ведутся в интересах Министерства обороны США уже в течение длительного времени.

Целью программы управляемых биологических систем является создание прототипов биосистем как платформы для разработки перспективных биосистем поиска, обнаружения, идентификации, измерения. В военных целях, планируется организация исследований по управлению биологическими объектами биотическими методами через физическое, тепловое, нейронное, химическое стимулирование, внедрение управляющих материалов и/или устройств. На естественные биоорганизмы предполагается возложить функции охраны и поиска целей в условиях неизвестной окружающей среды, мелкие существа могут запускаться в развалины зданий в поисках жертв стихийных бедствий, пускаться по трубам с микрокамерами для их обследования и т. д.

Развитие биоподобных микророботов позволит создать роботы более гибкие и устойчивые, чем современные устройства, в условиях неопределенной внешней среды, а также разработать и исследовать новые материалы, промышленные технологии, датчики и приводы. Практические приложения будут включать

разведку, разминирование, доставку полезных грузов, сбор информации, раннего обнаружения радиационных, химических, бактериологических загрязнений и др.

На рис. 2.11 и 2.12 приведены примеры роботов – «биогибридов» и биоподобных роботов [96].

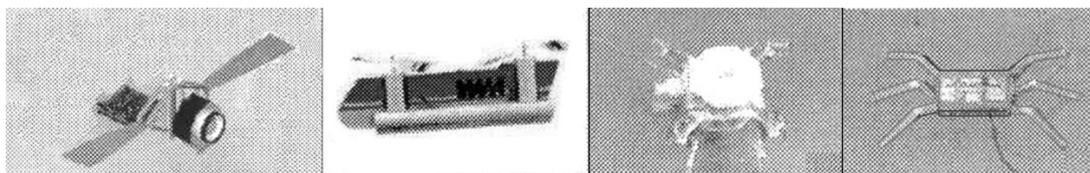


Рисунок 2.11 – Биоподобные роботы

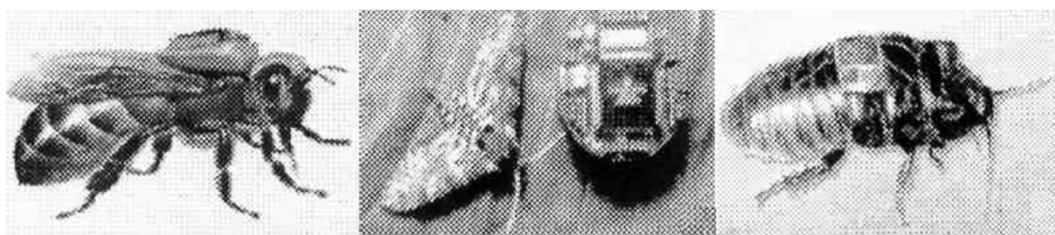


Рисунок 2. 12 – Биологические роботы

Проект микромеханического летающего насекомого, выполняемый в университете Беркли, США предусматривает создание устройств с размахом крыльев 10 – 25 мм, способного осуществлять автономный полет.

Анализ конструкции показал способность пьезоэлектрических двигателей (имеют коэффициент полезного действия до 90-95%) обеспечить необходимые значения плотности энергии и возможность получения требуемой для полета мощности с помощью солнечных батарей. Для летающих микроботов – аналогов природных насекомых – достаточно мощности порядка 10 мВт, что уже в настоящее время дает возможность практического изготовления необходимых крыльев и источников питания. Проблемным остается создание необходимой СУ.

Основное преимущество подобных роботов – невозможность засечь их с помощью средств ПВО. Затруднена также борьба с ними. Возможно гражданское применение в целях контроля окружающей среды [169].

Рядом университетов США разрабатываются биоподобные шагающие микроробототехнические системы алгоритмов распознавания элементов окружающей среды, СУ и элементы искусственного интеллекта.

Роботы должны быть оборудованы высокоэффективными резонансными пьезоэлектрическими приводами, содержать микровидеокамеру и датчики звука или температуры, обеспечивать незаметный поиск целей, взаимодействие с командным пунктом [173].

Разработки систем, имитирующих поведение беспозвоночных, выполняются с целью интеграции в схемы высокого уровня управления, рефлексов низкого уровня. Проекты, подобные «Скорпион» (Scorpion Project), работы для сложных инспекционных задач «Snake 2», являются идеальными для инспекционных, диверсионно-разведывательных систем в узких полостях, коробах, канализационных коллекторах и трубах, чем объясняется значительный интерес, проявляемый к ним во всем мире [145].

Мини-робот «Snake 2» построен в 1999г, имеет 12 колес вокруг каждой секции туловища, крутящий момент >12 Нм для любого звена может двигаться со скоростью 0,1 м/с. Структурно мини-робот может включать до 15 унифицированных секций. В каждой секции установлено по 3 двигателя. Соседние секции соединены универсальным шарниром. У каждой секции есть 6 инфракрасных дистанционных датчиков, 3 моментных датчика, 1 датчик наклона, 2 угловых датчика для измерения положения шарнира.

Видеокамера, расположенная в головной секции робота, предназначена для передачи видеоизображения на удаленный монитор. Ультразвуковые датчики, установленные на голове робота, используются для обнаружения препятствий. Питание осуществляется либо по кабелю, либо за счет энергии батарей, расположенных в хвостовом сегменте. В полностью автоматном режиме мини-робот может работать до 30 мин.

Подводные: восьминое шагающее устройство подобное омару и плавающее, спроектированное по подобию миноги, позволяют проводить совместные исследования дна и толщины воды. Оба устройства обладают робастными

свойствами по отношению к изменяющемуся рельефу дна и широтно-высотному управлению.

Работы в области распределенных робототехнических систем ведутся по следующим основным направлениям:

- уменьшение ГМХ (мини-, микро-, нанороботы);
- роботы с динамически изменяемой структурой;
- системы роботов;
- биоробототехнические системы;
- поиск новых технических методов управления роботами (новые способы связи, элементы искусственного интеллекта).

Большое внимание уделяется оптимальному балансу между индивидуальными возможностями отдельного микро- или мини-робота и возможностями всей робототехнической системы в целом, между интеллектуальными способностями отдельного робота и всей системы.

Распределенные РТС обладают уникальными возможностями по выполнению действий в условиях дистанционного управления, способствующих решению поставленных задач минимального риска людей. Параллельная совместная работа многочисленных микро- или мини-роботов сможет значительно сократить сроки выполнения необходимой работы. Кроме того, применение интегрированной РТС значительно дешевле использования комплексных роботов.

Электростатический привод используется в качестве микропереключателей СВЧ-сигналов, перспективных для использования в космических системах связи, построенных из пикоспутников. Эти переключатели обладают такими преимуществами, как низкие вносимые потери, высокая добротность, низкая потребляемая мощность, хорошая изоляция на высокой частоте и низкая стоимость. Возможность изготовления электромеханических переключателей на одном кристалле с микроэлектронными компонентами открывает перспективу создания систем с более высокой функциональностью.

Сравнительно новым направлением развития в робототехнике является создание устройств бытового назначения. Билл Гейтс [112] считает, что именно это

направление приведет к стремительному росту робототехники, которая сейчас находится в состоянии микроэлектроники и ЭВМ 70-х-80-х годов прошлого века. Технической базой роста должны стать принципы многопроцессорной параллельной обработки информации и разделения задач по подсистемам и времени обработки.

Эти принципы названы:

- concurrency and coordination runtime (CCR) – координации и распределения времени;
- decentralized software services (DSS) – децентрализации обслуживания программного обеспечения.

Разработкой базовых принципов фирма Microsoft занимается уже ряд лет.

Выводы по разделу 2

Для обеспечения эффективности высокоавтоматизированного современного производства важными моментами являются: обоснованный выбор технологического оборудования, мониторинг жизненного цикла и этапа производства в частности, оценка стабильности технологического процесса; действия, направленные на интеллектуализацию производства.

На нижних уровнях управления производственными системами используются разнообразные технические критерии и задачи оптимизации носят многокритериальный характер. По мере подъема по ступеням структурной иерархии технические критерии уступают место экономическим, и в большинстве случаев для оценки эффективности интегрированных технологических систем используется однокритериальный экономический подход.

Для выбора оптимального варианта ТС или ее отдельных компонентов на всех этапах жизненного цикла методологической базой может служить теория принятия решений. Решения могут приниматься в условиях определенности, риска или неопределенности. Одним из когнитивных решений является метод байесовских статистических решений, обладающий рядом преимуществ перед другими.

Статистические методы широко используются и при мониторинге сложных

технологических процессов по критерию стабильности процесса во времени. В производстве МЭМС, гибридных интегральных и полупроводниковых микросхем действует большое число случайных, неуправляемых факторов, которые делают ТП «трудно управляемым», а ТС – динамической системой с дискретными состояниями (ДСДС).

Показателем уровня технологического процесса является выход годных изделий. Во многих видах производства этот показатель регламентируется соответствующими стандартами, из года в год планируется повышение выхода годных. К сожалению, планирование (прогнозирование) выхода годных по этим стандартам не связано с организационными и техническими мерами ТП, что приводит либо к невозможности достижения директивного значения показателя, либо он не полностью использует возможности производства.

Актуальной задачей является разработка технически обоснованного метода расчета выхода годных изделий МСТ. Одним из возможных решений может быть метод, основанный на учете выхода годных конструктивных элементов (КЭ) изделий и их постоянного пересчета по результатам контроля текущего производства.

Перспективные планы совершенствования РЭА реализуются путем планомерного улучшения технологии производства, повышения точности и управляемости ТП. В этом направлении большие надежды возлагаются на создание интеллектуальных технологий, т.е. технологий, включающих в автоматизированные производственные системы элементы искусственного интеллекта.

Для интеллектуальных технологий необходимо создание высокого уровня информатизации хода ТП, т.е. наличие большого числа сенсоров, измеряющих (контролирующих) в реальном масштабе времени параметры процесса и регулирующих их в нужном направлении, необходимы микро ИУС. Система датчиков может быть реализована на компонентах МЭМС, ФЭ и нанотехнологий. К достоинствам МСТ и НТ следует отнести малые габариты и групповые методы изготовления и, соответственно, низкую стоимость изделий при массовом производстве.

Компоненты МЭМС с успехом используются в высокочастотных устройствах.

Пассивные компоненты: резисторы, индуктивности, конденсаторы, фильтры, фазовращатели, линии передач, антенны, микропереключатели, реле, ключи – из-за своей миниатюрности, надежности и простоты монтажа значительно снижают стоимость узлов ВЧ приборов. Разработаны многослойные индуктивности, переменные конденсаторы, резисторы, в том числе мемристоры.

По аналогии с устройствами функциональной электроники (ФЭ) компоненты МЭМС обеспечивают выполнение функций формирования, хранения и обработки сигналов, источниками которых являются акустические, механические, оптические, магнитные, тепловые, электрохимические и другие физические явления. Благодаря своей миниатюрности они позволяют получать матричные, мультисенсорные многофункциональные, многоцелевые прецизионные структуры, что улучшает характеристики и повышает надежность систем обработки информации, расширяет функциональные возможности радио-, акустических, оптических систем локации, навигации, управления, связи и защиты информации [251].

Создание мини- и микророботов, роботов для обследования больших территорий иерархически организованными коллективами роботов – перспективное направление для интеллектуальных МЭМС компонентов.

На основании анализа изменения свойств при микроминиатюризации и совместного действия в МЭМС компонентах сил различной физической природы, приходим к выводам:

1. К методологическим основам микроминиатюризации компонентов МЭМС следует отнести:

- принцип изоморфизма;
- метод подобия и размерностей физических величин;
- электромеханические и другие физические аналогии.

2. Принцип изоморфизма позволяет анализировать явления электро- и теплопроводности, диффузии и переноса вещества, скорости осаждения вещества и другие физические параметры любым другим, выбранным по принципу удобства или доступности и точности измерений.

3. Теория подобия и размерностей физических величин показывает разную

скорость изменения сил различной физической природы:

- поверхностного натяжения; веса; инерции; трения; давления; упругости электростатического и электромагнитного взаимодействия;

4. Пропорциональное уменьшение линейных размеров компонентов МЭМС приводит:

- к повышению быстродействия механических и термических актюаторов и сенсоров;
- при малых размерах доминируют силы, связанные с поверхностью;
- действие силы тяжести (гравитации) уменьшается;
- электростатические силы становятся более эффективными, чем электромагнитные.
- в микроприборах сухое трение преобладает над мокрым;
- добротность механических колебательных систем повышается.

5. Критериями подобия физических явлений в компонентах микроэлектромеханических систем служат характеристические числа – безразмерные величины, являющиеся отношениями различных видов сил, энергии. Для подобия протекания соответствующих процессов – числа Коши, Вебера, Фурье, Фруда, Рейнольдса и другие, должны быть одинаковые;

6. Электромеханические аналогии позволяют рассматривать статическое взаимодействие микромеханических и электронных компонентов на основе принципа Даламбера для механических систем и законов Кирхгофа и Фарадея для электромагнитных цепей. Динамические процессы описываются уравнениями Лагранжа-Максвелла, не требующими расчета реакций опор и дающими систему из n уравнений для n -неизвестных. Использование обобщенных сил, масс, координат и учет миниатюризации механических и электрических компонентов дает возможность составления системы уравнений для их расчета и функционирования в статистическом и динамическом решении работы МЭМС.

7. МЭМС-устройства являются микроминиатюрными информационно-управляющими системами, пригодными для производственных технологий, способными удовлетворить различные требования (интеллектуальности, цифрового

представления информации, многофункциональности, высокой чувствительности и точности, низкой стоимости при массовом производстве и использовании групповых технологий).

8. Объединение электрических и механических устройств на низком уровне интеграции так же позволяет существенно улучшить надежность и электрофизические свойства устройств:

- быстроедействие (например, использование акселерометров с емкостными датчиками в подушках безопасности);
- чувствительность емкостных датчиков (на уровне 100 аФ);
- добротность механических колебательных систем (до 10^5);
- термочувствительность микробалок обеспечивает их возможность в ИК-видении.

9. Уменьшение размеров компонентов обеспечивает повышение их быстрогодействия (и собственной резонансной частоты). Повышается чувствительность датчиков неэлектрических величин. Электростатические двигатели становятся эффективнее электромагнитных, микробалки – эффективными датчиками температуры, являются перспективными чувствительными элементами для инфракрасного видения. Снижается энергопотребление МЭМС-устройств.

10. Перспективным направлением в робототехнике является создание гибко-жестких конструкций с сосредоточенной и распределенной упругостью, а также с изменяемой конфигурацией устройств. Общая теория создания таких устройств еще не разработана.

11. Конвергенция необычных физических явлений в микроминиатюрных изделиях с учетом уменьшения линейных размеров компонентов и изменения соотношения действия различных видов сил, дает возможность создания принципиально новых технических решений для улучшения электрофизических характеристик микрокомпонентов и технико-экономических показателей их производства.

3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1 Математическая модель микробалок

Большое число подвижных элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС): управляемые контактные пары, упругие подвесы, клапаны, кантилеверы, миллипеды, резонансные системы, акселерометры и гироскопы – имеют детали, в форме консольных балок, подверженных действию изгибающих обобщенных сил.

Учитывая размеры элементов МЭМС (от 1 мкм до 1 мм), балки являются простейшими пружинами или участками более сложных композиций из последовательно (и)или параллельно соединенных элементов балок. При изгибе, балка испытывает сложное напряженное состояние, определяемое системой действующих на нее сил, конструкцией и свойствами материала.

К особенностям расчета микробалок относится необходимость учета масштабного фактора, изменяющего соотношение сил гравитации, инерционных сил и сил упругости в твердом теле, инерции и сил поверхностного натяжения и тяжести в жидкой среде и др. При расчете балок используются классические подходы сопромата: методы конечных элементов, начальных параметров, узловый анализ, функции Грина, задачи об изгибе балки.

Для расчета деформации в материалах балок при объемном напряженном состоянии необходим учет действия нормальных и касательных напряжений и в общем случае тензоры напряжений и деформаций определяются для анизотропных материалов 81 компонентной (3^4 – тензором четвертого ранга) [113, 140].

С учетом пространственной симметрии свойств упругости материалов с кубической кристаллической структурой, которой обладает кремний, число независимых переменных уменьшается до 36, а изотропных материалов – до 3.

Компоненты тензоров деформации могут быть выражены через податливости, а тензоров напряжений через упругости (следствие аддитивного действия сил в зоне

упругих деформаций).

В векторно-матричной форме тензоры деформаций и напряжений имеют вид:

$$\varepsilon_i = s_{ij} \delta_{ij}, \quad (3.1)$$

$$\delta_{ij} = c_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (3.2)$$

где s_{ij} , c_{ij} – тензоры, получаемые свертыванием тензоров 4-го порядка s_{ijkl} ,

c_{ijkl} – по правилам суммирования Эйнштейна;

c_{ij} – коэффициенты жесткости;

s_{ij} – коэффициенты податливости материала в направлении действия соответствующего напряжения;

ε_i – относительные деформации (растяжения-сжатия) вдоль осей x , y , z .

Эти коэффициенты определяются свойствами материала, но не являются константами, т.к. зависят еще и от ориентации выбранной системы осей x , y , z .

В приведенных уравнениях тензор s_{ij} – симметричен, т.е. $s_{ij} = s_{ji}$, что вытекает из теоремы равенства работ.

Наиболее простой вид матрицы податливости получает при изотропии свойств материала балки (3.3):

$$s = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

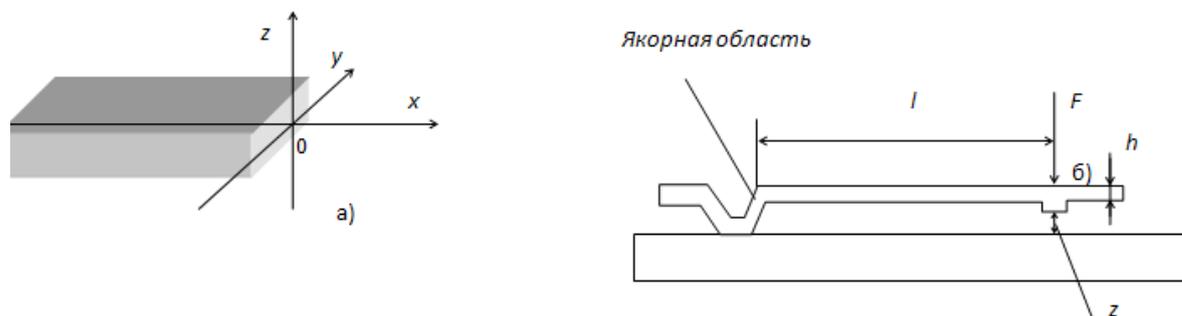


Рисунок 3.1 – Система координат при рассмотрении деформации изгиба балки (а) и консольная балка, работающая на изгиб (б)

Компоненты податливости изотропного материала к действию нормальных напряжений – это величины обратно пропорциональные модулю Юнга E (для s_{ii}).

$$s_{ii} = \frac{1}{E}; \quad (3.4)$$

$$s_{ik} = s_{ki} = -\frac{\mu}{E} \text{ для } i, k = 1, 2, 3, \quad (3.5)$$

$$s_{ii} = \frac{1}{G} \text{ для } i, k = 4, 5, 6. \quad (3.6)$$

Здесь E – модуль Юнга.

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (3.7)$$

Динамика движения сложной балки представленной на рисунке 3.2 в общем случае определяется дифференциальным уравнением второго порядка в виде:

$$[m]\{\ddot{\xi}\} + [R]\{\dot{\xi}\} + [K]\{\xi\} = \{F\}, \quad (3.8)$$

где $\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ – перемещения, скорости и ускорения выбранных узловых точек балки соответственно;

$[m]$ – система матриц массы структурного участка балки, кг;

$[R]$ – системы матриц демпфирования, потерь, Нм/с;

$[K]$ – системы матриц жесткости участка балки, элементы матрицы имеют разные размерности для деформации растяжения-сжатия и изгиба, $\frac{I}{i}$;

$\{\xi\} = \{x_i, z_i, \theta_i, \dots, x_N, z_N, \theta_N\}$ – координаты узлов N трехкомпонентных векторных столбцов; $\{F\}$ – вектор обобщенных сил (M, Q, q).

Любые связанные между собой участки балки в точках соединений имеют одинаковые смещения по координатам и угол поворота сечения для выполнения условия непрерывности. Размер матрицы всей системы зависит от числа выбранных узлов балки.

Поперечные отклонения $\mathcal{G}(x)$, осевые смещения $\nu(x)$ и угол сдвига $\theta = \frac{d\mathcal{G}}{dx}$ можно описать тремя степенями свободы в каждом узле.

В промежутках между узлами условие равновесия балки определяется уравнением:

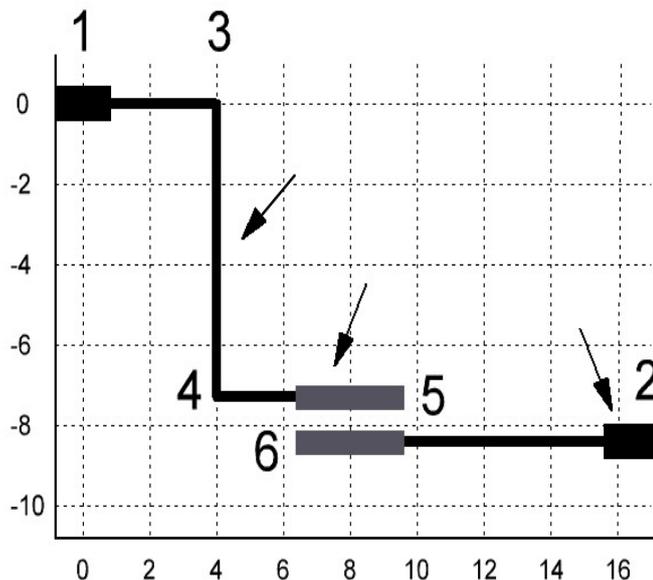
$$\frac{\partial^4}{\partial x^4} \mathcal{G}(x) = 0 \quad (3.9)$$

Решение уравнения с учетом граничных условий для обоих концов участка балки дает 4 уравнения с 4 неизвестными.

Выражая функции $\nu(x)$ и $\theta(x)$ и группируя подобные члены, получаем:

$$\mathcal{G}(x) = H_1(x)\mathcal{G}_1 + H_2(x)\theta_1 + H_3(x)\mathcal{G}_2 + H_4(x)\theta_2. \quad (3.10)$$

В этом равенстве $H_i(x)$ – кубические функции.



1, 2 – анкер; 3, 4, 7 – узлы; 5, 6 – свободные концы балок

Рисунок 3.2 – Сложная балка

В уравнении движения балки жесткость K и компоненты тензора жесткости k_{ij} характеризуют амплитуду отклонения тела, точек тела от положения статического равновесия под действием единичной силы и имеют размерность $[H/M]$. Величины c , обратные жесткости называются упругостью и имеют размерность $[M/H]$.

В матрице податливости s_{ij} имеют размерности $[M^2/H]$, а модули упругости $c_{ij} - [H/M^2]$. Таким образом, по установившейся в теории сопромата и теории упругости терминологии модули упругости c_{ij} соответствуют жесткости K единичной длины, а податливости s_{ij} – упругостям $c = \frac{1}{k}$. Тогда

$$k_{ij} = c_{ij}l, \quad c_{ij} = \frac{S_{ij}}{l}. \quad (3.11)$$

Коэффициент относительной жесткости балки при деформации растяжения-сжатия определяется как отношение жесткости ES к длине l , т.е. $K_{\delta\delta\tilde{\delta}} = \frac{ES}{l} [H/M]$.

Здесь S – площадь поперечного сечения балки.

При деформациях изгиба целесообразно ввести понятие «эквивалентной жесткости» участка балки длиной l , связанное с прогибом конца этого участка, которое необходимо для «сшивки» сложной составной балки. Прогиб конца балки под действием сосредоточенной силы обратно пропорционален кубу длины и пропорционален жесткости сечения при изгибе EJ_y . Тогда $K_{e\check{\alpha}} = \frac{EJ}{l^3} [H/M]$.

Тогда матрица жесткости изгиба балки будет представлена в виде матрицы 6×6 :

$$K = \frac{E}{l^3} \begin{bmatrix} Sl^2 & 0 & 0 & -Sl^2 & 0 & 0 \\ 0 & 12J & 12EJ & 0 & -12J & 6Jl \\ 0 & 6Jl & 6EJl & 0 & -6Jl & 2Jl \\ -ESl^2 & 0 & 0 & Sl^2 & 0 & 0 \\ 0 & -12J & -12EJ & 0 & 12J & -6Jl \\ 0 & 6Jl & 6EJl & 0 & -6Jl & 4Jl \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Жесткость балки можно рассчитать по теореме Кастильяно [114], в соответствии с которой сила равна частной производной от потенциальной энергии системы по перемещению точки приложения силы вдоль направления этой силы:

$$F_i = \frac{\partial S}{\partial \xi_i}, \quad (3.13)$$

где F_i – сила или момент, а ξ_i – смещение координат для степеней свободы $i = 1, 2, 3$, т.е. для $\xi = x, z, \theta$ соответственно.

Для линейной модели потенциальная энергия балки постоянного сечения определяется как сумма энергии перемещения и изменения формы:

$$S = \frac{EJ}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x) \right)^2 dx + \frac{EA}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial}{\partial x} u(x) \right)^2 dx. \quad (3.14)$$

Подстановка этого выражения в предыдущие определяет компоненты жесткости в виде:

$$K_{ij} = EJ \int_0^l H_i''(x) H_j''(x) dx + EA \int_0^l H_i'(x) H_j'(x) dx, \quad (3.15)$$

которая дает приведенную ранее матрицу жесткости балки.

Матрицы масс m_{ij} и демпфирования R находятся приравниванием внутренней и внешней работ, вызванных виртуальными перемещениями:

$$m_{ij} = \int_0^l \rho(x) S(x) H_i(x) H_j(x) dx, \quad (3.16)$$

где $\rho(x)$ – плотность и $S(x)$ – площадь поперечного сечения по оси x .

При расчетах сложных балок [157], составленных из линейных участков, расположенных в одной плоскости но ориентированных различно, каждый участок балки воздействует на смежные с ним силами реакции, а свойство самого участка может быть охарактеризовано эквивалентными параметрами жесткости для деформации растяжения-сжатия и изгиба соответствующими коэффициентами ($K_{\delta\alpha\tilde{n}\delta}$, $K_{\delta\zeta\tilde{a}}$).

Так, при увеличении длины балки с жесткостью K в n раз при неизменном поперечном сечении, ее жесткость может быть получена как:

$$K_1 = \frac{EJ_y}{(nl)^3} = \frac{K}{n^3}. \quad (3.17)$$

Конструктивно удлиненная балка может быть представлена в виде «свернутой» конструкции из 2-х или более последовательных участков, соединенных жесткими перемычками.

Точка крепления пружины (анкер) удалена от поддерживаемого груза на расстояние $2l$ (рис. 3.3, а).

Участки балки могут соединяться параллельно, увеличивая площадь поперечного сечения балки (рис. 3.3, б) (высоту h).

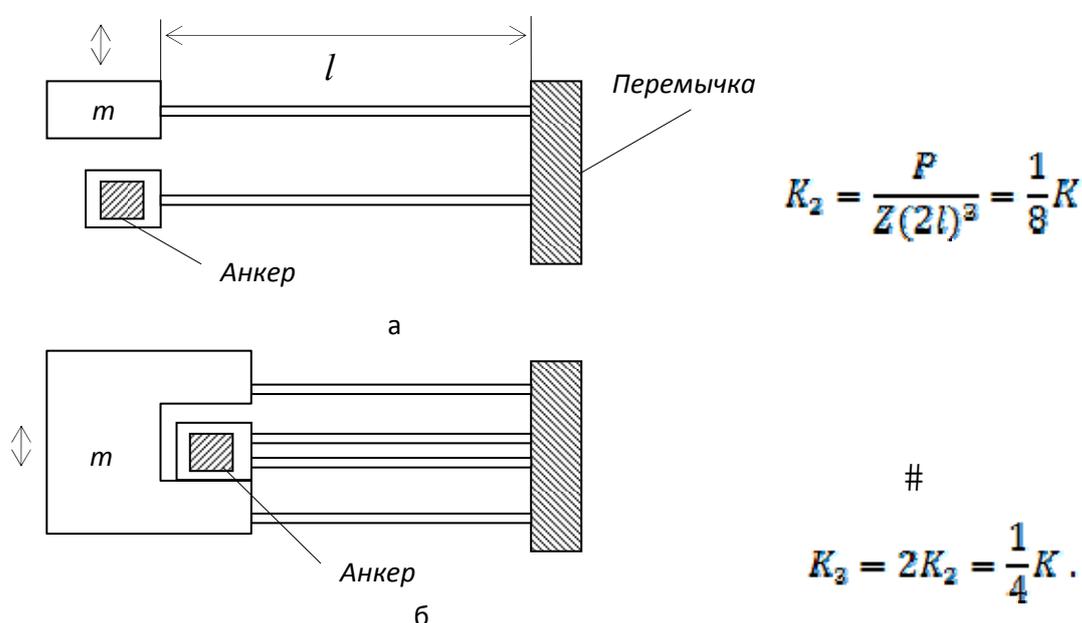


Рисунок 3.3 – Последовательное (а) и параллельное (б) соединение балок

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1) форма оси изгиба балки определяется в общем случае кривой четвертого порядка и зависит от системы действующих сил и свойств материала балки. Напряженное состояние и деформации описываются тензорами четвертого ранга. Количество независимых переменных тензоров уменьшается при симметрии и изотропии упругих свойств материала и для изотропных материалов равно трем;

2) решение дифференциального уравнения четвертого порядка с учетом граничных условий узлов определяет параметры матриц деформации, статические и динамические характеристики системы;

3) используя эквивалентные параметры жесткости участков балок можно

рассчитывать более сложные конструкции балок.

3.2 Математические модели емкостных элементов

Среди МЭМС, на основе которых создаются приборы для управления движением, одними из наиболее распространенных являются акселерометры, в которых или съем сигнала, или электростатическое воздействие на подвижный элемент, или оба действия вместе реализуются с помощью одиночного или дифференциального микромеханического конденсатора [144].

Очевидно, что для конденсатора зависимость между приложенным напряжением, протекающим током и изменяющейся во времени емкостью в более простом для моделирования виде выражается зависимостью тока от напряжения и емкости:

$$I = -\frac{dQ}{dt} = -(V \cdot \frac{dC}{dt} + C \cdot \frac{dV}{dt}). \quad (3.18)$$

Аналогичным образом схема дифференциального микромеханического конденсатора замещается трехполосником с двумя источниками тока. При этом функциональная зависимость источников определяется выражениями:

$$I_1 = -\frac{dQ_1}{dt} = -(V_{21} \cdot \frac{dC_1}{dt} + C_1 \cdot \frac{dV_{21}}{dt}); \quad (3.19)$$

$$I_2 = -\frac{dQ_2}{dt} = -(V_{32} \cdot \frac{dC_2}{dt} + C_2 \cdot \frac{dV_{32}}{dt}). \quad (3.20)$$

Схемы замещения показаны на рисунке 3.4.

Расчет потенциалов в узлах схемы и их производных осуществляется в любой системе анализа электронных схем и соответственно в PSPICE. Следовательно, дальнейшим этапом разработки динамических моделей ЕМС является

математическое описание уравнений движения подвижных элементов ЭМС и соответствующее получение выражений для емкости.

Для плоского конденсатора (рис. 3.4) накопленная энергия U может быть рассчитана по формуле:

$$U = CV^2/2, \quad (3.21)$$

где C – емкость и V – напряжение между обкладками конденсатора.

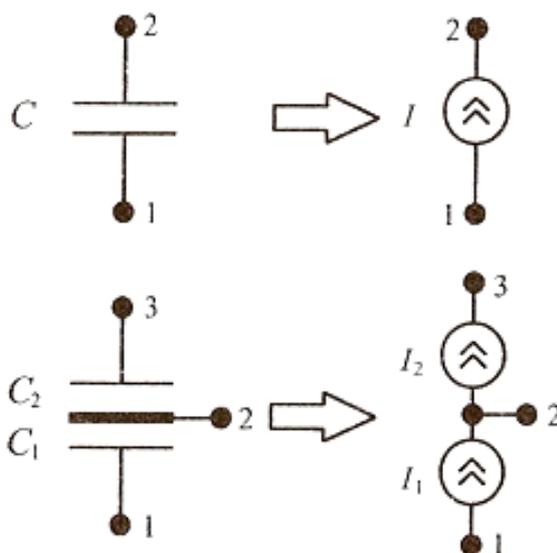


Рисунок 3.4 – Схема замещения одиночного и дифференциального конденсаторов ЭМС зависимыми источниками тока

Когда пластины конденсатора перемещаются навстречу друг другу, работа, совершаемая силой взаимодействия между ними, может быть рассчитана, как изменение U в зависимости от изменения расстояния x . Сила рассчитывается по формуле (3.22) с учетом выражения определения C :

$$F_x = V^2 \partial C / \partial x / 2 \quad (3.22)$$

Существует несколько вариантов реализации электростатических актюаторов на основе плоскопараллельных конденсаторов (рис. 3.5).

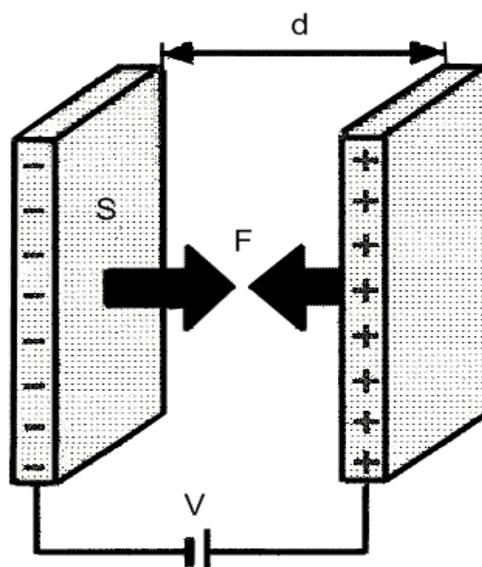


Рисунок 3.5 – Модель плоского конденсатора

К первому типу относятся конструкции с линейным перемещением подвижного электрода между жестко закрепленными неподвижными электродами, а ко второму – конструкции с вращением относительно оси упругих подвесов – торсионов.

Идеальными механическими элементами являются: элементы массы, элементы упругости и элементы трения. Или просто масса, упругость, трение.

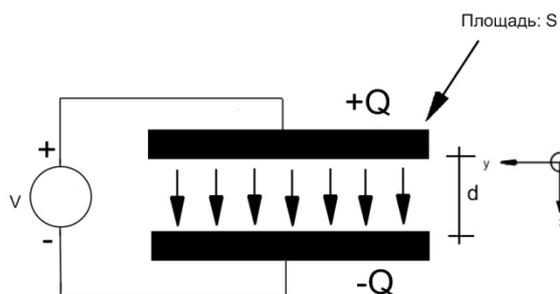
Масса характеризует связь ускорения, преобразуемого механическим элементом под действием приложенной силы:

$$F=ma \quad (3.23)$$

Упругость – элемент механической цепи, в которой при закреплении какой-либо из точек или ряда точек этого элемента и при приложении к другой его точке силы F относительно перемещению указанных точек противодействует только упругая сила.

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{x}$$

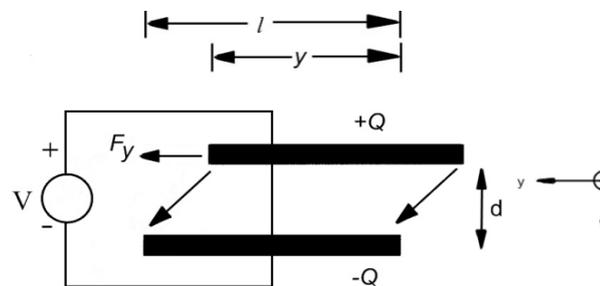
$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{x^2} V^2$$



a

$$C = \frac{\epsilon_0 y Z}{d}$$

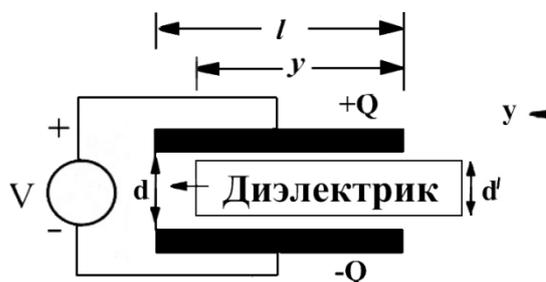
$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 Z}{d} V^2$$



б

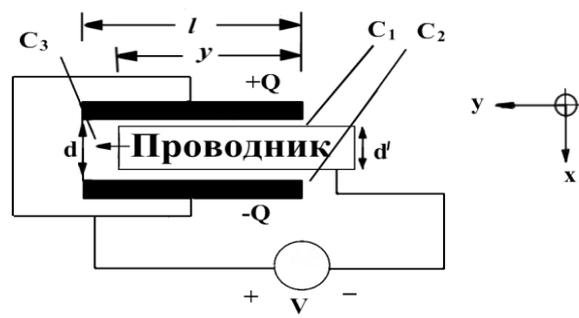
$$C = C_{\text{возд}} + C_{\text{серд}} = \frac{\epsilon_0 (l-y) z}{d} + \frac{\epsilon_0 l y}{d}$$

$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 (\epsilon_d - 1) z}{d} V^2$$



в

$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 z d}{d(d-d')} V^2$$



г

а – перпендикулярное движение обкладок; б – смещение обкладок по длине;

в – введение диэлектрика в зазор; г – введение в зазор проводника

Рисунок 3.6 – Варианты изменения емкости конденсаторов

При этом величина силы упругости пропорциональна относительному перемещению x и коэффициенту упругости k :

$$F = kx, \quad (3.24)$$

т.е. kx представляет собой реакцию упругой силы, уравновешивающую приложенную силу: упругость k равна отношению приложенной к упругому

элементу в некоторой точке силы к величине перемещения под действием этой силы. Вместо упругости иногда применяют «жесткость». Обычно этот термин относится к свойствам некоторого упругого элемента, представленного определенной конструкцией. При кручении жесткостью называется произведение отражающее влияние размеров поперечного сечения на деформируемость при кручении. А G представляет собой модуль упругости при сдвиге.

Сила трения пропорциональна относительной скорости перемещения:

$$F = \eta \frac{dx}{dt} . \quad (3.25)$$

Но возможны более сложные зависимости сил трения от скорости.

В модели дифференциального конденсатора в случае линейных ускорений подвижная пластина конденсатора перемещается прямолинейно относительно неподвижных, под воздействием внешнего ускорения, т.е. действующей силой является сила $m \frac{d^2x}{dt^2}$, где m – масса подвижной обкладки конденсатора.

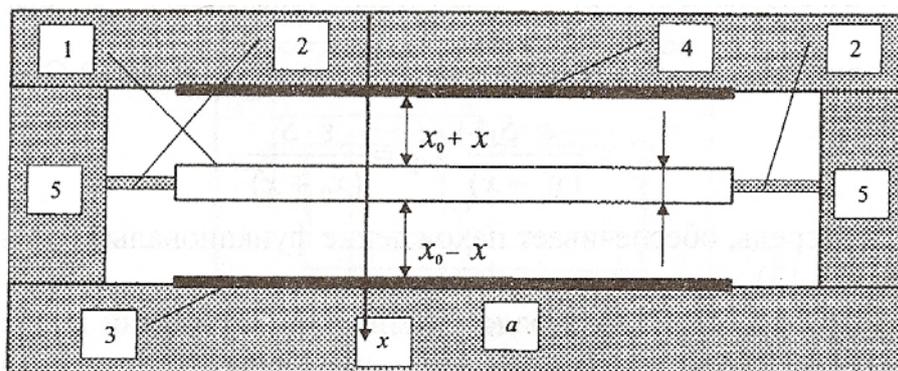
Для всякой механической системы в состоянии динамического равновесия $\sum F_i = 0$.

В используемой модели сила $m \frac{d^2x}{dt^2}$ уравнивается силой упругости подвеса kx и демпфирования $\eta \frac{dx}{dt}$, а также разностью сил электростатического взаимодействия подвижной пластины с неподвижными:

$$\frac{\varepsilon S V_{12}^2}{2(x_0 + x)^2} - \frac{\varepsilon S V_{12}^2}{2(x_0 - x)^2} \quad (3.26)$$

Поскольку все эти силы в данном случае описываются тривиальными выражениями, то общее уравнение выглядит следующим образом:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - R \frac{dx}{dt} - kx - \frac{\varepsilon \cdot S \cdot V_{12}^2}{2(x_0 + x)^2} + \frac{\varepsilon \cdot S \cdot V_{12}^2}{2(x_0 - x)^2} = 0. \quad (3.27)$$



1 – кремниевый подвижный электрод; 2 – упругий подвес; 3 – подложка с первым управляющим электродом (напряжение V_{12} относительно подвижного электрода); 4 – подложка со вторым управляющим электродом (напряжение V_{32} относительно подвижного электрода); 5 – рамка крепления упругого подвеса

Рисунок. 3.7 – Схема акселерометра на основе плоского микромеханического дифференциального конденсатора

Значение емкостей C_1 и C_2 определяются:

$$C_1 = \frac{\varepsilon S}{(x_0 - x)}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon S}{(x_0 + x)} \quad (3.28)$$

Для другого случая дифференциального конденсатора, подвижный электрод которого совершает вращательное перемещение относительно оси проходящей через центр торсионов упругого подвеса. Активными обобщенными силами являются крутящий момент, создаваемый неуравновешенной массой маятника под действием ускорения a , а также моменты электростатического взаимодействия частей подвижной пластины с неподвижными электродами. Они уравновешиваются моментом сил трения и моментом сил упругости, развиваемым закручиванием торсиона.

Угол закручивания торсионного подвеса α определяется зависимостью

$$\alpha = \frac{M_k \ell}{GJ_{\text{торс}}}. \quad (3.29)$$

где, M_k – момент кручения торсиона,

$J_{\text{торс}}$ – полярный момент инерции поперечного сечения торсиона,

G – модуль упругости при сдвиге,

ℓ – длина торсиона.

Жесткостью при кручении в механике определяется произведением $GJ_{\text{торс}}$, то есть, момент кручения торсиона представляется в виде:

$$M_{\text{кр}} = \frac{GJ_{\text{торс}} \alpha}{\ell}, \quad (3.30)$$

где ℓ – длина торсионного подвеса.

Полярный момент инерции поперечного сечения S торсиона определяется по формуле:

$$J = \int_S \rho^2 dS \quad (3.31)$$

Крутящий момент маятника создается за счет разности масс левой и правой части маятника, что отображено в формуле (3.32).

Крутящий момент, действующий на маятник вследствие внешнего ускорения:

$$M(a) = \frac{1}{2} a \rho W h (L_2^2 - L_1^2) \cos \alpha, \quad (3.32)$$

a – приложенное внешнее ускорение,

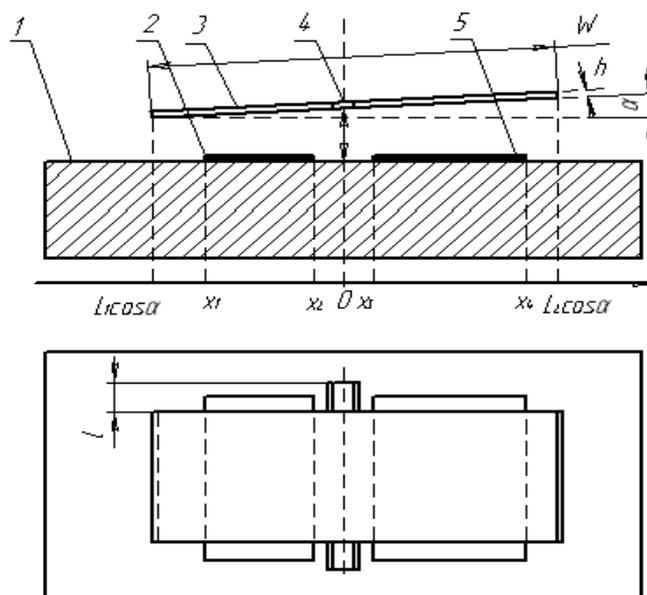
α – угол поворота торсиона,

ρ – плотность материала маятника,

h – толщина маятника,

W – ширина маятника,

L_1, L_2 – длина левой и правой частей маятника.



- 1 – кремниевый маятник (подвижный электрод); 2 – торсионы подвеса;
 3 – первый управляющий электрод (напряжение V_{12} относительно маятника);
 4 – второй управляющий электрод (напряжение V_{32} относительно маятника);
 5 – подложка

Рисунок 3.8 – Конструкция маятникового акселерометра

Момент, действующий на маятник вследствие электростатического притяжения

$$M_{\text{ЭС}} = M_{\text{ЭС1}} + M_{\text{ЭС2}}, \quad (3.33)$$

где, $M_{\text{ЭС1}}$ и $M_{\text{ЭС2}}$ – моменты электростатического притяжения левой и правой части подвижной обкладки.

Момент демпфирования:

$$M_d = \eta \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3.34)$$

где η – коэффициент силы торможения,

α – угол поворота торсиона.

Результирующее уравнение угловых колебаний маятника представляет собой сумму воздействующих на него моментов.

$$\sum_i^n M_i = 0. \quad (3.35)$$

Уравнение колебаний маятника принимает следующий вид:

$$M(a) + M_K + M_{\text{эс}} + M_d = 0 \quad (3.36)$$

Знаки моментов в уравнении (3.30) определяются в соответствии с законами, принятыми в классической механике: момент направленный по часовой стрелке считается положительным, против – отрицательным.

Момент инерции самой балки никакого сопротивления вращению (кроме несимметричного, например трение о воздух) не оказывает .

Уравнение зависимости емкости от угла поворота маятника, приобретает следующий вид:

$$C_1 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\varepsilon W dx}{d(x, \alpha)} = \left(\frac{\varepsilon W}{\text{tg}\alpha} \ln \frac{d + X_2 \text{tg}\alpha}{d + X_1 \text{tg}\alpha} \right); \quad (3.37)$$

$$C_2 = \int_{x_3}^{x_4} \frac{\varepsilon W dx}{d(x, \alpha)} = \left(\frac{\varepsilon W}{\text{tg}\alpha} \ln \frac{d + X_4 \text{tg}\alpha}{d + X_3 \text{tg}\alpha} \right); \quad (3.38)$$

При малых значениях α уравнения (3.19), (3.20) упрощаются:

$$C_1 = \varepsilon W \left(\frac{X_2}{d + X_2 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{X_1}{d + X_1 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (3.39)$$

$$C_2 = \varepsilon W \left(\frac{X_4}{d + X_4 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{X_3}{d + X_3 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (3.40)$$

Полученная модель акселерометра позволяет определять зависимость изменения емкости от приложенной внешней силы.

3.3 Расчет встречно-штыревого микрорезонатора

На рисунке 3.9 представлена горизонтальная проекция встречно-штыревого микрорезонатора. Приведенные размеры элементов конструкции дают представление о масштабном коэффициенте микромеханических элементов. Симметрия колебательных элементов системы обеспечивает высокую чувствительность системы вдоль одной оси x .

