

## ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОТОТОК РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАП-ДЕТЕКТОРОВ

### Введение

Трап-детекторы оптического излучения получили широкое распространение в метрологических центрах мира, как передаточные эталоны (transfer standard) энергетических единиц оптического излучения. Квантовая эффективность трап-детекторов превышает 99,9 %, а воспроизведения мощности оптического излучения эталонов на базе трап-детектора имеет значение менее 0,1 %. Постоянно ведутся работы по совершенствованию устройств на базе трап-детекторов и создаются эталонные средства измерения на их основе. Для улучшения точности измерений необходимо повышать квантовую эффективность трап-детекторов, уменьшать зависимость результата измерений от поляризации входного излучения, увеличивать угол обзора детекторов (field of view) и т.д.

Важным параметром оптического излучения, который влияет на результат измерений трап-детекторов, в частности на аппаратную составляющую неопределенности измерений, является поляризация входного излучения и излучения, распространяющегося внутри детектора. Даже в том случае, когда на вход детектора приходит деполаризованное излучение, внутри детектора, в той или иной степени, в зависимости от конструкции трап-детектора, излучение приобретает плоско-поляризованный или эллиптический вид.

В данной работе построена математическая модель прохождения плоско-поляризованного излучения внутри трап-детектора, по результатам численного моделирования проведено сравнение различных конфигураций трап-детекторов, включая предлагаемую авторами новую модель. Новый трап-детектор имеет незначительную поляризационную зависимость и самую высокую среди рассматриваемых конструкций детекторов квантовую эффективность.

### Обзор конструкций трап детекторов

Трап-детектор был предложен и описан Залевским и Дудой в 1983 г. [1] и запатентован Дудой в 1985 г. [2]. Этот детектор состоит из четырех расположенных последовательно вдоль распространения оптического излучения фотодиодов и имеет свое коммерческое воплощение под названием QED-100. Луч оптического источника, попадая на поверхности фотодиодов, частично поглощается, а оставшаяся энергия луча отражается. Отражаясь от каждого фотодиода в трап-детекторе, луч попадает на последующий по ходу движения луча фотодиод и, отразившись от последнего в цепочке фотодиода, направляется на предыдущий фотодиод, таким образом возвращаясь в систему фотодиодов. Токи от всех фотодиодов суммируются, т.е. фотодиоды электрически соединены друг с другом параллельно. Более экономичная, но менее эффективная модель, состоящая из трех фотодиодов, представлена в [3].

Благодаря многократному попаданию луча на фоточувствительные поверхности фотодиодов внутри трап-детектора практически все оптическое излучение поглощается, следовательно, уменьшаются потери, связанные с отражением излучения от поверхности фотодиодов в структуре детектора и увеличивается значение внешней квантовой эффективности. Уменьшение потерь значительно улучшает линейность спектральной чувствительности трап-детектора по сравнению с отдельными фотодиодами [4].

Недостатками такой схемы является зависимость фототока на ее выходе от поляризации оптического излучения входящего в детектор и распространяющегося внутри него, т.е. данная схема не учитывает направление плоскости поляризации оптического излучения.

Приведем наиболее интересные конфигурации трап-детекторов.

Фирма Sigma Research Technologies (San Marcos Island, FL) разработала трап-детектор под названием Trap-100, состоящий из трех фотодиодов и имеющий «Z»-конфигурацию [5]. Особенностью данной модели является то, что внутренний угол падения излучения на фотодиоды детектора выбран  $9,1^{\circ}$ , что позволяет минимизировать зависимость от поляризации.

Наиболее используемой схемой построения трап-детектора является пространственная конфигурация, представленная в [5]. Данная конфигурация наиболее адаптирована к влиянию поляризации излучения на квантовую эффективность детектора и имеет свое коммерческое воплощение под названием QED-200. За счет наклона фотодиодов по отношению к направлению распространения луча под углом  $45^{\circ}$  в разных плоскостях снижается зависимость фототока детектора от поляризации излучения, отраженного от поверхности фотодиодов [5].

Для уменьшения потерь, связанных с отражением излучения в рассмотренных выше фотодетекторах, предлагается новая конструкция трап-детектора [3, 6, 7], представленная на рис. 1, которая обеспечивает большее число переотражений луча в структуре детектора без увеличения числа фотодиодов.

Ближайший существующий аналог новой конструкции представлен на рис. 2, который описывает распределение отраженной мощности оптического излучения внутри трап-детектора, и представляет трехдиодный вариант четырехдиодной конструкции трап-детектора [1].