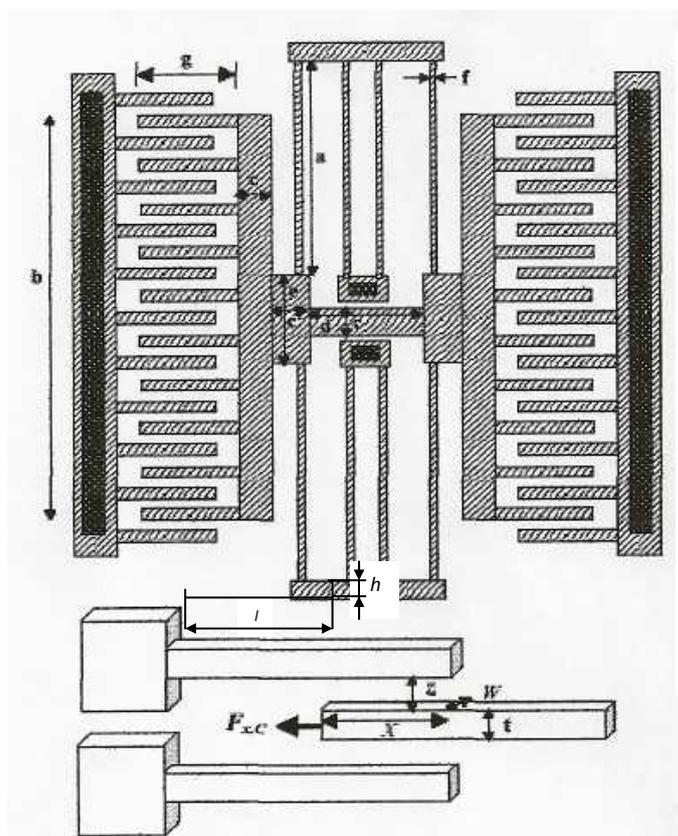
Масса подвижных частей резонатора m может быть рассчитана по формуле (или другой, учитывающей особенности конструкции):

$$m = \rho_{poly} w(2bc + 2ce + cd + 20tg). \quad (3.41)$$

Жесткость пружин определяется, исходя из последовательного и параллельного соединения частей, а именно: одна пружина (от точки крепления к корпусу до точки крепления груза массой m) состоит из последовательно соединенных двух участков длиной a , т.е. $l = 2a$, между собой эти части скреплены недеформирующейся перемычкой.

Всего пружин в конструкции – 4. Каждая из четырех внутренних частей пружин, ближних к анкеру при отклонении груза в одну из сторон имеет

одинаковое распределение нормальных напряжений растяжения-сжатия на одинаковых удалениях от оси изгиба, проходящей через центр элемента крепления. Аналогичное утверждение справедливо для четырех частей, соединенных с грузом, т. е. эти 4 пружины соединены между собой параллельно.



Исходные данные

$$a=112 \text{ мкм};$$

$$b=120 \text{ мкм};$$

$$c=12 \text{ мкм};$$

$$d=30 \text{ мкм};$$

$$e=24 \text{ мкм};$$

$$f=2,0 \text{ мкм};$$

$$g=30 \text{ мкм};$$

$$X=20 \text{ мкм};$$

$$w=3,5 \text{ мкм};$$

Рисунок – 3.9 – Конструкция встречно-штыревого микрорезонатора

Жесткость одной пружины:

$$k_1 = \frac{Ewf^3}{4(2a)^3} = \frac{Ewf^3}{32a^3}. \quad (3.42)$$

Жесткость 4-х пружин, соединенных параллельно в четыре раза выше (можно сказать, что ширина одной пружины W стала в четыре раза больше).

$$k = 4k_1 = \frac{Ewf^3}{8a^3} \quad (3.43)$$

Пользуясь принципом электромеханических аналогий, определяем частоту резонанса колебательной системы:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad (3.44)$$

$$\beta = \frac{\omega_0 m}{Q} \quad (3.45)$$

Максимальная сила электростатического взаимодействия:

$$F_{x,c} = \frac{dc}{2dx} U^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{xw \cdot n \cdot 2}{z} U^2 = \frac{\varepsilon_0 n w}{z} U^2 \quad (3.46)$$

Здесь:

$$k \cdot \Delta x = F_{x,c} \quad (3.47)$$

$$\Delta x = \frac{F_{x,c}}{k} \quad (3.48)$$

Энергия входа:

$$N_{\text{вх}} = \int IV dt = \int \frac{dQ}{dt} V dt = \int_0^{\tau} V^2 dC \quad (3.49)$$

Энергия выхода

$$N_{\text{вых}} = \int_0^{\Delta x} (F_{x,c} - F_i) dx = \int_0^{\Delta x} \left(\frac{\varepsilon_0 n w}{z} U^2 - k \Delta x \right) dx = \frac{\varepsilon_0 n w}{z} U^2 \Delta x - k \frac{\Delta x^2}{2} \quad (3.50)$$

Коэффициент полезного действия резонатора:

$$\eta = \frac{N_{\text{вблх}}}{N_{\text{вх}}} \quad (3.51)$$

3.4 Моделирование пьезопреобразователя

Миниатюризация источников питания (ИП) электронной аппаратуры отстает от миниатюризации полупроводниковых приборов примерно в 50 раз.

Пользуясь возможностями нанотехнологий и микроэлектромеханических систем, разработчики стремятся создавать альтернативные виды ИП, в том числе встраиваемые непосредственно в микросхемы.

Общая идея создания таких источников заключается в преобразовании в электрическую энергию различных видов энергии окружающей среды. К ним относятся вибрации или колебания, удары, разность температур, биохимические факторы, УЗ волны, акустические шумы, энергия выделяемая движущимися объектами (направление «Energy harvest»).

Так потенциальными источниками в теле человека является механическая и тепловая энергия, химическая и гидравлическая энергия системы кровообращения.

Среди различных преобразователей энергии, не востребованных ранее, находятся пьезопреобразователи.

Пьезоэлектрические материалы обладают прямым и обратным пьезоэффектом, что обеспечило их широкое использование как в качестве сенсоров так и прецизионных актюаторов, микро- и наноисточников питания, преобразователей энергии.

Существует много оценок эффективности преобразования механической энергии в электрическую. Наиболее общими оценками являются максимальный электрический заряд, который можно получить от единичного объема пьезоэлемента (ПЭ), при максимальной механической нагрузке, или максимальное значение энергии, которую можно получить от ПЭ путем его деполяризации.

Особенностью пьезопреобразователей механической энергии в электрическую являются высокие напряжения и малые выходные токи ($U \geq 5 \text{êÁ}$, $^2 \approx 10 \text{îêÁ}$, при длине ПЭ $l = 10 - 15 \text{î}$). Для сохранения энергии на выходном конце используется заряд конденсатора значительной емкости через схему выпрямления (рис. 3.10).

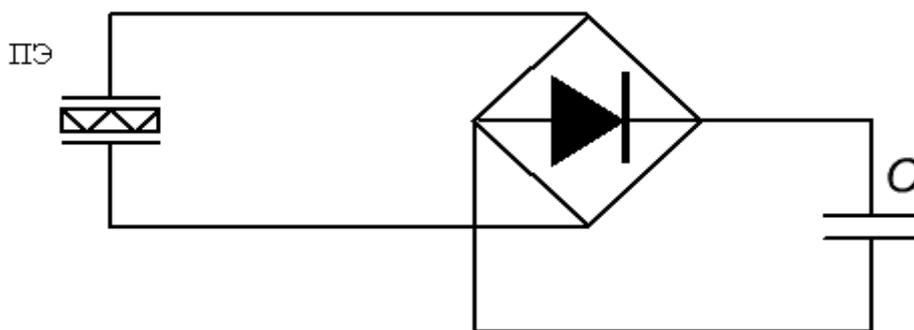


Рисунок 3.10 – Преобразователь с параллельным конденсатором

Максимальная плотность энергии для пьезокерамики ЦТС (PZT) достигает при холостом ходе $1,2 \text{ Вт/см}^3$ [165], но в течение очень короткого промежутка времени (до разряда через искру или C_0 (пробой диэлектрика)).

Подключение параллельно C_0 конденсатора. C понижает напряжение, генерируемого заряда Q :

$$Q = C_0 U_0 = (C_0 + C)U \quad (3.52)$$

Эквивалентная схема преобразователя на ПЭ из ЦТС представлена на рис 3.11.

Но, к сожалению, снижается количество энергии, запасаемой на конденсаторе C .

$$P = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} \quad (3.53)$$

Повысить эффективность преобразования возможно использованием ПЭ в виде пакета дисков, шайб с $h \leq 0,5 - 1 \text{ мм}$, металлизированных медью. Диски в пакете соединяются параллельно. C_0 ПЭ увеличивается, напряжение U уменьшается, ток возрастает. Влияние параллельного конденсатора уменьшается.

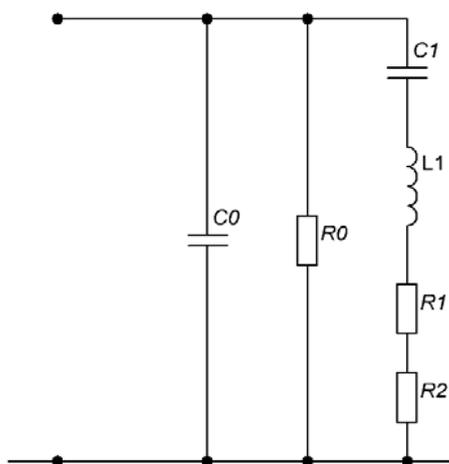
$$\begin{cases} Q = d_{33}F + C_0U \\ X = K_{33}U + K_{\text{оїд}}F \end{cases} \quad (3.54)$$

где d_{33} – пьезоэлектрический модуль;

X – изменение длины ПЭ;

K_{33} – модуль обратного пьезоэффекта;

$K_{\text{оїд}}$ – коэффициент упругости материала ПЭ.



C_0 – статическая емкость ПЭ минус C_1 ; C_1, L_1 – емкость и индуктивность механической системы; R_0 – определяется механическими потерями при колебаниях нагрузки; R_1 – механические потери в L_1 , R_2 – потери на излучение.

Рисунок 3.11 – Эквивалентная схема ЦТС-преобразователя

В работе (патент Украины № 108314 [115]). предложено решение циклического возбуждения ПЭ, установленных в колесо автомобиля с определенным угловым шагом.

Использоваться могут либо ПЭ, размещенные между двумя кольцами из

конструкционной керамики, либо пленочные ПЭ пакеты с полосками разной длины (которые будут иметь разную эффективность при различной скорости движения автомобиля). Необходимая проводниковая разводка всех ПЭ обеспечивается многослойной разводкой, колец из конструкционной керамики (изготавливается по технологии «сырой керамики»). Решение может быть эффективным также для мобильных микророботов.

Выводы по разделу 3

В разработанных математических моделях, пригодных для расчета МЭМС-компонентов, учтены следующие особенности:

- консольные балки в МЭМС выполняют функции механических и термических датчиков, элементов жесткости (пружин), исполнительных устройств (актюаторов);

- чувствительные элементы на основе консольных и балок сложной конструкции имеют высокую чувствительность к механическим и тепловым воздействиям, что позволяет получить высокие значения электро-физических параметров;

- объединение различных видов сил, действующих в МЭМС-компонентах, позволяет повысить быстродействие механических и тепловых актюаторов, чувствительность и добротность микромеханических резонансных систем;

- электрическое возбуждение и емкостные элементы в МЭМС используются в различных вариантах изменения емкости: за счет изменения зазора, или площади перекрытия обкладок, с поступательным и вращательным движением в электронную схему;

- выполненный расчет резонатора с встречно-штыревой структурой дает представление о масштабах физических величин, действующих в МЭМС структуре;

- показана возможность использования пьезоэлектрических преобразователей механической энергии для создания микромощных источников питания и

направления повышения их эффективности.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

4.1 Выбор стратегии управления с использованием марковских процессов

Компьютеризированные интегрированные системы являются эффективным средством автоматизации в серийном и мелкосерийном производстве различных отраслей промышленности.

Такие системы обеспечивают:

- увеличение фонда рабочего времени технологического оборудования до трех раз;
- рост мобильности производства, т. е. способности освоения новых типов изделий с минимальными временными, трудовыми и материальными затратами (в пределах конструктивно-технологических решений, реализуемых комплексом технологического оборудования системы);
- увеличение производительности оборудования;
- повышение качества выпускаемой продукции;
- снижение длительности технологического цикла производства;
- автоматизацию транспортно-складских работ и сокращение страховых заделов полуфабрикатов и комплектующих изделий.

Обеспечение экономической эффективности является важнейшей задачей, решаемой оптимизацией структуры и состава производственных систем (ПС) при проектировании стратегии управления, алгоритмов функционирования и управления компонентами системы, использованием оптимальных технологических режимов обработки, обеспечением высокой надежности технологических средств.

«Стоимость управления» (в широком смысле этого слова) в производственных системах становится соизмеримой с затратами энергии, труда и материальных средств на разработку и изготовление ее оборудования. Значимость и сложность

задач управления обусловлены их иерархической структурой, стохастическим характером многих процессов, большой размерностью задач, динамичностью и территориальной распределенностью элементов и модулей ПС, необходимостью эффективного использования дорогостоящего основного и вспомогательного оборудования, даже кратковременные простои которого ведут к большим экономическим потерям.

На нижних уровнях производственных систем действуют разнообразные технические критерии оптимизации, и сами задачи носят многокритериальный характер. По мере подъема по ступеням структурной иерархии ситуация, как правило, изменяется, и технические критерии уступают место экономическим. В настоящее время в большинстве случаев для оценки эффективности ПС используется однокритериальный экономический подход.

Для выбора оптимального варианта компьютеризированных интегрированных систем или их отдельных компонентов из возможных решений методологической базой может быть теория принятия решений

В производстве МЭМС и НТ, полупроводниковых структур, гибридных интегральных схем и ряде других видов производства, содержащих «трудно управляемые процессы», технологические режимы часто определяются на основе статистических данных, которые получают по результатам контроля изготовленных партий изделий.

Удобным параметром оптимизации при этом является выход годных изделий, который характеризует точность технологического процесса и легко пересчитывается в затраты на производство.

Значительное число технологических процессов (ТП) электронных приборов, изделий приборо- и машиностроения ввиду действия многих неуправляемых факторов производства носит случайный характер, т.е. представляет собой динамические управляемые стохастические процессы.

Одной из основных проблем управления такими процессами является принятие решений в стохастических процессах [116], в частности, управляемых марковских процессах [117] как наиболее изученного класса процессов ввиду их

относительной простоты. Методы принятия решений в них основываются на управлении по состоянию, которое может изменяться под влиянием управлений некоторым случайным образом.

Марковские процессы решений были впервые введены Беллманом [118] и выделены в специальный класс задач динамического программирования, развиты Ховардом [119]. Процессы решений исследовали многие зарубежные и отечественные ученые [116].

Рекуррентные методы принятия оптимальных решений в условиях риска и неопределенности, позволяющие решать задачи больших размерностей и приспособленные к специфике ПС, предложены в [116] и других работах Баранова В.В.

В работах [120, 121] представлен алгоритм поиска оптимальной стратегии управления ТП применительно к автоматизированным технологическим системам, в том числе компьютеризированным производственным системам, определены основные задачи построения такой стратегии для ТП с дискретным временем в условиях неопределенности, то есть при неизвестной функции переходных вероятностей $Q = \{q_{xz}\}$.

Выделены задачи идентификации функции Q , определения оптимального момента остановки, выбора управления на каждом шаге принятия решения с учетом результатов наблюдения процесса. В работе [121] разработан метод идентификации функции Q на примере биномиального распределения q_{xy} с неизвестным параметром распределения λ , который уточняется по формуле Байеса. Для упрощения пересчетов используется аппарат сопряженных распределений [122].

Известны общие подходы определения оптимальных моментов остановки в вероятностных задачах оптимального управления в простейших по структуре задачах об оптимальном выборе момента коррекции объекта, движущегося стохастическим образом, последовательного анализа в математической статистике, о выборе наилучшего объекта, основанные на использовании метода «обратной индукции» («индукции назад»).

Целью данной работы является построение метода определения оптимального

момента остановки, дающего максимальную величину дохода при неограниченном во времени продолжении ТП с дискретным временем. При этом будем полагать, что множество состояний E и управлений Y конечны и E образует один эргодический класс состояний. Обобщенным примером такого процесса является изготовление какого-либо изделия партиями фиксированного объема, в котором состоянием служит выход годных изделий в партии (или «процент выхода годных» при произвольных объемах партий).

На каждом шаге i выбора управления используется уточненное по результатам наблюдений, полученным до $i-1$ шага процесса значение параметра λ . Управление y_k^i выбирается решающей функцией по состоянию системы в момент $i-1$, значению параметра λ .

Для использования методики управления процессами разнообразной природы приводится физическая интерпретация действий операторов и их свойств, рекуррентных способов расчета функции выигрышей и сравнения стратегий.

Стратегия управления дискретными ТП в системе, определяемой набором объектов $\{E, Y, Q, P, R\}$, при неизвестной функции переходных вероятностей представляет собой последовательность управлений $f_1, f_2 \dots f_m, \pi, \pi, \dots$, под действием которых система в момент применения управления из состояний $x_i \in E$ переходит в состояние $z_i \in E$ с вероятностями $q_{xz} \in Q$. Наблюдаемые значения z_i используются для уточнения переходных вероятностей, а также для расчета выигрыша (дохода) от использования управления $y_k \in Y$ на i -ом шаге управления. После m наблюдений, когда матрица переходных вероятностей достаточно точно идентифицирована, выбирается стационарное управление π для последующего неограниченного отрезка времени. Для того, чтобы стратегия (последовательность принимаемых управлений) на первых m шагах была оптимальной, управление f_i , используемое на каждом шаге i , должно обеспечивать максимальный выигрыш с учетом полученных на данный момент переходных вероятностей. Этот выигрыш $\mathcal{G}^{(i)}$ является функцией примененных управлений [116]:

$$g^{(i)} = g^{(i)}(f_1, f_2, \dots, f_i), \quad (4.1)$$

т.е. управляемый процесс является неоднородной цепью Маркова:

$$x = (x_i, F_i, q_x^i) \text{ для } i = 0, 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

здесь F_i – σ -алгебра, интерпретируемая как совокупность событий, наблюдаемых до момента i включительно,

q_k^i – распределение вероятностей, отвечающее начальному состоянию x в момент времени i , т.е. рассчитанное по результатам $i-1$ шага.

Выигрыш на одном шаге управления определяется в виде математического ожидания, из которого вычтены затраты C_0 на проведение эксперимента (наблюдения) и пересчета вероятностей

$$w_x(x, y_k) = \sum_{z=0}^n w(x, y_k, z) q(x, z | y_k) - C_0, \quad (4.3)$$

т.е. это x -овая координата выигрыша на одном шаге.

За m шагов, в течение которых уточняются переходные вероятности, чистый выигрыш составит

$$g^{(m)}(x, f^{(m)}) = \sum_{i=0}^m w_{x_i}(x_i, f_i) - mC_0. \quad (4.4)$$

На временном отрезке $m+1, \dots, \infty$ переходные вероятности остаются неизменными, стратегия – стационарной, и обеспечивается заключительный выигрыш:

$$r_m(x, \pi) = \lim_{L \rightarrow \infty} \left\{ M_x \sum_{l=m+1}^L w(x_l, \pi, z_l) - M_z \sum_{l=m+1}^L w(z_l, \pi, z_l) \right\} = u^{(m)}(x, \pi) - u^{(m)}(z, \pi) \quad (4.5)$$

Известно [118], что вектор $r_m(x, \pi)$ сходится со скоростью геометрической прогрессии, z -вероятностный вектор, все координаты которого одинаковы, он не зависит от исходного состояния системы $x_i(0)$ и является собственным вектором матрицы $Q = \|q_{xz}\|$, принадлежащим характеристическому числу 1 [123], т.е. $z = \lim_{l \rightarrow \infty} x(l)$.

Общий выигрыш $g_m(x, f^{(m)}\pi)$, получаемый на неограниченном отрезке времени $0, 1, \dots, \infty$ определяется суммой:

$$g_m(x, f^{(m)}\pi) = \mathcal{G}^{(m)}(x, f^{(m)}) + r_m(x, \pi). \quad (4.6)$$

Изменение общего выигрыша при изменении m . Для $m=0$ естественно положить:

$$v_0(x, f^{(0)}) \equiv 0.$$

Тогда $g_0(x, f^{(0)}\pi) = g_0(x, \pi) = r^{(0)}(x, \pi) = r(x, \pi)$.

Поскольку относительный выигрыш $r^{(m)}(x, \pi)$ конечен для $m < \infty$, то и g_m при этом конечен.

Кроме того, из (4.5) следует, что

$$\lim_{m \rightarrow \infty} r^m(x, \pi) \rightarrow 0. \quad (4.7)$$

Поэтому:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} g_m(x, f^{(m)}\pi) = \lim_{m \rightarrow \infty} \mathcal{G}^{(m)}(x, f^{(m)}). \quad (4.8)$$

В технологическом процессе легко определить функцию выигрыша, обеспечивающую его ограниченность, например, величиной увеличения стоимости

годных изделий партии, полученного за счет роста выхода годных.

Согласно (4.4, 4.6) выигрыш уменьшается на сумму затрат mC_0 при возрастании m и функция суммарного выигрыша возрастает лишь, пока плата за вычисление апостериорных параметров и доходов не превосходит математического ожидания непосредственного выигрыша на последующем шаге. Необходимо определить момент остановки $m < \infty$, максимизирующий получаемый выигрыш, т.е. определить случайную величину t , принимающую значения из множества $\{1, 2, 3, \dots\}$ и такую, что событие $\{t=m\}$ определяется полностью значениями f_1, f_2, \dots, f_m и не зависит от будущих значений f_{m+1}, \dots . Математическое ожидание $M\mathcal{G}^{(m)}$ имеет смысл среднего выигрыша для правила остановки m .

Супремум $V = \sup M\mathcal{G}^{(m)}$ по классу S всех возможных правил остановки m , для которых $M\mathcal{G}^{(m)}$ существует, называется ценой последовательности $\{\mathcal{G}^{(m)}\}$, и если найдется некоторое правило остановки m , для которого $M\mathcal{G}^{(m)} = V$, то m будет оптимальным.

Для выигрыша в виде (4.6) оптимальный момент остановки определится как момент $t = m < \infty$, для которого

$$M_x \{g_m\} = M \{g_m(x, f^{(m)}\pi)\} \quad (4.9)$$

достигает цены

$$S(x) = \sup_m M_x g_m. \quad (4.10)$$

Важным положением для определения оптимального момента остановки является возможность прогнозирования выигрыша $g_{m+1}(x, f^{(m+1)}\pi)$ после выполнения серии m экспериментов (без выполнения $(m+1)$ -го эксперимента).

Действительно, если $\varphi_m(\lambda|z)$ – апостериорная плотность распределения параметра λ , определяющего функцию распределения переходных вероятностей $Q(x, y, z)$, после серии из m экспериментов, а $q_m(z, \cdot)$ – апостериорные переходные

вероятности, то учитывая конечное число состояний системы, можно вычислить, не производя нового эксперимента, апостериорную плотность распределения параметра λ для каждого $z = z_{m+1} \in E$, т.е. функцию $\varphi_{m+1}(\lambda | z)$:

$$\varphi_{m+1}(\lambda, z_m, e_{m-1}(z_{m-1}, y)) = \varphi_{m+1}(\lambda | z_m, y) = \frac{q(z_m, z_{m+1} | \lambda, y) \cdot \varphi_m(\lambda | y)}{\int_{\Lambda} q(z_m, z_{m+1} | \lambda, y) \cdot \varphi_m(\lambda | y) d\nu(\lambda)} . \quad (4.11)$$

Для расчета переходной функции $q(x, z)$ будем использовать значение параметра λ , которое является его байесовской оценкой, т.е. точкой принятия решения d , которое доставляет минимум риску $p[\varphi(\lambda), d]$, или ущербу от расхождения значения d и истинного значения параметра λ . В задачах оценивания вещественного параметра хорошо изученной функцией потерь является квадратическая функция:

$$L(\lambda, d) = a(\lambda - d)^2 ,$$

которая имеет байесовскую оценку $d = \lambda^*$ при любом заданном распределении λ , и минимизирует значение риска $M[(\lambda - d)^2]$.

Очевидно, $d = \lambda^* = M(\lambda)$. При этом минимальное значение риска:

$$M[(\lambda - M(\lambda))]^2 = \text{var } \lambda .$$

Для получения рекуррентных зависимостей общего выигрыша и поиска оптимальной остановки с помощью метода обратной индукции определим ряд операторов: $T(f_i)[7], F(f_i), F_{C_0}(f_i), U, U_m^{*C_0}$.

$$T(f_i)w(x) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{z=0}^n w(x, f_i, z)q(x, z | f_i) = M_x^{f_i} w(x, f_i) \quad (4.12)$$

$T(f_i)$ является достаточной статистикой выигрыша [122], что использовано в

[121] для упрощения процедуры пересчетов переходных вероятностей за счет применения сопряженных распределений.

Формула (4.12) определяет семейство линейных операторов $\{T_t\}, t \in S$. Это семейство образует полугруппу, которая является сжимающей:

$$T_s \cdot T_t = T_{s+t}, \quad s, t \in S.$$

$$\|T_t f\| \leq \|f\|, \quad t \in S.$$

Пусть $u(x)$ – некоторая конечнозначная вещественная ограниченная функция выигрышей на E (определение $u(x)$ приведено ниже).

Введем оператор $F(f_i)$, который позволяет рассчитывать выигрыш для стратегии $f_i \pi$, т.е. вставляет управление f_i перед стратегией $\pi = (\pi_0, \pi_1 \dots \pi_m)$:

$$F(f_i)u(x) \stackrel{\text{def}}{=} w(x, f_i) + T(f_i)u(x) \quad \text{для } i = 0, 1, 2, \dots \quad (4.13)$$

Поддействуем оператором $F(f)$ на выигрыш $\mathcal{G}^{(m)}(x, \pi)$:

$$\begin{aligned} F(f)\mathcal{G}^{(m)}(x, \pi) &= T(f)[w(x) + \mathcal{G}^{(m)}(x, \pi)] = M_x^f [w(x) + M_x^{\pi_m} \sum_{i=0}^m w(x_i, f_i, x_{i+1})] = \\ &= M_x^f w(x, f, x_1) + M_x^f M_x^{\pi_m} \sum_{i=0}^m w(x_i, \pi_i, x_{i+1}) = M_x^f w(x, f, x_1) + \\ &+ M_x^{\pi_m} \sum_{i=1}^{m+1} w(x_i, \pi_i, x_{i+1}) = M_x^{\pi_m} \sum_{i=0}^{m+1} w(x_i, \pi_i, x_{i+1}) = \mathcal{G}^{(m+1)}(x, f\pi). \end{aligned} \quad (4.14)$$

Итак,

$$F(f)\mathcal{G}^{(m)}(x, \pi) = \mathcal{G}^{(m+1)}(x, f\pi) \quad \text{для } m = 0, 1, 2, \dots \quad (4.15)$$

Оператор $F(f)$ реализует шаг назад в методе «обратной индукции» при

расчете выигрыша.

Учет затрат C_0 на каждом шаге наблюдения процесса и пересчете переходных вероятностей обеспечивает оператор F_{C_0} :

$$F_{C_0}(f)\mathcal{G}^{(m)}(x, \pi) \stackrel{\text{def}}{=} F(f)\mathcal{G}^{(m)}(x, \pi) - (m+1)C_0 = \mathcal{G}^{(m+1)}(x, f\pi) - (m+1)C_0 \quad (4.16)$$

для $m = 0, 1, 2, \dots$

Предположим, что в некоторый момент времени $t > 0$ известны значения $x_t = t; \lambda_t = \lambda$ и $f_t = f$. Будем считать момент t начальным при рассмотрении процесса, а (x, λ, f) – начальными условиями.

Введем переменную l , принимающую значения $0, 1, \dots, t$ и будем производить отсчет моментов времени в обратном порядке, начиная с момента t , т.е. $l = t - t'$, где t и t' – фиксированные моменты времени и $t' \leq t$.

Найдем условные математические ожидания $M\{u(x_l) | x, \lambda, y\}$. Так как математические ожидания рассматриваются после наблюдения величины x_l для l таких, что $t' = t - l \leq t$, то будем считать его апостериорным математическим ожиданием.

Положим, что значение параметра λ и управление фиксированы для всех $l = 0, 1, \dots, t$. Пусть $Q(y, \lambda)$ – оператор усреднения по мере, задаваемой переходной вероятностью $Q(\cdot | x, \lambda, y)$, т. е.

$$Q(y, \lambda)u(x) = \sum_{z=0}^n u(z)Q(z | x, \lambda, y) \quad (4.17)$$

Положим тогда для $l = 0, 1, \dots, t$

$$M\{u(x_l) | x, \lambda, y\} = Q^l(y, \lambda)u(x) \quad (4.18)$$

Для $l = 0$

$$M\{u(x_0) | x, \lambda, y\} = u(x). \quad (4.19)$$

В адаптивном процессе значения параметра λ_t , $t=1,2,\dots$ выбираются с помощью метода идентификации δ , а управление y_k^t , $t=0,1,2,\dots$ – с помощью стратегии управления $\pi(\delta) = \{\pi_0^\delta, \pi_1^\delta, \dots\}$.

Определим апостериорное математическое ожидание для этого случая. Пусть до момента t включительно наблюдалась некоторая траектория $x_0^t = (x_t, \dots, x_0)$, для некоторого момента $t' \leq t$ выбрано значение параметра $\lambda_{t'} = \delta(x_0^{t'}, \pi_0^{t'-1})$. Используя переменную l , запишем $\lambda_{t-l} = \delta(x_0^{t-l}, \pi_0^{t-l-1})$.

Оператор $Q(y, \lambda)$, определенный при $y = \pi_{t-l}(x)$, $x \in E$ и $\lambda_{t-l} = \delta(x_0^{t-l}, \pi_0^{t-l-1})$, обозначим $Q(\pi_{t-l}, \delta)$. Тогда апостериорное математическое ожидание $M^{\pi(\delta)}\{u(x_t) | x_0^t\}$ определяется следующим образом:

$$M^{\pi(\delta)}\{u(x_t) | x_0^t\} = \prod_{j=0}^{t-1} Q(\pi_{t-j}, \lambda_{t-j}) u(x_t), \quad l=1, \dots, t. \quad (4.20)$$

Это математическое ожидание зависит от всей наблюдаемой траектории $x_0^t = (x_t, \dots, x_0)$. Однако зависимость от наблюдения x_t выражается в явном виде, а от предшествующих наблюдений $x_0^{t-1} = (x_{t-1}, \dots, x_0)$ – неявно, через зависимость операторов Q от оценок, выбираемых с помощью заданного метода идентификации δ .

Тогда, выделяя зависимость от x_t , запишем апостериорное математическое ожидание в виде

$$M^{\pi(\delta(x_0^t))}\{u(x_t) | x_t\} = \prod_{j=1}^l Q(\pi_{t-j}, \lambda_{t-j}) u(x_t), \quad l=1, \dots, t. \quad (4.21)$$

Поскольку переходная плотность вычисляется последовательно рекуррентным способом по результатам экспериментов, то $g_m(x)$ также определим рекуррентным

способом:

$$\begin{aligned}
 g_m(x, f^{(m)}\pi) &= g_m(x, f_m f^{(m-1)}\pi) = T(f_m)[w(x) - C_0 + g_{m-1}(x, f^{(m-1)}\pi)] = \\
 &= w(x, f_m) + T(f_m)g_{m-1}(x, f^{(m-1)}\pi) - C_0 = F(f_m)g_{m-1}(x, f^{(m-1)}\pi) - C_0 = \\
 &= F_{C_0}(f_m)g_{m-1}(x, f^{(m-1)}\pi)
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Очевидно следующее представление для функции g_m :

$$\begin{aligned}
 g_m(x, f^{(m)}\pi) &= F_{C_0}(f_m)F_{C_0}(f_{m-1})\cdots F_{C_0}(f_1)g_0(x, \pi) = \\
 &= F_{C_0}(f_m)F_{C_0}(f_{m-1})\cdots F_{C_0}(f_1)r(x, \pi)
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Т.е. функция g_m является некоторым относительным выигрышем, полученным путем преобразования относительного выигрыша $r(x, \pi)$ с помощью оператора $[F_{C_0}(f_n)\cdots F_{C_0}(f_1)]$.

В начале процесса ($m=0$) адаптивного построения оптимальной стратегии необходимо, чтобы стратегия π была оптимальной в условиях априорной информации о процессе. Возможно также задание некоторых начальных значений параметра, определяющего переходные вероятности процесса.

Оптимальность стратегии после выполнения каждого очередного эксперимента обеспечивает применение оператора $U_{C_0}(f_m)$:

$$U_{C_0}(f_m) \stackrel{def}{=} \sup_{\pi_m} F_{C_0}(\pi_m), \tag{4.24}$$

где π_m – решающая функция при наличии информации о процессе после выполнения серии m экспериментов.

Рассмотренные операторы $T, F, F_{C_0}U_{C_0}$ – монотонные, субрегулярные [116], а функции $g_m(x), u(x), u^{(m)}(x, \pi)$ эксцессивны относительно операторов F_{C_0}, U_{C_0} при некотором $m < \infty$ или операторы F_{C_0}, U_{C_0} сохраняют эти функции при $m < \infty$. При

этом функция $u(x, \pi)$ является эксцессивной мажорантой функции $g(x, \pi)$.

Тогда функция g_m , построенная с помощью оператора $[U_{C_0}(f_m) \cdots U_{C_0}(f_1)]$, представляет собой тот максимальный относительный выигрыш, который может быть получен после выполнения серии m экспериментов ровно, а следовательно, стратегия $f^{(m)}\pi$ оптимальна на первых m шагах адаптивного управления.

Используя $g_m(x, f^{(m)}\pi)$ в качестве начального относительного выигрыша, выберем оптимальную стационарную стратегию $\sigma_m^\infty = (\sigma_m, \sigma_m, \dots)$, которая будет m -оптимальной адаптивной стратегией, т.к. она оптимальна с точностью до той информации о процессе, которая получена по результатам серии m экспериментов.

Нестационарная стратегия $\pi, f_1, \dots, f_m, \sigma_m, \sigma_m, \dots$ очевидным образом максимизирует выигрыш на всем неограниченном промежутке времени, начиная с $m=0$, т.е. она будет (g_m, m) оптимальной стратегией. Пусть теперь $m \in M$ есть S -оптимальный момент остановки процесса идентификации. Тогда функция $u^{(m)}(x)$ совпадает с ценой и представляет тот максимальный относительный выигрыш, который вообще может быть получен при адаптивном синтезе оптимальной стратегии, т.е. она будет (S, m) -оптимальной адаптивной стратегией.

Может оказаться, что $m = \infty$, т.е. может не существовать конечного момента остановки, тогда необходимость вычисления стационарной стратегии отпадает.

Оптимальной адаптивной стратегией будет (S, m) -оптимальная стратегия $(\pi^m \sigma_m^\infty)$, если $m < \infty$, и стратегия $(\pi, f_1, f_2, \dots), (S, m)$, если $m = \infty$.

Таким образом, задача построения (S, m) -оптимальной адаптивной стратегии сводится к отысканию S -оптимального момента остановки m и способа отыскания цены $S_m(x)$ для последующего вычисления m -оптимальной стационарной стратегии σ_m^∞ , если $m < \infty$.

Цена марковского процесса с дискретным временем определяется с использованием понятий эксцессивных, регулярных функций и наименьших эксцессивных мажорант.

Функция $u(x, \pi) \in B$ называется эксцессивной, (для процесса X или относительно оператора U^{*C_0}), если при всех $x \in E$ определены математические

ожидания

$$U^{*C_0}u(x, \pi) = M_x u(x, \pi) \quad \text{и} \quad U^{*C_0}u(x, \pi) \leq u(x, \pi) \quad (4.25)$$

т.е. если оператор U^{*C_0} является оператором сжатия.

Экссессивная функция $u(x, \pi) \in B$ называется экссессивной мажорантой функции $g(x, \pi) \in B$, если $u(x, \pi) \geq g(x, \pi)$, $x \in E$. Экссессивная мажоранта $u(x, \pi)$ функции $g(x, \pi)$ называется наименьшей экссессивной мажорантой $g(x, \pi)$, если $u(x, \pi)$ меньше или равно любой $\mathcal{U}(x, \pi)$ экссессивной мажоранте функции $g(x, \pi)$.

Пусть для некоторого $m < \infty$, $m = 0, 1, 2, \dots$ функция $u_m(x)$ экссессивна относительно $U_m^{*C_0}$. Такую функцию будем называть m -регулярной, если для любого $\tau \in M$ $u_m(x) = MU_{m+\tau}^{*C_0} \dots U_m^{*C_0} u_m(x)$.

Если $L(A^-)$ и $L(A^+)$ – совокупности функций $g(x, \pi)$, удовлетворяющие следующим условиям:

$$A^- : M_x^\pi \{ \sup_m g_m^-(x, \pi) \} < \infty \quad \text{для} \quad x \in E, \quad \text{где} \quad g^-(x, \pi) = -\min(g, 0); \quad (4.26)$$

$$A^+ : M_x^\pi \{ \sup_m g_m^+(x, \pi) \} < \infty \quad \text{для} \quad x \in E, \quad \text{где} \quad g^+(x, \pi) = \max(g, 0). \quad (4.27)$$

Пусть функция $g_m(x) \in L(A^+)$. Тогда, если при некотором $m < \infty$ функция $g_m(x)$ экссессивна относительно оператора $U_m^{*C_0}$, то она m -регулярна, т.е. $g_m(x) \geq U_m^{*C_0} g_m(x)$.

Тогда неравенства справедливы для любого $\tau \in \bar{M}$, т.е. $g_m(x) \geq U_{m+\tau}^{*C_0} \dots U_m^{*C_0} g_m(x)$.

Отсюда вытекает неравенство

$$g_m(x) \geq MU_{m+\tau}^{*C_0} \dots U_m^{*C_0} g_m(x), \quad (4.28)$$

что означает m -регулярность функции $g_m(x)$.

Пусть $\{U_k^{*C_0}, k = 1, 2, \dots\}$ – последовательность операторов, построенных по

апостериорным маргинальным переходным функциям.

Обозначим $\tilde{U}_{C_0}^* = \lim_{k \rightarrow \infty} U_k^{*C_0}$.

Этот предел существует, при этом апостериорное распределение параметра сходится к его истинному значению для конечномерного дискретного распределения параметра λ [122].

При использовании оператора $\tilde{U}_{C_0}^*$ понятие m -регулярности эксцессивной функции заменяется понятием регулярности, подчеркивая, что регулярная функция не зависит от индекса $m = 0, 1, \dots$ и для марковских функций моментов $\tau, \sigma \in \bar{M}$ таких, что $\tau \geq \sigma$ с вероятностью 1

$$M_x \{ u_\sigma \} \geq M_x \{ u_\tau \}. \quad (4.29)$$

В частности, если $\sigma = 0$, то

$$u(x) \geq M_x \{ u_\tau \} \quad (4.30)$$

Тогда

$$MU_{C_0}^{*\sigma} u(x) \geq MU_{C_0}^{*\tau} u(x) \quad (4.31)$$

$$M \{ u_\sigma(x) \} \geq M \{ u_\tau(x) \} \quad (4.32)$$

И для $\sigma = 0$ получаем

$$u(x) \geq MU_{C_0}^{*\tau} u(x) = M \{ u_\tau(x) \}. \quad (4.33)$$

После остановки процесса идентификации в момент m вычисляется m -оптимальная стратегия σ_m^∞ . И пусть C_1 – плата за вычисление этой стратегии. Определим оператор U_m^{*C} с целью учета этой платы

$$U_m^{*C} = U_m^{*C_0} - C_1. \quad (4.34)$$

Очевидно, что свойства монотонности, регулярности, сжатия справедливы и для оператора U_m^{*C} .

Введем оператор G , необходимый для определения S -оптимального марковского момента

$$Gg_0(x) = \max\{g_0(x), U_0^{*C}g_0(x)\}. \quad (4.35)$$

Положим, что его m -тая степень есть:

$$G^m g_0(x) = \max\{G^{m-1}g_0(x), U_{m-1}^{*C}Gg_0(x)\}. \quad (4.36)$$

Тогда функция

$$\varphi(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} G^m g_0(x) \quad (4.37)$$

является наименьшей регулярной \tilde{U}_C^* эксцессивной мажорантой функции $g(x)$ для $g_0(x) \in L(A^+)$, либо $g_0(x) \in L(A^-)$.

Действительно, если $g_0(x) \in L(A^+)$, то согласно (3.36)

$$G^{m+1}g_0(x) \geq G^m g_0(x). \quad (4.38)$$

С учетом ограниченности сверху имеем: $\lim_{m \rightarrow \infty} G^m g_0(x)$ существует и конечен.

$$\varphi(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} G^m g_0(x) \geq g_0(x) \quad (4.39)$$

$$\varphi(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} G^m g_m(x), \quad m = 1, 2, \dots, \quad (4.40)$$

т.е. функция $\varphi(x)$ является мажорантой $g_m(x)$.

Вместе с тем функция $\varphi(x)$ эксцессивна относительно оператора U_c^* .

Применяя теорему Лебега о монотонной сходимости, имеем:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \lim_{m \rightarrow \infty} G^m g_0(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} \max\{G^{m-1} g_0(x), \tilde{U}_c^* G^{m-1} g_0(x)\} = \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \max\{\varphi_m(x), \tilde{U}_c^* \varphi_m(x)\} = \max\{\varphi(x), \tilde{U}_c^* \varphi(x)\} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Откуда $\varphi(x) \geq \tilde{U}_c^* \varphi(x)$, т.е. $\varphi(x)$ эксцессивна относительно оператора \tilde{U}_c^* .

Функции $\varphi(x)$, кроме того, является наименьшей эксцессивной мажорантой функции $g_n(x)$ и равна цене $\varphi(x) = S(x)$.

Оператор \tilde{U}_c^* не зависит от индекса $m = 0, 1, 2, \dots$, и из эксцессивности функции $\varphi(x)$ следует, что $\varphi(x) \geq \tilde{U}_c^* \varphi(x)$ для $m = 0, 1, 2, \dots$

Тогда справедливо неравенство:

$$\varphi(x) \geq M \tilde{U}_c^{*\sigma} \varphi(x) \text{ для } \sigma \in \bar{M} \quad (4.42)$$

что означает регулярность эксцессивной функции $\varphi(x)$.

Если $g_0(x) \in L(A^-)$, доказательство выполняется аналогичным способом.

Так как цена является мажорантой функции $g_0(x)$, а $\varphi(x)$ является наименьшей \tilde{U}_c^* - эксцессивной мажорантой $g_0(x)$, то

$$S(x) \geq \varphi(x) \quad (4.43)$$

Имеем:

$$\varphi(x) \geq M_x \{\varphi_\sigma\} \geq M_x \{g_\sigma\}, \sigma \in \bar{M} \quad (4.44)$$

Тогда

$$\varphi(x) \geq \sup_{\sigma \in \bar{M}} M_x \{g_\sigma\} = S(x) \quad (4.45)$$

Вместе (4.44) и (4.45) дают $S(x) = \varphi(x)$.

Пусть определен марковский момент $\tau \in \overline{M}$:

$$\tau = \inf\{m : G^{m+1}g_0(x) = G^m g_0(x)\}, \quad (4.46)$$

Тогда, если $g(x) \in L(A^+)$, то τ является S -оптимальным моментом остановки, т.е. $\tau \in M$.

Если $g(x) \in L(A^-)$, $\tau = \infty$ является S -оптимальным марковским моментом.

Действительно, пусть $g(x) \in L(A^+)$.

Т.к. $G^{m+1}g_0(x) \geq G^m g_0(x)$, то из определения момента τ следует, что до момента τ имеют место строгое неравенство:

$$G^{m+1}g_0(x) > G^m g_0(x), \quad m = 0, 1, \dots, \tau - 1, \quad (4.47)$$

а в момент $\tau = m$

$$G^{m+1}g_0(x) = G^m g_0(x) \quad (4.48)$$

Здесь положено

$$G^0 g_0(x) = g_0(x) \quad (4.49)$$

Тогда по определению оператора G и его степеней, следует, что до момента τ справедливы следующие неравенства:

$$U_m^{*C} G^m g_0(x) > G_m g_0(x), \quad m = 0, 1, \dots, \tau - 1 \quad (4.50)$$

и в момент $m = \tau$

$$U_{\tau}^{*C} G^{\tau} g_0(x) \leq G^{\tau} g_0(x). \quad (4.51)$$

Тогда для $m < \tau$ имеем

$$G^{m+1} g_0(x) = \max\{G^m g_0(x), U_m^{*C} G^m g_0(x)\} = U_m^{*C} G^m g_0(x) \quad (4.52)$$

Отсюда рекуррентным способом получаем

$$G^m g_0(x) = g_m(x), \quad m = 0, 1, \dots, \tau \quad (4.53)$$

$$U_m^{*C} g_m(x) = g_m(x), \quad m = 0, 1, \dots, \tau - 1 \quad (4.54)$$

$$U_m^{*C} g_m(x) < g_m(x), \quad m = \tau \quad (4.55)$$

Таким образом, функция $g_m(x)$ в момент $m = \tau$ эксцессивна относительно оператора U_n^* . Учитывая (4.55), получаем

$$G^{\tau+1} g_0(x) = \max\{G^{\tau} g_0(x), U_{\tau}^{*C} G^{\tau} g_0(x)\} = G^{\tau} g_0(x) = g_{\tau}(x) \quad (4.56)$$

По индукции устанавливается справедливость

$$G^{\tau+k} g_0(x) = g_{\tau}(x), \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.57)$$

Переходя к пределу при $k \rightarrow \infty$, получаем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} G^{\tau+k} g_0(x) = \varphi(x) = S(x) = g_{\tau}(x) \quad (4.58)$$

Т.о., в момент τ достигается цена, откуда следует S -оптимальность момента τ .

Из условия $g(x) \in L(A^+)$ и определения функция g вытекает, что $\lim_{m \rightarrow \infty} g_m(x) \rightarrow -\infty$.

С другой стороны (4.38) $g_{m+1}(x) > g_m(x)$, $m = 0, 1, \dots, \tau - 1$.

Это возможно лишь при изменении знака разности $g_{m+1}(x) - g_m(x)$, при котором $m < \infty$. Такая перемена знака происходит при $m = \tau$. Тем самым с вероятностью 1 $\tau < \infty$, т.е. $\psi \in M$.

Если $g(x) \in L(A^-)$, что имеет место в том случае, когда, начиная с некоторого m , $g_{m+k+1}(x) > g_{m+k}(x)$ для $k = 0, 1, \dots$, такое $m \equiv 0$.

Тогда $G^k g_0(x) = g_k(x)$ для $k = 0, 1, \dots$.

$G^{k+1} g_0(x) > G^k g_0(x)$ для $k = 0, 1, \dots$.

$\tau = \inf\{k : G^{k+1} g_0(x) = G^k g_0(x)\} = \infty$.

Что подтверждает структуру оптимальной стратегии для $g(x) \in L(A^+)$ и для $g(x) \in L(A^-)$, приведенную выше.

Для построения оптимизированной процедуры определим операторы $R(f)$ и $\Gamma(f, \pi)$.

Оператор $R(f)$:

$$R(f)u(x) \stackrel{\text{def}}{=} Fc_0(f)u(x) - u(x) = (Fc_0(f) - I)u(x) \quad (4.59)$$

Оператор $R(f)$ – субрегулярный, т. е. $R(f)u(x) \geq 0$.

Его субрегулярность связана с субрегулярностью оператора $Fc_0(f)$.

Оператор $\Gamma(f, \pi)$:

$$\begin{aligned} \Gamma(f, \pi)u(x) &\stackrel{\text{def}}{=} R(f)u(x) - R(\pi)u(x) = Fc_0(f)u(x) - Fc_0(\pi)u(x) = \\ &= [T(f) - T(\pi)]u(x) + w(x, f) - w(x, \pi) \end{aligned} \quad (4.60)$$

Используя обозначение

$$Fc_0(f)r(x,\pi) = r(x, f\pi), \text{ где } f\pi = (f, \pi, \pi\dots), \quad (4.61)$$

получаем рекуррентные соотношения:

$$r(x, f\pi) = Fc_0(f)r(x, \pi) = w(x, f) + T(f)r(x, \pi). \quad (4.62)$$

Аналогично:

$$r(x, \pi\pi) = Fc_0(\pi)r(x, \pi) = w(x, \pi) + T(\pi)r(x, \pi). \quad (4.63)$$

Согласно:

$$\Gamma(f, \pi)r(x, \pi) = r(x, f\pi) - r(x, \pi\pi), \quad (4.64)$$

откуда

$$r(x, f\pi) = r(x, \pi\pi) + \Gamma(f, \pi)r(x, \pi). \quad (4.65)$$

Сравнение относительных выигрышей, получаемых при использовании двух разных стратегий f, π , тождественно не равных друг другу возможно при использовании одинаковых констант при вычислении $r(x, \pi)$ и $r(x, f)$.

Выбрав в качестве этой постоянной значение $u(z, \pi) \equiv C$, получим:

$$r^\pi(x, f) = u(x, f) - u(z, \pi). \quad (4.66)$$

Верхний индекс π здесь указывает на зависимость величины относительного выигрыша от выбора постоянной C .

Тогда для сравнения различных стратегий можно использовать оператор

$R(f)$.

Пусть f и π – две стационарные стратегии. Чтобы $r^\pi(x, f) \geq r(x, \pi)$, необходимо и достаточно, выполнить условие:

$$R(f)r(x, \pi) \geq 0. \quad (4.67)$$

Действительно, соотношение (4.67) означает, что

$$Fc_0(f)r(x, \pi) \geq r(x, \pi)$$

$$Fc_0(f)[u(x, \pi) - u(z, \pi)] = Fc_0(f)u(x, \pi) - u(z, \pi) \geq u(x, \pi) - u(z, \pi). \quad (4.68)$$

Прибавив к обеим частям неравенства одну и ту же константу $C = u(z, \pi)$, получим:

$$Fc_0(f)u(x, \pi) \geq u(x, \pi). \quad (4.69)$$

Поддействовав на обе части неравенства монотонным оператором $F_{C_0}^{k-1}, k = 1, 2, \dots$, получим

$$F_{C_0}^k(f)u(x, \pi) \geq F_{C_0}^{k-1}(f)u(x, \pi) \geq \dots \geq F_{C_0}(f)u(x, \pi) \geq u(x, \pi). \quad (4.70)$$

Переходя к пределу при $k \rightarrow \infty$, получаем

$$u(x, f) \geq u(x, \pi). \quad (4.71)$$

А вычитая одну и ту же константу из обеих частей неравенства, получаем:

$r^\pi(x, f) \geq r(x, \pi)$ и выполнение предположения, что $R(f)r(x, \pi) \leq 0$ приводит к неравенству, противоречащему исходному, что и доказывает утверждение (4.67).

Как следствие доказанного утверждения получаем следующие положения:

1) Для всяких двух стационарных стратегий f и π , для выполнения неравенства:

$$r^\pi(x, f) \geq r(x, \pi) \quad (4.72)$$

необходимо, чтобы $\Gamma(f, \pi)r(x, \pi) \geq 0$. Утверждение следует из тождества:

$$\Gamma(f, \pi)r(x, \pi) \equiv R(f)r(x, \pi). \quad (4.73)$$

2) Пусть относительные выигрыши удовлетворяют рекуррентному соотношению:

$$r(x, f, \pi) = r(x, \pi\pi) + \Gamma(f, \pi)r(x, \pi). \quad (4.74)$$

3) Тогда для того, чтобы $r^\pi(x, f) \geq r(x, \pi)$, необходимо и достаточно, чтобы

$$r(x, f, \pi) \geq r(x, \pi\pi). \quad (4.75)$$

Действительно, если упомянутое рекуррентное соотношение имеет место, то для того, чтобы $r(x, f\pi) \geq r(x, \pi\pi)$ должно выполняться условие

$$\Gamma(f, \pi)r(x, \pi) \geq 0. \quad (4.76)$$

Требуемое соотношение следует из предыдущего следствия.

4) Если задана некоторая начальная стратегия π и $C \equiv u(z, \pi)$, тогда из неравенства $u(x, f^*) \geq u(x, f)$ для $f \in Y, x \in E$ следует:

$$r^\pi(x, f^*) \geq r^\pi(x, f) \text{ для } f \in Y, x \in E \quad (4.77)$$

и обратно.

5) оптимальная стратегия f^* удовлетворяет соотношению:

$$\sup_f \Gamma(f, f^*)r^\pi(x, f^*) = 0 \quad (4.78)$$

По (4.76) $\Gamma(f, f^*)r^\pi(x, f) \leq 0$, т.е.

$$\sup_f \Gamma(f, f^*)r^\pi(x, f) = 0 \quad (4.79)$$

Определим оператор Γ^* :

$$\Gamma^*r(f, \pi) \stackrel{\text{def}}{=} \Gamma(f^*, \pi)r(x, \pi) = \sup_f \Gamma(f, \pi)r(x, \pi) \quad (4.80)$$

Оптимизационная процедура может использовать операторы R и Γ .

Определим правило принятия решений следующим образом:

$$\sigma(x) = \begin{cases} \pi(x), & \text{если } \Gamma^*r(x, \pi) = 0 \\ f^*(x), & \text{если } \Gamma^*r(x, \pi) > 0, \end{cases} \quad (4.81)$$

т.е. новая стратегия f^* будет использоваться, если она увеличивает выигрыш.

Для $x \in E$ и $y \in Y$ вычислить значение оператора $\Gamma(y, \pi)z(x, \pi)$, используя в качестве $r(x, \pi)$ значение относительного выигрыша, полученного с помощью ряда (4.5).

По полученным результатам образовать множество:

$$G_x(\pi) = \{y : \Gamma(y, \pi)r(x, \pi) > 0\} \text{ для } x \in E \quad (4.82)$$

Из этого множества необходимо выбрать управление:

$$y^* = f^*(x) \in G_x(\pi) : \Gamma(f^*\pi)r(x, \pi) = \Gamma^*r(x, \pi) = \max_{y \in G_x(\pi)} \Gamma(y, \pi)r(x, \pi) \quad (4.83)$$

и образовать новую стратегию $\sigma^{(1)}$ согласно (4.81), которая в силу условия $\Gamma(f, \pi)r(x, \pi) > 0$ является строгим улучшением стратегии π , т.е. $\sigma^{(1)} = y^* = f^*(x)$.

Если же $G_x(\pi) = \emptyset$ для $x \in E$, то исходная стратегия π – оптимальная, и в этом случае, используя стратегию $\sigma^{(1)}$, рекуррентным способом вычисляется значение относительного выигрыша:

$$r(x, \sigma^{(1)}\pi) = Fc_0(\sigma^{(1)})r(x, \pi). \quad (4.84)$$

Используя новый вектор $r(x, \sigma^{(1)}\pi)$, находится новое улучшение стратегии и т.д. За конечное число шагов достигается оптимальная стратегия, что следует из двух следующих утверждений:

Если $G_x(\pi) = \emptyset$ для $x \in E$, тогда стратегия π является оптимальной.

Действительно, пусть $y = f(x) \in G_x(\pi)$.

Из определения множества $G_x(\pi)$, если оно не пусто, следует $\Gamma(y, \pi)r(x, \pi) > 0$,

и согласно следствию (4.72), справедливо неравенство $r^\pi(x, f) > r(x, \pi)$, т.е. стратегия f строго лучше стратегии π .

Если же $G_x(\pi) = \emptyset$ для всех $x \in E$, то не существует стратегии, лучшей, чем π , т.е. нигде не выполняется условие $\Gamma(y, \pi)r(x, \pi) > 0$ и следовательно $r(\pi) \geq r^\pi(f)$ для $f \in \pi$.

2) Пусть множества состояний и управлений конечны. Тогда алгоритм, построенный показанным выше образом, сходится к оптимальной стратегии.

Т.к. E и \dot{O} конечны, то их прямое произведение $\Pi = E * \dot{O}$ – конечно. Алгоритм описывается разобранном способом, т.е он останавливается, когда $G_x(\pi) = \emptyset$ для $x \in E$, либо сопровождается улучшением стратегии для $G_x(\pi) \neq \emptyset$.

4.2 Идентификация функции переходных вероятностей

Множество переходных вероятностей $Q = \{q_{xz}\}$, описывающих переходы управляемой системы из состояния X в состояние Z при фиксированных управлениях $y_k \in Y$, образуют стохастическую матрицу $(n+1) \times (n+1)$, где $(n+1)$ – число состояний системы ($x_j, z_j \in E$), где j – момент времени принятия решения, шаг процесса, $i = 0, 1, 2, \dots, m, \dots, \infty$; j – состояние системы (x_j – начальное; z_j – конечное; $x_{j+1} = z_j$), $j = 0, 1, 2, \dots, n$; k – текущая переменная на множестве управлений ($y_k \in Y$), $k = 1, 2, \dots, K$.

Тогда для элементов матрицы на каждом шаге процесса выполняются условия:

$$\sum_{z=0}^n q_{xz} = 1, \quad (4.85)$$

для $x = 0, 1, 2, \dots, j, \dots, n$; $q_{xz} \geq 0$.

Каждая строка матрицы представляет собой дискретное распределение вероятностей. Обычно в начале изучения процесса это распределение неизвестно. При байесовском подходе к статическим задачам необходимо постулировать существования априорного распределения, параметры которого неизвестны.

Зададим, например, вероятности исходной априорной матрицы биномиальным распределением:

$$q(x, z | \lambda, y_k) = C_n^z \lambda^z (1 - \lambda)^{n-z}, \quad (4.86)$$

для $x = 0, 1, 2, \dots, n$.

При этом выполняются условия и параметр λ может интегрироваться как вероятность оказаться годным для каждого изделия партии фиксированного

объема n . Параметр λ зависит от применяемого управления y_k и должен быть определен по серии экспериментов для каждого фиксированного y_k . От исходного состояния системы x параметр λ не зависит.

Будем предполагать, что параметр λ является случайной величиной принимающей значение из некоторого пространства Λ и существует множество Φ условных распределений на Λ при условии $y_k \in Y$.

На основе имеющейся информации процессе можно выразить свое априорное мнение об относительном правдоподобии того или иного значения параметра $\lambda \in \Lambda$ с помощью условного распределения $\varphi(\lambda|y_k) \in \Phi$.

Использование теоремы Байеса позволяет построить удобную рекуррентную процедуру пересчета априорных распределений параметра в апостериорные по результатам эксперимента.

Если на некотором i -ом шаге принятия решения наблюдалось состояние $x_j^i \in E$, имела место априорная условная обобщенная вероятностная плотность (о. в. п.) $\varphi_i(\lambda|y_k)$ параметра λ , было выбрано управление $y_k \in Y$, в результате чего система перешла в состояние $z_j^i \in E$, то будем считать, что был выполнен эксперимент $e_k^i(x, y)$, исходом которого является z_j^i , и принимающий решения изменяет свое априорное мнение об относительном правдоподобии параметра λ , используя теорему Байеса.

Действительно, если при фиксированном управлении y_k проведена серия из m экспериментов и их исход образует последовательность $\{z_1, z_2, \dots, z_m\}$, то для каждого значения параметра эти случайны величины независимы и одинаково распределены, т. е. представляют собой последовательную повторную случайную выборку о. в. п.

$$q(z_1, \dots, z_m | \lambda) = \prod_{i=1}^m q_i(z_{i-1}, z_i | \lambda), \quad (4.87)$$

Тогда, используя теорему Байеса, можно вычислить апостериорное

распределение параметра λ :

$$\begin{aligned}
 \varphi(\lambda|z_1, \dots, z_m) &= \frac{\prod_{i=1}^m q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda)}{\int_{\Lambda} \prod_{i=1}^m q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda) d\nu(\lambda)} = \\
 &= \frac{\prod_{i=1}^m q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) q_m(z_{m-1}, z_m|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda)}{\int_{\Lambda} \prod_{i=1}^m q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) q_m(z_{m-1}, z_m|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda) d\nu(\lambda)} = \\
 &= \frac{q_m(z_{m-1}, z_m|\lambda) \frac{\prod_{i=1}^{m-1} q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda)}{\int_{\Lambda} \prod_{i=1}^{m-1} q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda) d\nu(\lambda)}}{\int_{\Lambda} q_m(z_{m-1}, z_m|\lambda) \frac{\prod_{i=1}^{m-1} q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda)}{\int_{\Lambda} \prod_{i=1}^{m-1} q_i(z_{i-1}, z_i|\lambda) \varphi_{yk}(\lambda) d\nu(\lambda)} d\nu(\lambda)} = \\
 &= \frac{q_m(z_{m-1}, z_m|\lambda) \varphi(\lambda|z_1, \dots, z_m)}{\int_{\Lambda} q_m(z_{m-1}, z_m|\lambda) \varphi(\lambda|z_1, \dots, z_m) d\nu(\lambda)}. \tag{4.88}
 \end{aligned}$$

По (4.88) можно построить рекуррентное соотношение для вычисления апостериорных распределений

$$\varphi_m(\lambda|z_m, e_{m-1}(z_{m-1}, y)) = \varphi_m(\lambda|z_m, y) = \frac{q(z_{m-1}, z_m|\lambda, y) \varphi_{m-1}(\lambda|y)}{\int_{\Lambda} q(z_{m-1}, z_m|\lambda, y) \varphi_{m-1}(\lambda|y) d\nu(\lambda)}. \tag{4.89}$$

Рекуррентное соотношение для вычисления маргинальной переходной плотности по результатам наблюдений:

$$q_m(x, \bullet|y) = \int_{\Lambda} q_{m-1}(x, \bullet|\lambda, y) \varphi_m(\lambda|z_m, y) d\nu(\lambda). \tag{4.90}$$

При наличии достаточных статистик фиксированной размерности удобным способом вычисления апостериорных распределений является использование сопряженного семейства распределений.

Достаточными статистиками биномиального распределения являются математическое ожидание и дисперсия.

При существовании достаточных статистик имеется стандартное семейство распределений параметра λ со следующими свойствами: апостериорное распределение λ должно принадлежать тому же семейству, что и априорное при любом объеме выборки m и любых значениях наблюдений в выборке.

Сопряженным биномиальному является бета-распределение. Тогда априорная плотность распределения вероятности (п.р.в) параметра λ будет:

$$\varphi(\lambda) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \lambda^{\alpha-1} (1 - \lambda)^{\beta-1}, \quad (4.91)$$

где $\alpha > 0$; $\beta > 0$.

Тогда апостериорная о.в. п. $\varphi(\bullet | x, z)$ параметра при условии наблюдения в эксперименте перехода в состояние z будет:

$$\begin{aligned} \varphi(\lambda | x, z) &= \frac{c_n^z \lambda^z (1 - \lambda)^{n-z} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \lambda^{\alpha-1} (1 - \lambda)^{\beta-1}}{\int_0^1 c_n^z \lambda^z (1 - \lambda)^{n-z} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \lambda^{\alpha-1} (1 - \lambda)^{\beta-1} d\lambda} = \\ &= \frac{\lambda^{\alpha+z-1} (1 - \lambda)^{\beta+n-z-1}}{\int_0^1 \lambda^{\alpha+z-1} (1 - \lambda)^{\beta+n-z-1} d\lambda} = \frac{\Gamma(\alpha + z + \beta + n - z)}{\Gamma(\alpha + z)\Gamma(\beta + n - z)} \lambda^{\alpha-1} (1 - \lambda)^{\beta-1} \end{aligned} \quad (4.92)$$

для $0 \leq z \leq n$.

Т.е. апостериорные значения параметров α_1 и β_1 равны:

$$\alpha_1 = \alpha + z \text{ для } 0 \leq z \leq n, x = 0, 1, \dots, n$$

$$\beta_1 = \beta + n - z.$$

Методом индукции устанавливаются простые рекуррентные соотношения:

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + z_i \text{ для } 0 \leq z_i \leq n,$$

$$\beta_i = \beta_{i-1} + n - z_i. \quad (4.93)$$

При выполнении последовательности m экспериментов и наблюдений $\{z_1, \dots, z_i, \dots, z_m\}$ исходов экспериментов, представляющих повторную выборку из биномиального распределения с неизвестным параметром λ , априорная исходная п. р. в. которой выражается (4.93) бета-распределения с параметрами α и β : $\alpha > 0$; $\beta > 0$, будет иметь апостериорную п. р. в., определяемую бета-распределением с параметрами

$$\alpha_m = \alpha + \sum_{i=1}^m z_i \quad \text{и} \quad \beta_m = \beta + mn - \sum_{i=1}^m z_i \quad (4.94)$$

Ограничения, накладываемые на изменения параметров x и z ($x = 0, 1, \dots, j, \dots, n; 0 \leq z \leq n$) позволяют оставаться в рассматриваемом классе бета-распределений ($\alpha > 0; \beta > 0$) при бесконечном продолжении экспериментов.

Для расчета переходной функции $q(x, z)$ будем использовать математическое ожидание параметра λ , которое является его байесовской оценкой.

Действительно, так как в статистической задаче оценивания параметра ущерба от принятия решения d отражает расхождение между значением λ и оценкой d , то функция потерь $L(\lambda, d)$ имеет вид:

$$L(\lambda, d) = \gamma(\lambda)V(\lambda - d) \quad (4.95)$$

Байесовская оценка λ^* определяется как точка $d \in \Lambda$, доставляющая минимум риску $\rho[\varphi(\lambda), d]$:

$$\rho[\varphi(\lambda), d] = \int_{\Lambda} \gamma(\lambda)V(\lambda - d)\varphi(\lambda)d\lambda \quad (4.96)$$

где V – неотрицательная функция вектора погрешностей $(\lambda - d)$ такая, что, $V(0) = 0$ а $\gamma(\lambda)$ – неотрицательная весовая функция.

Хорошо изученной функцией потерь в задачах оценивания вещественного параметра λ является квадратическая функция:

$$L(\lambda, d) = a(\lambda - d)^2, \quad (4.97)$$

имеющая байесовскую оценку $d = \lambda$ при любом заданном распределении λ и минимизирующая следующее значение риска $M[(\lambda - d)^2]$.

Очевидно,

$$d = \lambda^* = M(\lambda) \quad (4.98)$$

где M – знак математического ожидания.

При этом минимальное значение риска:

$$M[(\lambda - M(\lambda))]^2 = \text{var } \lambda. \quad (4.99)$$

Теперь, если в i -ом эксперименте наблюдалось значение z_i случайной величины с о. в. п. $q(\bullet|\lambda)$ и $\varphi(\bullet|z_i)$ – апостериорная п. р. в. λ , то байесовское решение:

$$\lambda^*(z_i) = M[\varphi(\lambda|z_i)], \quad (4.100)$$

где $M[\varphi(\lambda|z_i)]$ – математическое ожидание апостериорного распределения параметра λ .

Риск при этом равен дисперсии $var[\varphi(\lambda|z_i)]$ апостериорного распределения λ .

Для случая бета-распределения параметра λ :

$$\lambda_i^* = M[\varphi_k(\lambda|z_i)] = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \beta_i} = \frac{\alpha_{i-1} + z}{\alpha_{i-1} + \beta_{i-1} + n}. \quad (3.101)$$

Переходная функция

$$q_i(x, z | \lambda_i^*, y) = C_n^z (\lambda_i^*)^z (1 - \lambda_i^*)^{n-z}, \quad (4.102)$$

для $0 \leq z \leq n$.

Таким образом, в результате последовательного эксперимента рекуррентным способом вычисляется переходная плотность вероятности, байесовская оценка параметра λ_i и переходная функция $q_i(x, z)$.

Для расчета исходной (априорной) переходной функции для каждого управления $y_k \in Y$ могут быть взяты произвольные фиксированные значения $\alpha_0 > 0$ и $\beta_0 > 0$.

Выводы по разделу 4

1. Предлагаемая технология позволяет принимать решения по управлению в условиях неопределенности, которые по мере уточнения неизвестного параметра функций переходных вероятностей при последовательных наблюдениях результатов экспериментов обеспечивают минимальные риск в оценке этого параметра в виде

математического ожидания λ^* , позволяет на каждом шаге сравнивать различные стратегии и выбирать решения, максимизирующие доход, рассчитанный по скорректированным оценкам λ^* , определять по полученным рекуррентным соотношениям оптимальный момент остановки процесса идентификации с учетом затрат на проведение экспериментов, оценивать выигрыш от применения выбранного управления на определенном шаге или примененной стратегии для процесса в целом.

2. Из того, что множество стратегий конечно, алгоритм сопровождается строгим улучшением стратегии и останавливается на оптимальной стратегии, следует, что за конечное число шагов он достигает оптимальной стратегии.

3. В случае конечных множеств состояний управлений существует φ -оптимальная стратегия.

4. Для любой нестационарной стратегии найдется стационарная стратегия, которая не хуже нестационарной.

5. Разработанный рекуррентный метод принятия решений в стохастических процессах позволяет оптимизировать стратегии мониторинга сложных технологических процессов.

РАЗДЕЛ 5

ВЫБОР ЛУЧШЕГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПО КРИТЕРИЮ СТОИМОСТИ

5.1 Метод выбора лучшего варианта ТП из множества рассмотренных альтернатив

Другой проблемой разработки ТП изготовления МЭМС является выбор лучшего варианта из определенного множества ТП.

Цель поиска решения в задачах автоматизированного проектирования технологических процессов состоит в получении такого варианта его реализации, который был бы определен с достаточными для практического применения условиями и был бы по определенному критерию лучшим из рассматриваемых.

Сравнение возможных вариантов технологического процесса может выполняться различными математическими методами: с использованием марковских процессов с доходами, байесовских статистических решений, теории систем массового обслуживания, операторными методами и многими другими, учитывающими те или иные характеристики разрабатываемых технологических процессов [174].

В настоящей работе предложен метод выбора лучшего варианта по критерию минимальной стоимости с использованием байесовских решений.

В теоретико-множественном представлении процесс отыскания лучшего решения заключается в нахождении на множестве всех возможных решений A пересечения рассматриваемого разработчиком подмножества решений Y и подмножества Θ , характеризующегося минимальными стоимостями технологического процесса (ТП) (рис.5.1).

Модель процесса основана на байесовой теории решений и позволяет охарактеризовать область пересечений $Y \cap \Theta$ путем «выворачивания» деревьев решений [124] по априорным экспертным оценкам дискретных распределений

стоимостей разработки.

Уточнение этих распределений при получении конкретных стоимостей экспериментальных данных на определенных этапах разработки производится по формуле Байеса.

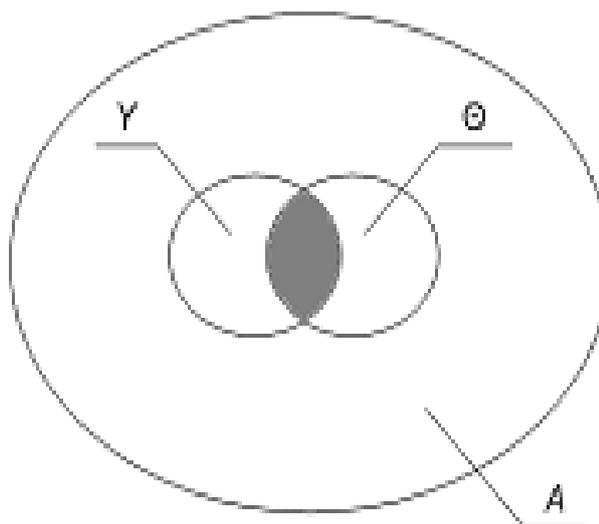


Рисунок 5.1 – Множество вариантов ТП

Последовательность этапов работ, в результате выполнения которых получается наилучшее решение на момент оценки всей имеющейся информации, выглядит следующим образом:

- составление априорных оценок подмножества Y экспертным способом;
- преобразование априорных оценок в свойства вычислительной сети;
- построение дерева решений;
- расчет ожидаемой выгоды для всех операций дерева;
- уточнение априорных оценок и усечение неперспективных;
- наилучший вариант.

Процесс поиска такого решения осуществляется в виде последовательности расчетных и (или) физических «экспериментов», т. е. действий, в которых приобретается информация о природе возможных решений.

Для иллюстрации работы разработанной модели рассмотрим представленную

в виде дерева решений (рис. 5.2) задачу выбора лучшего варианта ТП вжигания толстоленочных проводников по критерию затрат для разных методов вжигания, описанных в работах, и разных установок вжигания.

Методика решения задачи выбора с использованием теории байесовских статических решений, позволяют определить лучший вариант ТП на каждом шаге принятия решений.

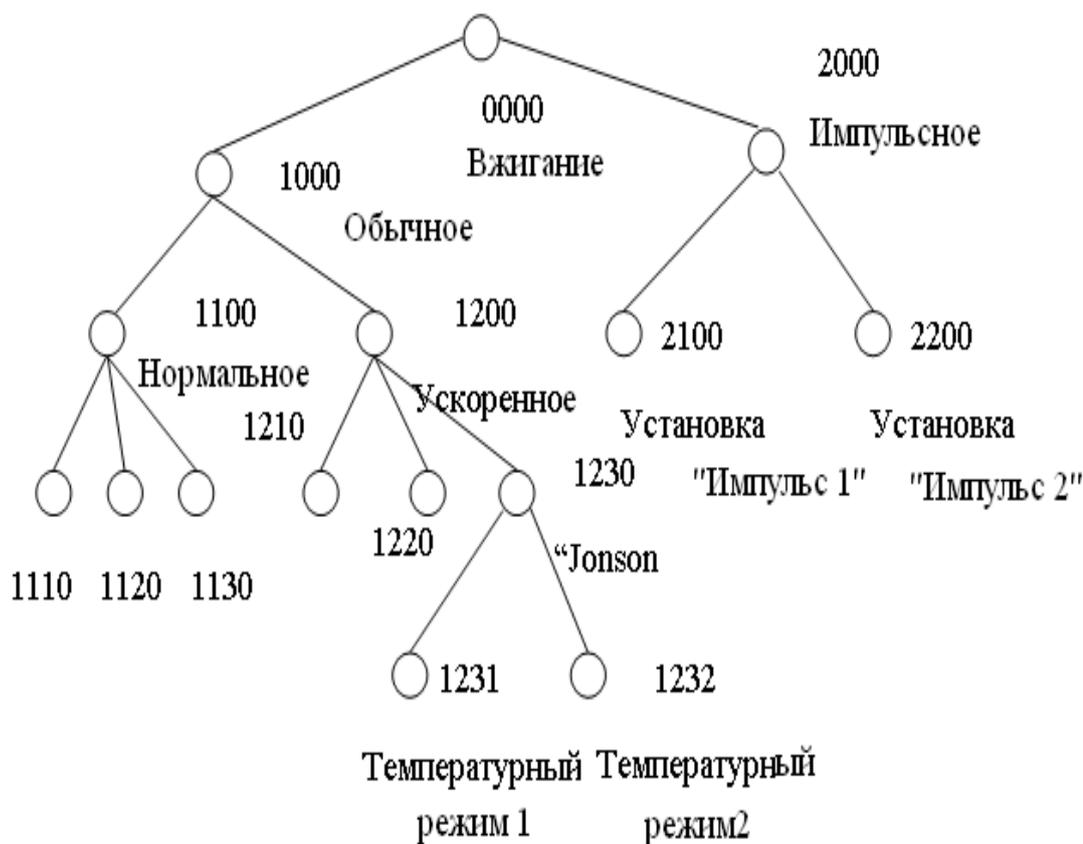


Рисунок 5.2 – Пример построения дерева решений

Для четкого понимания физического смысла вершин (операций) на дереве решений рассмотрим отвлеченный, гипотетический пример, посвященный выбору лучшего варианта реализации какого-либо продукта промышленного предприятия.

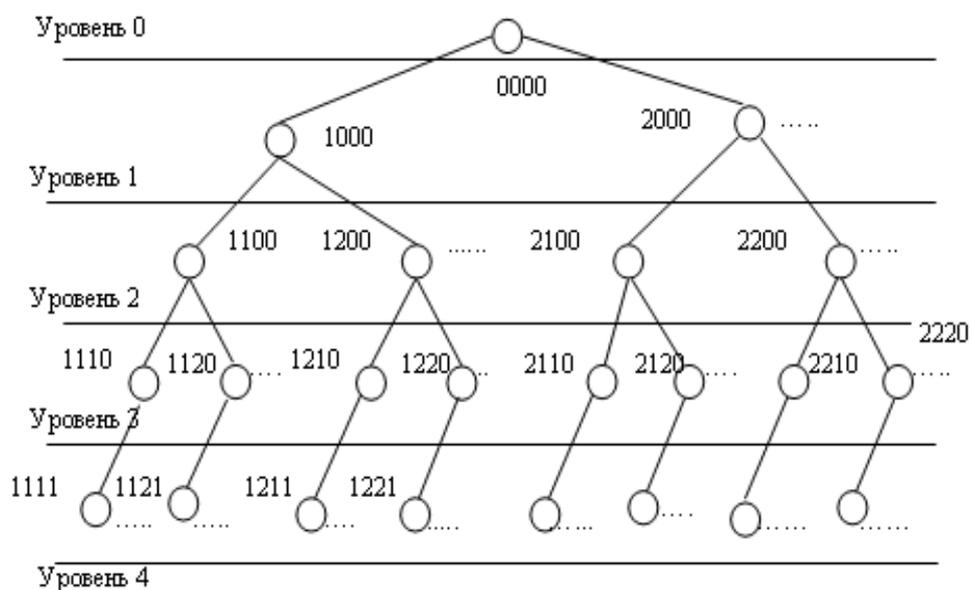


Рисунок 5.3 – Варианты распределения продукции

0 – уровень (вершина 0000) соответствует всему возможному множеству вариантов реализации продукта.

1 – уровень пусть соответствует реализации этого вида продукции в различных регионах (городах, странах).

2 – уровень пусть предполагает реализацию рассматриваемого товара промышленным предприятиям, торговой сети в каждом из этих регионов (или учебным заведениям и т.д.).

3 – уровень включает основных потребителей, т.е. конкретные заводы, оптовые базы, крупные магазины и т.д.

4 – уровень пусть содержит стоимости реализации единицы продукции каждому из потребителей, которые получены при многократных продажах партий каждому из потребителей. Пусть таких продаж было произведено достаточно много.

Тогда вершины самого нижнего 4-го уровня представляют конкретные значения стоимости реализации единицы продукции в том или ином варианте продаж.

Варианты 3, 2, 1 и 0 уровня могут быть охарактеризованы распределениями

вероятностей стоимости реализации единицы продукции при реализации конкретному потребителю (3 уровень), различным категориям потребителей (2 уровень), реализации продукции в разных регионах (1 уровень), всех вариантов реализации, учтенных в дереве решений.

Итак, характеристикой вершин нижнего уровня дерева решений является *стоимость*, а вершин более высоких уровней – *распределения вероятностей стоимостей*, согласованные с конкретными стоимостями самого низкого уровня и распределениями вероятностей получения определенных стоимостей в вершинах более низких уровней, входящих в рассматриваемую.

При разработке ТП решается обратная задача получения распределения вероятностей стоимостей в вершинах более низких уровней по известным (или заданным) распределениям вероятностей в вершинах более высокого уровня, то есть для ее решения формально необходимо совокупность дуг, связывающих каждую родительскую (порождающую) вершину с дочерними (порождаемыми) вершинами, охарактеризовать оператором, умножением на который из исходного распределения можно получить распределения дочерних вершин.

Чисто математически задача формализации неразрешима, т.к. дочерние вершины для порождающей операции неразличимы и необходима дополнительная информация о дочерних операциях, получаемая в физическом эксперименте, для дифференциации их свойств.

Поиск лучшего варианта ТП на дереве решений является решением обратной задачи, описанной выше. Вершина самого верхнего уровня характеризуется распределением вероятностей, которое задается экспертным способом специалистами в данной области деятельности. Этим же способом задаются и условные вероятности распределения «параметра оптимизации» для каждого из его возможных дискретных значений, установленных экспертами.

Исходные распределения вероятности и условные распределения вероятности «параметра оптимизации» являются субъективными оценками, которые по экспериментальным данным, полученным в процессе проектирования уточняются с использованием формулы Байеса, т.е. субъективность задания распределений

уменьшается, а согласованность, достоверность распределений увеличивается.

Исходные данные для расчетов представляются в виде экспертных оценок распределений вероятностей получения дискретных значений стоимости реализации ТП – $p(y)$ (рис. 5.4, а). Также в предположении наблюдения каждого из дискретных значений y_i проектировщику необходимо задать распределение условных вероятностей получения минимальных стоимостей $p(\theta/y)$ (рис. 5.4, б). Эти оценки относятся ко всему рассматриваемому подмножеству вариантов ТП – Y , которому на дереве решений соответствует вершина с индексом 0000 .

Вершины дерева представляют собой, согласно терминологии, операции, а ребра – операторы. Операция – решение либо множество решений в n -мерном пространстве решений. Оператор – множество процедур, применяемых к какой-либо операции, чтобы произвести другую операцию, более низкого уровня, со стоимостью u и вероятностью ее наблюдения $P_{ij}(y)$.

Вершина дерева 0000 представляет «универсальную» операцию, т. е. множество всех возможных решений, включая «нулевую» операцию, представляющую собой отсутствие решения. Операции могут быть разделены на «неосновные», т. е. операции, определяющие перспективную зону поиска решений, и «основные» – операции самого низкого уровня, представляющие конкретные решения в рамках этой зоны.

Преобразование исходных данных $p(y)$ и $p(\theta/y)$ в свойства вычислительной сети заключается в нахождении распределений $p(\theta)$ и $p(\theta/y)$ для универсальной операции – вершины $j=0000$. Данное преобразование выполняется с использованием свойства симметрии совместных вероятностей $p(y, \theta)$ в отношении элементов y и θ , которые справедливы для каждой операции j дерева.

$$p(y, \theta) = p(y)p(\theta/y) = p(\theta)p(y/\theta) \quad (5.1)$$

Распределение минимальных стоимостей $P_j'(\theta)$ можно рассматривать как свойство операции j . Штрих в обозначении вероятности обозначает априорное распределение.

Если на операцию j воздействовать оператором уровня $i - e_{ij}(y/\theta)$ (произвести эксперимент e_{ij}), то получим распределение $P_{ij}(y)$ для операции k более низкого уровня иерархий ($k \in j$), т. е. свойства вершин определяются свойствами включающих операций и возможностями операторов, соединяющих их. Расчеты ведутся по формулам

$$P_{ij}(y) = \int p_i(y/\theta) p_j(\theta) d\theta, \quad (5.2)$$

$$p(\theta) = \int P_{ij}(\theta/y) dy, \quad (5.3)$$

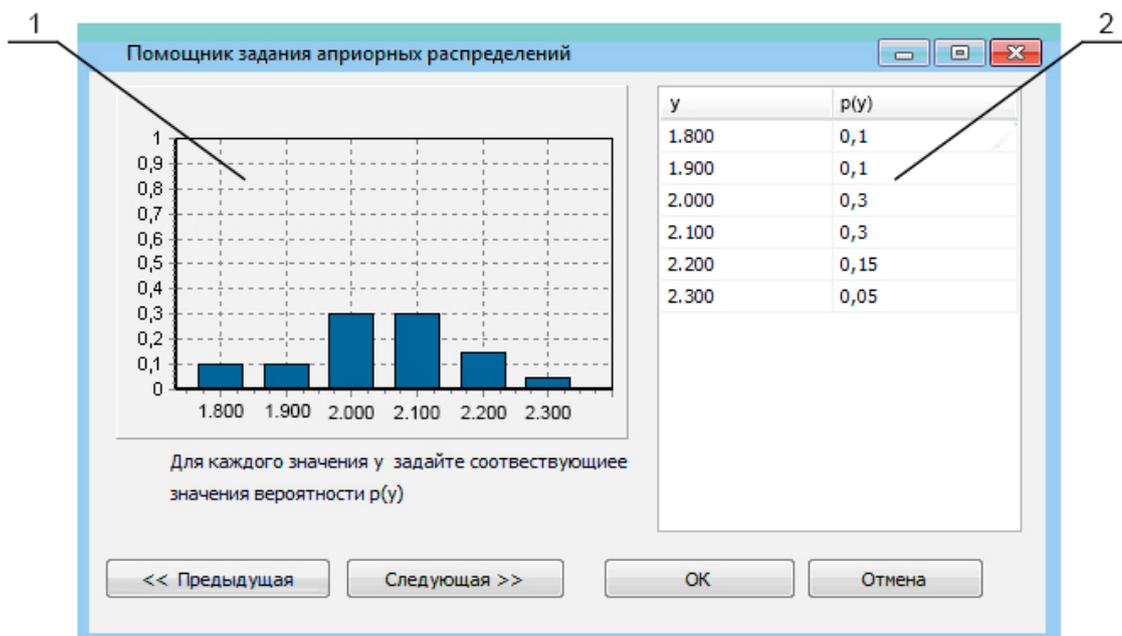
$$p(y/\theta) = \int P_{ij}(\theta, y) / p(\theta). \quad (5.4)$$

Прямое вычисление $p(y/\theta)$ по формуле (5.8) дает ненормированное значение условных вероятностей, характеризующих оператор, поэтому полученные априорные распределения должны пройти этап нормализации. Для нормирования введем вспомогательную переменную $m = y - \theta$, характеризующую величину смещения минимальных значений стоимости θ от наблюдаемого в эксперименте результата, и функцию $p(m) = \sum_{\theta} p(\theta, y = m + \theta)$. Распределение $p(m)$ может быть принято за вероятность $p(y/\theta)$, и оно обеспечивает нормирование.

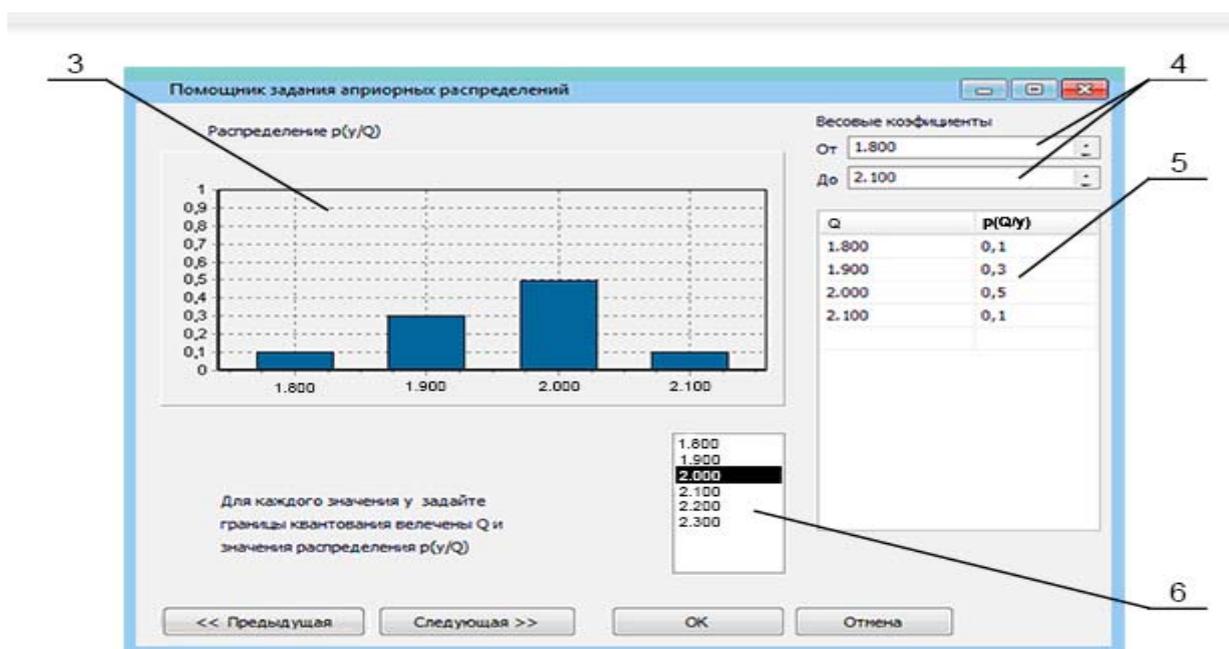
На следующем этапе проектировщик представляет картину возможных решений, стараясь наиболее широко и полно представить варианты возможных решений с подробной конкретизацией (рис. 5.3).

Такая древовидная схема позволяет наглядно представить важные для разработчика аспекты «истории» решения задачи по выбору наилучшего ТП и определить:

- а) число операций, которые генерируются и просчитываются;
- б) последовательность, в которой эти операции выполняются;
- в) их относительные уровни, т. е. с помощью каких операторов они производятся;



а)



б)

а) окно задания распределения $p(y)$: 1 – гистограмм $p(y)$; 2 – таблица ввода дискретных значений $p(y)$; б) окно задания априорного распределен $p(y)$:

3 – гистограмма распределения $p(\theta/y)$; 4 – поля ввода границ диапазона условного распределения $p(\theta/y)$; 5 – таблица ввода дискретных значений $p(\theta/y)$; 6 – поле выбора значений y , для которых задается распределение $p(\theta/y)$

Рисунок 5.4 – Окна «помощника» задания априорных распределений

г) для каждой операции ее общую «генеалогия», т. е. в какие операции она включена и какие операции сама включает.

Если в эксперименте была получена конкретная стоимость y^* для какой либо основной операции, происходит уточнение априорных оценок по формуле Байеса.

Для всех операций k , включающих данную операцию k , апостериорное значение

$$p''(\theta / y^*) = \frac{p'(\theta) p_i(y^* / \theta)}{\int p'(\theta) p_i(y^* / \theta) d\theta} \quad (5.5)$$

Для всех других операций распределения вероятностей остаются без изменений.

Таким образом, при получении конкретной стоимости априорные значения в распределении θ уточняются вверх по иерархии, не затрагивая остальных ветвей дерева решений.

Чтобы значительно уменьшить количество рассматриваемых вариантов, необходимо введение аппроксимаций, смысл которых состоит в «усечении» ветвей дерева решений, т. е. в определении точки, в которой можно прекратить рассмотрение дальнейшей последовательности процесса в связи с тем, что выполненная серия экспериментов уже дала достаточно информации, и оптимальным решением является прекращение дальнейшего анализа. Это позволяет исключить из дальнейшего рассмотрения целые «поддеревья». Правила, используемые для этого, называются правилами «усечения».

Еще один вопрос связан с необходимостью определения некоторого эквивалентного значения для граничной точки, которое представляло бы величину ожидаемой выгоды от использования оптимальной стратегии на отсеченной части дерева.

После проведения необходимых уточнений распределений по результатам эксперимента проектировщик выберет среди всех ранее полученных операций ту, которая связана с наименьшими затратами – R . Выполнять ли еще один

дополнительный эксперимент для наблюдения результата y^{**} , зависит от ожидаемой выгоды получения операции со стоимостью $y^{**} < R$. «Выгода» будет оценкой такой операции. Стоимость операции будет равна меньшему из чисел R и y^* . Стоимость результата определится из выражения

$$u(e_{ij}, y^{**}) = c + \min(R, y^{**}), \quad (5.6)$$

где c – стоимость эксперимента.

Для вычисления ожидаемых затрат в указанном эксперименте используем величину $P_{ij}(y)$; тогда

$$u^*(e_{ij}) = \int_0^{\infty} P_{ij}(y) u(e_{ij}, y) dy = c + \int_0^R y P_{ij}(y) dy + R \int_R^{\infty} P_{ij}(y) dy. \quad (5.7)$$

При окончании процесса в данной точке соответствующие затраты будут равны:

$$u^*(e_0) = R.$$

Проектировщику следует проводить эксперимент e_{ij} вместо окончания процесса только, если

$$\int_0^R (R - y) P_{ij}(y) dy > c. \quad (5.8)$$

Таким образом, если ожидаемое сокращение затрат при выборе наилучшего из найденных вариантов основных операций будет меньше либо равно стоимости проведения нерассмотренного эксперимента e_{ij} , он будет исключен из рассмотрения.

В процессе исследования было разработано Windows-приложение, позволяющее проверить эффективность данной теории. Для реализации данного

приложения был применен объектно-ориентированный подход к программированию с использованием *MS Visual C++*. Процесс выбора наилучшего варианта разработки с помощью данного программного продукта прост и может контролироваться технологом на каждом этапе поиска.

Рассмотрим работу данной программы на примере задачи выбора лучшего технологического процесса вжигания толсто пленочных микросборок.

После задания диапазона значений стоимости y и шага квантования, влияющего на точность априорной оценки (рис. 5.5), технолог непосредственно переходит в окно «помощника», предназначенное для задания вероятностных оценок каждой дискретной стоимости данного диапазона (рис. 5.4, а). При вводе значений $p(y)$ для каждого дискретного y_i в таблицу ввода 2 разработчик может визуальнo контролировать вид и изменения распределения в гистограмме 1.

На следующем этапе технологу необходимо перейти в окно задания условных распределений $p(\theta/y)$ (рис. 5.4, б). Перебирая по очереди все дискретные значения y в списке 4, необходимо задать для каждого элемента этого списка границы распределения $p(\theta/y)$ в полях ввода 2 и значения условных вероятностей в таблице ввода 5. Аналогично предыдущему шагу, вид каждого из заданных распределений можно контролировать при помощи гистограммы 1.

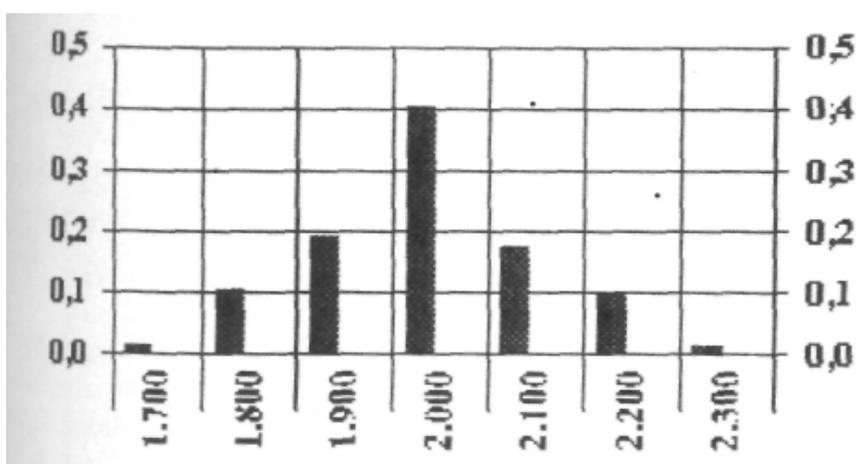


Рисунок 5.5 – Априорное распределение $p(\theta)$

После преобразования априорных распределений для универсальной операции

в распределение $p(\theta)$ для этой операции и распределение $p(y/\theta)$ для оператора, свойства операций более низкого уровня в иерархии дерева решений формально порождаются (определяются) операциями более высокого уровня, и технолог должен развернуть дерево решений ТП, начиная с верхнего уровня (рис. 5.6). Разработанное программное приложение позволяет строить дерево решений с присвоением индексов для каждой операции.

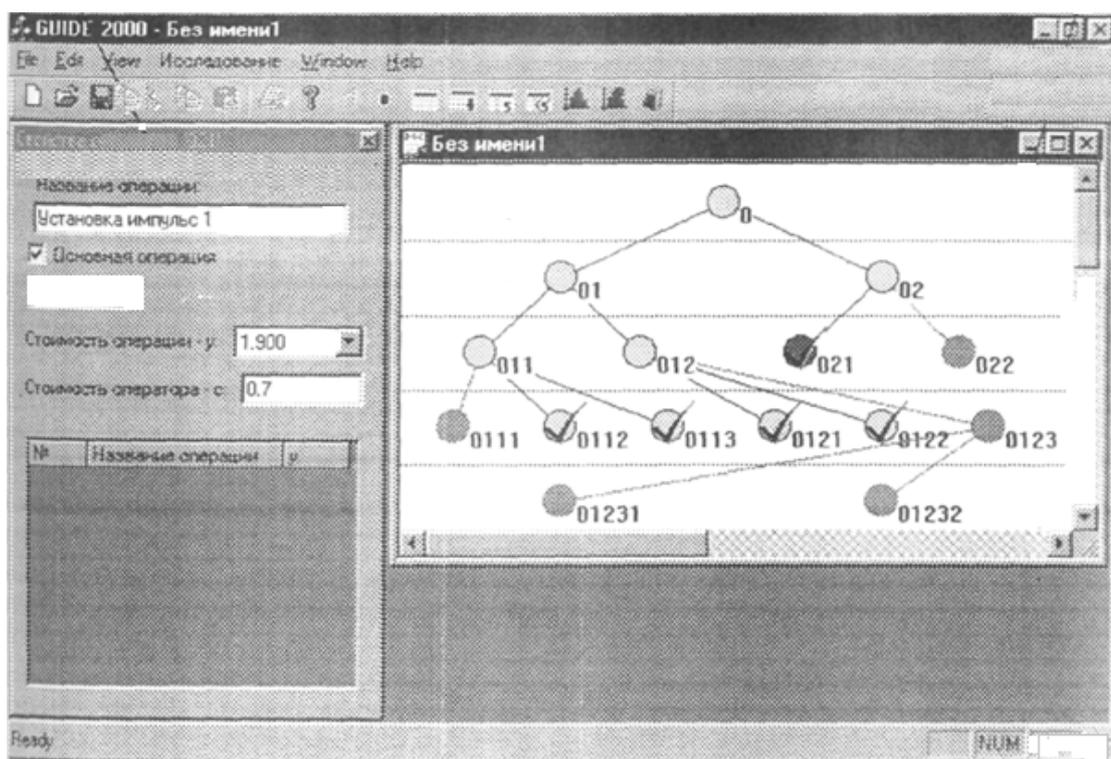


Рисунок 5.6 – Окно приложения

Так, распределение $p(\theta)$ универсальной операции приписывается операциям j дерева до получения экспериментальных данных по какой-либо основной операции y^* (принцип транзитивности). Основным методом вжигания слоев толстопленочных микросборок, широко используемым промышленными предприятиями, является вжигание в много-зонных конвейерных печах типа СК-10, СК-11, ПЭК-8, печей фирмы VTU и Jonson, обеспечивающих поддержание температуры в зоне максимального нагрева с точностью $1...2$ °C, ламинарный поток воздуха в муфеле печи, направленный встречно движению обжигаемых изделий, стабильную скорость движения конвейера, заданную скорость нагревания и охлаждения подложек.

Длительность процесса вжигания каждого слоя многослойных коммутационных плат примерно равна 90...105 минутам [125].

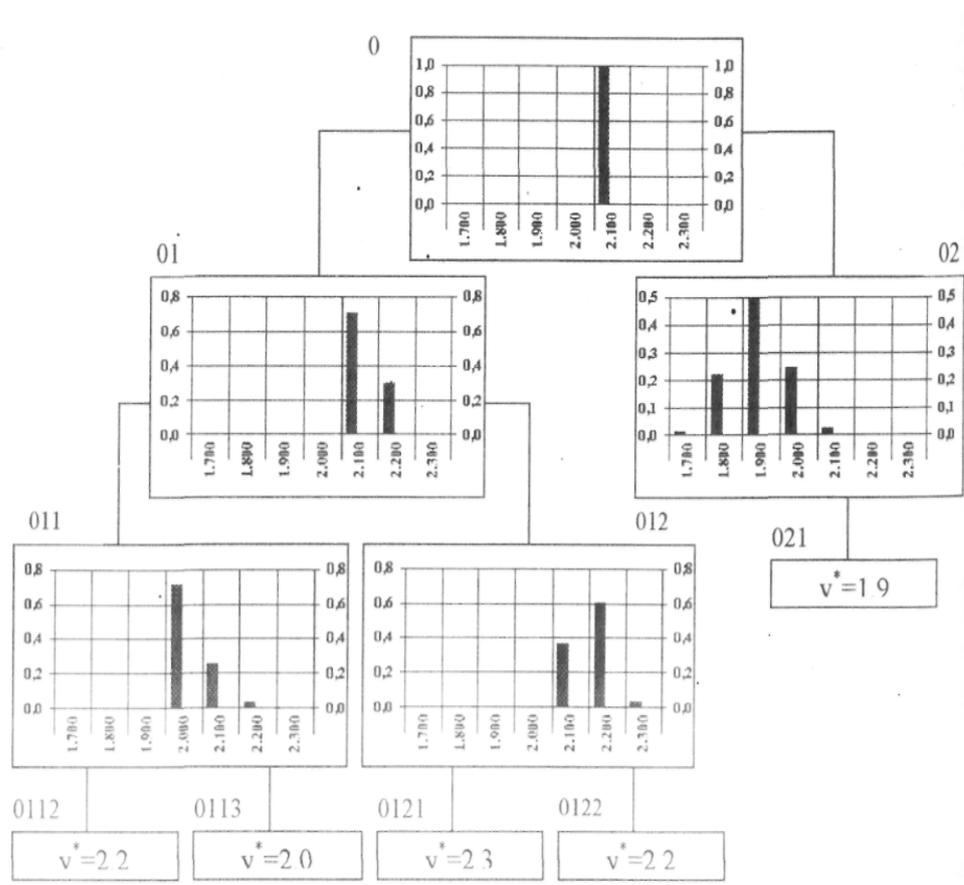
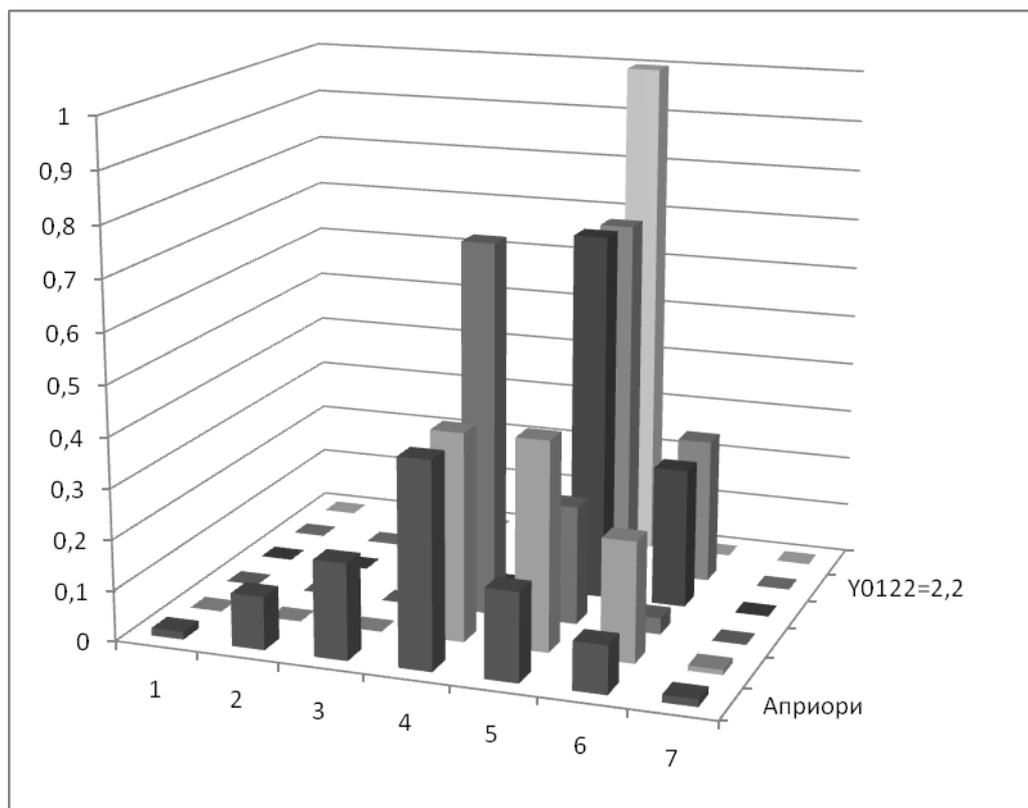


Рисунок 5.7 – Состояние распределений в узлах усеченного дерева решений

Известны также работы по ускоренному вжиганию слоев микросборок [126], сокращающему время вжигания в 2 – 4 раза, а также по импульсному вжиганию за 90...20 секунд, уменьшающему длительность вжигания в 10 – 100 раз [127].

Исходя из возможных вариантов вжигания было построено дерево решений. По мере получения конкретных стоимостей y^* в операциях 0112, 0113, 0121, 0122 и 021 априорные распределения минимальной стоимости θ были уточнены, а неперспективные варианты разработки дерева решений усечены.

Состояние распределений в узлах усеченного дерева решений приведены на рис. 5.7, а изменение распределения $p(\theta)$ в универсальной операции – на рис. 5.8.



Априори	0.015	0.105	0.19	0.405	0.175	0.095	0.015
Y0112=2,2	0	0	0	0.41	0.412	0.237	0.01
Y0113=2,0	0	0	0	0.734	0.234	0.032	0
Y0121=2,3	0	0	0	0	0.724	0.276	0
Y0122=2,2	0	0	0	0	0.712	0.288	0
Y012=1,9	0	0	0	0	0.999	0	0

Рисунок 5.8 – График изменения распределения $p(\theta)$ в универсальной операции

Из полученных данных видно, что наилучшим вариантом термообработки будет технологический процесс, определяющийся операцией 021, т. е. вжиганием импульсным методом на установке «Импульс 1», с наибольшей вероятностью получения минимальной стоимости $\theta=2,1$.

Метод был использован для обоснования ТП изготовления шариковых

выводов на МЭМС ПМУ и ТП проводников шлейфа МПУ [189, 190].

Был рассмотрен выбор оптимального технологического процесса создания контактов по технологии BGA (матричных шариковых выводов).

В качестве оценочного фактора для расчетов по теореме Байеса выбирается количество выхода годной продукции (зондов).

В дереве решений (рисунок 5.9) представлены следующие уровни иерархии: 1 - непосредственно создание зондов по технологии BGA на полиимидном шлейфе; 2 - тип технологии, в данном, рассматриваемом случае представлен выбор между технологиями трафаретной печати (11) и впрыскивание капель припоя (12); 3 - тип оборудования (BGA9000A (111), APR-5000 (112) для трафаретной печати; InjectSys350A (121), АОУЕ 720 (122) – инжекционного создания шариков припоя); 4 - материал заготовок (рассмотрены паяльная паста Sn62/Pb36/Ag2 и золотосодержащая паста NC297DX для каждого из вариантов).

На основе экспертных оценок формируем данные выхода годных изделий по дереву решений, θ и y – выход годных изделий, представлены в процентах. И имеют следующие значения в соответствии с суждением проектировщика (принимающего решение) о вероятностях результата y .

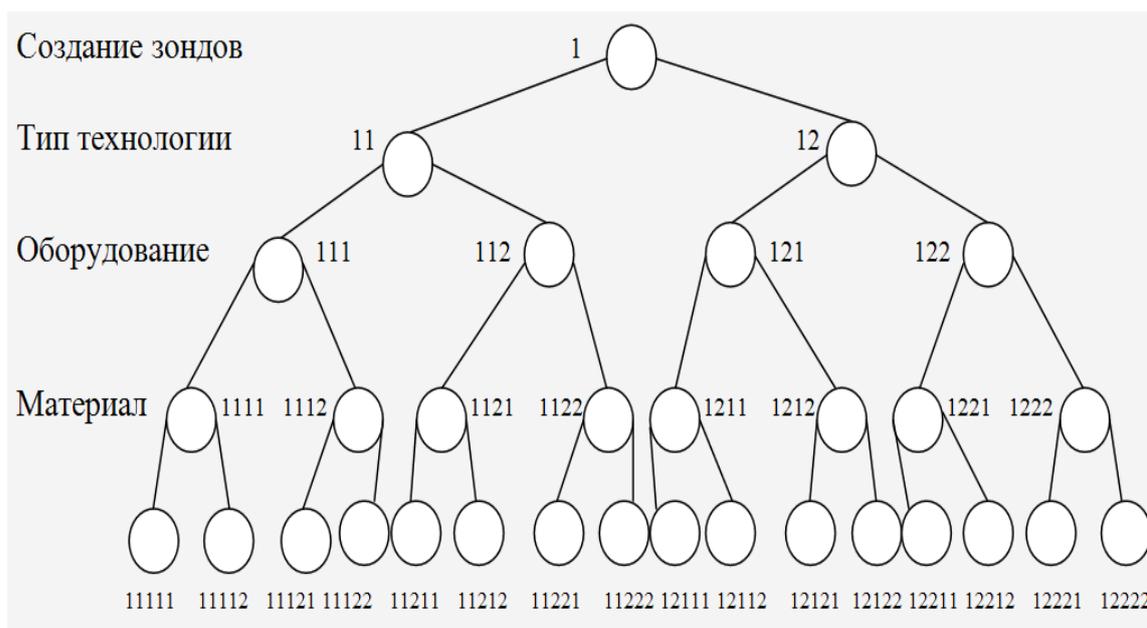


Рисунок 5.9.– Дерево решений для BGA

Определяется совместное распределение $P(\theta, y)$, данные представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Совместное распределение $P(\theta, y)$

y		92	93	94	95	96	97	98	99	$P(y)$
93	$P(\theta/y)$	0.0025	0.0100	0.0125	0.0200	0.0050	-	-	-	0.05
94		0	0.0050	0.0100	0.0150	0.0150	0.0050	-	-	0.05
95		0	0	0.0100	0.0300	0.0300	0.0200	0.0100	-	0.10
96		0	0	0	0.0400	0.1000	0.0400	0.0200	-	0.20
97		0	0	0	0.0300	0.0600	0.1800	0.0300	-	0.30
98		0	0	0	0	0.0200	0.1200	0.0400	0.0200	0.20
99		0	0	0	0	0.0100	0.0300	0.0400	0.0200	0.10
$P(\theta)$		0.0025	0.0150	0.0325	0.1350	0.2400	0.3950	0.1400	0.0400	

В последней строке таблицы приведены значения безусловного распределения $P(\theta)$. По данным таблицы 5.3 вычисляем $g_i(m) = \sum_{\theta} P(\theta, y = m + \theta)$, значения вероятностей $P(\theta, y = m + \theta)$ для различных θ и m таковы (таблица 5.4):

Таблица 5.4 – Значения вероятностей $P(\theta, y = m + \theta)$

m	$P(m)$
-3	0.01
-2	0.08
-1	0.2775
0	0.39
1	0.1475
2	0.075
3	0.02

Далее необходимо рассмотреть экспериментальные значения вероятности выхода годных изделий для всех возможных вариантов по дереву решений (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Апостериорные значения выхода годных изделий

№	y^*
1111	95.1
1112	96.4
1121	96.2
1122	97
1211	96.3
1212	97.2
1221	97.1
1222	97.4
2111	96.2
2112	98.1
2121	96.8
2122	97.3
2211	96.9
2212	98.4
2221	97.9
2222	98.8

Далее по формуле Байеса необходимо перейти от априорного распределения к апостериорному.

$$P''(\Theta / y) = \frac{P'(\Theta) \times P(y^* / \Theta)}{\sum_{\Theta} P(\Theta) \times P(y^* / \Theta)} \quad (5.9)$$

$$y_{1111}^* = 95$$

$$P''(94/95) = \frac{0.0325 \times 0.2775}{0.0325 \times 0.2775 + 0.135 \times 0.39 + 0.24 \times 0.1475 + 0.395 \times 0.075 + 0.14 \times 0.02} = 0.0697$$

$$P''(95/95) = 0.4069$$

$$P''(96/95) = 0.2739$$

$$P''(97/95) = 0.2278$$

$$P''(98/95) = 0.0217$$

Результаты, полученные для аналогичных вариантов апостериорного распределения, сведены в таблице 5.6, а гистограмма первого апостериорного распределения представлена на рисунке 5.10, совместное распределение $P(\theta, y)$ представлены в таблице 5.7, значения вероятностей $P(\theta, y = m + \theta)$ в таблице 5.8.

Таблица 5.6 – Апостериорное распределение

y		94	95	96	97	98	99	$P(y)$
95	$P(\theta/y)$	0,0697	0,406 9	0,2739	0,2278	0,0217		0,2380
96			0,187 6	0,4682	0,2916	0,0526		0,1905
97			0,042 8	0,2641	0,6110	0,0821		0,1905
98				0,0792	0,4521	0,2252	0,2435	0,1905
99				0,1014	0,5790	0,2884	0,0312	0,1905
y			94	95	96	97	98	99

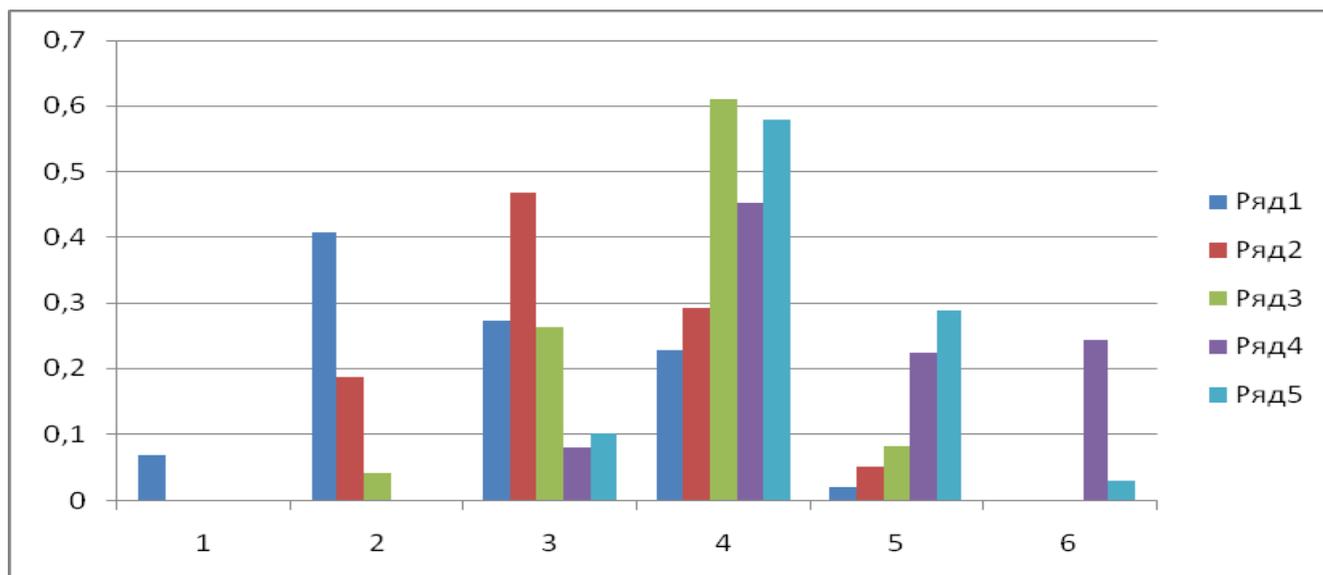


Рисунок 5.10. – Гистограмма первого апостериорного распределения

Таблица 5.7 – Совместное распределение $P(\theta, y)$

y		94	95	96	97	98	99	$P(y)$
95	$P(\theta/y)$	0,0166	0,0968	0,0652	0,0542	0,0052		0,2380
96			0,0357	0,0892	0,0555	0,0100		0,1905
97			0,0082	0,0503	0,1164	0,0156		0,1905
98				0,0151	0,0861	0,0429	0,0464	0,1905
99				0,0193	0,1103	0,0549	0,0059	0,1905
$P(\theta)$	0,0166	0,1407	0,2391	0,4225	0,1286	0,0523		

Таблица 5.8 – Значения вероятностей $P(\theta, y=m+\theta)$

m	$P(m)$
-3	0.0052
-2	0.0642
-1	0.1822
0	0.3512
1	0.2436
2	0.1336

Результаты, полученные для второго апостериорного распределения, сведены в таблице 5.9, а гистограмма второго апостериорного распределения представлена на рисунке 5.11, второе совместное распределение $P(\theta, y)$ на рисунке 5.10.

Таблица 5.9 – Второе апостериорное распределение

y		94	95	96	97	98	99	$P(y)$
95	$P(\theta/y)$	0,0321	0,3958	0,3494	0,2171	0,0408		0,2380
96			0,0756	0,2339	0,5964	0,0941		0,1905
97			0,0756	0,2339	0,5964	0,0941		0,1905
98				0,1683	0,5430	0,2385	0,20501	0,1905
99				0,0416	0,5095	0,2827	0,1662	0,1905
y			94	95	96	97	98	99

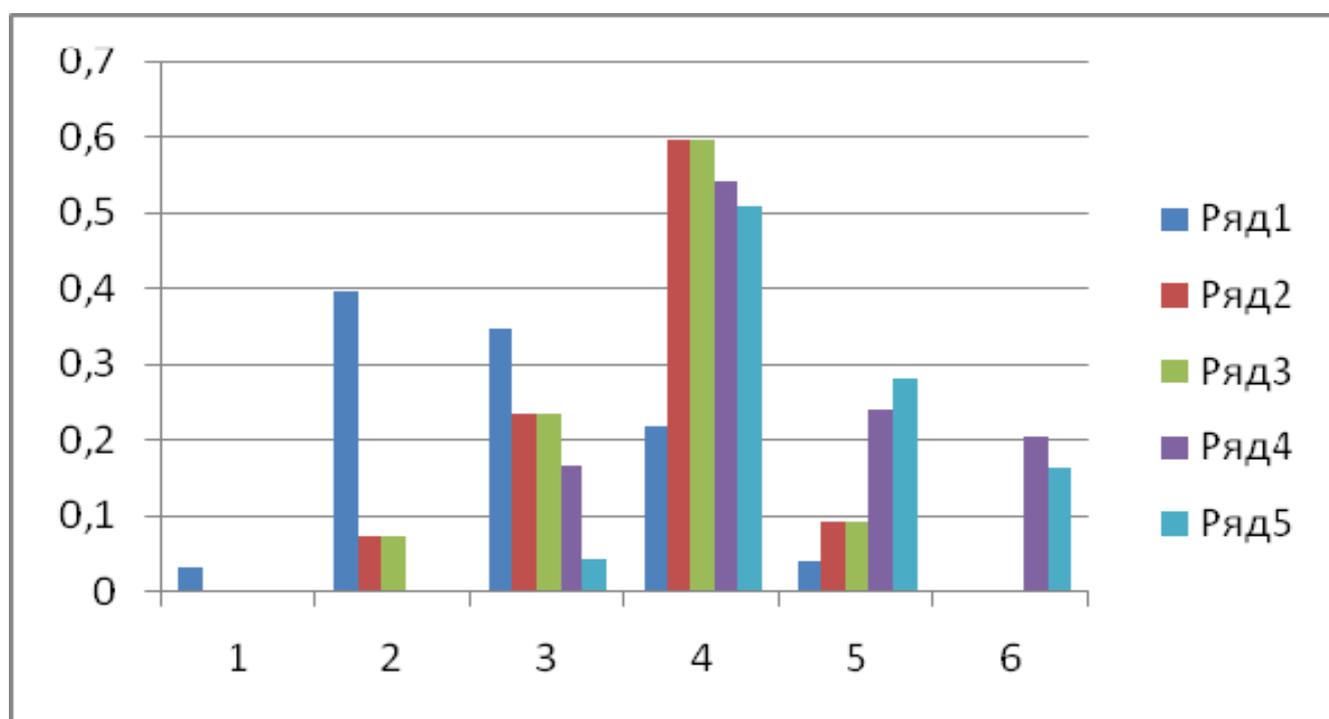


Рисунок 5.11 – Гистограмма второго апостериорного распределения

Таблица 5.10 – Второе совместное распределение $P(\theta, y)$

y		94	95	96	97	98	99	$P(y)$
95	$P(\theta/y)$	0,0166	0,0968	0,0652	0,0542	0,0052		0,2380
96			0,0357	0,0892	0,0555	0,0100		0,1905
97			0,0082	0,0503	0,1164	0,0156		0,1905
98				0,0151	0,0861	0,0429	0,0464	0,1905
99				0,0193	0,1103	0,0549	0,0059	0,1905
$P(\theta)$	0,0166	0,1407	0,2391	0,4225	0,1286	0,0523		

Необходимо определить значение стоимостного фактора, в нашем случае это количество выхода годных изделий из парии в 2000 единиц.

Ожидаемая выгода u^* определяется по формуле $u^*(e_{ij}) = P_{ij}(y) \cdot u(e_{ij}, y)$

Для определения выгоды от каждого варианта технологического процесса введена десятибалльная оценка оборудования (таблица 5.11) и пятибалльная оценка используемых материалов (как ПР предполагаем, что весовой коэффициент оборудования в два раза более значим чем материалов) (таблица 5.12). по различным параметрам, а полученная выгода в таблице 5.13.

Таблица 5.11 – Определение выгоды оборудования

Оборудование	BGA9000A	APR-5000	InjectSys350A	AOYUE 720
Стоимость оборудования	5	7	3	9
Эксплуатационные расходы	7	4	5	3
Производительность	8	4	9	3
Амортизация оборудования	7	5	4	4
Среднее значение показателей	6,75	5	5,25	4,75

Таблица 5.12 – Определение выгоды материалов

Материалы	NC297DX	Sn62/Pb36/Ag2
Проводимость	4	2
Механическая прочность	4	2
Стоимость материала	1	4
Среднее значение показателей	3	2,67

Таблица 5.13 – Выгода

№	u
1111	9.75
1112	9.75
1121	9.42
1122	9.42
1211	8
1212	8
1221	7,67
1222	7,67
2111	8,25
2112	8,25
2121	7,92
2122	7,92
2211	7,75
2212	7,75
2221	7,42
2222	7,42

Ожидаемая выгода u^* определяется по формуле $u^*(e_{ij}) = P_{ij}(y) \cdot u(e_{ij}, y)$

Таблица 5.14 – Ожидаемая выгода

	$P_{ij}(y)$	$u^*(e_{ij})$		$P_{ij}(y)$	$u^*(e_{ij})$		$P_{ij}(y)$	$u^*(e_{ij})$
1111	0.0697	0,6796	1112	0.1876	1,8291	1121	0.1876	1,7672
	0.4069	3,9673		0.4682	4,5679		0.4682	4,4104
	0.2739	2,6705		0.2916	2,8431		0.2916	2,7469
	0.2278	2,2211		0.0526	0,5129		0.0526	0,4955
	0.0217	0,2116						
1122	0.0428	0,4031	1211	0.1876	1,5008	1212	0.0428	0,3424
	0.2641	2,0256		0.4682	3,7456		0.2641	2,1128
	0.6110	5,7556		0.2916	2,3328		0.6110	4,888
	0.0821	0,7734		0.0526	0,4208		0.0821	0,6568
1221	0.0428	0,3283	1222	0.0428	0,3283	2111	0.1876	1,5477
	0.2641	2,0256		0.2641	2,0256		0.4682	3,8627
	0.6110	4,6864		0.6110	4,6864		0.2916	2,4057
	0.0821	0,6297		0.0821	0,6297		0.0526	0,434
2112	0.0792	0,6534	2121	0.0428	0,339	2122	0.0428	0,339
	0.4521	3,7298		0.2641	2,0917		0.2641	2,0917
	0.2252	1,8579		0.6110	4,8391		0.6110	4,8391
	0.2435	2,0089		0.0821	0,6502		0.0821	0,6502
2211	0.0428	0,3317	2212	0.0792	0,6138	2221	0.0792	0,5877
	0.2641	2,0468		0.4521	3,5038		0.4521	3,3546
	0.6110	4,7352		0.2252	1,7453		0.2252	1,671
	0.0821	0,6363		0.2435	1,8871		0.2435	1,8068
2222	0.1014	0,7524						
	0.5790	4,2962						
	0.2884	2,14						
	0.0321	0,2382						

Оптимальным вариантом, в соответствии с проведенными расчетами, по стоимостному критерию количества выхода годных изделий является вариант 1111 в соответствии с деревом решений. Что соответствует технологии трафаретной печати, установка BGA9000A, материал выводов паяльная паста Sn62/Pb36/Ag2.

5.2 Расчет выхода годных компонентов МЭМС по конструктивным элементам

Выход годных служит важным показателем совершенства технологического процесса и степени его освоения конкретным предприятием. Эта величина и ее составляющие по отдельным операциям являются одной из основных распространенных оценок технологической точности, и используется для управления качеством выпускаемой продукции. Порядок учета брака регламентируется нормативными технологическими документами.

Однако, существующие методы не позволяют учитывать связь выхода годных с техническими и организационными мерами по совершенствованию производства, в связи с чем выход годных для трудноуправляемых процессов устанавливается директивно. Это может приводить к недоиспользованию возможностей производства либо ставить производство в затруднительное положение из-за отсутствия технических решений для обеспечения требуемого показателя. Поэтому, расчет выхода годных, основанный на доступных каждому производству значениях данного показателя, и прогнозирование его изменений при изменении конструкторско-технологических решений материалов, совершенствовании технологии, и других условий производства, представляет существенный интерес.

Принципом, который позволяет учесть влияние разнородных факторов на выход годных, свести их к единому показателю, может служить вероятностная оценка получения годных конструктивных элементов (КЭ) МЭМС компонентов, модуля МЭМС. Имея такие оценки для всех КЭ, выход годных для компонентов МЭМС можно найти по формуле:

$$y_k = \prod_{l=1}^L y_{kl} \dots \prod_{m=1}^M y_{km} \dots \prod_{n=1}^N y_{kn}. \quad (5.10)$$

где l, m, \dots, n – КЭ, определяющие выход годных компонента, модуля (индекс « k » означает «конструктивный»); L, M, N – общее количество КЭ типов l, m, \dots, n соответственно в компоненте.

При изготовлении МЭМС компонентов с одинаковыми конструкторско-технологическими решениями (КТР), но разной сложности, т.е. содержащих большее или меньшее количество КЭ разных типов, выход годных различается.

При введении новых типов КЭ в компоненты МЭМС для расчета выхода годных необходимо определить y_{kl} – для новых типов КЭ, а значения y_{kl}, \dots, y_{kn} , также присутствующих в модулях, взять по данным производства до модернизации.

Вероятности получения годных КЭ могут быть достаточно просто установлены путем изготовления небольших партий специальных тестовых устройств, содержащих необходимые типы КЭ в больших количествах. Изготовление таких компонентов должно производиться по тому же ТП, что и для реальных изделий, и в тождественных условиях. Данные последующих этапов производства должны позволять периодически уточнять значения y_{kl} в произвольный момент времени. Кроме того, рассчитываемый выход годных не должен резко изменяться из-за случайных отклонений данного показателя для отдельных партий компонентов. Значения выхода годных должны быть оптимальными исходя из уровня показателей, достигнутых производством, а снижение потерь должно обеспечиваться конкретными техническими мерами: изменением ТП, оборудования, материала, конструкции компонента, организации производства, квалификации рабочих или других условий производства.

Конструктивной основой компонентов нулевого, первого и второго уровней служат коммутационные платы: печатные, МКП-1, 2, 3 и др. Основными КЭ таких являются: проводники разных слоев и сечений, «окна» для межслойных переходов проводников, участки изоляции между перекрещивающимися проводниками разных слоев многослойной проводниковой разводки, резисторы, КЭ МЭМС: консольные

балки, мембраны, торсионы, плоские пружины, луженые контактные площадки (КП), паяные (сварные) соединения с различными материалами пар соединяемых элементов и др. В качестве примеров можно назвать: проводник диаметром 30 мкм, никелевую КП или внешний вывод из ковара, платы и рамки герметизации, сварной шов рамки и крышки корпуса микросборки. Наборы (типы) КЭ уточняются по видам брака, характерным для производства конкретных изделий.

КЭ могут иметь различные геометрические характеристики (площадь, длину, диаметр и др.). Поэтому для характеристики их дефектов удобно использовать удельную плотность дефектов элементов i -го типа, связанную с количеством дефектов соотношением:

$$D_i = \frac{\lambda_i}{NA_i}, \quad (5.11)$$

где λ_i – количество дефектов i -го типа КЭ на партии коммутационных плат; N – количество плат в партии; A_i – геометрическая характеристика КЭ (площадь изоляции, длина для проводников, сварных или паяных швов, количество паяных (сварных) соединений на плате), балок, пружин мембран и др.

Вероятность присутствия дефектов, обусловленных типом КЭ, на отдельном модуле зависит от геометрической характеристики A , умноженной на удельную плотность дефектов D . Так как в ТП дефекты должны быть явлением редким, зависящим от выхода большого числа случайно действующих факторов, выход годных может быть описан распределением Пуассона. Могут использоваться и другие типы распределений. В частности удобны из-за наличия у них достаточных статистик экспоненциальные распределения.

В распределении Пуассона:

$$y(x, AD) = \frac{(AD)^x e^{-(AD)}}{x!}, \quad (5.12)$$

$y(x, AD)$ истолковывается как вероятность наличия x дефектов на фиксированном интервале геометрической характеристики A при удельной плотности дефектов. Можно утверждать, что на модуле не будет ни одного дефекта ($x = 0$) данного типа с вероятностью $y(0, AD) = e^{-AD}$. Дальнейшее усовершенствование модели описание дефектов КЭ заключается в учете возможных неоднородностей плотности дефекта каждого вида КЭ с помощью различных стандартных распределений $f(D)$ по площади платы, от края к центру и т.д.

Средний выход в этом случае определится выражением:

$$y = \int_0^{\infty} e^{-(AD)} f(D) dD. \quad (5.13)$$

При использовании для описания распределений, сопряженных основному, существенно упрощается использование результатов текущего производства изделий, которые содержат интересующие КЭ, для уточнения вероятностей получения годных элементов этих типов.

Сопряженным распределению Пуассона является γ -распределение:

$$f(D) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} D^{\alpha-1} e^{-\frac{D}{\beta}}. \quad (5.14)$$

Тогда:

$$y = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{\infty} e^{-(A+\frac{1}{\beta})D} D^{\alpha-1} dD. \quad (5.15)$$

Подстановка:

$$D = \ell n \frac{1}{z}; \quad dD = \frac{1}{z} dz \quad \begin{cases} D = 0, z = 1 \\ D = \infty, z = 0 \end{cases};$$

$$\ln(e^{-(A+\frac{1}{\beta})D}) = -(A+\frac{1}{\beta})\ln\frac{1}{z};$$

$$\ln(e^{-(A+\frac{1}{\beta})D}) = \ln\left(\frac{1}{z}\right)^{-(A+\frac{1}{\beta})};$$

$$e^{-(A+\frac{1}{\beta})D} = \left(\frac{1}{z}\right)^{-(A+\frac{1}{\beta})}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{\tilde{A}(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^1 \left(\frac{1}{z}\right)^{-(A+\frac{1}{\beta})} \left[\ln\frac{1}{z}\right]^{\alpha-1} \frac{dz}{z} = \\ &= -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\alpha-1}}{\tilde{A}(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^1 \left(\frac{1}{z}\right)^{-(A+\frac{1}{\beta})} (1-z^n)^{\frac{1}{n}\alpha-1} \frac{dz}{z}. \end{aligned}$$

Имеем:

$$\ln\frac{1}{z} = \lim_{n \rightarrow \infty} n(1-z^n)^{\frac{1}{n}}$$

Приняв:

$$z = x^n;$$

$$dz = nx^{n-1}dx,$$

получим:

$$\begin{aligned}
y &= - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\alpha}{\tilde{A}(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{\frac{n(A+\frac{1}{\beta})}{n}} (1-x)^{\alpha-1} \frac{dx}{x} = \\
&= - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\alpha}{\tilde{A}(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{\frac{n(A+\frac{1}{\beta})-1}{n}} (1-x)^{\alpha-1} dx = \\
&= - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left[\frac{n(A+\frac{1}{\beta})}{\beta} \right]^\alpha}{(A+\frac{1}{\beta})\tilde{A}(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{\frac{n(A+\frac{1}{\beta})-1}{\beta}} (1-x)^{\alpha-1} dx = (1+A\beta)^{-\alpha}
\end{aligned}$$

Здесь α и β могут бы найдены по математическому ожиданию и дисперсии в виде:

$$\alpha = \left(\frac{\bar{D}}{\sigma} \right); \beta = \frac{\sigma^2}{D}, \quad (5.16)$$

где \bar{D} – средняя плотность дефектов;

σ^2 – дисперсия плотности дефектов.

Параметры α и β полностью определяют распределение плотности дефектов КЭ каждого типа, а следовательно, и $y_{k,l}$, $y_{k,m}$... в данной партии (группе партий, изготовленных за определенный календарный период).

Аналогично могут быть вычислены выходы годных при других распределениях дефектов.

Пересчет параметров α и β по результатам изготовления очередной партии микросборок для сопряженных распределений весьма прост.

Если априорная плотность дефектов КЭ конкретного типа из распределения Пуассона характеризуется значением с параметров α и β , $\alpha > 0$, $\beta > 0$, тогда апостериорное распределение D при $X_i = x_i$ ($i=1,2,\dots,n$) есть гамма распределение с параметрами:

$$\alpha + \sum_{i=1}^n x_i ; \beta + 1, \quad (5.17)$$

где x_i – число бракованных КЭ;

n – общее число КЭ данного типа.

Аналогичные простые арифметические пересчеты параметров существуют для других пар сопряженных распределений.

Пересчет параметров распределения по формуле (5.16) позволяет учесть влияние результата текущего производства на вычисление плотности дефектов КЭ рассматриваемого типа и, следовательно, на выход годных.

Если величины $\lambda_v D_i$ в выражении (5.10) определены для нового ТП, оборудования, материала, конструкции, то, расчеты по приведенной методу позволят оценить влияние этих изменений на выход годных компонентов МЭМС.

Точность и объективность расчетов могут быть повышены увеличением объема статистических данных производства, а также дальнейшей детализацией КЭ с помощью составных композиционных распределений плотности, групп оборудования, квалификации операторов, изготавливающих ЭА.

5.3 Пример расчета выхода годных структур

Исходные данные по выходу годных электрических компонентов получены путем изготовления микросборок типа МА-2А на заводе «Хартрон». Изготовлено 29 партий по 20 штук. Всего 580 микросборок.

По результатам контроля изготовленных многослойных структур была принята следующая классификация дефектов (табл. 5.15):

- 1 тип – обрывы и короткие замыкания проводников в слоях (ЭК-1);
- 2 тип – дефекты межслойной изоляции (короткие замыкания между (ЭК-2) слоями, пониженное сопротивление изоляции, пузыри, трещины, вспучивания и др.);
- 3 тип – обрыв межслойного перехода, КЗ соседних контактных

площадок (ЭК-3);

– 4 тип – необлудившиеся контактные площадки, трещины вокруг КП (ЭК-4);

Таблица 5.15 – Количество отказов по видам дефектов

№ п/п	Номер партии	Тип дефектов				№	Номер партии	Тип дефектов			
		1	2	3	4			1	2	3	4
1	585		4		0	16	676	1	5		
2	623		2			17	677		3		
3	622	1	2			18	152	8	5		
4	861	6				19	623				13
5	862	5				20	624		3		14
6	863	5	2			21	472	6			
7	866	6				22	486		4		
8	855	8				23	678	1			
9	899	1	4	1		24	673	2	1		
10	994	1	8		1	25	771	1			
11	604	1	10			26	737		1		
12	767	9				27	-	-	-		
13	469	2	5	2		28	114	2	4	1	
14	470	3	4		1	29	115	1			
15	675	2	7			Итого		72	74	4	29

1) расчет параметров распределения дефектов проводников.

– плотность дефектов:

$$D_1 = \frac{\lambda}{KNA_1} \quad (5.18)$$

где: λ – общее количество дефектов проводников;

N – количество партий;

K – количество плат в партии;

A_1 – общая длина проводников на плате, $A_1 = 3406i$;

σ – среднее квадратическое отклонение плотности дефектов:

$$\sigma_1 = 41,26 \frac{\ddot{a}\dot{a}\dot{\delta}}{\ddot{i}}$$

– коэффициент распределений α_1 и β_1 :

$$\alpha_1 = \left(\frac{\overline{D_1}}{\sigma_1} \right)^2 = 0,78,$$

$$\beta_1 = \frac{\sigma_1^2}{D_1} = 46,7.$$

– выход годных проводников:

$$y_1 = (1 + A_1 \beta_1)^{-\alpha} = (1 + 3406 \cdot 46,7 \cdot 10^{-6})^{-0,78} = 0,8912$$

2) Расчет параметров распределения дефектов изоляции:

– плотность дефектов межслойной изоляции:

$$D_2 = 86,14 \cdot 10^{-6};$$

$$\sigma_2 = 91,40 \frac{\ddot{a}\dot{a}\dot{\delta}}{\ddot{i}^2};$$

$$\alpha_2 = 0,6949;$$

$$\beta_2 = 96,98;$$

$$y_2 = (1 + A_2 \beta_2)^{\alpha_2} = 0,9109.$$

3) Расчет параметров дефектов межслойных переходов (678 многослойных переходов):

$$D_3 = 10,1 \cdot 10^{-6};$$

$$\sigma_3 = 2,3 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_3 = 0,3136;$$

$$\beta_3 = 102,72 \cdot 10^{-6};$$

$$y_3 = 0,9790.$$

Общий выход годных многослойных структур тогда равен:

$$y = \prod_{i=1}^3 y_i = 79,477\% . \quad (5.19)$$

По выполненному анализу ТП следует отметить, что основным видом брака являются обрывы и короткие замыкания проводников в слоях.

Выход годных можно улучшить конструктивными решениями, перейдя к менее плотной разводке, технологическими решениями – подготовкой паст перед нанесением, контролем качества нанесения и состояния трафаретов и др. Дефекты типа необслуженных площадок и трещин появились лишь в двух соседних по времени изготовления партиях и были связаны с отклонениями режима вжигания паст. Анализ дефектов типа необслуженных контактных площадок на микрошлифах и измерениями переходных сопротивлений выявил, что причиной брака было растекание изоляционной пасты и уменьшение вследствие этого размеров контактных площадок. Зависимость диэлектрической проницаемости кристаллизующего стекла СЦ-273 имеет минимальное значение при температуре вжигания $780^{\circ}C$, но при этом по величине растекания благоприятной температурой

вжигания по величине растекания оказалась температура 750°C (рисунок 5.12).



Рисунок 5.12 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры вжигания стекла СЦ-273

Снижение температуры вжигания до 750°C исключило указанный вид дефектов.

Для прогноза выхода годных изделий микросборок необходим расчет (по конструкторской документации) следующих характеристик: общая длина проводников, площадь межслойной изоляции перекрестий, размеры платы, количество проводниковых слоев), число межслойных переходов, размеры и форма «окон» для межслойных переходов.

Для МЭМС компонентов необходимо определение плотности дефектов для новых элементов конструкции: площади слоев, разделенных воздушными промежутками, протяженности глубоких узких щелей, скрытых узких каналов, получение зазоров в глубине углублений и др.

Используя свойства функции Γ , являющейся распространением на область любых положительных значений аргумента-факториала $n!$, определенного лишь для натуральных значений n и вычисление Γ для сколь угодно большого значения аргумента путем приведения к вычислению Γ для аргумента $\langle 1$, можно уточнять

достигнутый в производстве уровень выхода годных неограниченно долго.

Свойства гамма функции:

$$\Gamma(\alpha + 1) = \alpha\Gamma(\alpha); \quad (5.20)$$

$$\Gamma(\alpha + n) = (\alpha + n - 1)(\alpha + n - 2)\dots(\alpha + 1)\alpha\Gamma(\alpha); \quad (5.21)$$

$$\Gamma(1) = \int_0^{\infty} e^{-x} dx = 1; \Gamma(n + 1) = n!;$$

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}. \quad (5.22)$$

Таким образом, предлагаемая методика имеет следующие преимущества:

- позволяет планировать выход годных изделий, исходя из уровня, достигнутого производством, путем использования конкретных организационно-технических мероприятий, с учетом сложности конструкции узлов;
- дает возможность оценивать эффективность новых ТП, материалов, оборудования, оснастки для повышения точности и стабильности ТП;
- может уточняться путем добавления новых КЭ по зафиксированным в производстве видам брака;
- обеспечивает пересчет плотности дефектов каждого вида по результатам изготовления узлов ЭА за произвольный отрезок времени простыми арифметическими действиями;
- может совершенствоваться путем учета неравномерности распределений дефектов с помощью составных распределений плотности дефектов;
- ориентируется на АСУ ГПС соответствующих видов производства и обеспечивает в этом случае автоматизацию получения исходных данных (D_i).

Выводы по разделу 5

Предложенный метод байесовских статистических решений позволяет выбрать лучший из рассматриваемых вариантов на каждом шаге разработки с использованием формализованной когнитивной процедуры и может использоваться для сравнения вариантов технических решений на разных стадиях проектирования.

Метод адаптивный, т.е. полученные в результате выполнения этапов работы экспериментальные данные используются для уточнения априорных распределений.

«Отсекание» неперспективных по выбранному критерию направлений сокращает объемы вычислений.

Метод прогнозирования выхода годных изделий позволяет:

- планировать выход годных, исходя из уровня, достигнутого производством, путем использования конкретных организационно-технических мер, с учетом сложности конструкции узлов;
- учитывать эффективность новых ТП, материалов, оборудования для повышения точности и стабильности ТП;
- уточнять выход годных путем добавления новых КЭ по зафиксированным в производстве видам брака;
- обеспечивать пересчет плотности дефектов каждого вида по результатам изготовления узлов ЭА за произвольный отрезок времени простыми арифметическими действиями;
- совершенствование путем учета неравномерности дефектов с помощью составных распределений плотности дефектов

РАЗДЕЛ 6

СОЗДАНИЕ МЭМС МНОГОЗОНДОВЫХ ПОДКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА КОНВЕРГЕНЦИИ

6.1 Разработка метода и технологии изготовления многозондовых подключающих устройств

Принцип конвергенции различных физических явлений был опробован при разработке многозондовых подключающих устройств для контроля электрических параметров многослойных структур МЭМС и микроэлектронной аппаратуры, а также электронных компонентов с матричными шариковыми выводами типа BGA/CSP [240, 241].

Конструктивной основой современной микроэлектронной аппаратуры многих МЭМС устройств являются многослойные коммутационные платы. Важной операцией их производства остается электрический контроль целостности проводников и отсутствие коротких замыканий разобобщенных цепей. При уменьшении размеров проводников и зазоров между ними, а также при увеличении степени интеграции узлов аппаратуры сложность этой операции возрастает, потому что на малой площади необходимо устанавливать большое число зондов для их подключения к автоматизированным приборам контроля.

Контроль электрических параметров МКП обеспечивается различными видами автоматизированных систем контроля и подключающих многозондовых устройств. Используются МПУ с подпружиненными зондами («ложе гвоздей»), с зондами с потерей устойчивости, с «летающими зондами» (рис. 6.1, рис. 6.2) [150 – 152], со специально созданными для контроля периферийными площадками. Каждый из перечисленных МПУ обладает своими недостатками и общей для них всех возможностью ошибок контроля первого и второго рода (возможностью пропуска брака и отбраковки годных изделий), вызванной отсутствием контакта зондов к точкам контроля изделий.

Электрический контроль многослойных коммутационных плат выполняется автоматизированными комплексами, подключаемыми к МКП с помощью МПУ. Известны контролирующие комплексы с числом точек подключения 4000, 8000, 10 000 и даже 16 000. Сложность изготовления, ремонта, эксплуатации и стоимость таких устройств возрастают. Цена одного пружинного зонда составляет 100 и более гривен.

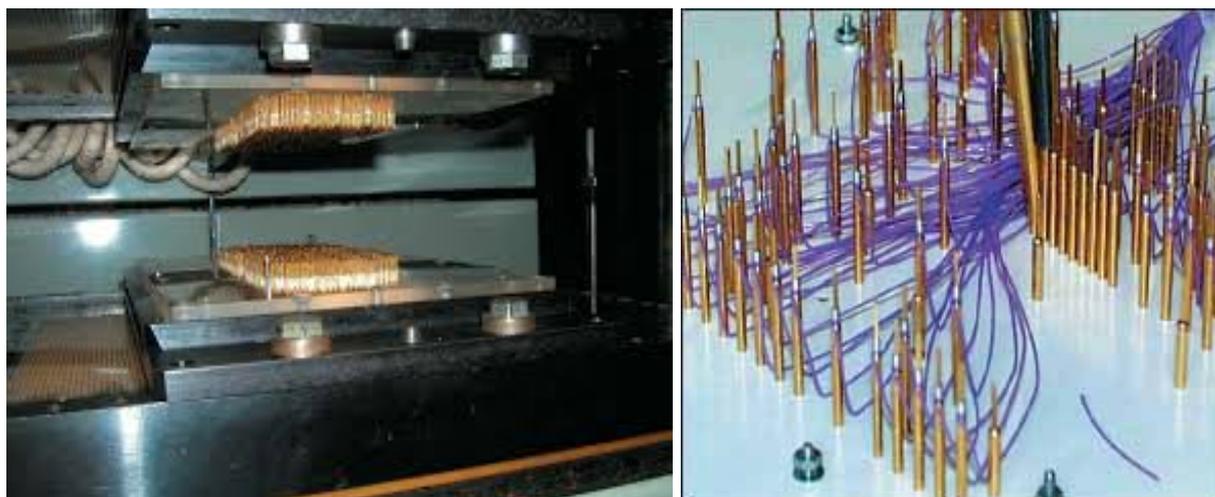


Рисунок 6. 1 – МКУ «ложе гвоздей»

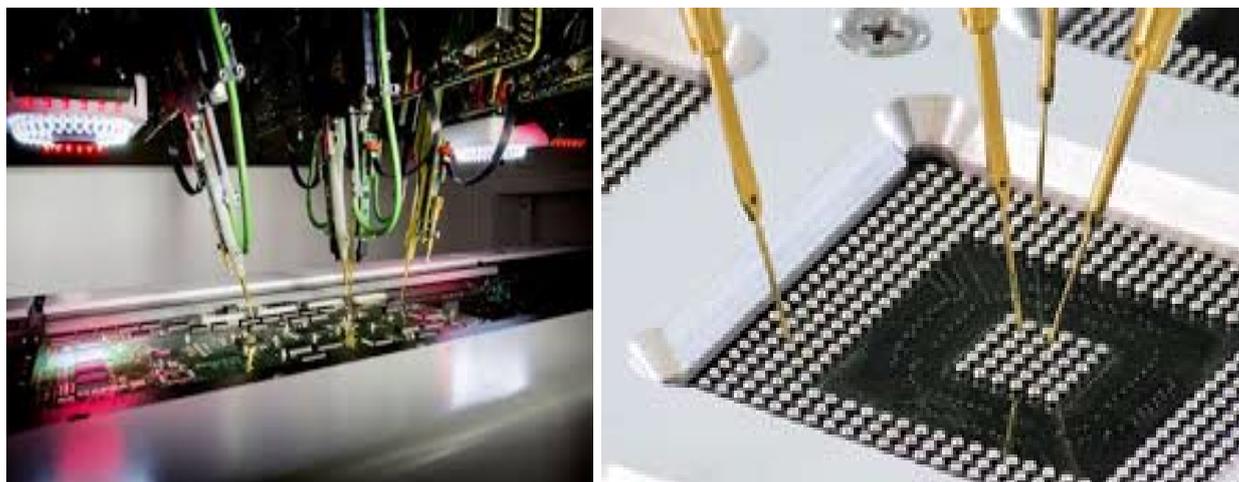


Рисунок 6.2 – МКУ «летающие зонды»

Устройства отличаются высокой сложностью, трудоемкостью изготовления и недостаточной надежностью [153 – 155]. До нескольких процентов общего количества цепей после автоматической проверки контролируют вручную, поэтому

создание многозондовых подключающих устройств остается актуальным до настоящего времени.

На основе принципа конвергенции различных физических явлений для устранения отмеченных недостатков был разработан новый метод создания МЭМС многозондовых подключающих устройств и на его основе создан ряд конструкций.

Этот метод создания МПУ использует свойство воздушной (газовой) среды равномерной передачи статического давления, по поверхности закрытого объема, одна из стенок которого образована гибким полиимидным шлейфом, на проводниках которого зонды матрицы.

Принципиально упрощена форма зондов, вместо штырей сложной конфигурации используются шариковые выводы, множество упругих элементов зондов прежних конструкций заменено гибкой полимерной пленкой, на которой размещены шарики-зонды.

В технологическом процессе изготовления МЭМС МПУ используются три известных технологии: изготовление шлейфа на пленочном фольгированном носителе, изготовления шариковых выводов и прижатия шлейфа с зондами давлением сжатого воздуха, что позволило размещать зонды более плотно на плоскости, уменьшить стоимость производства устройства, обеспечить дублирование зондов на контактах контролируемых изделий.

В многозондовых подключающих устройствах, применяемых при контроле электрических параметров многослойных структур, гибкой основой является фольгированная алюминием полиимидная пленка, изготавливаемая по техническим условиям БУО 037108.14.

По технологи, разработанной в НИТИП (г. Харьков), изготавливается многослойный полиимидный шлейф. Методом фотолитографии на пленке вытравливается система проводников. Контактные площадки (места расположения будущих зондов) покрываются никелем 5-10 мкм. Конвекцией горячего воздуха шарики припоя паяются, образуя матрицу зондов. Зонды могут изготавливаться и другими способами (трафаретной печатью и оплавлением припойных паст, гальваническим осаждением и оплавлением и т.д.) [20].

Давление зондов на контактные площадки создается в подключающем устройстве сжатым воздухом после закрепления шлейфа с зондами в корпусе с уплотнением по периметру зоны размещения зондов.

Технические возможности ряда МКУ приведены ниже.

В качестве объекта контроля выбрана многослойная коммутационная плата аппаратуры УКЦВС (КРЗ, г. Киев) (рис.6.3). Один из четырех однотипных топологических проводниковых слоев МКУ показан на рисунке 6.4.

Многозондовое микроэлектромеханическое устройство, содержащее 2400 зондов (патент № 82405 [128]) реализовано на многослойной полиимидной плате с алюминиевой разводкой. Для коммутационной платы 48×60 мм, с шагом расположения контактных площадок 0,625 мм МПУ изготовлено на четырехслойном шлейфе. Зонды в виде шариков изготовлены по технологии BGA-компонентов, противоположные концы шлейфа подведены к автоматическому контролируемому комплексу [188].

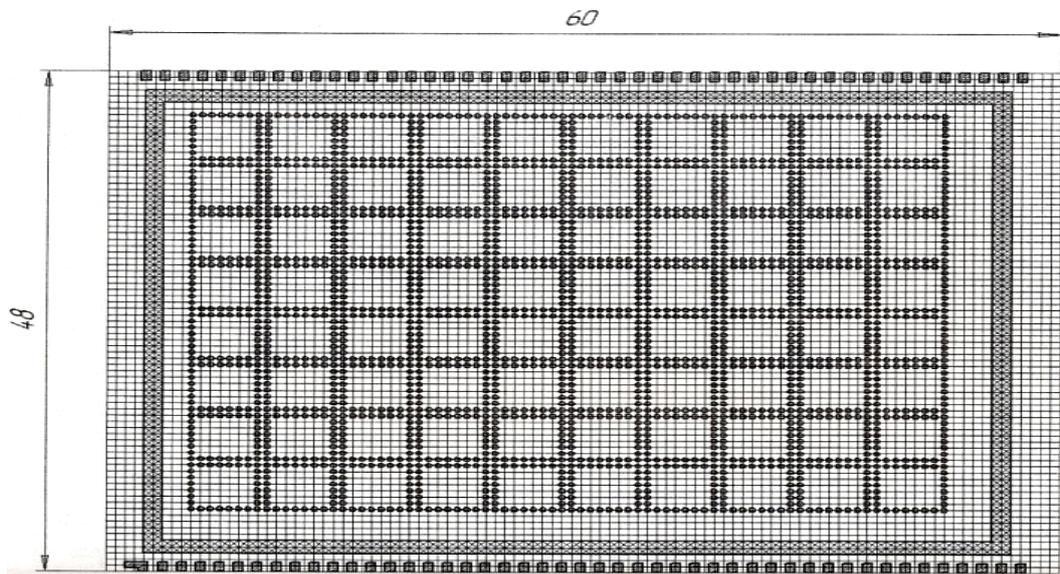


Рисунок 6.3 – Пример контролируемой МКП

Шлейф с зондами-шариками располагается в корпусе, в нижней части которого имеется объем для подачи сжатого воздуха.

Шлейф расположен выше воздушной камеры на решетке, зондами вверх.

В верхней части корпуса устанавливается контролируемая плата контактными площадками вниз так, что они накладываются на шарики-зонды шлейфа. Контролируемая плата сверху прижимается крышкой.

При подаче сжатого воздуха в воздушную камеру шлейфа с шариками зондами прижимается к контактным площадкам контролируемой платы.

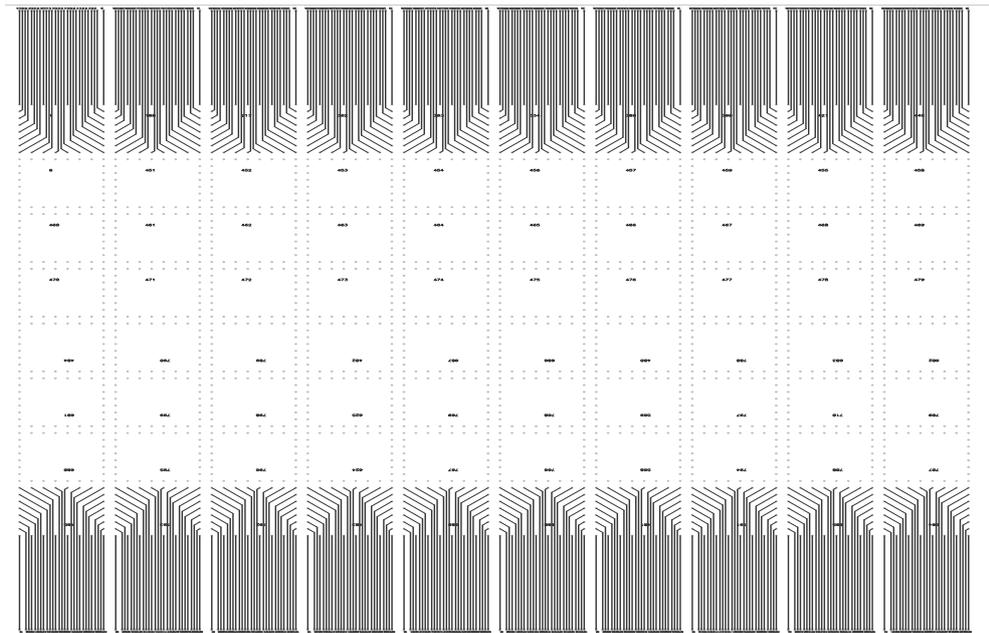


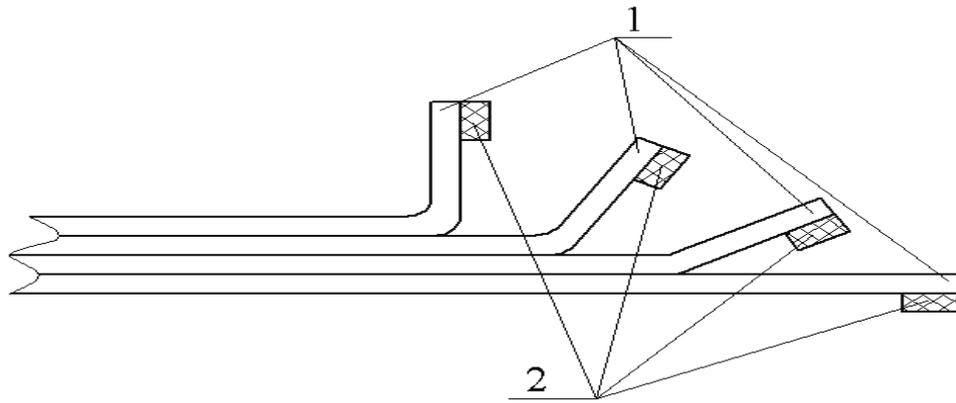
Рисунок 6.4 – Первый слой прижимающей пластины МКУ

Ширина проводников прижимающего шлейфа и расстояния между ними равны 75 мкм, диаметр межслойных отверстий – 100 мкм.

Для удобства подключения различные слои шлейфа имеют различную длину и на обратную сторону (внешний конец) слоя наклеены полоски стеклотекстолита толщиной 0,1 мм (рис. 6.5).

Воздушное прижатие шлейфа с зондами (air cushion pressing) позволяет обеспечить требуемое усилие контактирования всех точек многослойной контролируемой платы и зондов шлейфа.

Разрешающая способность проводниковой разводки шлейфа может быть повышена до 50...30 мкм, а диаметр зондов уменьшен до ~ 50 мкм.



1 – гибкий шлейф; 2 – стеклотекстолит

Рисунок 6.5 – Прижимающая пластина МКУ

Таким образом, предложенное многозондовое контактирующее устройство обеспечивает высокое качество контактирования при низкой вероятности повреждения контролируемого объекта, размещение контактов-зондов с более высокой плотностью.

6.2 МЭМС многозондового подключающего устройства с контролем наличия контакта зондов

Исключение ошибок контроля первого и второго рода достигнуто использованием более сложных матричных структур. К каждой контролируемой точке многослойной структуры подключается не один, а несколько отдельных зондов, между которыми образуется замкнутая цепь только в случае наличия контакта с контактной площадкой нескольких шариков (минимум – двух) (рис.6.6) [238].

От каждой пары соединенных шариков на противоположный (внешний) конец шлейфа выведен один проводник. Такое размещение частей зонда обеспечивает наличие контакта между разобщенными парами при небольших смещениях контактных площадок платы и зондов подключающего устройства по осям в плоскости платы.

Подключающее устройство обеспечивает возможность контроля наличия

контакта любого (каждого) из множества зондов с соответствующей контрольной точкой платы.

Кроме увеличения надежности контакта (он теперь обеспечивается, по крайней мере, контактированием двух частей-зондов), получена возможность контроля наличия контакта, что придает устройству свойство интеллектуальности.

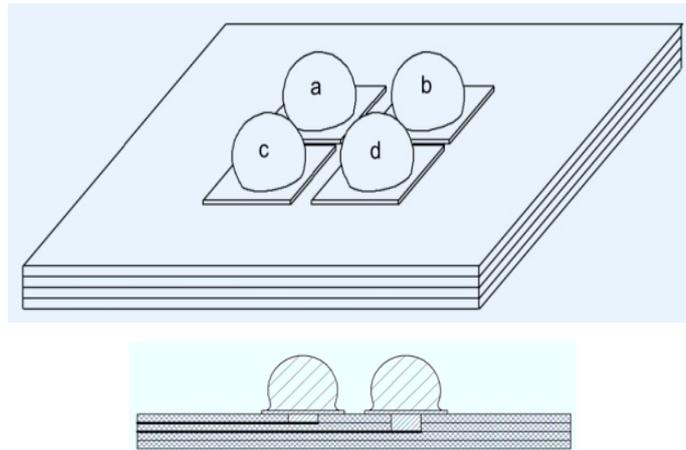


Рисунок 6.4 – Зонд МПУ

6.3 Разработка многозондовых контактирующих устройств для входного контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами

Значительная часть современных электронных компонентов, применяемых в РЭА, зарубежного производства. Обладая высокими электрофизическими характеристиками, эти покупные изделия достаточно часто не соответствуют паспортным данным, имеют скрытые дефекты, которые ввиду сложности и высокого уровня интеграции (процессоры, FPGA и др.) трудно своевременно выявить.

Это накладывает на отечественных производителей РЭА дополнительные обязанности по организации входного и функционального контроля покупных изделий и использованию контролирующих устройств высокого уровня автоматизации и соответственно сложности.

В области контроля электрических параметров компонентов наметилось

несколько тенденций. Первая из них – реализация в конструкции компонентов принципа периферийного, граничного тестирования (boundary testing по стандарту IEEE-1149). В этом варианте предусматривают вывод ключевых для проверки работоспособности точек схемы на внешний, периферийный ряд контактов, подключение к которым более простое, чем ко внутренним (в BGA/CSP и др.). Другой принцип используется в ПЛИС. Производитель разрабатывает схему устройства программирования и тесты для тестирования изделия, требующие дополнительных устройств ввода данных при тестировании [236].

Третий принцип – использование для тестирования программируемых подключающих быстродействующих устройств с «летающими зондами» (до 60 подключений в минуту). Установки разработаны в Японии, [129] используют прецизионные устройства позиционирования зондов (рис. 6.5).

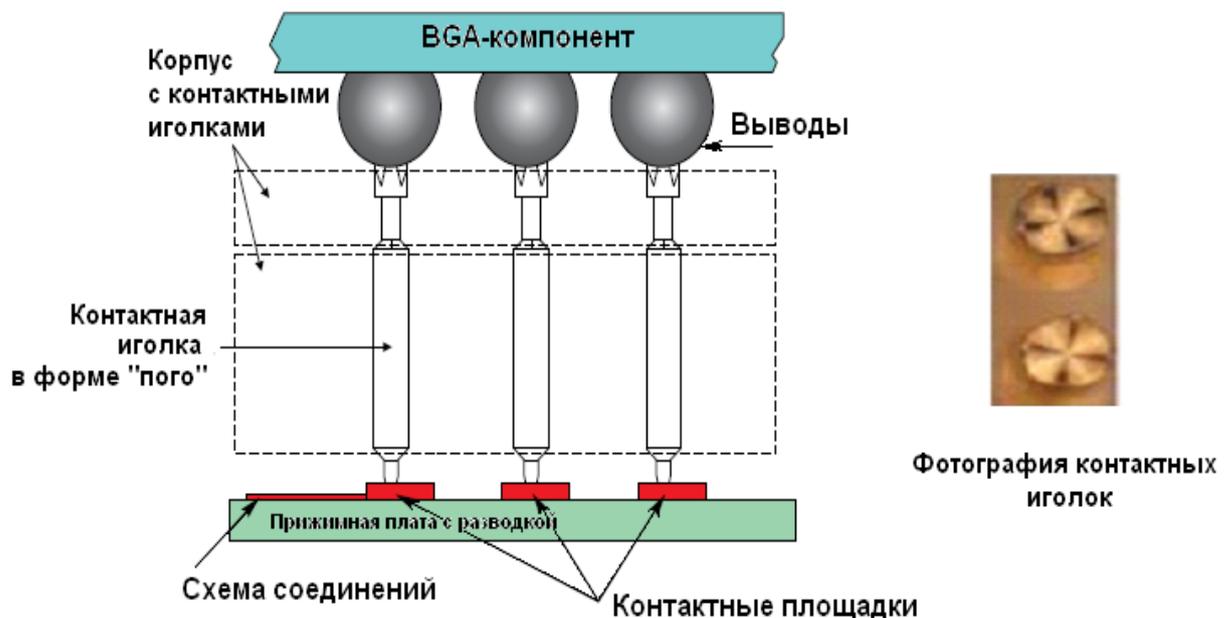


Рисунок 6.5 – Структура игольчатого соединителя

Одной проблемой соединителей для таких компонентов является необходимость избежать повреждений шариков процессе контактирования с иглой и обеспечить стабильный контакт [129].

Приложение чрезмерного усилия оставляет следы на поверхности шариков,

что негативно сказывается на BGA-компоненте и его надежности.

Как и в предыдущих устройствах, многозондовое подключающее МЭМС устройство, позволяющее производить контроль подключения каждого зонда к контактной площадке BGA-компонентов, реализуется на гибком пленочном шлейфе (патент Украины № 95190 [130]).

Каждая отдельная зонд-площадка разделяется на несколько электрически разъединенных между собой частей, которые предназначены для контактирования с одним шариковым выводом ЭК так, что отдельные части зонда станут электрически соединенными между собой только при контактировании по меньшей мере двух частей к одному выводу, и эти отдельные части соединены отдельными проводниками платы на его противоположном к зоне контактирования конце со стандартным плоским разъёмом.

Основные технические параметры МПУ:

- плотность расположения зондов – 0,5 мм;
- переходное сопротивление – единицы мОм;
- количество одновременно контролируемых элементов – до нескольких тысяч в зависимости от плотности их размещения;
- подключение к автоматизированным измерительным комплексам – через ZIF-разъемы.

При подключении к шариковым матричным выводам компонентов BGA/CSP зонды имеют форму плоских контактных площадок (рис. 6.6 и рис. 6.7).

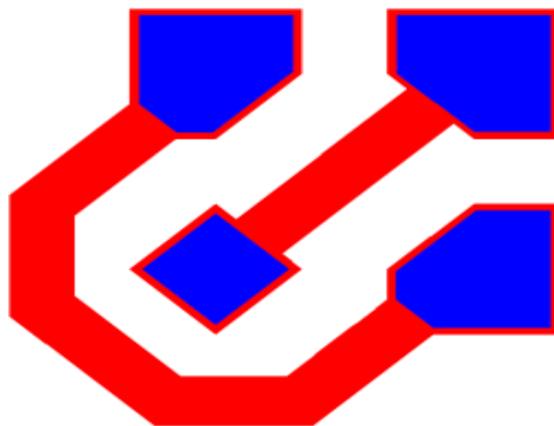


Рисунок 6.6 – Зонд-площадка

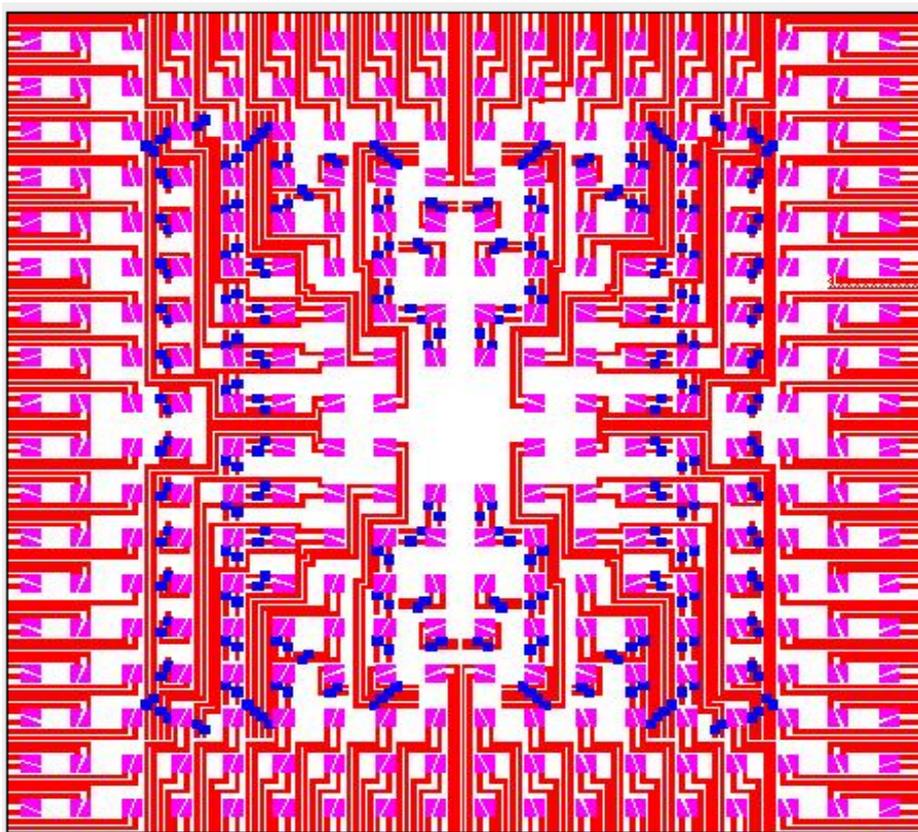


Рисунок 6.7 – Множество контактных групп

Схема подключения BGA компонентов к МПУ и представлена на рис. 6.8., на рис. 6.9 представлена 3D модель МПУ.

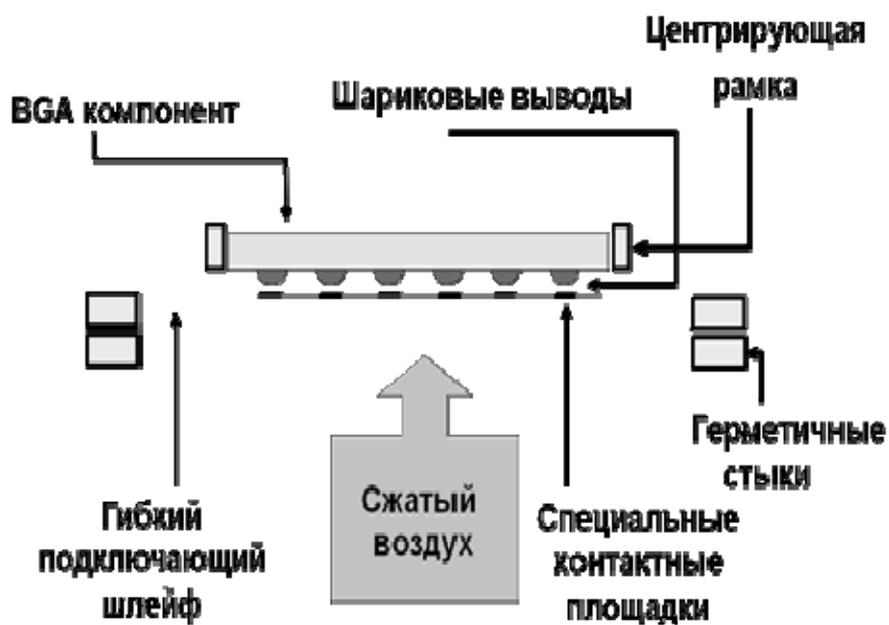


Рисунок 6.8 – Схема подключения BGA компонентов к МПУ

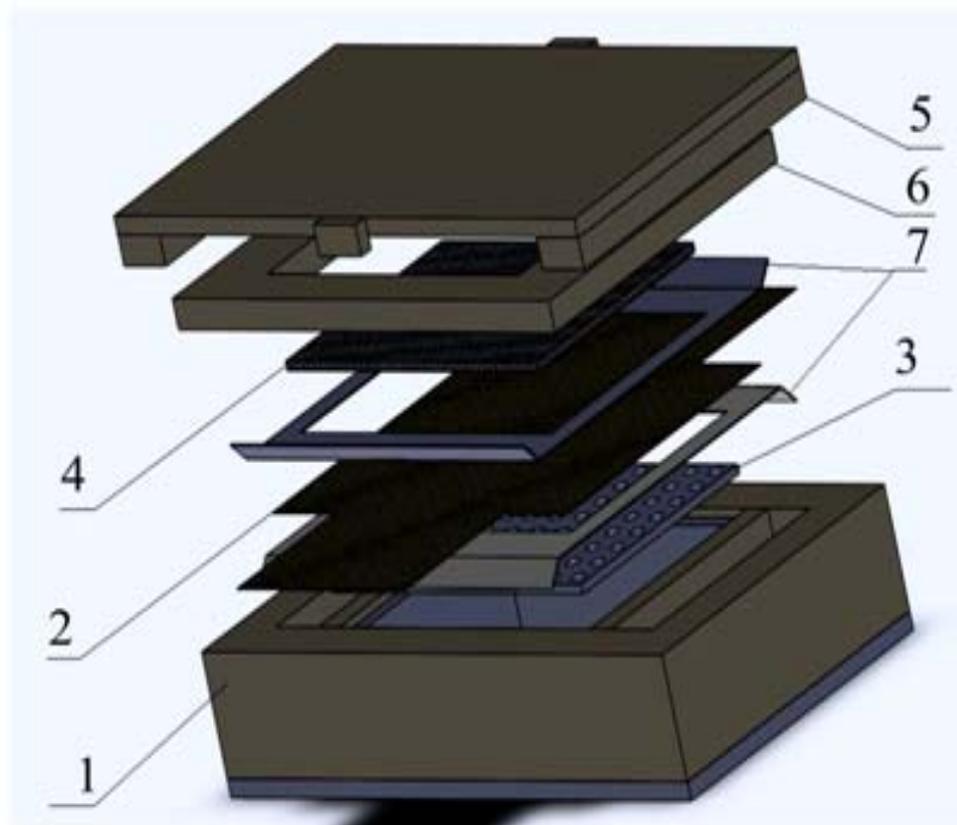


Рисунок 6.9 – 3D модель МПУ

В корпусе (1) прижимающая пластина МПУ (2) располагается зондами вверх на поддерживающей полке с перфорациями (3), обеспечивающей защиту от провисания, в горизонтальном положении.

На массив плоских зондов устанавливается контролируемый компонент (4) и фиксируется крышкой (5).

Центрирующая рамка (6) обеспечивает совмещение шариковых выводов с контактами-зондами МПУ по двум координатам.

Для поджатия контактов МПУ и создания необходимого давления на шарик в объем корпуса под перфорированной полкой подается сжатый воздух.

Для предотвращения утечки воздуха используются изолирующие прокладки (7).

По техническим требованиям предприятия «Хартрон – Энерго» (г. Харьков) было разработано МКУ для контроля микросхем в корпусе *FG-320*.

Технические требования к МПУ:

- сопротивление перехода зонд-шариковый вывод, мОм – не более 8;
- сопротивление проводника в шлейфе до соединения с ZIF, Ом – не более 10;
- емкость проводника относительно всех остальных – менее 100 пФ;
- длина шлейфа до ZIF-соединителя, мм – 200;
- количество точек подключения (матрица $18 \times 18 - 4$) – 320;
- шаг выводов, мм – 1;
- диаметр шарикового вывода, мкм – 600.

Изображение корпуса микросхемы приведено на рисунке 6.10.

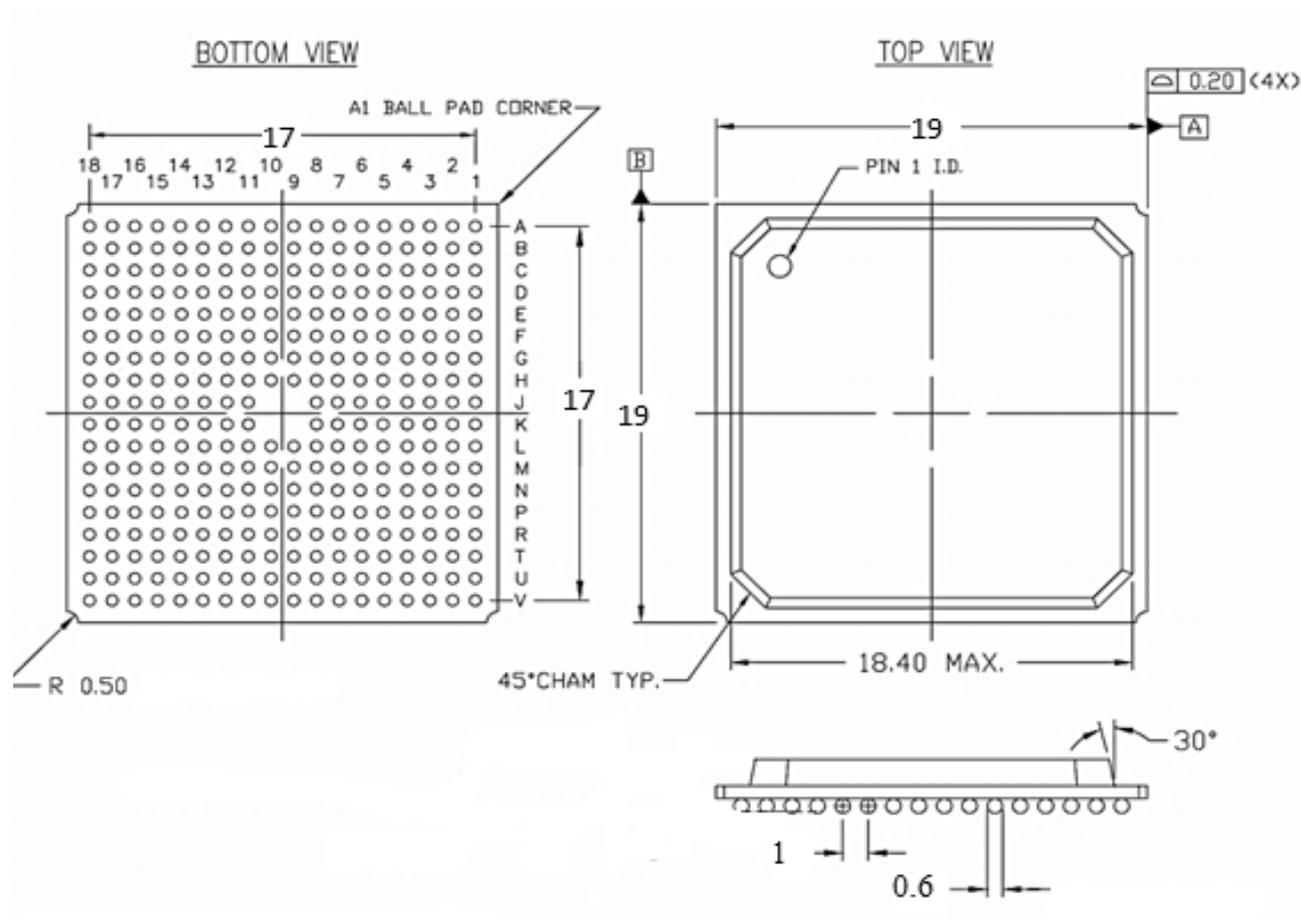


Рисунок 6.10 – Корпус *FG-320*

Топология МПУ разрабатывалась с использованием САПР *P-CAD* и *Auto CAD*.

Рассмотрено три варианта [239].

Первый вариант (рис. 6.11):

- материал шлейфа – полиимид ФДИ-А-35;
- ширина проводников, мкм – 40;
- расстояние между проводниками, мкм – 60.
- разводка выполнена на двух слоях (рис. 6.9).

Конструктивные особенности первого варианта топологии спроектированной прижимающей пластины:

- два слоя ПП;
- габаритные размеры контактной площадки – 300×300 мкм;
- сопротивление проводников менее 7 Ом (при длине шлейфа 0,2 м) ;
- емкости отдельного проводника на все остальные менее 50 пФ;
- реперные знаки;
- переходные отверстия под сварку.

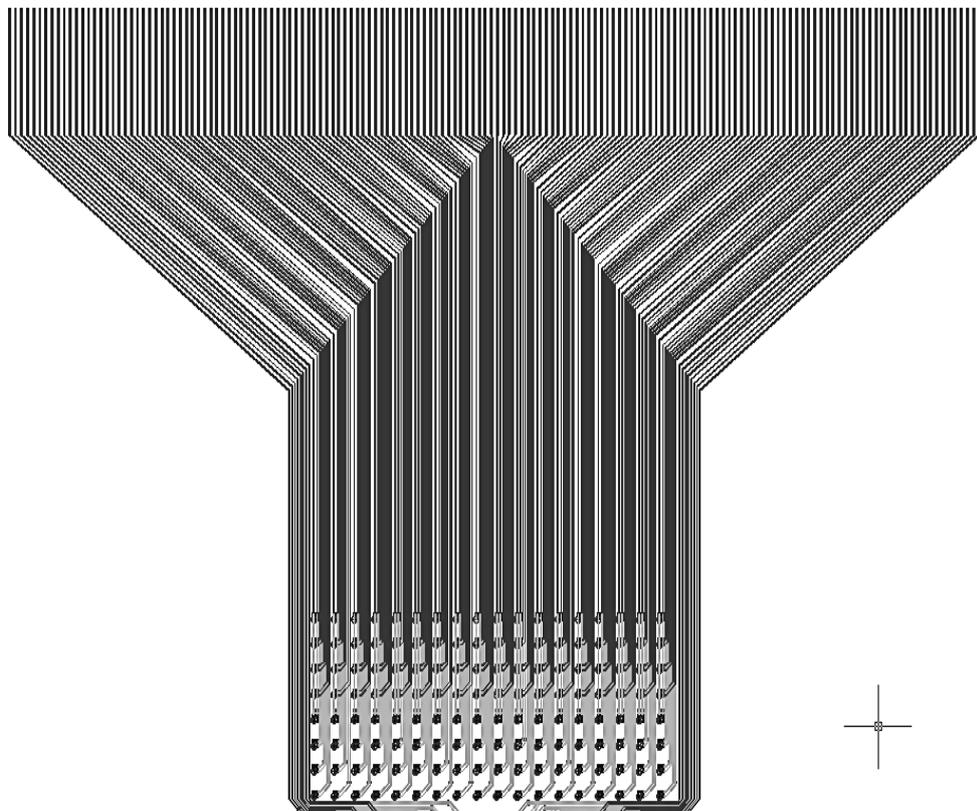


Рисунок 6.11 – Первый вариант топологии

Второй вариант разводки топологии (рис. 6.12):

- разводка трехслойная;
- ширина проводников, *мкм* – 75;
- расстояние между проводниками, *мкм* – 150;
- разводка выполнена на две стороны корпуса микросхемы в виде симметричных частей ;

сопротивление проводников менее 4 *Ом* (при длине шлейфа 0,2 *м*);

емкость отельного проводника на все остальные – менее 90 *пФ*;

диаметр переходных отверстий для УЗ-сварки – 150 *мкм*.

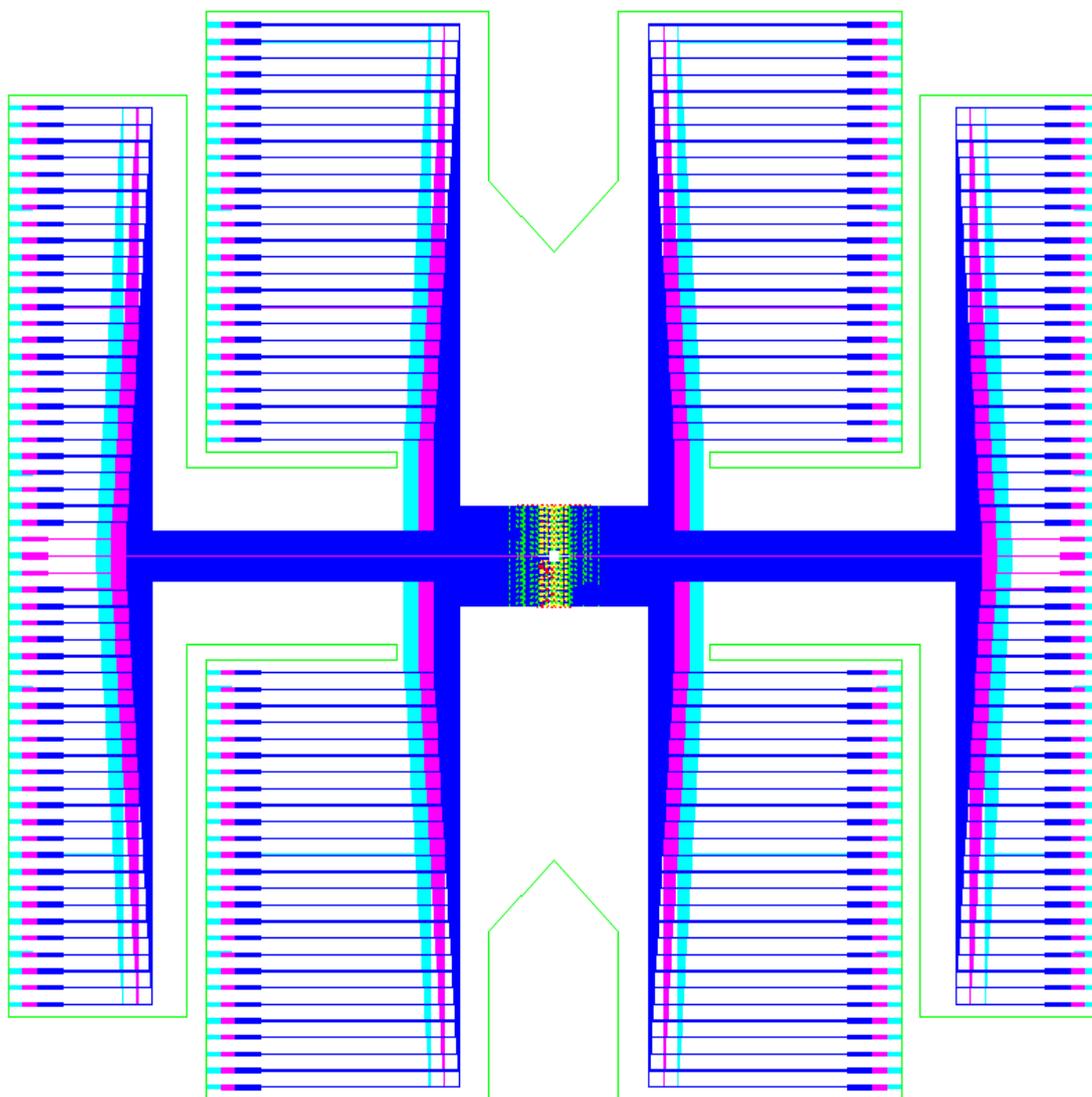


Рисунок 6. 12 –Второй вариант топологии МПУ

Третий вариант шлейфа изготовлен на полиимиде ФДИ-А-50, увеличена ширина проводников до 100 мкм, минимальное расстояние между проводниками до 90 мкм (рис. 6. 13).

Третий вариант разводки топологии:

- сопротивление проводников, R_m – менее 2;
- емкость проводника на все остальные, $n\Phi$ – менее 160.

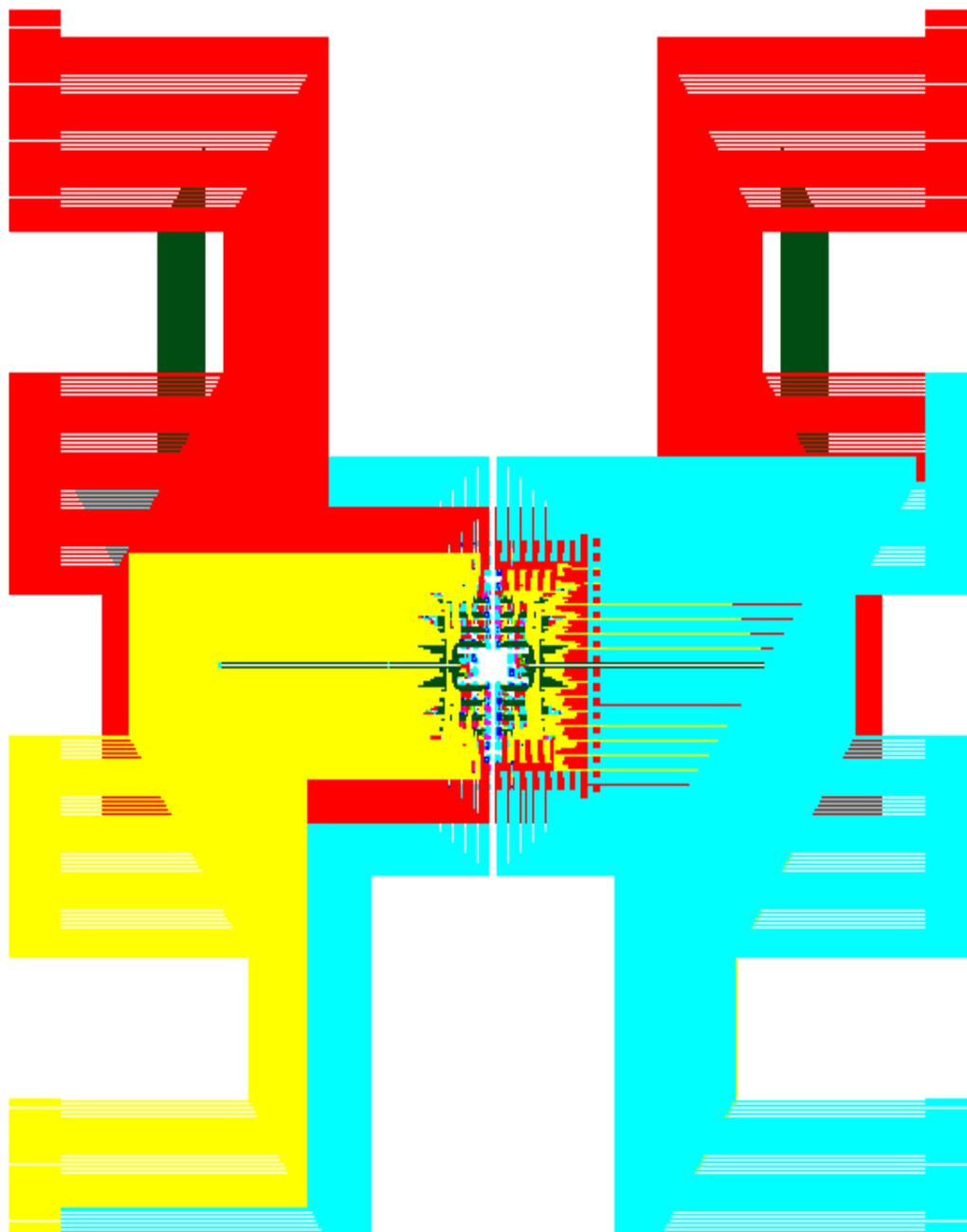


Рисунок 6.13 – Третий вариант топологии МПУ

Наиболее ненадежным элементом шлейфов являются сварные соединения проводников различных слоев. Их количество во втором варианте равнялась 1260, в третьем – 640.

Фрагмент выполнения сварных соединений приведен на рисунке 6.14.

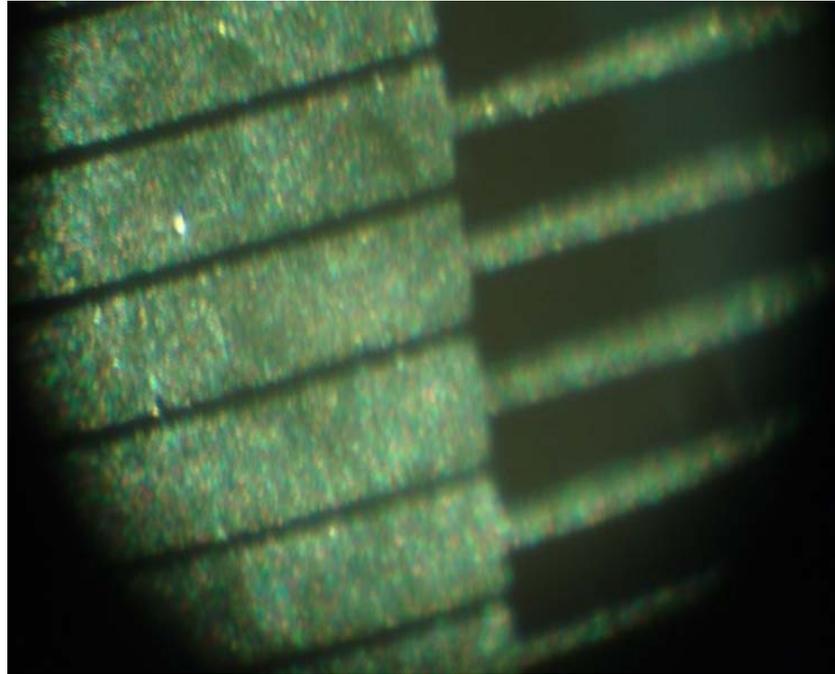


Рисунок 6.14 – Соединение шлейфа сваркой через окна в полиимиде

6.4 Моделирование напряженно-деформированного состояния прижимающей пластины многозондового подключающего устройства

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) прижимающей пластины МПУ проведено с помощью метода конечных элементов с учетом деформирования шариков и модели Герца [148, 149, 185].

Для вычислений использовалась среда *Femap 10/2* и дополнительный модуль, написанный языком *VB NET*.

Числовые эксперименты осуществлялись при равномерном размещении шариков и при отсутствии части из них

Предложенный подход дает возможность проводить проверку величины и равномерности давления шариков к контактной площадке, а также напряжения в

ленке МПУ и величины прогиба пленки.

Исходные данные для моделирования НДС прижимающей пластины МПУ приведены в табл. 6.2, а схематическое изображение контакта шарика и зонда МПУ представлено на рис. 6.15.

Таблица 6.2 – Исходные данные к моделированию

Размеры пластины	30 мм × 30 мм × 0,15 мм
Матрица шариковых выводов	13 × 13
Расстояние между центрами шариков	2,5 мм
Ширина свободной от шариков полосы	5 мм
Давление воздуха	0,005 Н/мм ²
Модуль Юнга пластины	3000 Н/мм ²
Модуль Юнга шарика	70000 Н/мм ²
Коэффициент Пуассона шарика и пластины	0,3
Диаметр шарика	0,5 мм
Пластина жестко закреплена по краям	

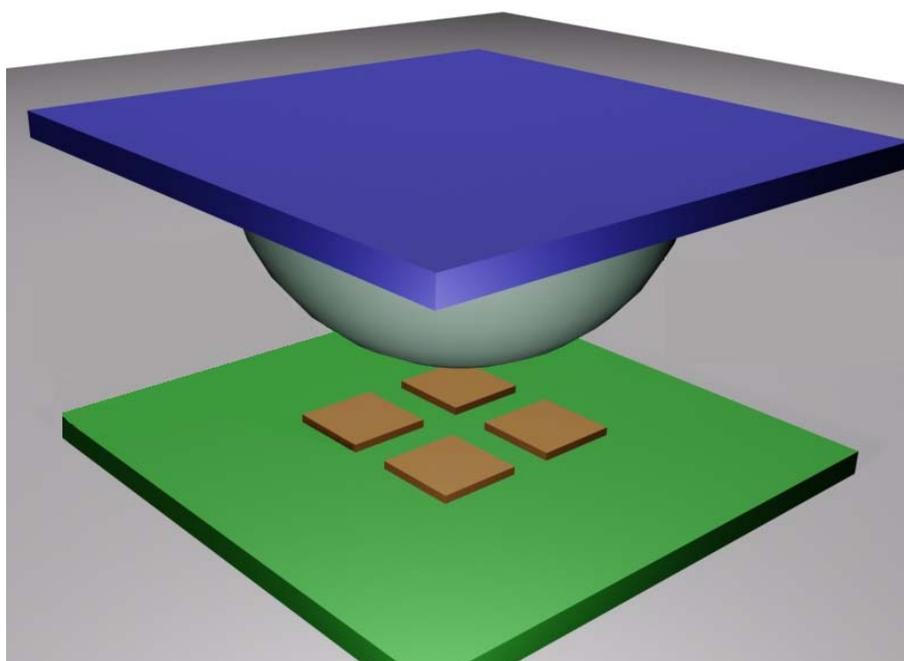


Рисунок 6.15 – Контактная пара «шарик-зонд МПУ»

По моделям распределения эквивалентных напряжений в пластине, прогибов пластины и сил реакции шариков было отмечено, что в случае отсутствия отдельного шарикового вывода или зоны шариков изменение давления наблюдается только в первом ряду шариковых выводов, окружающих отсутствующие элементы.

Моделирование подтвердило возможность прижатия зондов к шарикам в диапазоне 0,03...0,3 Н при условии растяжения пленки ФДИ-А-24 в пределах упругой деформации. При этом прогибы пленки находились в пределах 15 мкм.

Напряжения в пленке в зонах отсутствия шариков изменялось примерно в 7 раз (0,3-0,046 Н/мм²).

Отсутствие какого-либо шарика увеличивало давление на окружающие его выводы примерно в 1,5 раза, а реакция на возмущение распространялась только на 1 шаг.

Наиболее нагруженными элементами являются угловые и наружные шарики. Острый угол по контуру прижатия является концентратором напряжений в пленке и шариковых выводах и поэтому необходимо скругление прижимающей рамки

Полученные модели распределения сил реакции шариков, эквивалентных напряжений в пластине и ее прогибов для случая равномерного расположения шариков и при отсутствии одного из них представлены на рис. 6.16 – 6.21.

По результатам изготовления трех вариантов МПУ был выбран лучший вариант конструкции с учетом максимального выхода годных. Учитывались три параметра конструкции: ширина проводника и зазор, количество сварных точек в каждом варианте.

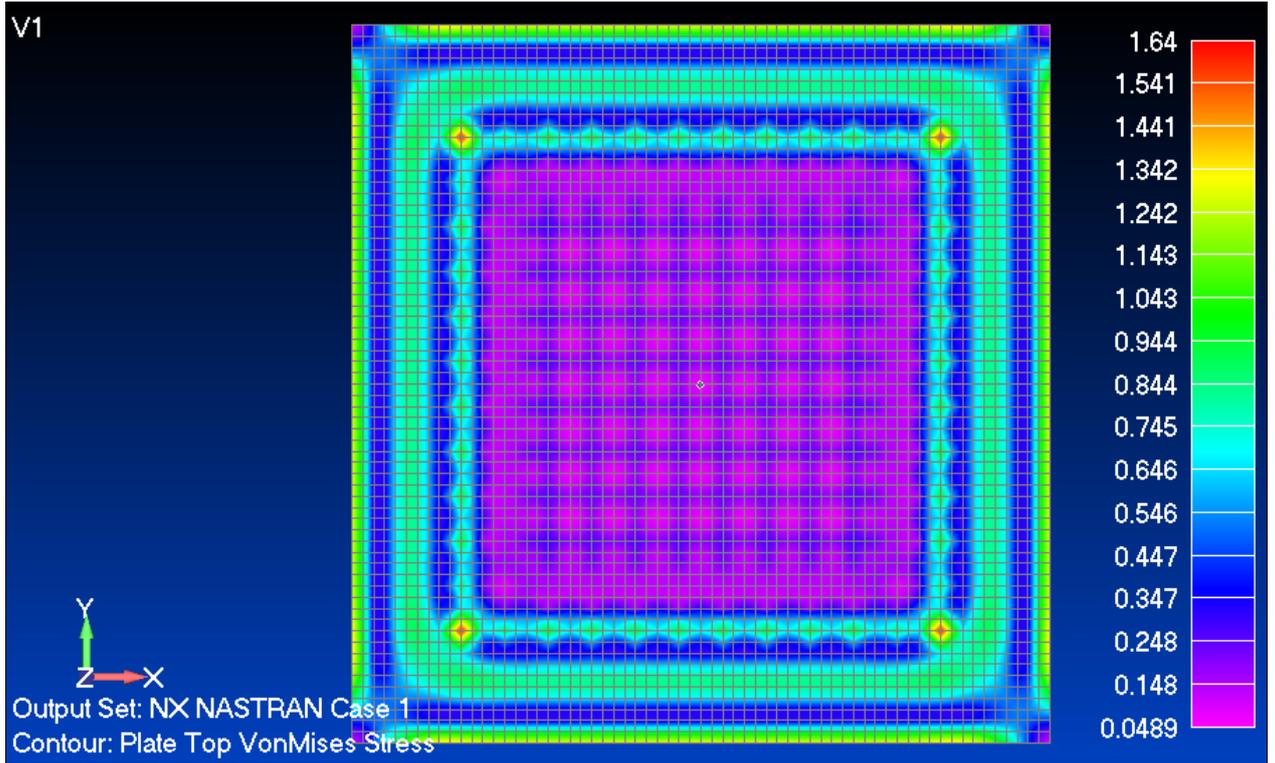


Рисунок 6.16 – Напряжения в пластине при равномерном размещении шариков

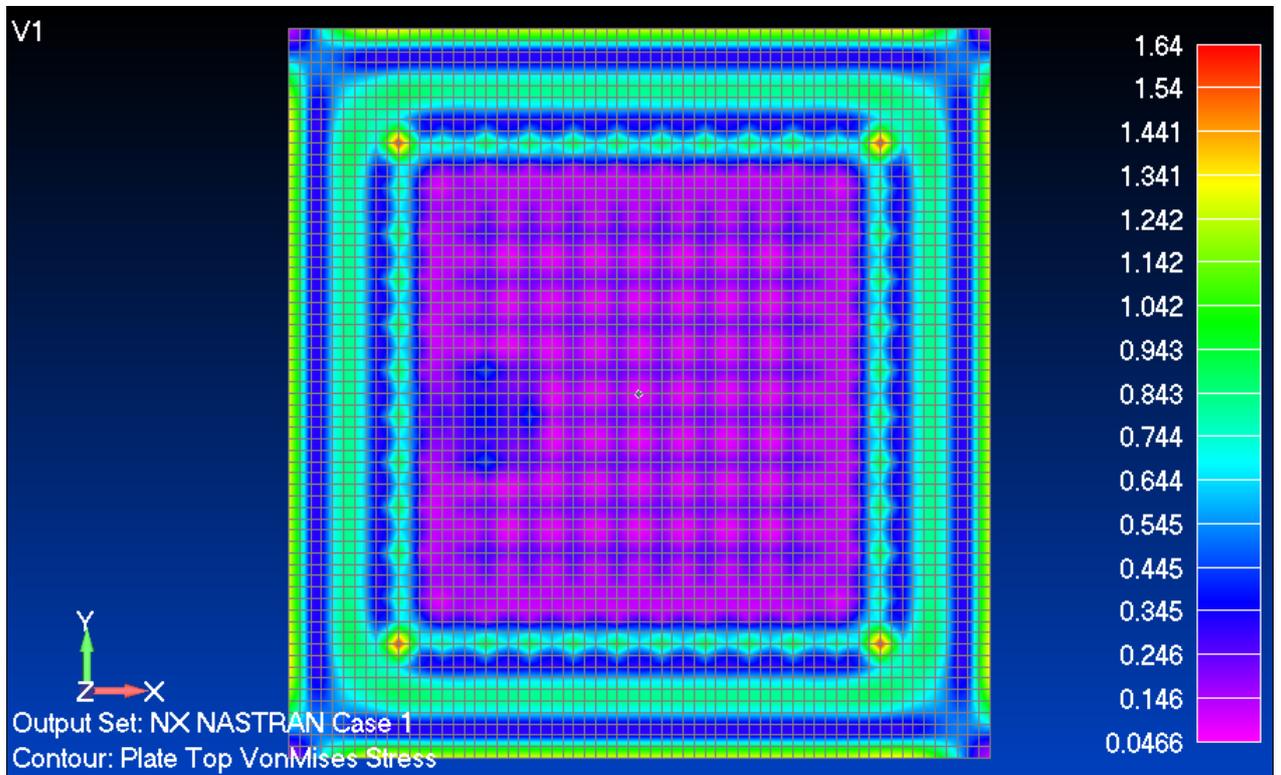


Рисунок 6.17 – Напряжения в пластине при отсутствии группы шариков

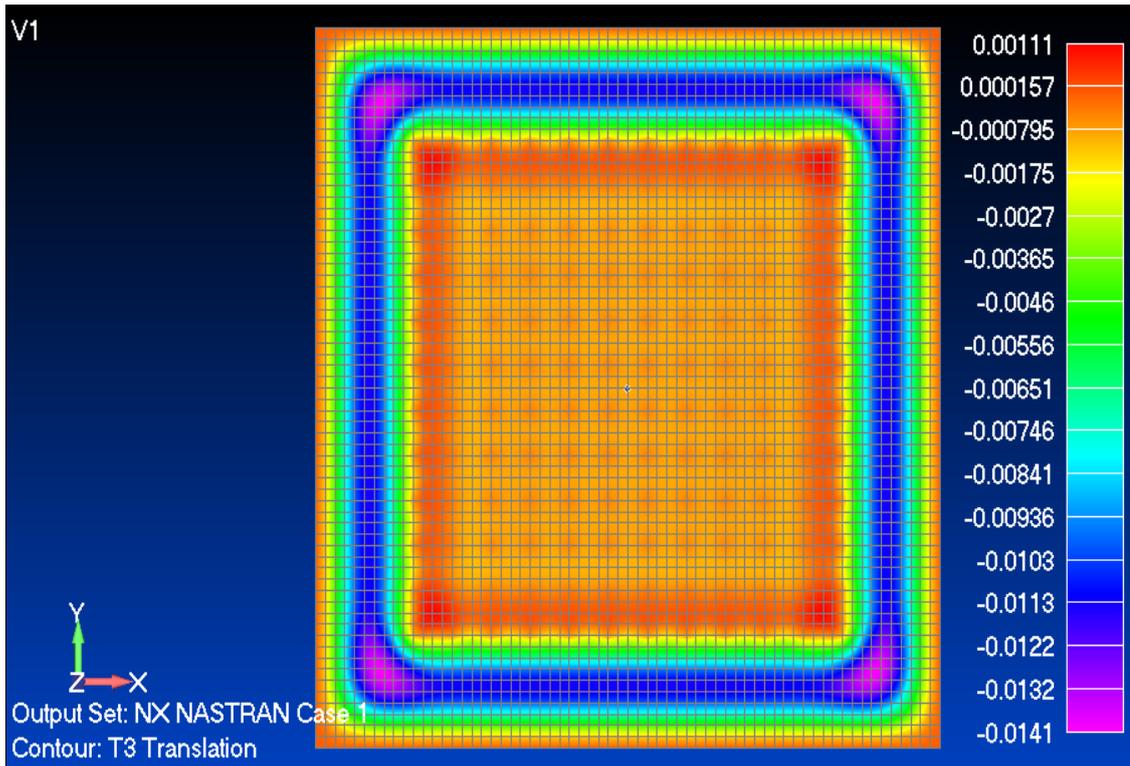


Рисунок 6.18 – Прогиб пластины при равномерном размещении шариков

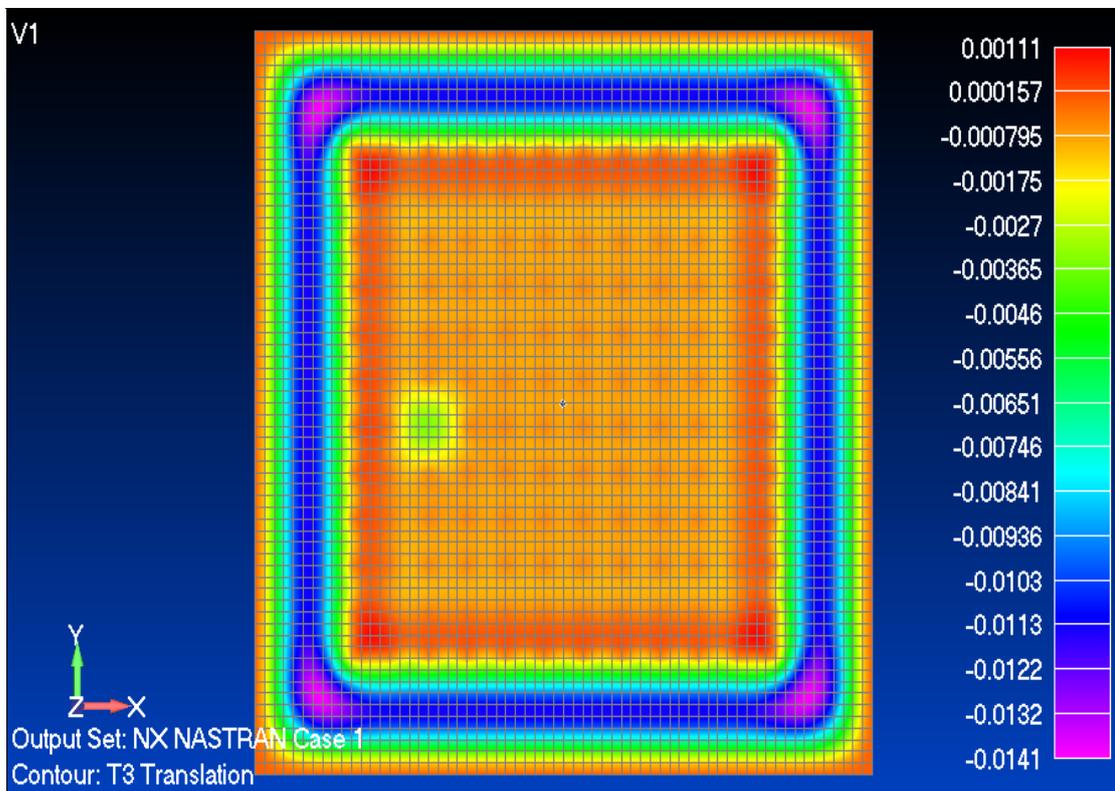


Рисунок 6.19 – Прогиб пластины при отсутствии одного шарика

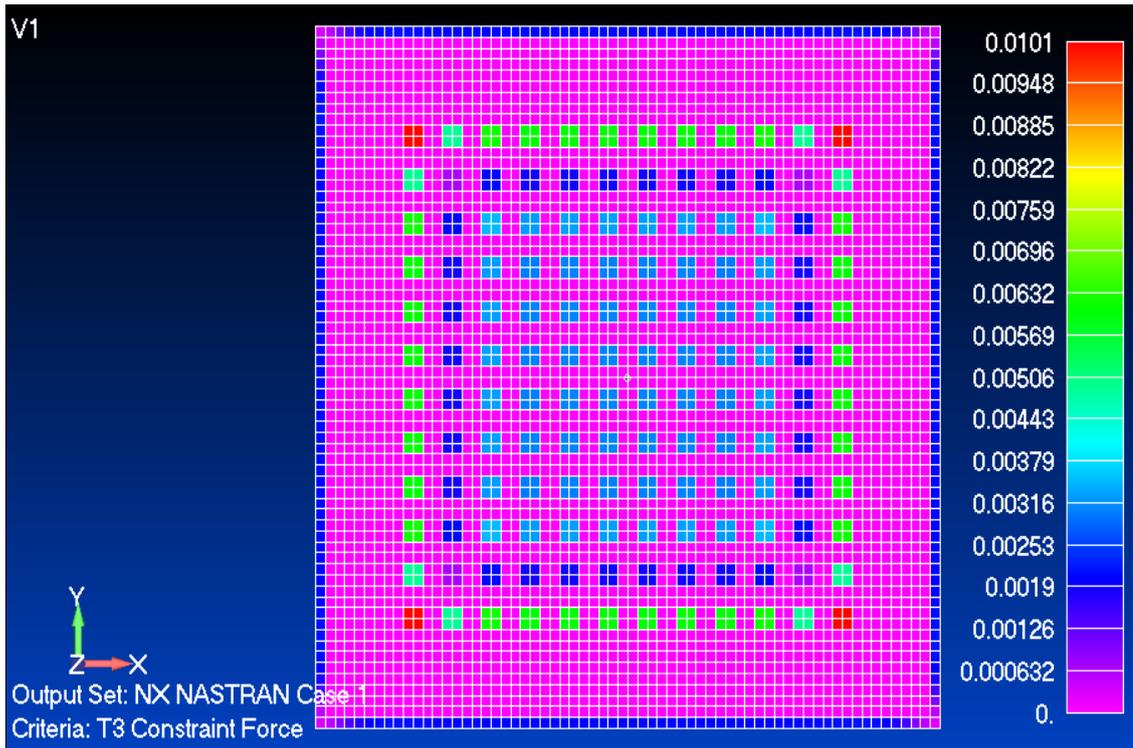


Рисунок 6.20 – Силы реакции шариков при равномерном размещении шариков

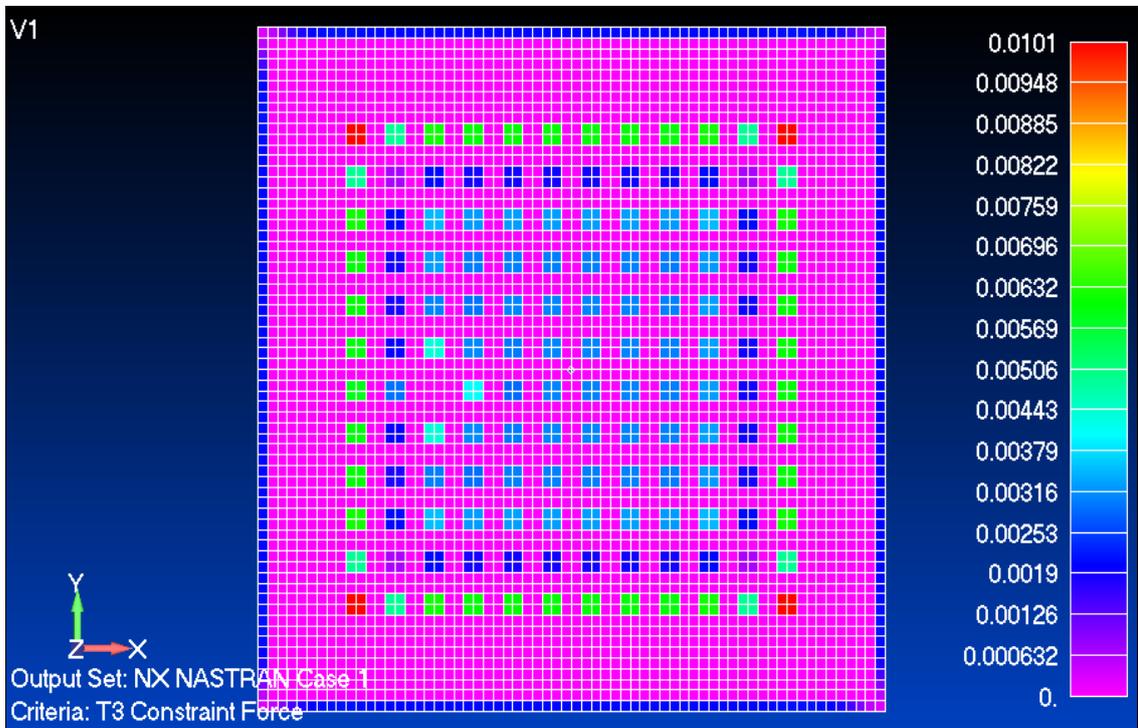


Рисунок 6.21 – Силы реакции шариков при отсутствии одного шарика

6.5 МЭМС-интерфейс автоматического измерительного комплекса

МЭМС-интерфейс многоточечных автоматических контролирующих комплексов (патент Украины 98539 [131]) повышает надежность тестирования и достоверность результатов контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами, создает возможность контроля наличия контакта между каждым отдельным зондом и контрольными точками тестируемых изделий.

В автоматических многоточечных комплексах контроля электрических параметров компонентов с использованием подключающих многозондовых устройств между контролируемыми изделиями и измерительными устройствами присутствует несколько разъемных соединений (рис.6.22), что при большом количестве проверяемых цепей существенно увеличивает трудоемкость изготовления кабельной (шлейфовой) системы.

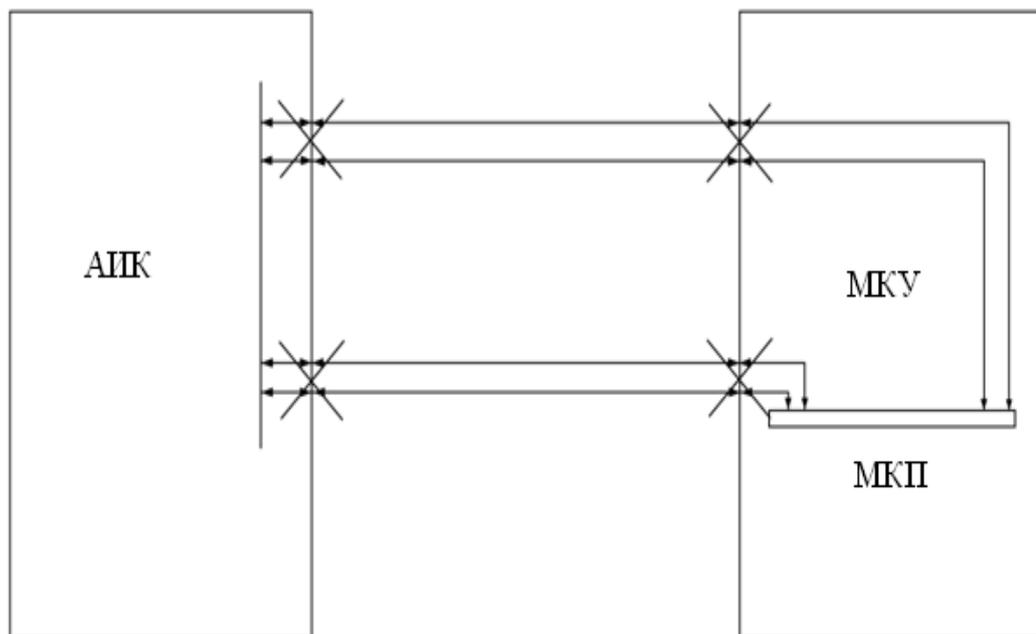


Рисунок 6.22 – Функциональная схема МЭМС-интерфейса

Используя преимущества миниатюрных полиимидных шлейфов, возможно исключение одного или двух разъемных соединений в каждой контролируемой цепи.

Выводы по разделу 6

Разработанные метод и технология МЭМС МПУ позволяют получить ряд преимуществ по сравнению с традиционными механическими системами:

- исключить ошибки контроля первого и второго рода;
- повысить надежность контактирования зонда;
- повысить производительность операции контроля;
- обеспечить возможность контроля наличия контакта любого зонда с контролируемой точкой изделия;
- уменьшить шаг между зондами до 100...150 мкм;
- снизить трудозатратность изготовления МПУ и цену.

На примере разработки технологической оснастки для контроля электрических параметров многослойной проводниковой разводки МЭМС, тонко- и толсто пленочных плат, электронных компонентов с матричными шариковыми выводами показана возможность нетрадиционной реализации многозондовых МЭМС подключающих устройств, которые имеют существенные преимущества перед известными устройствами. А именно:

- обеспечивают повышение надежности контроля за счет возможности проверки наличия контакта каждого зонда с соответствующей точкой контролируемого изделия, а так же дублирования контакта параллельными цепями, исключают забраковку годных изделий и пропуск брака;
- снижается трудоемкость и стоимость изготовления подключающих устройств за счет упрощения формы зондов и способа их применения к контролируемому изделию;
- повышается производительность операций контроля;
- повышается плотность размещения зондов (шаг – 100, 150 мкм).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе в соответствие с поставленной целью решена научно-практическая проблема разработки методологических основ проектирования технологии производства компонентов микроэлектромеханических систем, что позволяет повысить эффективность производства за счет:

- обоснования принципа конвергенции разных физических явления, в частности, электрических и механических в качестве творческого метода создания МЭМС-компонентов с улучшенными электрофизическими свойствами;
- определения влияния уменьшения линейных размеров компонентов на соотношение сил, взаимодействующих в компонентах МЭМС;
- разработки математических моделей ряда типовых компонентов МЭМС;
- разработки рекуррентного метода принятия решений в стохастических системах для мониторинга технологических процессов производства компонентов МЭМС;
- обоснования метода выбора лучшего технологического процесса из альтернативных вариантов на основе байесовских статистических решений;
- разработки метода прогнозирования выхода годных компонентов по их конструктивным элементам;
- создания на основе объединения разных физических величин метода разработки многозондовых подключающих устройств для операции автоматизированного контроля электрических параметров многослойных структур и электронных компонентов с матричными выводами.

В работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Конвергенция различных физических величин с учетом уменьшения линейных размеров и аналогий в конкретных компонентах признана основным принципом создания микроэлектромеханических систем. Такое объединение особенностей различных явлений обеспечивают улучшение электрофизических параметров МЭМС, возможность дальнейшей миниатюризации аппаратуры. Выбран

ряд особенностей явлений и сред, которые являются перспективными для создания МЭМС.

2. Определены критерии геометрического, механического, теплового подобия компонентов МЭМС в виде известных характеристических чисел (Коши, Фурье, Вебера, Фруда и других).

3. Впервые разработан метод и технология изготовления многозондовых подключающих устройств для автоматического контроля электрических параметров многослойных коммутационных плат и электронных компонентов с матричными шариковыми выводами типа BGA/CSP путем синтеза технологий изготовления шлейфов на гибком пленочном носителе, технологии изготовления матричных шариковых выводов и технологии давления через воздушную подушку, что обеспечивает повышение надежности контроля. Это исключает ошибки, возникающие за счет подключающего устройства (которые составляли примерно 5%) и повышает надежность контроля, уменьшает ГМХ подключающих устройств в 10-100 раз.

4. Разработанный метод мониторинга технологических процессов с дискретным временем для принятия решений по выбору оптимальных управлений для обеспечения максимального выхода годных изделий, на основе теории рекуррентных оптимальных решений в стохастических управляемых процессах. Метод предусматривает определение операторов выгоды, идентификации функции переходных вероятностей, определение оптимального момента остановки, расчет операторов связи конечной выгоды с общей выгодой стратегии и операторов сравнения различных управлений. Метод определен на множествах состояний E системы, множестве управлений U , вероятностях перехода из состояния в состояние Q , выгод R от переходов, правил Π назначения при использовании марковского процесса в компьютеризированных технологических процессах.

5. Разработан метод определения лучшего варианта технологического процесса путем объединения априорной информации, полученной по экспертным оценкам, и экспериментальным данным, полученным путем физического эксперимента или расчетами на последовательных этапах разработки, по критерию

минимальной стоимости или наименьших технологических потерь. Расчеты апостериорных распределений (стоимости или потерь) базируются на теории Байеса.

6. Разработан математический метод прогнозирования выхода годных изделий, по удельным значениям плотности дефектов конструктивных элементов, которые были причиной брака изделий в прошлом и внесены в классификатор брака. Выход годных конструктивных элементов всех видов определяет общий выход годных изделий. Прогноз выхода годных новых изделий учитывает конкретные количества конструктивных элементов в них. Метод связывает изменения показателя выхода годных с изменением материалов, оборудования, режимов обработки и других показателей технологического процесса.

7. Обобщенные положения аналитической механики, электроники с учетом масштабных факторов в электромеханических аналогиях в терминах обобщенных сил, масс, координат.

8. Показано, что учет законов изменения сил в МЭМС позволяет повысить быстродействие механических и тепловых актюаторов и датчиков обратно пропорционально длине, чувствительность и добротность микромеханических резонансных систем, эффективность электростатических и пьезовибрационных двигателей.

9. Показано, что для МЭМС-актюаторов и устройств микророботов перспективным направлением является безборочные гибко-жесткие конструкции, прототипами которых являются живые существа и технические макроконструкции с сосредоточенной или распределенной упругостью, переменной структурой и формой. Такие конструкции обеспечивают групповое изготовления.

10. Определены следующие перспективные конструктивно-технологические решения МЭМС:

– реализация информационно-управляющих систем в микроисполнении для различных областей применения, в т.ч. для интеллектуальных технологических процессов;

- использование матричных мультисенсоров для контроля различных физических величин, комплексных функциональных мультисенсоров газовых сред;
- использование МЭМС компонентов как интерфейса для реализации квантово-механических эффектов в РЭА;
- использование консольных микробалок как высокочувствительных датчиков ускорений, температуры, давления и других, в том числе для инфракрасного видения, дистанционного измерения высоких температур;
- использование электростатических двигателей вместо электромагнитных;
- повышение быстродействия и надежности электрофизических величин в изделиях МЭМС;
- микромощные источники питания, утилизируют неиспользуемые виды энергии: вибрации, тряски, ударов, колебаний и т.д.;
- повышение КПД элементов солнечных батарей путем их покрытия пленками перовскита;
- изготовление полупроводниковых приборов на основе бездефектных органических полимеров, полученных стереоскопическим катализом и матричным синтезом [171].;
- создание составляющих и микроботов для космической техники [245, 252, 253].

11. Перспективным направлением МЭМС является конвергенция нескольких (более 2-х) специфических свойств различной физической природы в одном устройстве.

13. Практическое применение нашли микроэлектромеханические многозондовые подключающие устройства для электрического контроля многослойных плат и электронных компонентов с матричными выводами, созданные путем объединения технологий гибких шлейфов, матричных шариковых выводов и прессования с воздушной прокладкой, что в 10 – 100 раз уменьшает ГМХ устройств.

14. Создана научно-практическая база для подготовки специалистов по направлению производства микросистемной техники, создан совместный научно-учебно-производственный центр ХНУРЭ – «Хартрон-Энерго ЛТД», создана кооперация ряда предприятий г. Харькова в направлении МЭМС; 2 учебника используются рядом университетов Украины в учебном процессе.

15. Результаты работы использованы на предприятии ГНПП «Объединение Коммунар» (г. Харьков), ООО «Светодиодные технологии Украина» (г. Харьков), Государственном предприятии «Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», ООО НПФ «ВЕСТ ЛАБС ЛТД », Корпорация Тиол ООО НПО «Вертикаль», «Titan Machinery Limited», о что подтверждено соответствующими техническими актами внедрения (приложение Р).

16. результаты исследований внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую работу ХНУРЭ, а также учебный процесс Конотопского института Сумского государственного университета, Запорожского национального технического университета, Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Винницкого национального технического университета, Криворожского колледжа НАУ, что подтверждается соответствующими актами (приложение П).

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Варадан, В. Высокочастотные МЭМС и их применение [Текст]: пер. с англ. / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе М. : Техносфера, 2004. - 528 с.
2. Вернер, В. Д. Синергетика, микроминиатюризация, микроэлектронная техника, наноэлектроника [Текст] / В.Д. Вернер // Микросистемная техника. - 2004. - №7. - С. 23-29.
3. Вернер, В. Д. Технология миниатюризации «сверху-вниз» или «снизу вверх» [Текст] / В. Д. Вернер, П. П. Мальцев, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплыгин // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - № 1. - С. 5-9.
4. Невлюдов, И.Ш. Топология гибкого шлейфа для подключения к автоматизированным измерительным комплексам микросхем в корпусе FM-320 [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. Н. Борщев, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова, И. Т. Тымчук, О. Б. Лукачов, М. А. Проценко // НТЖ Технология приборостроения. - 2012. - №1. - С. 21-25.
5. Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій [Текст] : пат. 95190 С2 Україна: МПК Н05К 1/11 / Борщев В. Н., Коцій Л. Д., Лістратенко О. А., Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Проценко М. А., Разумов-Фризюк Є. А., Тертишний С. М., Тимчук І. Т.; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 21.05.10; опубл. 11.07.11, Бюл. №3. - 5 с
6. Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій [Текст]: пат. 97538 Україна: МПК Н05К 1/11 (2006.01) / Борщев В. Н., Коцій Л. Д., Лістратенко О. А., Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Проценко М. А., Разумов-Фризюк Є. А., Тертишний С. М., Тимчук І. Т.; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 19.03.10; опубл. 26.09.11, Бюл. №18. - 5 с.
7. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи [Текст] / В. И. Ваганов. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 136 с.
8. Ваганов, В. И. Интегральный транзисторный преобразователь давления /

В. И. Ваганов, П. П. Поливанов [Текст] // Электронная техника, сер. II. - 1975. - Вып. 4. - С. 89-92.

9. Ваганов, В. И. Классификация структур интегральных механоэлектрических преобразователей [Текст] / В. И. Ваганов // Измерительная техника. - 1980. - №3. - С. 27-29.

10. Ваганов, В. И. Особенности технологии изготовления интегральных тензопреобразователей [Текст] / В. И. Ваганов, Н. И. Гончарова // Приборы и системы управления. - 1981. - №7. - С. 30-32.

11. Беклемишев, В. В. Интегральный преобразователь давления на основе тензочувствительных схем на биполярных тензотранзисторах и тензорезисторах [Текст] / В. В. Беклемишев, В. И. Ваганов, В. В. Воробьева // Электронная техника, Сер. 10. - 1980. - Вып. 4. - С. 78-85.

12. Функціональна мікроелектроніка: прилади із зарядовими зв'язками, циліндричні магнітні домени, давачі [Текст]: навч. посібник/ Ю.О. Гордієнко, М.І. Сліпченко, В.А. Хорунжий та ін. - К., ІСДО, 1996. - 52 с.

13. Основы микроэлектронных устройств [Текст]: учеб. пособие / Б.Г. Бондарь, Ю.Е. Гордиенко, А.В. Бородин, Н.И. Слипченко. - К., ІСДО, 1998. - 216 с.

14. Дружинін, А. О. Структури кремній-на-ізоляторі для сенсорної електроніки [монографія] / А.О. Дружинін, Когут І.Т., Оверко Ю.М. - Львів. : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2013. - 236 с.

15. Лепіх, Я.І. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління [Текст] / Я.І. Лепіх, Ю.О. Гордієнко, С.В. Дзядевич. - Одеса: Астропринт, 2011. - 352 с.

16. M. Lobur, O. Matviyukiv, D. Lizanets**. Cells Modeling Approaches for Microfluidic Biodevices // Перспективні технології і методи проектування МЕМС: матеріали дванадцятої міжнар. конф. MEMSTECH 2015, 2-6 вересня 2015, Поляна, Україна / Національний Університет "Львівська Політехніка"– Л.: Вежа і Ко, 2015 – С.11-13-Парал.тит.арк.англ.

17. Лучинин, В. В. Научно-технический прорыв на микроуровне [Текст] /

В.В. Лучинин // Петербургский журнал электроники. - 2000. - № 3- 4. - С. 4-11.

18. Невлюдов, И. Ш. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, В. А. Палагин. - Х. : Коллегиум, 2007. - 268 с.

19. Семенец, В. В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології: підручник для ВНЗ (рекомендований МОНУ) / В. В. Семенец, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін. – Х.: Видавн. «Компанія СМІТ», 2011. – 416 с.

20. Семенец, В. В. Технология межсоединений электронной аппаратуры [Текст]: учеб. для вузов / В. В. Семенец, Джон Кратц, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин. - Х. : Изд. СМІТ, 2005. - 432 с.

21. Рожицкий, М. М. Технологія виготовлення полімерного мікрофлюїдного пристрою / М. М. Рожицький, К. М. Музыка, Г. М. Бендеберя // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. - 2008. - №4. - С. 57-62.

22. Стасюк, З.В. Структура та електропровідності ультратонких плівок міді, золота та срібла. Наносистеми, наноматеріали та нанотехнології [Текст] / З.В. Стасюк, А.П. Шпак, Р.І. Бігун, , Ю.А. Куницький. – Л., 2010.– Т. 8, № 2.– С. 1001-1050.

23. Невлюдов И. Ш. Концепции оптимального управления в гибких производственных системах. Обзор лит. за 1980-1990 гг. / И. Ш. Невлюдов, В. М. Зубков, В. А. Палагин, Б. Н. Дедух // ЦНТИ-24: Поиск, ГОНТИ-24, 1991.– 82 с.

24. Палагин, В. А. Расчет выхода годных функциональных узлов электронной аппаратуры [Текст] / В. А. Палагин, Н. В. Милютина // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. - Харьков, 1997. - Вып. 103. - С. 16-21.

25. Невлюдов, И. Ш. Последовательный выбор лучшего варианта разработки [Текст]:/ И. Ш. Невлюдов, В. М. Зубков, В. А. Палагин // Радіоелектроніка, інформатика, управління. - 1999. - №1. С. 72-79.

26. Невлюдов И. Ш. Методика оценки вариантов разработки по критерию стоимости /И. Ш. Невлюдов, В. М. Зубков, В. А. Палагин // Авиационно-

космическая техника и технология. Труды гос. аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского. – Х.: 2000.– Вып. 14. – С. 87 – 89.

27. Невлюдов И. Ш. Принятие технических решений в условиях неопределенности при выборе технологического процесса / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, А. А. Андрусевич, В. А. Макаренко // Технология приборостроения. – 2002, №1. С 27 – 33.

28. Невлюдов И. Ш. Методика автоматизированного проектирования технологических процессов / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Макаренко // НТЖ «Технология и конструирование в электронной аппаратуре». – 2002. – № 4 – 5. – С. 29 – 33, [*Ulrich's Periodicals Directory*].

29. Невлюдов И. Ш. Использование метода байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса / И. Ш. Невлюдов, М. А. Омаров, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк // «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении». Сб. науч. трудов. Вып. №3 (63). Юбилейный.-Х.:2010. с.173 – 180.

30. Невлюдов И. Ш. Поиск оптимальной стратегии управления технологическими процессами с дискретным временем / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, А. А. Андрусевич // Авиационно-космическая техника и технология. Труды гос. Аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского. – Х.: 2001. – Вып. 24. – С. 207 – 219.

31. Невлюдов И. Ш. Идентификация переходной функции при адаптивном процессе принятия решений / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, О. Г. Шинкаренко // Технология приборостроения. – 2002. –№2. – С. 34 – 36.

32. Невлюдов И. Ш. Технология поиска оптимальной стратегии управления дискретными технологическими процессами: Всеукр. межвед. Научн-техн. сб. / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, О. Г. Шинкаренко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2004.– Х. Вып. 127. – С. 124 – 137.

33. Невлюдов И. Ш. Микросистемная техника/ И. Ш. Невлюдов, П. Ф. Поляков, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков,

Я. Ю. Королева // НТЖ «Радиоелектронні і комп'ютерні системи». – 2006. – №4 (16). – С. 12 – 30.

34. Поляков П. Ф. Элементы и устройства функциональной микроэлектроники / П. Ф. Поляков, А. В. Бородин, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сб. науч. трудов Харьковского национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского. – Х.: 2007. – С. 49 – 59.

35. Невлюдов, И. Ш. Нанолитография – наноимпринтинг / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Фризюк, О. Г. Шинкаренко // всеукр. межвед. научн.-техн. сб. «Радиотехника». – Х.: ХНУРЭ, 150, 2007. – С. 151-158.

36. Невлюдов И. Ш. Технологии микросистемной техники (часть II) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е.А. Чалая // НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2. – С. 5 – 11.

37. Классификация технологий микроэлектромеханических систем: тез. докл. 2-го междунар. радиоэл. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (сент 2005), г. Харьков, Украина /И. Ш. Невлюдов, В. М. Свищ, В. А. Палагин // Том 1. – С. 111 – 114.

38. Палагин, В. А. Уточнение модели емкостных элементов МЭМС В. А. Палагин, Е. В. Грицкевич, Е. А. Фризюк // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – №4. – С. 48 – 50.

39. Поляков П. Ф. Мини-, микро- и нанороботы П. Ф. Поляков, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков., Я. Ю. Королева // сб. науч. трудов. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2007 – Вып. 35. – Х.: Нац. аэрокосмический университет «ХАИ» – С. 104 – 113.

40. Невлюдов И. Ш. Элементы солнечных батарей на основе коллоидного нанокристаллического полупроводника TiO_2 / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. И. Степаненко, К. Н. Клиценко, Е. А. Разумов-Фризюк, О. Е. Деменко // НТЖ «Технология приборостроения». – 2008. №2. – С. 7 – 10.

41. Невлюдов И. Ш. Многозондовое контактное устройство / И. Ш. Невлюдов, Ю. П. Мачехин, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризиук, И. Т. Тымчук // НТЖ «Технология приборостроения». – Х.: 2009. – №2. – С. 43 – 45.

42. Невлюдов И. Ш. Подключающее МЭМС-устройство для контроля BGA-компонентов / И. Ш. Невлюдов, Р. М. Мартынян, В. А. Палагин, Б. С. Слободян Е. А. Разумов-Фризиук, И. В. Жарикова, М. И. Дмитрев, А. С. Беляев // НТЖ «Технология и конструирование в электронной аппаратуре». – Одес. – 2012. – №1. – С. 54 – 56, [*Ulrich's Periodicals Directory*].

43. Невлюдов И. Ш. Топология гибкого шлейфа для подключения к автоматизированным измерительным комплексам микросхем в корпусе FM-320 / И. Ш. Невлюдов, В. Н. Борщев, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризиук, И. В. Жарикова, И. Т. Тымчук, О. Б. Лукачов, М. А. Проценко // НТЖ «Технология приборостроения». – 2012. – №1. – С. 21 – 25.

44. Невлюдов И. Ш. Метод подключения электронных компонентов к автоматизированным измерительным комплексам / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, И. В. Жарикова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1/9 (61). – С. 4 – 7, [*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, PИЦ та інші*].

45. Some solutions for manufacturing microdevices: тез. сб. науч. тр. 1-ой МНТК «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» в рамках 3-й МРФ «Прикладная РЭ. Состояние Электронной базы и перспективы развития», (30 сент – 3 окт. 2008, Харьков – Судак)/ А. І. Filipenko, І. Sh. Nevlyudov, V. A. Palagin // Том 3. – С. 195 – 197.

46. Невлюдов И. Ш. Многозондовое подключающее устройство для контроля BGA-компонентов / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, И. Т. Тымчук, Е. А. Разумов-Фризиук, И. В. Жарикова // Сб.нт 3-й МНК «Функциональная компонентная база. Микро- опто- и наноэлектроника» Харьков – Кацевели, 28.09.2010, С. 191 – 194.

47. Nevliudov I. Sh. MEMS Intellect Multiprobes Contacting Devices for Electrical Checking-Up of Multilayers Commutative Boards and BGA/CSP Electronic Components [Text]/ I. Sh. Nevliudov, V. A. Palagin, E. A. Razumov-Frizjuk, I. V. Sharikova // Proceedings of IEEE East-West Design, Test Symposium (EWDTS`2012). IEEE Computer Society – Kharkov, Ukr. September 14 – 17, 2012. – P. 483 – 485.

48. Технологические особенности изготовления многозондовых подключающих устройств для контроля компонентов BGA/CSP: тез. докл. МН Практика «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», (вересень 2012 р.) – И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Запоріжжя: С.272 – 274.

49. Невлюдов И. Ш. Особенности проектирования компонентов микроэлектромеханических систем / И. Ш. Невлюдов, Палагин В. А., Богдан Ю. И. // «Технология приборостроения». – 2014. №2. – с 35 – 39.

50. Невлюдов И. Ш. Влияние масштаба на электрофизические параметры компонентов микроэлектромеханических систем / И. Ш. Невлюдов, Палагин В. А., Богдан Ю. И., Томанова Е. М.// Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автоматика та приладобудування. – 2014. № 67(1109). – С 38 – 48, [Ulrich's Periodicals Directory].

51. Невлюдов, И. Ш. Технологии микросистемной техники / И. Ш. Невлюдов, Палагин В. А., Чалая Е.А. // «Технология приборостроения». – 2014. №3. – С 7 – 10.

52. Микроэлектромеханические многозондовые подключающие устройства для контроля изделий техники: тез. докл. науч. конф. XXI International conference «New leading technologies in machine building». (Sept. 2013) I. Sh. Nevliudov, V. A. Palagin, I. V. Sharikova – Rybachie: P. – 20 – 24.

53. Невлюдов И. Ш. Ефективність застосування конвергенції для МЕМС актюаторів / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В., Р.Ю. Аллахверанов // НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2. – С. 14 – 16.

54. Невлюдов И. Ш. Energy Harvesting: огляд п'єзоелектричних перетворювачів / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, С.А. Разумов-Фризюк,

Ю.И. Богдан // НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2. – С. 43–46.

55. Nanoimprinting – Nanolithography [Electronic source] / V. A. Palagin, A. E. Frizuk; The International Workshop on Optoelectronic Physics and Technology. – Режим доступа: [www/ URL: http:// photonics. Kture.Kharkov.ua/OPT/OPTann1en. html](http://www.photonics.kture.kharkov.ua/OPT/OPTann1en.html). – June 20 – 22, 2007. Kharkov, Ukraine. – P. 63-67. – Загл. з екрану/[Scopus].

56. Исследования возможности изготовления лакофольговых диэлектриков повышенной точности для изготовления МЭМС устройств: тез. докл. сб. науч. тр. 1-й междунар. науч. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития», (30 сент – 3 окт. 2008) – Харьков – Судак.: В. И. Степаненко, К. Ю. Харенко. В. А. Палагин, Е. А. Фризюк // Том 3. – С. 219 – 223.

57. Математическая модель плоских пружин актюаторов МЭМС: тез. докл., сб. науч. трудов 2-ой междунар. науч. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития», (30 сент – 3 окт. 2009).– Харьков – Кацивели: И.Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, В. А. Палагин. – С. 53 – 56.

58. Компоненты функциональной электроники, микросистемной техники и нанотехнологии в РЭА: тез. докл., сб. науч. трудов 4-ой междунар. науч. конф. «Функциональная база нанoeлектроники», (30 сент – 3 окт. 2011). Харьков – Кацивели: Н. И. Слипченко, И. Ш. Невлюдов, А. И. Филипенко, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий. – С. 19 – 26.

59. Слипченко Н. И. Изоморфизм и электромеханические аналогии в микросистемной технике / сб. н. тр. 5 МНК «Функциональная база нанoeлектроники», 2012 г. / Н. И. Слипченко, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин – Харьков – Крым: С. 289 – 292.

60. Палагин В. А. Многозондовые подключающие устройства для контроля коммутационных плат и электронных компонентов / В. А. Палагин, И. Ш. Невлюдов, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова // Материалы 7 междунар. симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – 2012 – Т.1, М. РАН., С. 186 – 194.

61. Проектирование топологии гибкого полиимидного шлейфа многозондового устройства контроля электронных компонентов: тез. докл. 9-й Международной молодежной НТК РТ-2013 «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (апрель 2013) В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова. – Севастополь: 2013. – С. 262.

62. Трассировка подключающей пластины многозондового устройства контроля BGA- компонентов: тез. докл. 4-я МНПК «Функциональная база нанoeлектроники» (сентябрь – октябрь 2013) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Харьков – Крым: 2013.– С. 79-80.

63. Моделирование топологии подключающей пластины многозондового устройства для контроля микросхем с матричным расположением выводов: тез. докл. 12 МНТК «Физические процессы и поля технических и биологических объектов» (ноябрь 2013) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Кременчук: 2013. – С. 177 – 179.

64. Выбор варианта ТП на основе теории Байеса: тез. докл. 12 МНТК «Физические процессы и поля технических и биологических объектов» (ноябрь 2013) / И.Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Кременчук: 2013. – С.175-177.

65. Невлюдов И. Ш., Использование байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса / И. Ш. Невлюдов, М. А. Омаров, Е. А. Разумов-Фризюк/ тезисы доклада XX Intern. Cjnferens «New leadiny technologies in Machin Burding» Rybachie, Uk, September, 2010, P. 12.

66. Особенности проектирования компонентов микроэлектромеханических систем: тез. докл. 13 МНТК «Физические процессы и поля технических и биологических объектов» (7- 9 ноября 2014) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Ю. И.Богдан – Кременчук: 2014.– С.176 – 177.

67. Невлюдов И. Ш. МЭМС актюаторы / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин // Сборник научных трудов VIII «Функциональная база нанoeлектроники», Харьков – Одесса, 2015, сентябрь – октябрь, С. 204-207.

68. Шевченко, В. Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанотехнологии [Текст] / В. Я. Шевченко // Микросистемная техника. - 2004. - №9, С. 2-4.
69. Алфимов, С. М. Развитие в России работ в области нанотехнологий [Текст] / С. М. Алфимов, В. А. Быков, С. П. Желудева, П. П. Мальцев, В. Ф. Петрунин, О. А. Чаплыгин // Микросистемная техника. - 2004. - №8. - С. 2-8.
70. Ерохин, В. В. Элементная база систем на кристалле: процессоры [Текст] / В. В. Ерохин // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - №1. - С. 35-44.
71. Петерсен, К. Э. Кремний как механический материал [Текст] / К.Э. Петерсен // ТИИЭИР. - 1982. -Т. 70, №5. - С. 5-49.
72. Симон, Нейдриен. Нанотехнология и двойная спираль ДНК [Текст] / Нейдриен Симан // НТЖ В мире науки. - 2004. - №9. - С. 22-31.
73. Пул, Ч. Нанотехнологии [Текст] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. - 3-е изд., исправл. и доп. - М. : Техносфера, 2007. - 376 с.
74. Rosensweig, R. E. Ferrohydrodynamics [Text] / R. E. Rosencweig. - New-York: Cambridge University Press, 1985. - 344 pp.
75. Ульяненко, А. Г. Оборудование для исследований в нано- и микроэлектронике [Текст] / А. Г. Ульяненко. // Дополнение 1 в книге Пул, Ч. Нанотехнологии. - 3-е дополн. изд. - М. : Техносфера, 2007. - 376 с.
76. Ратнер, М. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи [Текст] / М. Ратнер. - М. : Изд. Дом Вильямс, 2004. - 240 с.
77. Кравченко, С. Фантастическое сегодня. Нанотехнологии: реалии и перспективы [Текст] / С. Кравченко // Chip. Компьютеры и коммуникации. Украина. - 2002. - № 7. - С. 20-23.
78. Суховеев, С. П. Волоконные МЭМС и НЭМС [Текст] / С. П. Суховеев // Микросистемная техника. - 2004. - №1. - С. 2-11.
79. Андреев, В. М. Материалы микроэлектронной техники [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. М. Андреев, М. Н. Брогулева, С. Н. Дацко, Л. В. Яманова. - М. : Радиосвязь, 1989. - 352 с.
80. Варадан, В. Высокочастотные МЭМС и их применение [Текст] : пер. с англ.

/ В. Варадан, К. Виной, К. Джозе М. : Техносфера, 2004. - 528 с.

81. Самойлович, М. И. Трехмерные наноконпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема [Текст]: Ч. 1, 2 и 3 / М. И. Самойлович, С. М. Клещев, А. Ф. Беянин, В. Д. Жидковский, М. Ю. Цветков // Микросистемная техника. - 2004. - № 6-8. - С. 9-17.

82. Вернер, В. Д. Технология миниатюризации «сверху-вниз» или «снизу вверх» [Текст] / В. Д. Вернер, П. П. Мальцев, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплыгин // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - № 1. - С. 5-9.

83. Технология межсоединений электронной аппаратуры: учебник для студ. ВУЗ (рекомендовано МОНУ), В. В. Семенец, Джон Кратц, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин. – Х.: «Компания СМИТ», 2005. – 432 с.

84. Варадан, В. Высокочастотные МЭМС и их применение [Текст] : пер. с англ. / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе М. : Техносфера, 2004. - 528 с.

85. Шалобаев, Е. В. Технология изготовления зубчатых колес и передач МЭМС. Технологии индивидуального формообразования микромеханики [Текст] / Е. В. Шалобаев, Ю. С. Монахов, В. Е. Стражинский, С. А. Шалько // Микросистемная техника. - 2004. - № 8. - С. 24-28.

86. Мальцев, П. П. Технологии и изделия микроэлектромеханики. [Текст] / П. П. Мальцев, В. А. Телец, А. Ю. Никифоров // Микросистемная техника. - 2001. - №10. - С. 18-24.

87. Телец, В. А. Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки [Текст] / В. А. Телец, Ю. С. Негина, А. А. Орлов // Микросистемная техника. - 2004. - №3. - С. 2-6.

88. Телец, В. А. Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения [Текст] / В. А. Телец // Микросистемная техника. - 2004. - №2. - С. 2-5.

89. Уайтсайдс, Дж. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. [Текст] : пер. с англ. / Дж. Уайтсайдс, Д. Эйглер, Р. Андерс и др. ; под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. - М. : Мир, 2002. - 292с.

90. Алферов, Ж. И. Наноматериалы и нанотехнологии [Текст] / Ж. И. Алферов, А. Л. Асеев, С. В. Гапонов, П. С. Коньев, В. Н. Панов, Э. А. Полторацкий, Н. П. Сибельдин, Р. А. Сурис // Микросистемная техника. - 2003. - №8. - С. 3-13.
91. Хатчесон, Ден. Первые наночипы [Текст] / Ден Хатчесон // НТЖ В мире науки. - 2004. - №7. - С. 46-53.
92. Алабушев, П. М. Теория подобия и размерностей. Моделирование: Уч. Пособие [Текст] / П. М. Алабушев, В. Б. Геронимус, Л. М. Минкевич, Б. А. Шеховцов // М. : Изд. Высш. шк., 1968. - 208 с.
93. Бурдун, Г. Д. Единицы физических величин [Текст] : справочник / Г. Д. Бурдун, В. А. Базакуца // Х. : изд. при ХГУ объединения Вища школа, 1984. - 208 с.
94. Большой энциклопедический словарь. Физика [Текст] / Гл. Ред. А. М. Прохоров. - 4-е стереотип. изд. - М. : Науч. Изд-во Больш. Росс. Энциклопедии, 1999. - 944 с.
95. Барсуков, А. П. Компоненты и решения для создания роботов и робототехнических систем [Текст]. Вып. 1: ежеквартальный справочник / А. П. Барсуков. - М. : Изд. ДМК-пресс, 2005. - 128 с.
96. Вуд, Роберт Полет механических пчел [Текст] / Р. Вуд // НТЖ «В мире науки». - 2015. - №4 - с. 103-109.
97. Нейман, А. Р. Теоретические основы электротехники: Учебник [Текст] / А. Р. Нейман, К. С. Демирчян // Изд. 3, Т. 1 - Лен.: Энергоиздат, 1981. - 534 с.
98. Trimmer, W.S.N. Sensors and Actuators [Text] / W.S.N. Trimmer // ISA, Vol. 19, №3, Sept. 1982. P. 267-287.
99. Введенский, Б. А. Физический энциклопедический словарь [Текст]. Т. 5. Спектр-Яркость. / А. М. Балдин, Б. А. Введенский; гл. ред. Б. А. Введенский. - М. : Сов. Энциклопедия, 1966. - 576 с.
100. Краткий политехнический словарь [Текст] / под ред. Ю. А. Степанов. - М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1955. - 1136 с.
101. Степанов, Ю. И. Применение технологий МЭМС и МСТ в автомобильной

технике [Текст] / Ю. И. Степанов // Микросистемная техника. - 2003. - №12. - С. 22-28.

102. Бобров, Д. О трении, графите и нанотехнологиях [Текст] / Д. Бобров // Наука и жизнь. - 2008. - №4. - С. 97-100.

103. Исии, Т. Мехатроника [Текст] / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ, Н. Накадзима. - М. : Мир, 1988. - 318 с.

104. Павловский, М. А. Теоретична механіка [Текст] / М. А. Павловский. – К. : Техніка, 2002. - 510 с.

105. Калантаров, П. К. Теоретические основы электротехники [Текст]: учеб. для электроэнергет. вузов / П. К. Калантаров, П. Р. Нейман . - 3-е изд., перераб. - Л. : ГЭИ, 1951. - 464 с.

106. Джагулов, Р. Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. Справочник [Текст] / Р. Г. Джагулов, А. А. Ерофеев. - Спб: Политехника, - 1994. - 608 с.

107. Иванов, А. А. Микросистемная техника - основа научно-технической революции в военном деле [Текст] / А. А. Иванов, П. П. Мальцев // Микросистемная техника. - 2004. - №10. - С. 2-6.

108. Поляков, П. Ф. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение. [Текст] Выпуск 1, т. 1 / П.Ф. Поляков, В.А. Хорунжий, В.П. Поляков // Харьков, Комп. СМІТ, 2007. - 552 с.

109. Поляков, П. Ф. Микросистемная техника [Текст] / П. Ф. Поляков, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков, Я. Ю. Королева // НТЖ Радіоелектроніка і комп'ютерні системи. - 2006. - №4. - С. 21-30.

110. Поляков, П. Ф. Мини-, микро- и нанороботы [Текст] / П. Ф. Поляков, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков, Я. Ю. Королева // НТЖ Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2007. - Вып. 35. - С. 104-113.

111. Поляков, П. Ф. Элементы и устройства функциональной микроэлектроники [Текст] / П. Ф. Поляков, А. В. Бородин, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий,

В. П. Поляков // НТЖ Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2007. - Вып. 36. - С. 49-59.

112. Гейтс, Б. Механическое будущее. (Microsoft предсказывает революцию в сфере робототехники) [Текст] / Билл Гейтс // НТЖ В мире науки. - 2007. - №5 - С. 37-43.

113. Най, Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц [Текст] : пер. с англ. - М. : Издательство иностранной литературы. - 1960. - 385 с.

114. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов [Текст] / Н. М. Беляев. - 15-е изд. - М. : Изд. Наука, 1976. - 608 с.

115. Пристрій для циклічного перетворення механічної енергії в електричну [Текст] : пат. 108314 Україна: МПК H02 №2/18, H01L 41/04; F03D 9/02 / Невлюдов І. Ш., Палагін В.А., Разумов-Фризюк Є.А., Жарікова І.В., Богдан Ю.І.; опубл. 10.04.15, Бюл. №7. - 3 с.

116. Баранов, В. В. Рекуррентные методы оптимальных решений в стохастических процессах [Текст] / В.В. Баранов // Х. : Изд. ХГУ. Вища школа, 1981. - 145 с.

117. Принятие технических решений в условиях неопределенности при выборе технологического процесса. [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, А. А. Андрусевич, В. А. Макаренко // Технология приборостроения. - 2002. - №1. - С. 27-33.

118. Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман. - М.: Мир, 1960. - 117.

119. Ховард, Р. Анализ решений: применение при статистическом выводе, принятии решений и планировании эксперимента [Текст]: ТИИЭР, т. 58, №5, 1970, С. 32-45.

120. Невлюдов, И. Ш. Поиск оптимальной стратегии управления технологическими процессами с дискретным временем [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, А. А. Андрусевич // Авиационно-космическая техника и технология. Труды гос. Аэрокосмического университета

им. Н. Е. Жуковского. ХАИ. - 2001. - Вып. 24. - С. 207-219.

121. Невлюдов, И. Ш. Идентификация переходной функции при адаптивном процессе принятия решений [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, О. Г. Шинкаренко // Технология приборостроения. - 2002. - №2. - С. 34-36.

122. Де Гроот, М. Оптимальные статистические решения [Текст] / М. Де Гроот. - М. : Мир, 1974. - 492 с.

123. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц [Текст] / Ф. Р. Гайтмахер. - М. : Наука. Гл. ред. ФМЛ, 1988. - 552 с.

124. Райфа, Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности [Текст] : пер. с англ. - М. : Мир, 1977. - 408 с.

125. ОСТ 92-4642-1985. Платы печатные. Методика планирования выхода годных и учет технологических потерь в процессе производства [Текст]. Введ.1987.01.01. - М. : Изд-во стандартов, 1985. - 42 с.

126. А. с. 1.168.079, СССР, МПК Н05К 3/12 1985. Способ изготовления толсто пленочных печатных плат [Текст] / Палагин В.А. , Мороз Н.Г., Багатов П.Н., Дегтярев В.П. (СССР). - 1985 г.

127. Колешко, В. М. Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике [Текст] / В. М. Колешко, А. А. Ковалевский. - Минск : Наука и техника, 1978. - 344 с.

128. Багатозондовий контактний пристрій [Текст] : пат. 82405 Україна: МПК Н05 1/00 / Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Семенець В. В., Сотник С. В., Фризюк Є. А.; заявник та власник Харківський нац. ун-т радіоелектроніки; заявл. 15.05.06; опубл. 10.04.08, Бюл. №7. - 4 с.

129. Chen Po Jui. Unpowered spiral-tube parylene pressure sensor for intraocular pressure sensory [Text] / Po-Jui Chen, D.C. Rodger, M.S. Humayun, Yu-Chong Toi // Sensor and Actuators. A: Phisical. March 2006. – V. 127. – Issue 2. – P.276-282.

130. Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій: патент України 95190 С2: МПК Н05К 1/11/ В. Н. Борщев, Л. Д. Коці, О. А. Лістратенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, М. А. Проценко,

Є. А. Разумов-Фризюк, С. М. Тертишний, І. Т. Тимчук; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 21.05.2010, опубл. 11.07.2011. Бюл. №3.

131. МЕМС-інтерфейс багатозондовий автоматичних контролюючих комплексів: патент України 98539: МПК H05K 3/40 (2006.01)/ І. В. Жарікова, З. І. Костенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Є. А. Разумов-Фризюк; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 24.09.2010, публ. 25.02.2011. Бюл. №4.

132. Березин, Г. Н. Оптические основы контактной фотолитографии [Текст] / Г.Н. Березин, А. В. Никитин, Р.А. Сурис. - М. : Радио и связь, 1982. - 104 с.

133. Блинов, Г.А. Гибридные интегральные функциональные устройства [Текст]: уч. пособие для студ. вузов в 9 кн. Микроэлектроника / Г. А. Блинов; под ред. Л.А. Коледова. - М. : Высш. шк., 1987. - 111 с.

134. Блэкфорд, Б. Л. Растровый туннельный микроскоп с высокой стабильностью на основе биморфных пьезоэлементов [Текст] / Б. Л. Блэкфорд, Д. К. Дон, М.Н. Джеринд / Приборы для научных исследований. - 1987. - №8. - С. 3-9.

135. Борисенко, А. И. Векторный анализ и начала тензорного исчисления [Текст] / А. И. Борисенко, И. Е. Тарапов.- Х. : Вища шк., 1986. - 216 с.

136. Борн, М. Основы оптики [Текст]: пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. - М. : Наука, 1970. - 855 с.

137. Быков, В.А. Зондовая микроскопия для биологии и медицины [Текст] / В.А. Быков // НТЖ Сенсорные системы. - 1998. - Т.12, №1. - С.101-124.

138. Вендик, О. Г. Корпускулярно-фотонная технология [Текст]: учеб. для вузов по спец. Промышленная электроника / О. Г. Вендик, Ю. Н. Горин, В. Ф. Попов. - М. : Высш. шк., 1984. - 240 с.

139. Вернер, В. Д. Синергетика, микроминиатюризация, микроэлектронная техника, наноэлектроника [Текст] / В.Д. Вернер // Микросистемная техника. - 2004. - №7. - С. 23-29.

140. Вишнева, Т. И. Применение анизотропного травления полупроводников в технологии микроэлектроники [Текст] // Сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. - М. : МИЭТ, 1976. - Вып. 24. - С. 169-174.

141. Волков, В. А. Справочник по приемникам оптического излучения [Текст] /

В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов, Л. С. Кременчугский, Л. З. Криксунов и др. ; под. ред. Л. З. Криксунова и Л. С. Кременчугского. - К. : Техніка, 1985.- 216 с.

142. Гайтмахер, Ф. Р. Теория матриц [Текст] / Ф. Р. Гайтмахер. - М. : Наука. Гл. ред. ФМЛ, 1988. - 552 с.

143. Гейм, Андре. Углерод – страна чудес [Текст] / Андре Гейм, Филипп Ким // НТЖ В мире чудес. - 2008. - № 7. - С. 30-37.

144. Гудинаф, Ф. Интегральные акселерометры [Текст] / Ф. Гудинаф // Электроника. - 1993. - № 7-8. - С.50-57.

145. Гурьянов, А. Трубки завтрашнего дня [Текст] / А. Гурьянов // Наука и жизнь. - 2010. - №2. - С. 16-21.

146. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования с приложением таблиц, составленных Р. Гершелем [Текст] / Г. Деч. - М. : Наука. Гл. ред. ФМН, 1971. - 288 с.

147. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования с приложением таблиц, составленных Р. Гершелем [Текст] / Г. Деч. - М. : Наука. Гл. ред. ФМН, 1971. - 288 с.

148. Дудников, Е. Г. О проблемах измерения, моделирования, контроля и управления в нанотехнологиях [Текст] / Е. Г. Дудников // Автоматизация и современные технологии. - 1992. - №6. - С. 34-39.

149. Дудников, Е. Г. Проблемы контроля и управления в нанотехнологиях [Текст] / Е. Г. Дудников // Приборы и системы управления. - 1999. - №5. - С. 20-22.

150. Еленин, Г. Г. Нанотехнологии, наноматериалы, наноустройства [Текст] / Г. Г. Еленин // Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие. - М.: Наука, 2002. - 478 с.

151. Карагусов, В. И. Нанокриогенные технологии [Текст] / В. И. Карагусов // Микросистемная техника. - 2004. - №10. - С. 15-23.

152. Бескорвайный, И. М. Технологические поколения современной электроники [Текст] / И. М. Бескорвайный // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - №1. - С. 22-30.

153. Предко, М. Устройства управления роботами: схемотехника и программирование / Майк Предко. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 416 с.
154. Паркин, С. Запоминающие устройства, на старт! [Текст] / С. Паркин // НТЖ «В мире науки». - 2009. - №8 - с. 64-70.
155. Конюхов, Н. Е. Опто-электронные контрольно-измерительные устройства [Текст] / Н. Е. Конюхов, А. А. Плют, П. И. Марков. - М. : Энергоиздат, 1985. - 152 с.
156. Гихман, И. И. Управляемые случайные процессы [Текст] / И. И. Гихман, А. В. Скороход. - М. : Энергоиздат, 1977. - 250 с.
157. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст]: В 3-х т. / В. И. Анурьев. - К. : Наук. думка, 2001. - 864 с.
158. Бескорвайный, И. М. Технологические поколения современной электроники [Текст] / И. М. Бескорвайный // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - №1. - С. 22-30.
159. Бондарев, В. П. Основы минералогии и кристаллографии с элементами петрографии [Текст]: учеб. для биол. и хим. спец. пед. вузов / В. П. Бондарев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1986. - 287 с.
160. Губкин, А. Н. Электреты [Текст] / А. Н. Губкин. - М. : Изд. АН СССР, 1961. - 141 с.
161. Делимарский, Ю. К. Неорганическая химия. Избранные главы [Текст] / Ю. К. Делимарский. - К. : Вища школа, 1973. - 196 с.
162. Дорожовець М.М., Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення мехатронних систем: Навч. посібник [Текст] / М.М. Дорожовець, О. В. Івахів, В.О. Мокрицький // - Львів, Вид. НУ Львівська політехніка, 2009.- 304с.
163. Дрекслер, К. Э. Машины созидания [Текст] / К. Э. Дрекслер. - Энкор Букс, 1986. - 386 с.
164. Ефимов, Н. Е. Микроэлектроника: физические и технологические основы, надежность [Текст]: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. / Н. Е. Ефимов, Н. Я. Козырев, Ю. Н. Горбунов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1986. - 404 с.
165. Жуков, С.Н. Первые шаги в пьезоактюации / пер. с англ. [Текст] / С.Н.

Жуков // М.: Додэка-XXI, 2011. - 80 с.

166. Зими́на, Т. Оксидные «бакиболы» [Текст] / Т. Зими́на // Наука и жизнь. - 2004. - №10. - С. 34-36.

167. Зимо́н, А. Д. Коллоидная химия [Текст] / А. Д. Зимо́н. - 4-е изд. - М. : Агар, 2003. - 320 с.

168. Ивано́в-Есипович, Н. К. Технология микросхем [Текст] / Н. К. Ивано́в-Есипович. - М. : Высшая школа, 1972. - 256 с.

169. Каллер, Давид. Сенсорные сети [Текст] / Давид Каллер, Ханс Мадлер // В мире науки. - 2004. - №10. - С. 36-43.

170. Карагусов, В. И. Нанокриогенные технологии [Текст] / В. И. Карагусов // Микросистемная техника. - 2004. - №10. - С. 15-23.

171. Кобрянский, В. Н. Новые органические материалы для электроники будущего [Текст] / В мире науки. - 2014. - №7-8. - с. 93-97.

172. Конюхов, Н. Е. Опто-электронные контрольно-измерительные устройства [Текст] / Н. Е. Конюхов, А. А. Плют, П. И. Марков. - М. : Энергоиздат, 1985. - 152 с.

173. Кота, Сридхар. Конструкции переменной формы [Текст] / Сридхар Кота // В мире науки. - №7-8. - 2014. С. 82-90.

174. Куприянов, И. П. Технологический микроклимат [Текст] / И. П. Куприянов. - М. : Сов. Радио, 1976. - 176 с.

175. Кьюкс, Филип. Кроссбар-нанокомпьютеры [Текст] / Филип Кьюкс, Грегори Снайдер, Стенли Уильямс // НТЖ В мире науки. - 2006. - №3. - С. 66-73.

176. Левич, В. Г. Курс теоретической физики. Т. 1. Теория электромагнитного поля. Теория относительности. Статистическая физика. Электромагнитные процессы в веществе [Текст] / В. Г. Левич. - 2-е изд., переработ. - М. : Гл. ред. ФМЛ Наука, 1969. - 912 с.

177. Ловин, Д. Создаем робота-андроида своими руками [Текст] : пер. с англ. - М. : Изд. Дом ДМК-пресс, 2007. - 312 с.

178. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики в 2-х томах [Текст] / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. - М. : Гл. ред. ФМЛ Наука, 1982. - 352 с.

179. Лурье, М. С. Реактивное ионно-плазменное травление в технологии

микроэлектромеханических систем [Текст] / М. С. Лурье, Е. Н. Пятнышев // Петербургский журнал электроники. - 2000. - №3-4. - С. 114-117.

180. Лучко, В. А. МЭМС-технология переворачивает представление о технике инфракрасного видения [Текст] / В. А. Лучко // Микросистемная техника. - 2004. - №2. - С. 6-7.

181. Лысенко, И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники [Текст] / И. Е. Лысенко. - Таганрог : Изд. ТРТУ, 2005. - 103 с.

182. Мазель, С. З. Планарная технология кремниевых приборов [Текст] / С. З. Мазель, Ф. П. Пресс. - М. : Энергия, 1974. - 384 с.

183. Михайлов, П. Г. Исследования по созданию высокотемпературных сенсорных элементов и структур [Текст] / П. Г. Михайлов // Микросистемная техника. - 2004. - №8. - С.38-44.

184. Мюллер, Скотт. Ремонт и модернизация персональных компьютеров [Текст] / Скотт Мюллер. - 21-е изд. - М. : Издательский дом Вильямс, 2013. - 1200 с.

185. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов [Текст] : справочник / В. И. Мясенков, В. П. Мальцев, В. П. Майборода и др. - М. : Машиностроение, 1989. - 520 с.

186. Классификация технологий микроэлектромеханических систем [Текст]: тез. докл. 2-ой МРФ Прикладная радиоэлектроника : Состояние и перспективы развития / И. Ш. Невлюдов, В. М. Свищ, В. А. Палагин // МРФ-2005. Сб. научн. тр. Харьков АН ПРЭ, ХНУРЭ. Т.1, 2005. - 114 с.

187. Невлюдов, И. Ш. Нанолитография-наноимпринтинг [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Фризюк, О. Г. Шинкаренко // НТЖ Радіотехніка. - 2007. - №150. - С. 151-158.

188. Багатозондовий контактний пристрій [Текст] : пат. 82405 Україна: МПК Н05 1/00 / Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Семенець В. В., Сотник С. В., Фризюк Є. А.; заявник та власник Харківський нац. ун-т радіоелектроніки; заявл. 15.05.06; опубл. 10.04.08, Бюл. №7. - 4 с.

189. Невлюдов, И. Ш. Использование метода байесовских статистических

решений для выбора варианта технологического процесса [Текст] / И. Ш. Невлюдов, М. А. Омаров, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризиук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. спец. выпуск. Новые технологии в машиностроении. Юбилейный. Посвящен 80-летию ХАИ. : сб. науч. трудов. - Вып. №3 (63). - 2010. - С.173-180.

190. Невлюдов, И. Ш. Многозондовое подключающее устройство [Текст] / И.Ш. Невлюдов, Ю.П. Мачехин, В.А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризиук, И.Т. Тымчук // Технология приборостроения. - 2009 - №2. - С. 43-45.

191. Нилсон, П. Новая молекула жизни? [Текст] / П. Нилсон // НТЖ В мире науки. - 2009. - №3. - С. 34-41.

192. Ньювер, Рейчел. Беспроводная зарядка с помощью звуковых волн [Текст] / Рейчел Ньювер // ВМН, 2015. - №2 – 42 с.

193. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия [Текст] : пер. с англ. / под ред. Р. М. Бургера и Р. П. Донована. - М. : Мир, 1969. - 451 с.

194. Райхель, Якоб. Атомные микросхемы [Текст] / Якоб Райхель // В мире науки. - 2005. - №5. - С. 34-42.

195. Реньян, В. Р. Технология полупроводникового кремния [Текст]: пер. с англ. - М. : Изд. Metallurgia, 1969. - 336 с.

196. Рубцов, И. В. Современная зарубежная военная микро- и миниробототехника [Текст] / И. В. Рубцов, В. Е. Нестеров, В. И. Рубцов // Микросистемная техника. - 2000. - №5. - С. 70-79.

197. Рэми, Г. Курс неорганической химии. Т.2. [Текст] / Г. Рэми. - М. : Мир, 1966. - 836 с.

198. Рэми, Г. Курс неорганической химии. Т.1. [Текст] / Г. Рэми. - М. : Мир, 1972. - 824 с.

199. Сиварам, Варум. Лучше кремния [Текст] / Варум Сиварам, Генри Снейт, Сэмюэль Стрэнкс // ВМН, 2015. - №8-9. - с. 108-115.

200. Синхронный 3-х фазный двигатель [Электронный ресурс] / ООО ТОСС Технология, оборудование, стеклянные структуры. - Режим доступа : [www/ URL](http://www/URL):

www.tegs.ru/tocc.htm/ - 10.11.2005 г. - Загл. с экрана.

201. Собенников, А. С. Фемтосекундная реализационная динамика фемтовозбужденных нанокристаллов TiO_2 в водных суспензиях [Текст] / А. С. Собенников, В. А. Надточенко, Ю. Е. Лозовик, О. М. Саркисов // Химическая физика. - 2005. - Т. 24.- Вып. 4. - С. 9-13.

202. Солин, Стюарт. Субмикронные магнитные сенсоры [Текст] / Стюарт Солин // НТЖ В мире науки. - 2004. - №11. - С. 44-51.

203. Стикс, Гэри. Микромеханические телефоны [Текст] / Гэри Стикс // НТЖ В мире науки. - 2004. - №5. - С. 24-25.

204. Стратонович, Р.Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления [Текст] / Р.Л. Стратонович // М.: Издательство МГУ, 1966. - 319 с.

205. Стикс, Гэри. Нанорисование [Текст] / Гэри Стикс // НТЖ В мире науки. 2004. - №6. - С. 22-23.

206. Стикс, Гэри. Нанотрубки в чистой комнате [Текст] / Гэри Стикс // НТЖ В мире науки. - 2005. - №5. - С. 70-73.

207. Стратонович, Р.Л. Теория информации [Текст] / Р.Л. Стратонович // М.: Сов. радио, 1975. - 424 с.

208. Суздаев, И. П. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров. Синергетика: от прошлого к будущему [Текст] / И. П. Суздаев. - М. : Ком. книга, 2006. - 592 с.

209. Ткачук, В. А. Нанотехнологии в медицине: успехи и перспективы [Текст] / В. А. Ткачук // НТЖ В мире науки. - 2009. - №2 - С. 72-77.

210. Ферри, Д. Электроника ультрабольших интегральных схем: пер. с англ. / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич. - М. : Мир, 1991. - 327 с.

211. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов [Текст]: учебн. для втузов / В. И. Феодосьев. - 9-е изд., перераб. - М. : Наука. Гл. ред. ФМЛ, 1986. - 512 с.

212. Филипенко, А. И. Использование автосвертки распределения оптического поля для идентификации положения сердцевины оптических волокон при их соединении [Текст] / А. И. Филипенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн.

сб. - Харьков : ХНУРЭ, 2003. - Вып. 132. - С. 109-114.

213. Филипенко, А. И. Исследование метода позиционирования фотонно-кристаллических волокон при их соединении [Текст] / А. И. Филипенко, О. В. Сычева // сб. науч. тр. 2-й Международной НК Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития. Харьков-Кацевели. 30 сент.-3 окт. 2009 г. - Харьков : ХНУРЭ, 2009 г. - С. 187-190.

214. Фиктенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления [Текст] / Г.М. Фиктенгольц // том II, издание пятое, стереотипное // ГИЗ ФМЛ, М. : 1962. - 758 с.

215. Форбс, Питер. Самоочищающиеся материалы [Текст] / Питер Форбс // НТЖ В мире науки. - 2008. - № 10. - С. 48-55.

216. Хатчесон, Ден. Первые наночипы [Текст] / Ден Хатчесон // НТЖ В мире науки. - 2004. - №7. - С. 46-53.

217. Храмов, Ю. А. Физики: Биографический справочник [Текст]. / Ю. А. Храмов ; под ред. А. И. Ахиезера. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Наука. Гл. ред. ФМЛ, 1983. - 346 с.

218. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем [Текст] / В. Н. Черняев. - М. : Энергия, 1977. - 375 с.

219. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров [Текст]: учеб. для вузов / В. Н. Черняев. - 2-е изд, перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1987. - 464 с.

220. Чжонлинь, Ван. Нанороботы с автоподзащитой [Текст] / Ван Чжонлинь // НТЖ В мире науки. - 2008. - №4. - С. 46-51.

221. Шелепин, Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем [Текст] / Н. А. Шелепин // Микросистемная техника. - 2004. - №9. - С. 30-35.

222. Шипов, Г. И. Теория физического вакуума [Текст] / Г. И. Шипов. - М.: Наука, 1997. - 450 с.

223. Эшли, Стивен. Солнечные дни для кремния [Текст] / Стивен Эшли // НТЖ В мире науки. - 2009. - № 1. - С. 12-13.

224. Юревич, Е. Ю. Основы робототехники [Текст]: учеб. пос. / Е. Ю. Юревич. - 2-е изд., дополн. и перераб. - С.-Пб. : БХВ Петербург, 2005. - 416 с.
225. Юрре, Т. А. Органические материалы для фотовольтаических элементов. [Текст] / Т. А. Юрре, Л. И. Рудая, Н. В. Климова, В. В. Шаланин // Физика и техника полупроводников. - 2003. - Т. 37, вып. 7. - С. 835-844.
226. Ayazi, Farroky. A HARPPSS Polysilicon vibrating ring gyroscope [Text] / Farroky Ayazi, Khalif Najafi // Microelectromechanical Systems. - 2001. - Vol. 10, № 2. - PP. 169-179.
227. Bjorksten, U. Book of Abstracts [Text] / U. Bjorksten, A. Hagfeldt, J. Mozer, M. Gratzel // Tenth International Conference on Photochemical Conversation and Storage of Solar Energy. JPS-10 July 24-29, 1994. Interlaken, Switzerland. - PP. 209-210.
228. Bosnell, J. R. Dielectric isolation techniques for integrated circuits [Text] / J. R. Bosnell // Microelectronics and Reliability. - 1976. - Vol. 15, №2. - PP. 113-122.
229. Clark, J. V. MEMS Simulation Using SUGAR V.05 [Electronic source] / J. V. Clark, Ningning Zhou, K. S. F. Pister ; Berkely Sensor and Actuator Center University of California at Berkely. - Режим доступа :
www/ URL: <http://www.bzac.berkely.edu/cadtools/sugar/Paper/hh1998.pdf/> - 11.01.1998.
- Загл. с экрана.
230. Crow, J.D. GaAs laser array source package [Text] / J.D. Crow, J.D. Comenford, R.A. Zaff, M.J. Brady and J.S. Harper // Opt. Lett. Vol. 1 . - 1977. - p. 40.
231. Dorey, A. P. A high sensitivity semiconductor strain sensitive circuit [Text] // Solid-state Electronics. - 1975. - Vol. 18, №4. - PP. 295-299.
232. Овчаренко, В.Е. Перспективы применения микроэлектромеханических систем в космической технике [Текст] / В.Е. Овчаренко, Е.В. Токарева, Н.В. Кононенко// НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2.
233. Овчаренко, В.Е. Принципы измерения фазового сигнала с использованием двухполупериодного преобразования [Текст] / В.Е. Овчаренко, С.А. Тышко// НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №1.
234. Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures [Text]/ A. Druzhinin, I.

Ostrovslui, Yu. Khoverko, S. Nichkalo, Iu. Kogut // *Physica Status Solidi C*. - Vol. 11, №(1). - 2014. - p. 156-159.

235. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures [Text]/ A. Druzhinin, I. Ostrovslui, Yu. Khoverko, R. Kortskii // *Materials Science in Semiconductor Processing*. - Vol. 40. - 2015. - p. 766-771.

236. Уваров, Б.М. Топологическая оптимизация конструктивных модулей радиоэлектронной аппаратуры по комплексному показателю надежности [Текст] / Б.М. Уваров // Всеукраинский межведомственный сборник «Радиотехника». – 2014. – №178.

237. Уваров, Б.М. Устойчивость радиоэлектронной аппаратуры защиты информации против дестабилизирующих механических воздействий [Текст] / Б.М. Уваров // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації і Україні. – 2014. – №2(28).

238. Уваров, Б.М. Электротепловые модели структурных элементов радиоэлектронного аппарата [Текст] / Б.М. Уваров // *Радиоэлектроника. Известия высших учебных заведений, том 58*. – 2015. – №11.

239. Дьяконов, В.П. Матлаб и SIMULINK для радиоинженеров [Текст] / В.П. Дьяконов - М.: ДМК Пресс, 2011 – 976 с.

240. Предко, М. Устройства управления роботами: схемотехника и программирование / Майк Предко. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 416 с.

241. Рыков, Н. Автоматическое тестовое оборудование с подвижными проводниками в производстве электронных изделий, Н. Рыков, Н. Марков // *НТЖ «Компоненты и технологии»*. 2005. - №3 - с. 224-227.

242. Суздальцев, И.П. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздальцев. – М.: Ком. книга, 2006 – 592 с.

243. Панич, А.Е. Пьезокерамические актюаторы: Уч. Пособие [Текст] / А.Е. Панич. – Ростов-на-Дону, 2008 – 159 с.

244. Новое поколение топливных элементов [Текст] // *НТЖ «В мире науки»*. - 2006. - №7 - с. 79-81.

245. Чой, Чарльз Миниатюризация энергии [Текст] / Ч. Чой // *НТЖ «В мире*

науки». - 2006. - №7 - с. 70-73.

246. Фезерстоун, С. Чернобыль и Фукусима – 2 естественные лабораторные среды загрязнения и выживание после атомных бомбардировок [Текст] / С. Фезерстоун // НТЖ «В мире науки». - 2015. - №4 - с. 22-31.

247. Демин, В.И. На пути к искусственному интеллекту [Текст] / В.И. Демин, М.С. Бурцев // НТЖ «В мире науки». - 2014. - №2 - с. 46-53.

248. Паркин, С. Запоминающие устройства, на старт! [Текст] / С. Паркин // НТЖ «В мире науки». - 2009. - №8 - с. 64-70.

249. Фридман, В. Гуманитарное погружение в естественно-научную среду [Текст] / В. Фридман // НТЖ «В мире науки». – 2014. - №3 - с. 34-39.

250. Бибииков, Т.А. Электроника и связь [Текст] / Т.А. Бибииков, А.В. Богдан, О.Н. Петришев, Ю.Н. Якименко // НТЖ «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – №5/1 – с. 94-107.

251. Ильков, А. В. Конструктивно-технологический базис МЭМС для диафрагментальных электроакустических преобразователей : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.27.01 "твердотельная электроника, РЭ компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах" / Ильков Андрей Владимирович – Москва, 2007. – 5 с.

252. Третьяков, Ю. Там, внизу еще много нанобума [Текст] / Ю. Третьяков, Е. Гудилин // НТЖ «В мире науки». – 2009. – №5 – с. 56-61.

253. Градецкий, В.Г. Динамика управляющих движений миниатюрных роботов [Текст] / В.Г. Градецкий, М.М. Князьнов, В.Н. Соловцов // НТЖ «Микросистемная техника». – 2003. – №12 – с. 7-15.

Приложение А
Электромеханические аналогии

Таблица А.1 Электромеханические аналогии

Система	Обобщенные		Основные законы	Принцип, закон	Уравнения движения	Дифференциальные коэффициенты			Кинетическая энергия, Т	Потенциальная энергия, П	Диссипативная функция Рэлея	Уравнения динамики
	Сила	Координаты				Обобщенные механические	Диссипационные	Упругости				
Механическая	F, M	q_i $\{x_i, \varphi_i\}$	<p>2-й Ньютона: $F = m\ddot{q} = m \frac{dq}{dt};$ $(M = je = j \frac{dq}{dt})$.</p> <p>Гука: $F = cx, \sigma = \varepsilon \cdot E$.</p> <p>Дискретный коэффициент Рэлея: $F = R_{мех} \frac{dq}{dt}$</p>	<p>Даламбера: $\sum F_i = 0,$ у. учитывая силы инерции</p>	<p>$a\ddot{q} + b_{мех}\dot{q} + cq = F,$ Символическое представление $(j\omega a + R_{мех} + \frac{c_{мех}}{j\omega})\dot{q} = F.$</p>	m_j	$R_{мех}$	$C_{мех}$	$\frac{1}{2}m(\dot{q})^2$	$\frac{1}{2}cq^2$	$\frac{1}{2}R_{мех}(\dot{q})$	<p>Лагранжа 2-го рода $\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} = Q_j$ $j = 1, 2, \dots, m$ $L = T - \Pi$ Q_j – неконсервативные обобщенные силы</p>
Последовательная электрическая цепь 1-я система аналогий	$e(t)$ $\frac{de(t)}{dt}$	q^e, i	<p>Ома: $U = iR$.</p> <p>Фарадея: $U_l = L \frac{di}{dt} \cdot \Phi$ $q^e = CU_c$ $i = \frac{dq^e}{dt}$ $i = C \frac{dU_c}{dt}$</p>	<p>2-й Кирхгофа: $\sum U_i = 0,$ включая $e(t)$.</p>	<p>$e(t) = U_L + U_R + U_C,$ $e(t) = L \frac{di}{dt} + R + \frac{q_e}{c}.$ $\frac{de(t)}{dt} = L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{c}$</p>	L	R	$1/C$	$\frac{1}{2}Li^2$	$\frac{1}{2C}(q^e)^2$	$\frac{1}{2}Ri^2$	<p>Лагранжа-Максвелла $T_1^e = \frac{1}{2} \sum_{j,k=m+1}^n L_{jk} i_j i_k$ $\Pi_1^e = \frac{1}{2} \sum_{j,k=m+1}^n b_{jk} q_j q_k$; $\frac{\partial T_1^e}{\partial i_j} = \sum_{k=m+1}^n L_{jk} i_k$; $\frac{\partial \Pi_1^e}{\partial q_j^e} = U_j$. Потеря энергии $\sum_{j,k=m+1}^n R_{jk} i_j i_k dt + \sum_{j=m+1}^n e_j i_j dt = \sum_{j,k=m+1}^n Q_{1j}^e dq_j$; $Q_{1j}^e = \sum_{k=m+1}^n R_{jk} i_k - e_j$ неконсервативные силы. $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_m}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L_m}{\partial q_j} = Q_j - j = 1, \dots, m \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_1^e}{\partial i_j} \right) + \sum_{k=m+1}^n R_{jk} i_k + \frac{\partial \Pi_1^e}{\partial q_j} = e_j \quad j = m+1, \dots, n.$</p>
Параллельная электрическая цепь 2-ая система аналогий	$\frac{di}{dt}$	U	<p>$i_R = \frac{U}{R},$ $i_R = \int \frac{U}{L} dt,$ $i_C = \frac{d(CU)}{dt} = C \frac{dU}{dt}$</p>	<p>1-й Кирхгофа: $\sum i_j = 0.$</p>	<p>$i = i_R + i_L + i_C$ $\frac{di}{dt} = C \frac{d^2U}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{L}$ Символическая форма $i(t) = (j\omega c + \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L})U.$</p>	C	$1/R$	$1/L$	$\frac{1}{2}CU^2$	$\frac{1}{2L}U^2$	$\frac{1}{2R}U^2$	<p>$\frac{d}{dt} \frac{dL_m}{dq_j} - \frac{dL_m}{dq_j} = Q_j \quad j = 1, 2, \dots, m;$ $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_2^e}{\partial \dot{U}_j} \right) + \sum_{k=m+1}^n \frac{1}{R_{jk}} + \dot{U}_k + \frac{\partial \Pi_2^e}{\partial U_j} = \frac{di}{dt}$ $j = m+1, m+2, \dots, n.$</p>

Приложение Б
Функциональная электроника

Компоненты	Акустоэлектроники		Акустооптики		ВОСПИ		Оптоэлектроники		Интегральной оптики	Фотоники		Магнитооптики	Магнитоэлектроники		Термоэлектроники	Хемоэлектроники	Криоэлектроники	Молекулярн электроники	
	Физико-химические эффекты	Поверхностно акустические волны	Акустические волны	ППЗ ПЗС хранение пакетов зарядов в потенц. ямах	Диффр. Реш. $V_{ak}=1...10m/c$	ВОЛС	Фотонные кристаллы ВОЛ	Интерференция когерентных волн	Активные компоненты ВОСПИ	Пустотелые композитные МСТ и ФКВ	Обработка информации в реальном масштабе времени, параллельная обработка	Фоточувствительные ППЗ	Фотонные кристаллы	Магнитное управление оптическими свойствами	ЦМД	Магнито-сопротивление	Эффекты Джоуля-Ленца, Зеебека, Пельтье	Капиллярные, электрохемоллю - мисценция	Температурно-конденсированное состояние вещества
Положительные свойства	Высокая Q управление х-ками ПАВ $V=1-5km/c$	Интроскопия	Обработка изображения кадрами, РЛС инф. Храненен пакетов зарядов в потенциал ных ямах	Оптическое управление дифр. решетками	Быстродействие, многоканальные, параллельные обработки в реальном масштабе времени, скрытность широкодиапазонность, защита от ЭМИ	Голография, 3D-TV, высокое быстродействие параллельная обработка, помехозащищенность, высокая направленность света, исключение паразити. связей в цепях, гальваническая развязка, согласование	Оптические модуляторы (электронные, акустические), улучшение эл-физ свойств	Функциональная организация кристалла как устройства	Магнитная модуляция	$V=1-10m/c$ магн. упр. дифр. решетки, фильтры и ген. СВЧ, магн.опт память	Сенсоры магнитного поля, ГМС, КМС, БМС, ЭМС, ТМС.	Преобразование тепла в электричество, пирозлектрический эффект	Целевая доставка лекарств	Снижение шумов, сверхпроводимость	Управление устройствами структур на атомном, молекулярном и наноструктурном уровнях				
Использование в РЭУ	Ф, ЛЗ, Фурье, преобр., МПО, ОС, АВ, Г, Д, ПЗС, ВШП, микротелеф, микрофоны	Интроскопия. Преобразование механической энергии в электрическую Пьезо 3Д высокоточные позиционерны, трансформ, сенсоры сил, электр. и магн. величин	Управление. ЛЗ, Ф, логические операции +, *, спектраланиз, трансверсальные и рекурсивные Фурье корреляторы, мультиплексоры, СДЦ, обнаружение и накопление сигналов	Кабельное TV, световоды, кварцевые и полимерные волокна микроструктурированные (ФКВ, МС), неохлаждаемые ИК-приемники, бесконтактные Д, LAN, WAN, телекоммуционная техника	Обработка сигналов в реальном масштабе времени, электрооптическое управление волноводными компонентами.: модул., ответвит., фокусир. элементы опг. $3У-10^{12}$ бит	ЛЗ, Ф, анализ спектра, отображение больших объемов информации	Фотоприем матрицы, дифракционные решетки, ИКД неохлажд., тепловидение	МОДиски, фотонные кристаллы (изоляция, сверхпроводимость)	Спинтроника и ЗУ	Фильтры, квадратические преобразователи, смесители, кол. конт. НЧ, мед. диагностика, ЖД с тепловой записью	Медицинские приборы, диагностика, анализ материалов, лаборатории на кристалле.	Сверхдальний прием, тепловидение, ИКД, пирометры.	Мехатронные узлы, межсоединения						
Основные материалы	Пьезоэлектрики, кремний, ниобат лития, германат висмута, пьезокерамика, ЦТС и другие	SiO_2 , многокомпонентные стекла, полупроводники, полимеры	SiO_2 , LiNbO ₃ , ниобат лития, таталат лития	Кварц, полимеры	Ферритгранаты, содержащие Bi	Ферромагнитные жидкости, коллоиды ферроматериалов	Пирозлектрики, окислы ванадия поли- и аморфный кремний, кремний на изоляторе, титанат бария-стронция, QaAS/AlGaAs, CaHgTe	Кремний	Теллуриды кадмия и ртути, коллоиды УНТ, фуллерены, графен, органические и неорганические полимеры, ДНК, интеллектуальн ые материалы										
Использование в РЭУ	Микро-, наноактюаторы и сенсоры, информационно управляющие системы, приборы для научных исследований																		
Использование в РЭУ	ИП, прецизионные позиционеры, микрофоны, телефоны, ИКВ, акселераторы, гироскопы, преобразователи энергии, антенны, пьезопечатающие головки, пьезодвигатели		Элементы солнечных батарей на TiO ₂ оптопереклюатели, микрзеркала		Интеллектуальные микродатчики, узлы связи опто- и электронных устройств, электростатические двигатели		Головки считывания-записи, магнитные жидкости		Термоактюатор, термолечающие головки		Печатающие устройства, микродозаторы, электронные носы		Конденсат Бозе-Энштейна		Интеллектуальн ые материалы, сверхчувствительные датчики, наноточки, линии, кристаллы, спинтроника				
Положительные свойства	Интеграция устройств различной физической природы Высокое быстродействие, добротность, малое энергопотребление, прецизионность, надежность																		
Физико-химические эффекты	Масштабные, квантово-механические эффекты, взаимное преобразование энергии различных видов, электромеханические, математические аналогии, новые свойства материалов и способы управления ними																	Самосборка, самораспознав., саморепликаци, направленный информационно -химический синтез	
	МАЭМС				МОЭМС				МЭМС				МЖЭМС				НТ		

Мехатронные принципы проектирования САПР

Приложение В
Технологии микроэлектромеханических систем

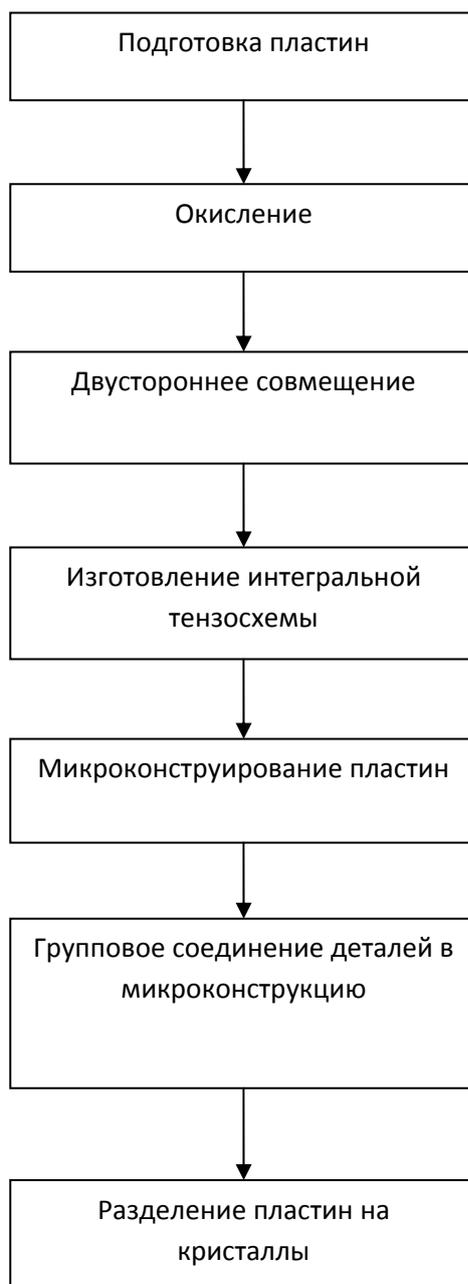
Таблица В.1 Технологии микроэлектромеханических систем

Технологии МЭМС

Групповые методы производства					Индивидуальное производство		
Фотошаблоны, маски, программы электронно-лучевых установок							
Основные операции	КМОП технологии	Корпускулярно-фотонные технологии	Технология интегральных тензопреобразователей	Нанотехнологии	Гибридные технологии	Технология перетягивания волокон	Методы микромеханик
		Очистка: механическая, химическая, УЗ и мегазвуковая перегретым CO ₂ , термическая. Окисление, диффузия, легирование. Эпитаксиальное наращивание, термообработка, ХОГФ, пиролиз, полимеризация, поликонденсация, вакуумные методы напыления. Литография: фото-, лазерная, электронно-, ионно-, рентгено-, стерео, проекционная. Травление: жидкостное (изо-, анизотропное, селективное, со стоп слоем, плазменное, электрохимическое, реактивно-ионное) ГРИТ	Лазерное испарение, осаждение, полимеризация, сварка, литография Лазерно-химическое осаждение Электронно- лучевая обработка Ионными лучами, Плазменные методы обработки	Двухсторонняя обработка кремневых пластин (окисление, совмещение)	Наноимпринтинг: термо-, фото-, стемулирование, обратный, наноконтактный, микропереносом, биотехнологии, бездефектные полимеры, штамповка керамики, интеллектуальные материалы, ДНК	Графаретная печать, многослойная разводка, пайка, сварка, термообработка, гальваника	Перетяжка волокон, скручивание, травление
Термомиграция алюминия в кремний для соединения двухсторонней подложки, эпитаксиальное наращивание для получения скрытых каналов, термосрачивание кристаллов на атомно-молекулярном уровне, совместное травление поли- и монокремния, термозапись информации.							
Сборка	Специфические операции микроэлектромеханических систем						
	Безборочные процессы			Индивидуальная обработка			
	Полимеризация, поликонденсация, гибко-жесткие конструкции, самосборочная литография, саморепликация, самораспознавание, химический направленный синтез			Прототипирование, стереолитография, двухфотонная стереолитография, лазерная пайка, сварка, спекание, соединение на атомно-молекулярном уровне, BGA – выводы, перевернутый			
Корпуса	Полимерные, керамические, кремневые с промежуточным слоем, стеклополимеры, металлостеклянные, металлокерамические, CSP -корпуса						

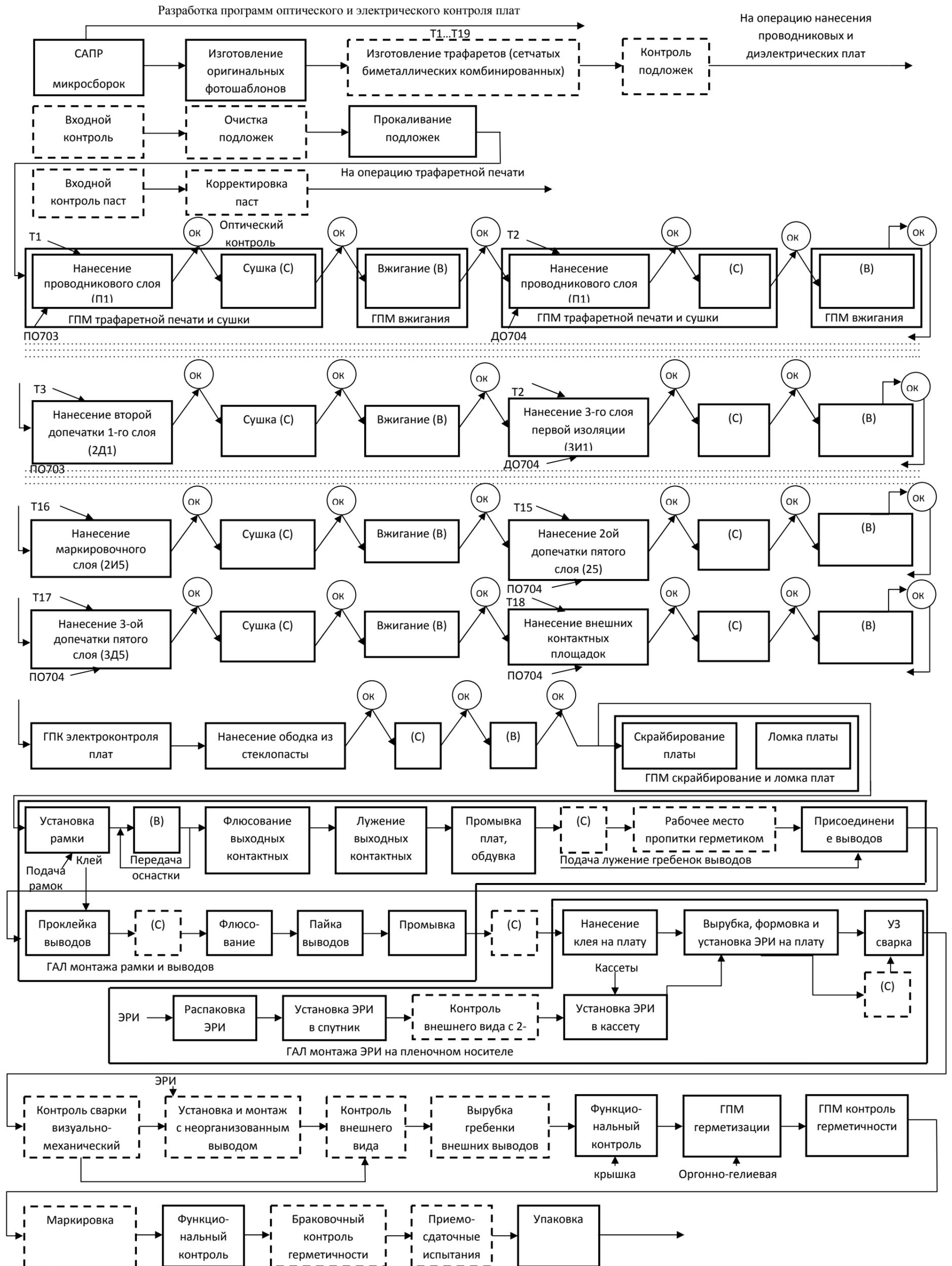
Приложение Г

Обобщенный технологический процесс изготовления ИТП давления

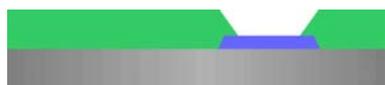


Приложение Д

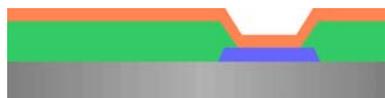
Типовой технологический процесс изготовления толсто пленочных микросборок



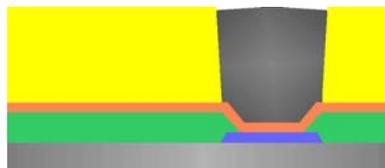
Приложение Е
Изготовление шариковых выводов



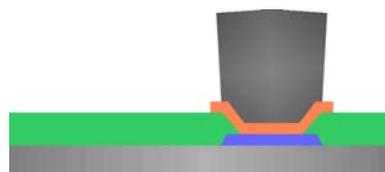
Контактная площадка, ионное травление
BCB (полиимида)



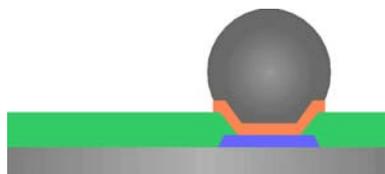
Нанесение барьерного слоя металла (основы для
гальванического осаждения)



Осаждение фоторезиста, формирование рисунка кристаллов,
электрогальваническое осаждение PbSn

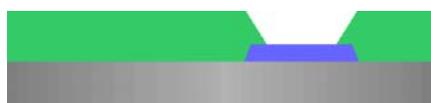


Удаление резиста, влажное травление основы для
гальванического осаждения



Оплавление контактного столбика

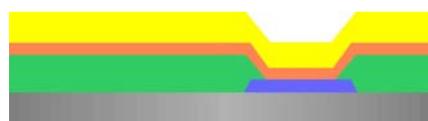
Рисунок Е.1 – Электрогальваническое осаждение



1. Контактная площадка
(после ионного травления)



2. Осаждение барьерного
слоя металлов (БСМ)



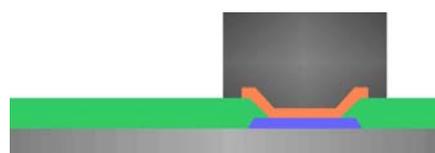
3. Фотолитография



4. Травление БСМ



5. Удаление фоторезиста



6. Трафаретная печать контактного
столбика припоя



7. Оплавление контактного
столбика припоя

Рисунок Е.2 – Трафаретная печать

Приложение Ж
Характеристики BGA/CSP выводов

Таблица Ж.1 – Параметры распространения сигнала при монтаже перевернутым кристаллом

Индуктивность, нГн	5,6...0,3
Емкость, пФ	9,1...2,5
Сопротивление, мОм	20,1...1,7
Время задержки, пс	508...51

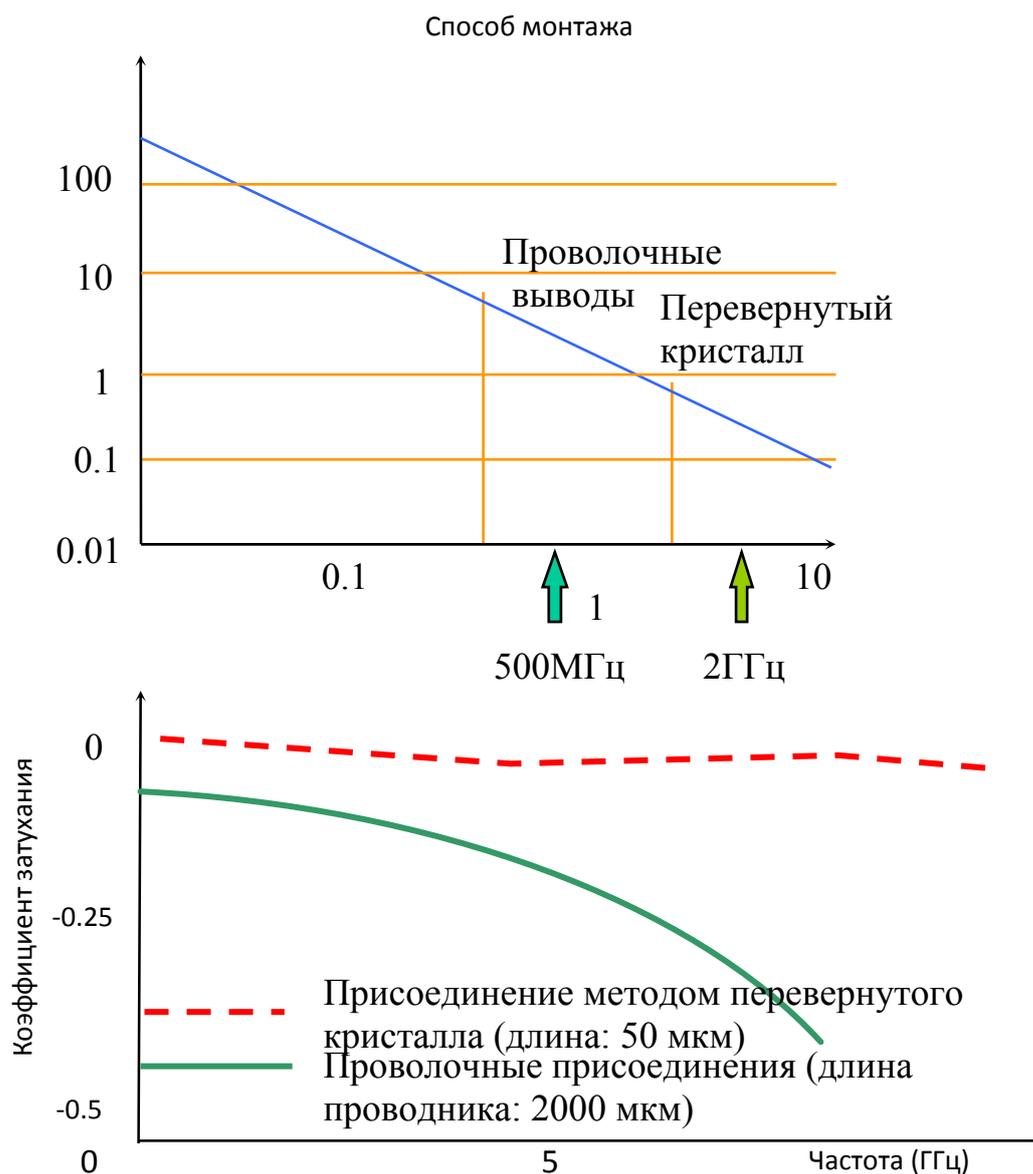
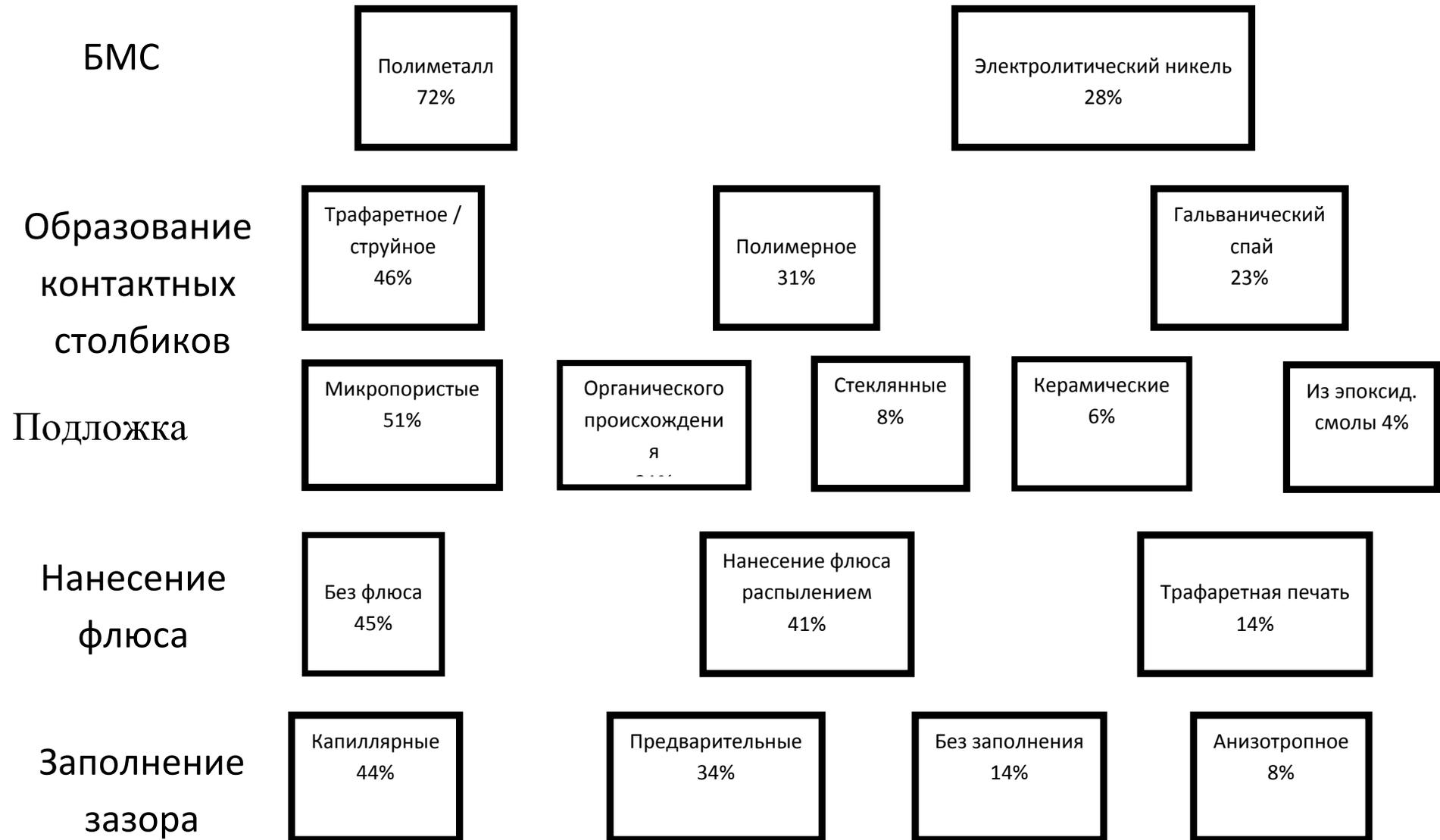


Рисунок Ж.1 – Влияние способа монтажа на частотные характеристики, возможность использования схем на СВЧ

Приложение И
Процессы изготовления перевернутого кристалла



Приложение К
Растровая акустическая микроскопия

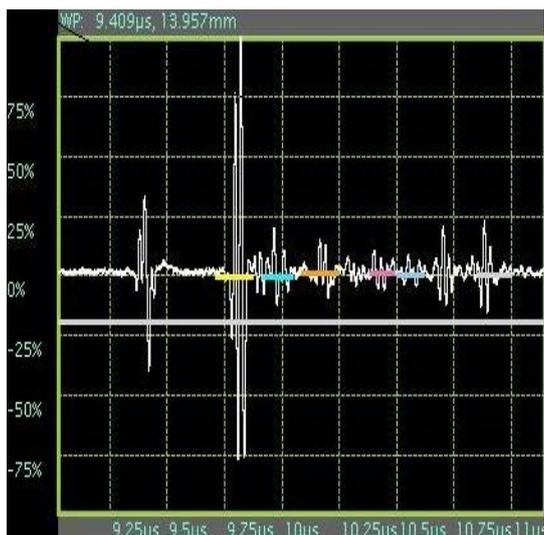
Таблица К.1 – Указатель режимов работы преобразователя

Объект исследования	Частота, МГц
Шариковая решетчатая матрица	50-75
Металлизация поверхности	110
Конденсатор	75
Недозаполненный перевернутый кристалл	110
Межсоединения перевернутого кристалла	180
Пластиковый корпус	15
TSOP (корпус с тонким одиночным контуром)	50-75

Таблица К.2 – Рабочие частоты РАМ

Достижимые диаметры пучка, мм	Частота, МГц
0,2...0,6	15
0,08...0,12	50
0,04...0,08	75
46	110
25	200
19	260

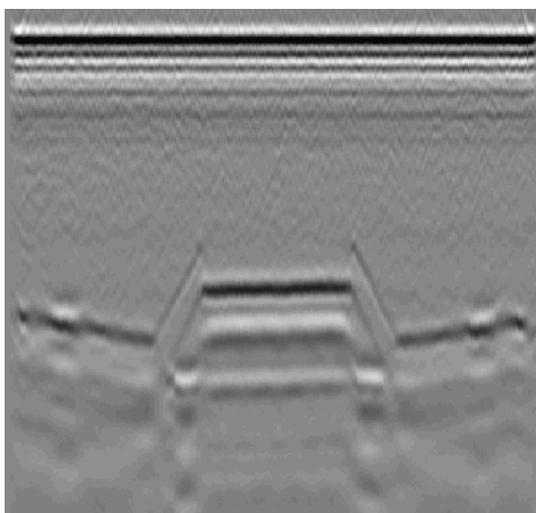
Приложение Л
Виды изображений при РАМ



Сигнал, отраженный от передней поверхности

Селекторы данных

Сохраняется амплитуда и наиболее важная информация

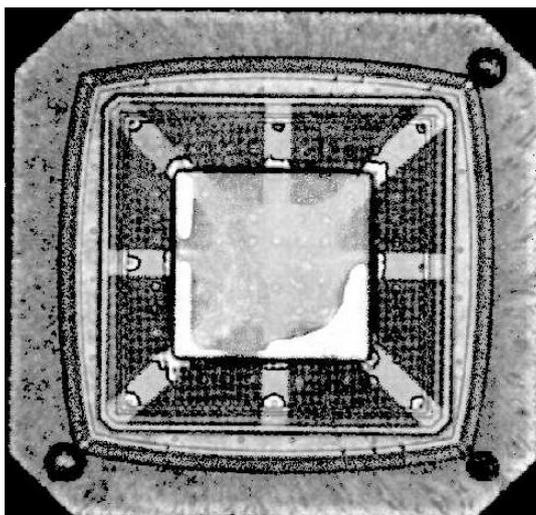


Режим яркости. Обеспечивает вид сбоку.

Вся область обработки, представляющая интерес.

Поворот индикаторов А- типа на 90° , строит график амплитуды в виде пятна яркого цвета.

Только амплитуда.



Обеспечивает вид сверху.

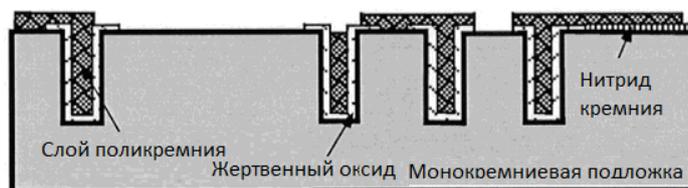
Амплитуда, глубина проникновения и фаза.

Используется чаще всего.

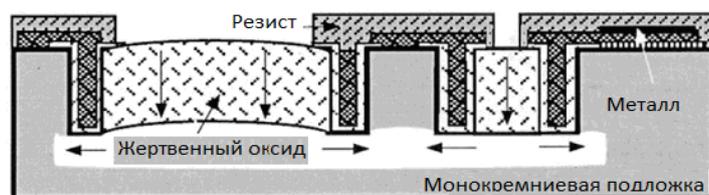
Приложение М
Технологический процесс HARPSS



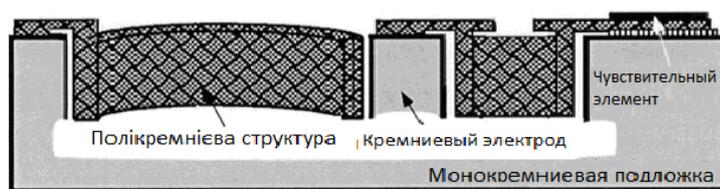
а, б



в, г, д, е, ё:



ж, з,



и, й

- а) нанесение и получение изоляционного слоя нитрида кремния, б) сухое глубокое травление канавок к главному телу структуры,
- в) нанесение LPCVD жертвенного слоя оксида и легирование поверхности оксида, г) заполнение канавок LPCVD полекремнием,
- д) травление поликремния на поверхности, е) формирование рисунка двуокиси, ё) нанесение легирования и рисунка поликремния,
- ж) нанесение Cr / Au и получение рисунка, з) SF₆ анизотропное травление и подрезание кремниевых структур / электродов (толстый резист используется как маска), и) пленочный резист, й) травление жертвенного слоя оксида до полного освобождения структуры.

Приложение Н
Методы наноимпринтинга

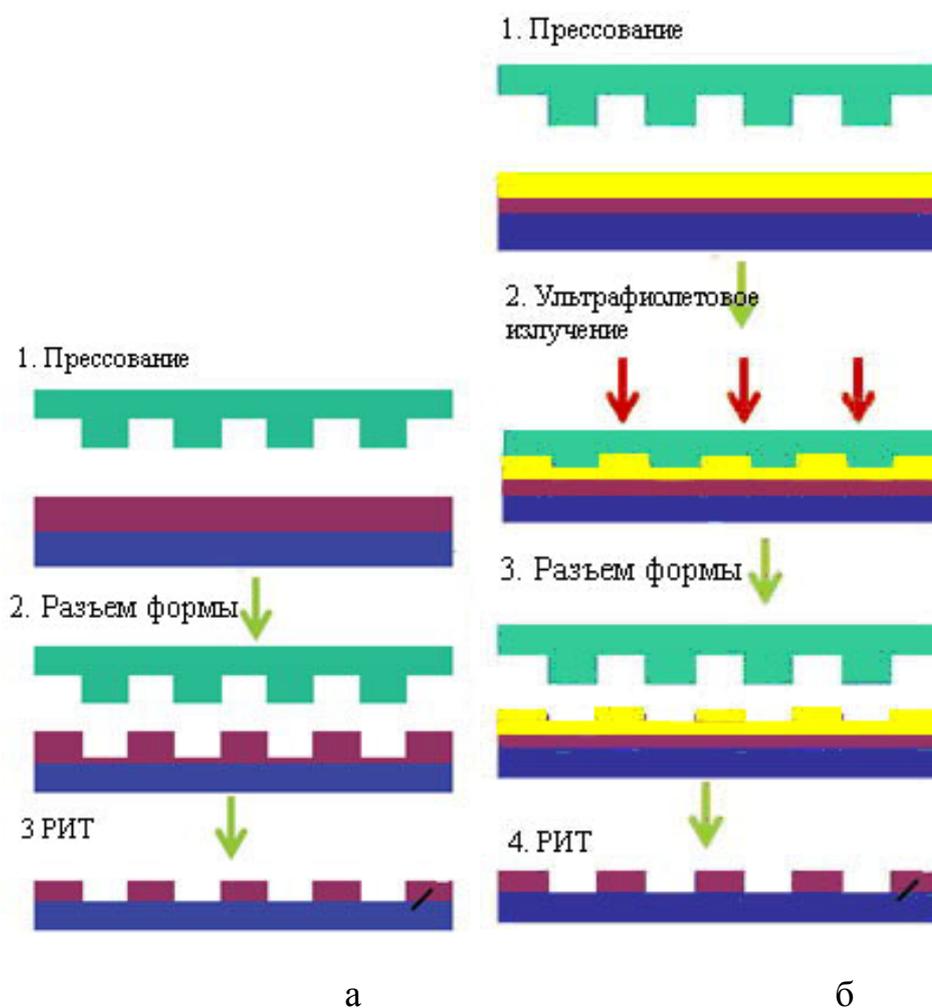


Рисунок Н.1 – Наноимпринтинг: а – термический; б – фотостимулируемый

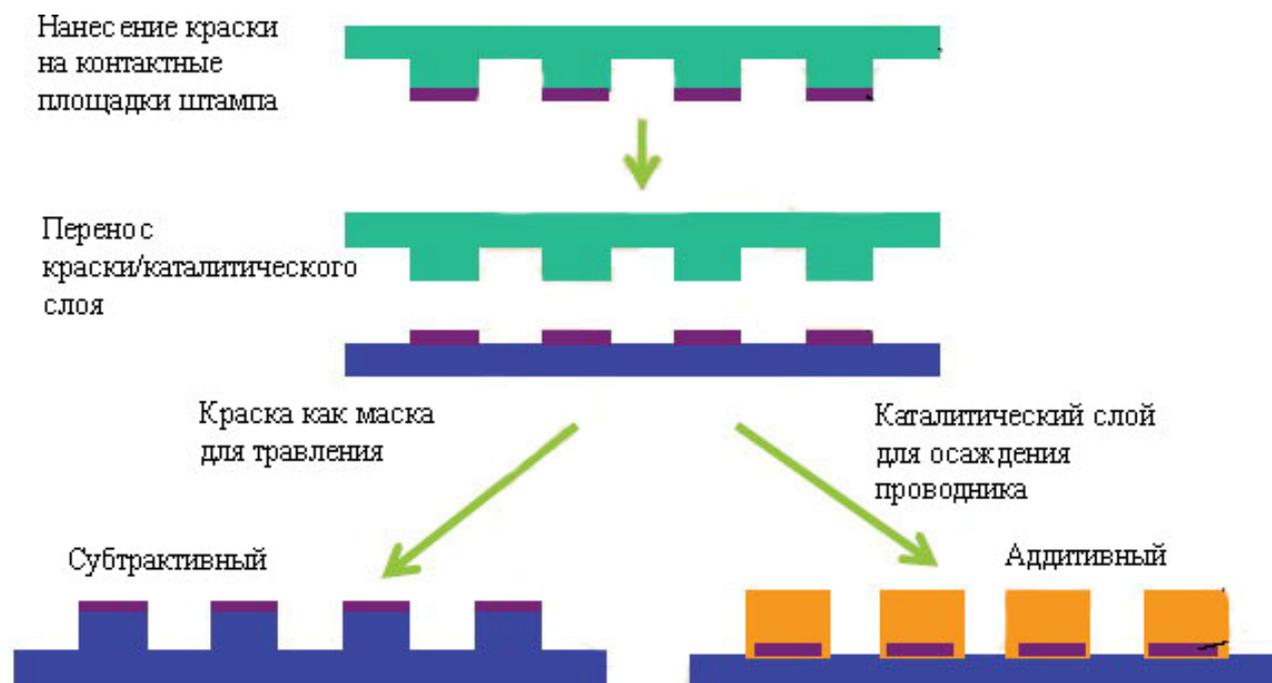


Рисунок Н.2 – Наноконтактная печать

Приложение П
Акты внедрения результатов НИР в учебный процесс

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з науково-педагогічної роботи по організації навчального процесу та його науково-методичного забезпечення



О.Н. Романюк

2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Палагіна Віктора Андрійовича

«Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем»

Комісія у складі: голови комісії, декана факультету радіотехніки, зв'язку та приладобудування професора Кичака В.М.; членів комісії: заступника декана факультету радіотехніки, зв'язку та приладобудування професора Барася С.Т., завідувача кафедри біомедичної інженерії професора Злепка С.М., професора Філінюка М.А. склали акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В.А. на тему «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – «Технологія, обладнання і виробництво електронної техніки» у навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі В.А. Палагіна були впроваджені у навчальний процес факультету радіотехніки, зв'язку та приладобудування з дисциплін: «Фізико-теоретичні основи конструювання і надійності РЕА» для студентів напряму 6.050902 – «Радіоелектронні апарати»; «Автоматизація виробництва електронних засобів» для студентів спеціальності 7.05090201 – «Радіоелектронні апарати та засоби».

Декан факультету радіотехніки, зв'язку та приладобудування,
професор, д.т.н.


В.М. Кичак

Заступник декана факультету радіотехніки,
зв'язку та приладобудування,
професор, к.т.н.


С.Т. Барась

Завідувач кафедри біомедичної інженерії,
професор, д.т.н.


С.М. Злепка

Професор, д.т.н.


М.А. Філінюк



ЗАТВЕРДЖУЮ

 Ректор КрНУ
 проф. Загірняк М.В.

17.02. 2016 р.

АКТ

 з впровадження результатів дисертаційної роботи
 Палагіна Віктора Андрійовича

Комісія у складі голови: декана факультету електроніки та комп'ютерної інженерії – к.т.н., доц. Мосьпана Владислава Олександровича, членів комісії: завідувача кафедри електронних апаратів (ЕА) – к.т.н., доцента кафедри ЕА Фомовської Олени Владиславівни, д.т.н., професора кафедри ЕА Луценка Ігоря Анатолійовича, к.т.н., доцента кафедри ЕА Антонової Олени Іванівни, к.т.н., доцента кафедри ЕА Юрко Олексія Олексійовича, к.т.н., доцента кафедри ЕА Фомовського Фелікса Володимировича, к.т.н., доцента кафедри ЕА Мосьпана Дениса Владиславовича, доцента кафедри ЕА Кухаренко Дмитра Володимировича склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В.А. на тему «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі В.А. Палагіна були впроваджені у навчальний процес на кафедрі ЕА факультету електроніки та комп'ютерної Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського з дисциплін: «Основи мікроелектроніки», «Основи технології радіоелектронних засобів», «Технологія деталей», «Патентознавство та авторське право», «Технологія та автоматизація виробництва ЕЗ», «Конструювання та технологія електронної біомедичної апаратури» для студентів напряму 6.050903 – Телекомунікації, 6.050902 – Радіоелектронні апарати, для спеціалістів спеціальності 7.05090204 – Біотехнічні та медичні апарати і системи, 7.05090201 – Радіоелектронні апарати та засоби, а також для магістрантів спеціальності 7.05090204 – Біотехнічні та медичні апарати і системи

Голова комісії

В. О. Мосьпан

Члени комісії

О. В. Фомовська

І. А. Луценко

О. І. Антонова

О. О. Юрко

Ф. В. Фомовський

Д. В. Мосьпан

Д. В. Кухаренко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник
Криворізького коледжу НАУ
Андрусевич А. О.

« 13 » лютого 2016 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес
Криворізького коледжу НАУ
результатів дисертаційної роботи
Палагіна Віктора Андрійовича

Комісія у складі голови: заступника начальника з навчальної роботи – к.т.н., доцента Даниліної Галини Володимирівни, членів комісії: завідувача кафедри радіотехніки та електромеханіки – к.т.н. Цвіркуна Сергія Леонідовича, к.т.н., доцента кафедри радіотехніки та електромеханіки Роздоловського Юрія Михайловича, завідувача кафедри комп'ютерні системи та мережі – к.т.н., доцента Жукової Людмили Леонтіївни, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В. А. на тему: «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Криворізького коледжу Національного авіаційного університету.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі В. А. Палагіна були впроваджені у навчальний процес на кафедрі радіотехніки та електромеханіки факультету «Повітряний транспорт та комп'ютерні технології» Криворізького коледжу Національного авіаційного університету в лекціях, у методичних вказівках та при виконанні практичних, лабораторних, курсових робіт з дисциплін: «Компонентна база радіоелектронної апаратури», «Конструювання радіоелектронної апаратури» та «Радіоелектронні системи» для студентів напряму підготовки 6.050901 "Радіотехніка".

Голова комісії

Члени комісії

Г. В. Даниліна

С. Л. Цвіркун

Л. Л. Жукова

Ю. М. Роздоловський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Конотопського інституту
Сумського державного університету
В.В.Бібік

" 11 07 2020 2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Палагіна Віктора Андрійовича у навчальний процес

Комісія у складі голови: директора Конотопського інституту СумДУ - к.ф.-м.н., доцента Бібіка Віталія Володимировича., членів комісії: к.ф.-м.н., доцента, завідувача кафедри електронних приладів і автоматики Гричановської Тетяни Михайлівни, к.ф.-м.н., доцента, завідувача кафедри фундаментальних та загальнонаукових дисциплін Бурика Івана Петровича, к.т.н., старшого викладача кафедри електронних приладів і автоматики Васильєва Володимира Івановича, к.ф.-м.н., старшого викладача кафедри електронних приладів і автоматики Іващенко Максима Миколайовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В.А. на тему «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Конотопського інституту Сумського державного університету

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі В.А. Палагіна та матеріали підручників, які застосовуються в інституті «Технологія межсоединений електронной аппаратуры» і «Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології» були впроваджені у навчальний процес на кафедрі електронних приладів і автоматики Конотопського інституту при викладанні дисциплін: «Матеріали електронної техніки», «Технологічні основи електроніки», «Технологія тонких плівок» для студентів напрямку 6.050802 – Електронні пристрої та системи.

Голова комісії

Бібік В.В.

Члени комісії

Гричановська Т.М.

Бурик І.П.

Васильєв В.І.

Іващенко М.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ

С.В.О. ректора
Харківського національного
університету радіоелектроніки
Рубін Е.Ю.

2016 р.

АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи
Палагіна Віктора Андрійовича

Комісія у складі голови: декана факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій – д.т.н., проф. Филипенка Олександра Івановича, членів комісії: д.т.н., професора кафедри ТАВР Цимбала Олександра Михайловича, заступника завідувача кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів (ТАВР) з наукової та навчальної роботи – к.т.н., професора кафедри ТАВР Євсєєва Владислава В'ячеславовича, к.т.н., доцента кафедри ТАВР Пономарьової Ганни Вікторівни, к.т.н., доцента кафедри ТАВР Разумова-Фризюка Євгенія Анатолійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В.А. на тему «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі В.А. Палагіна були впроваджені у навчальний процес на кафедрі ТАВР факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій Харківського національного університету радіоелектроніки з дисциплін: «Компоненти та технології мікросистемної радіоелектронної техніки», «Високі технології виробництва та інтелектуальні роботи», «Фізико-хімічні основи технології ЕА», «Мехатронні пристрої роботи технічних систем» для студентів напряму 6.050201 - Системна інженерія; 6.050902 - Радіоелектронні апарати, 6.050202 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, а також для магістрантів та спеціалістів спеціальності 8.05090203 - Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки.

Голова комісії

Члени комісії

О.І. Филипенко

О.М. Цимбал

В.В. Євсєєв

Г.В. Пономарьова

Є.А. Разумов – Фризюк



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Запорізького національного
технічного університету,
к.т.н., проф.

Прушківський В.Г.

"25" 03 2016 р.

АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи
Палагіна Віктора Андрійовича

Комісія у складі голови: декана факультету радіоелектроніки та телекомунікацій – к.т.н., доц. Кабака Владислава Семеновича, членів комісії: к.т.н., доцента кафедри інформаційних технологій електронних засобів Шило Галини Миколаївни, к.т.н., доцента кафедри інформаційних технологій електронних засобів Фарафонов Олексія Юрійовича, к.т.н., старшого викладача кафедри інформаційних технологій електронних засобів Фурманової Наталії Іванівни, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В.А. на тему «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Запорізького національного технічного університету.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі В.А. Палагіна, були впроваджені у навчальний процес на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів факультету радіоелектроніки та телекомунікацій Запорізького національного технічного університету з дисципліни «Основи технології електронних апаратів» для студентів напряму 6.050902 – «Радіоелектронні апарати» та з дисципліни «Мікроелектромеханіка» для магістрів спеціальності 8.05090203 – «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки».

Голова комісії

В.С. Кабак

Члени комісії

Г.М. Шило

О.Ю. Фарафонов

Н.І. Фурманова

Приложение Р
Акты внедрения результатов НИР в производство

УКРАЇНА



УКРАИНА

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
ХАРКІВСЬКИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ТЕХНОЛОГІЇ
МАШИНОБУДУВАННЯ

Україна, 61016, м. Харків-16,
вул. Кривоконівська, 30
Р/р 260023001773 в ХФ АБ «Таврика»,
МФО 351953, ЄДРПОУ 14311070
тел./факс: (057) 372-40-50
E-mail: tehmarsh@ukr.net

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ХАРЬКОВСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Украина, 61016, г. Харьков-16,
ул. Кривоконевская, 30
Р/с 260023001773 в ХФ АБ «Таврика»,
МФО 351953, ОКПО 14311070
тел./факс: (057) 372-40-50
E-mail: tehmarsh@ukr.net

Вих. № _____ від "16" березня 2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

В.о. директора Державного підприємства
«Харківський науково-дослідний
інститут технології машинобудування»
к.т.н., доцент



В.В. Косенко

**Технічний акт
про впровадження у виробництво від 2016 року
результатів науково-дослідної роботи
Палагіна Віктора Андрійовича**

Комісія у складі:

голова комісії: Мовшович Олександр Якович – вчений секретар
ДП «ХНДІТМ», Лауреат Державної премії України, д.т.н., професор;

члени комісії: Кобзев Олександр Сергійович – начальник науково-
технічного відділу ДП «ХНДІТМ», к.т.н., старший науковий співробітник;
Осадчук Алеся Ігорівна – молодший науковий співробітник, склала цей акт
про впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи
Палагіна Віктора Андрійовича на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук на тему «Методологічні основи проектування технологій
виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем».

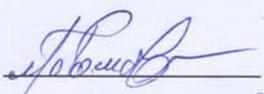
Комісія з розгляду результатів впровадження НДР у виробництво відзначила доцільність використання методів прогнозування виходу придатних виробів, порівняння варіантів розробки технічних об'єктів, зокрема технологічних процесів, та оптимізації управління технологічними процесами у динамічних системах з дискретними станами рекурентними методами прийняття рішень у стохастичних системах, що створює наукову базу для розрахунків рівня розробки технологічних процесів, технологічного оснащення, контролю та розробки автоматизованих систем моніторингу технологічних процесів на

А методологічні основи створення компонентів МЕМС: положення про конвергенцію фізичних явищ різної природи, виключення складальних операцій методами створення гнучко-жорстких конструкцій, аналіз корисних для МЕМС властивостей повітряних, рідинних та твердих станів середовищ та різних видів взаємодії компонентів, можуть суттєво сприяти розвитку мікроелектромеханічних систем, мікросистемної техніки на підприємствах.

Очікуваний економічний ефект складає 35,0 тис. гривень.

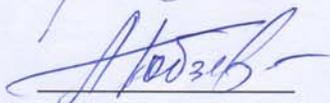
Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої Вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії :

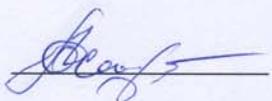


О.Я. Мовшович

Члени комісії:



О.С. Кобзєв



А.І. Осадчук

-Системы ввода данных в СЧПУ
-Системы ЧПУ для фрезерных, карусельных, токарных станков
-Контроллеры.
-Пресс-формы.

 ООО НПФ
Вест Лабс Лтд.
West Labs Ltd

Р/с 26001013007391 в ПАО «СБЕРБАНК», МФО 320627. Свид. плат. НДС № 29454804, ИНН № 226896420352, ОКПО 22689640

Адрес: ул. **Примакова, 46, г. Харьков,**
61004, Украина
Тел./факс: **(057) 783-86-61.**
Тел.: **(057) 783-86-62.**
E-mail: **info@wl.com.ua**
Web-сайт: **www.wl.com.ua**



Технічний акт від 4.03. 2016 р.

впровадження у виробництво результатів науково-дослідної роботи

Палагіна Віктора Андрійовича

«Методологічні основи проектування технологій
виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем»

Комісія у складі: голови директора ООО НПФ "Вест Лабс Лтд" Агадієва А.К. та членів комісії Єремієва М.Б., Ковальова М.А., Неділько О.В., склала цей акт про впровадження у виробництво технічних рішень на підмикальні багатозондові пристрої для контролю параметрів електронних компонентів з кульковими матричними виводами для виявлення дефектів у системах керування технологічного обладнання з числовим програмним управлінням при ремонтних роботах.

Застосування багатозондових підмикальних пристроїв забезпечує можливість доступу до точок контролю завдяки дублюванню зондів підмикального пристрою, а також довільної довжини шлейфу при необхідності з'єднань із спеціальним контрольно-вимірювальними стендами.

Голова комісії:

Агадієв А.К.

Члени комісії:

Єремієв М.Б.

Ковальов М.А.

Неділько О.В.



ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

Державне науково-виробниче підприємство «Об'єднання Комунар»

вул. Григорія Рудика, 8, м. Харків-МСП, 61070, Україна, факс: (057) 707-01-72, E-Mail: kommunar@tvset.com.ua
КОД ЄДРПОУ 14308730

«20» 04 2016 № _____

на № _____ від _____



«Затверджую»

Головний інженер

ДНВП «Об'єднання Комунар»

В.А. Кучма

Технічний акт від 10.05.2016р.

впровадження у виробництво науково-дослідної роботи

Палагіна Віктора Андрійовича

«Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів
мікроелектромеханічних систем»

Комісія у складі: голови – заступника головного технолога – Риндіна Віктора Михайловича та члена комісії провідного інженера-технолога – Нестеренко Анни Григоріївни склала Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Палагіна В.А. на етапі проектування технологічного оснащення операції електричного контролю багатозарових друкованих плат, вхідного контролю компонентів з матрічними кульковими выводами.

Технічний та економічний ефект від впровадження результатів роботи забезпечується:

- застосування багатозондового контактного пристрою у вигляді шлейфу на поліамідному носії з розщепленими зондами для контролю багатозарових друкованих плат, та BGA/CSP-компонентів, який дозволяє перевірити наявність контакту будь-якого зонду пристрою з відповідною точкою контролюємого компоненту, дублювати контакт паралельним з'єднанням окремих частин зонда, що в цілому підвищує надійність операції контролю електричних параметрів, та скорочує час контролю. Сила притискання

контактного пристрою за рахунок дії стисненого повітря на шлейф забезпечує рівномірність притиску окремих зондів та легко регулюється;

- використанням методу прогнозування виходу годящих друкованих плат, який базується на розрахунках питомих значень виходу годящих конструктивних елементів плат, спрощенні розрахунків застосуванням спряжених розподілів ймовірностей.

Враховуючи досить просту конструкцію багатозондового пристрою, у порівнянні з обладнанням аналогічного призначення, його використання на етапах створення дослідних зразків багатозондових контактних пристроїв для операцій контролю електричних параметрів плат та компонентів з матеріальних витрат.

При впровадженні в виробництво очікуваний ефект складає 80 тис.грн. на рік.

Голова комісії



В.М. Риндін

Член комісії



А.Г. Нестеренко



Корпорация Триол
 ООО НПО «Вертикаль»
 пр. Індустріальний, 10-К, Харків, 61007, Україна
 Тел: +38 (057) 766-08-57; Факс: +38 (057) 703-32-52
 office@triolcorp.com.ua
 www.triolcorp.ru

У спеціалізовану вчену раду
 із захисту дисертацій



Затверджую:

Директор ТОВ НВО «Вертикаль»

Лавренчук Я.В.

27.04.2016 р.

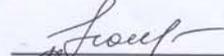
Технічний акт

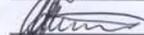
впровадження у виробництво результатів науково-дослідної роботи
 Палагіна Віктора Андрійовича
 «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів
 мікроелектромеханічних систем»

Комісія у складі: голови – Трофімова П.В. та членів комісії – Наумової Т.О., Жигалова О.О. склала цей акт про впровадження у виробництво технічного рішення на мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій БПП для контролю електричних параметрів електронних компонентів з кульковими матричними виводами для виявлення дефектів у системах керування технологічного обладнання при ремонтних роботах. Застосування БПП забезпечує контроль підключення кожного зонда до виводів компонентів і можливість доступу до точок контролю завдяки дублюванню зондів підмикального пристрою, а також достатньої довжини шлейфу при необхідності з'єднань зі спеціальними контрольно-вимірювальними стендами. Очікуваний економічний ефект 167 тис. грн. на рік.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:  (Трофімов П.В.)

Члени комісії:  (Наумова Т.О.)

 (Жигалов О.О.)

For and on behalf of **Confirm**
TITAN MACHINERY LIMITED

The technical act 11.05.2016

Authorized Signature(s)

of using MEMS multiprobe Test fixture in checking-up the electric components
after technical solution by Palagin V.

Committee of staff: Titan Machinery Limited., having its address at HK, 4210, Office Tower, Convention Plaza 1 Harbour Road, Wanchai, Hong Kong, China confirms that MEMS Intellect Multiprobes Contacting Devices for Electrical Checking-up of Multilayers Commutative Boards and BGA/CSP Electronic Components eliminate «False Masking» and «False Alarm» by mean doubling probes to each testing point boards or BGA/CSP components under testing, that is important for reliability checking-up processes.

Test fixture is simple cheap and universal device. Well-known commenting device more complicate and expensive.

Members of committee:

General Manager

Chief Engineer

For and on behalf of
TITAN MACHINERY LIMITED

.....
Authorized Signature(s)

Mr. Liu Shan

Mr. Wu Xiong



ООО «Светодиодные технологии Украина»
61145, Украина, г. Харьков, ул. Новгородская, 3, офис.104
Тел./факс: +38 (057) 720-42-48
email: info@ltu.ua
http://www.ltu.ua

Технічний акт від 31.03.2016
впровадження у виробництво результатів НДР

Палагіна Віктора Андрійовича

«Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем»

Комісія у складі:

- Борщов В.М. – Перший заступник директора, д.т.н., проф.,
- Проценко М.А. – заступник директора з розробок,
- Тимчук І.Т. – заступник директора з виробництва

склала цей акт про позитивний результат використання багатозондового підмикального пристрою з розщепленими на частини зондами для електричного контролю напівпровідникових приладів, наприклад макетів мікросхем зчитування та обробки інформації.

Використані прототипи підмикальних пристроїв відрізняються зручністю у використанні, дозволяють здійснювати електричний контроль тонких (50-100мкм) напівпровідникових пристроїв. Важливою особливістю та перевагою підмикальних пристроїв є наявність можливості здійснення перевірки контактування кожного окремого зонду з відповідною контактною площиною напівпровідникового приладу (внутрішнє тестування), що дозволяє значно підвищити достовірність тестування приладів.

Очікуваний економічний ефект складає 18 тисяч гривень.



Голова комісії

Борщов В.М.

Члени комісії

Проценко М.А.

Тимчук І.Т.