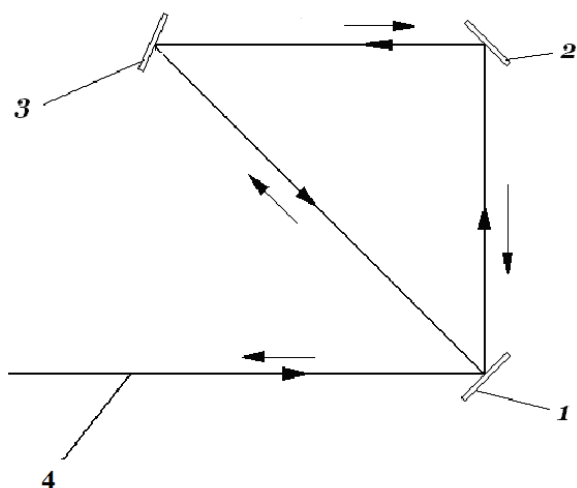


Рис. 1. Новая модель трап-детектора на базе трех фотодиодов

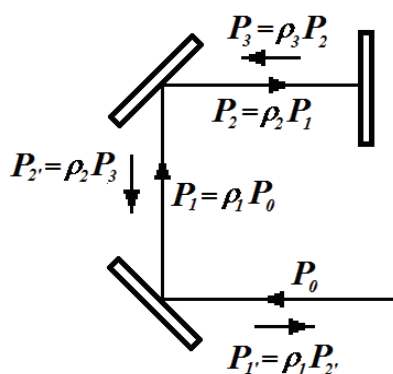


Рис. 2. Распределение отраженной мощности оптического излучения внутри трап-детектора

В предлагаемой новой конфигурации трап-детектора, построенной из трех фотодиодов, луч 4 падает на фотодиод 1 и далее последовательно отражается на фотодиоды 2 и 3. Фотодиод 3 отражает луч не обратно на фотодиод 2, как в известных конфигурациях трап детекторов, таких как на рис. 2, а отражает луч на фотодиод 1. Луч при этом падает на фотодиод 1 по нормали и затем возвращается обратно в систему фотодиодов, отражаясь от фотодиода 1 на фотодиод 3 и далее на фотодиоды 2 и 1. В результате число отражений увеличивается с 5 до 7 в схемах из трех фотодиодов. Таким образом, в классической схеме происходит  $2N-1$  переотражение [5], а в предлагаемой схеме –  $2N+1$  переотражение, где  $N$  – число фотодиодов в трап детекторе.

Новая конфигурация трап-детектора является поляризационно-зависимой, как и вариант, приведенный на рис. 2. Но за счет большего числа попаданий на фоточувствительные поверхности фотодиодов увеличивается значение поглощенной мощности и, следовательно, уменьшается влияние поляризации на результат измерений.

Как отмечалось выше, недостатком трап-детекторов является зависимость многих моделей от поляризации входного излучения. Это усугубляется и тем, что фотодиоды в детекторе расположены под углом к падающему излучению, что увеличивает поляризованность

отраженного от них излучения. Даже поляризационно-независимые трап-детекторы, такие, как в [5], при малейшем отклонении юстировки от идеальной в значительной мере становятся поляризационно-зависимыми [8].

### Модель поляризации мощности оптического излучения, распространяющегося в трап-детекторе

Для анализа поляризационной зависимости различных конструкций трап-детекторов необходимо составить модель распространения плоско-поляризованного излучения внутри трап-детектора. При этом модель должна эмулировать возможность поворота плоско-поляризованного оптического излучения на входе детектора и благодаря этому анализировать влияние направления плоскости поляризации относительно плоскости падения луча.

Для этого необходимо разложить вектор поляризации плоско-поляризованного оптического луча на входе в трап-детектор на две составляющие: составляющую вектора в плоскости падения луча на поверхность фотодиода  $p$  и составляющую вектора в перпендикулярной ей плоскости  $s$ . Так как луч внутри трап-детектора падает на поверхности фотодиодов под углом к нормали, то поглощение и отражение излучения фотодиодами для разных составляющих поляризации излучения будут различными. Поэтому в рассматриваемой модели мощность излучения, отраженная фотодиодами, рассчитывается отдельно для каждой составляющей вектора поляризации. При этом неотраженная (поглощенная) мощность участвует в генерации тока на выходе фотодиода. Таким образом, ток фотодиода зависит от коэффициента отражения данного фотодиода и от мощности, отраженной от предыдущего фотодиода (либо входной мощности для первого в трап детекторе фотодиода). Благодаря конструкции трап-детекторов излучение попадает на фотодиоды трап-детектора больше одного раза. Тогда токи, возникающие в фотодиоде при каждом попадании луча на фотодиод, суммируются. Общий ток трап-детектора равен сумме токов от всех фотодиодов, входящих в состав трап-детектора.

На рис. 2 показано распределение отраженной мощности оптического излучения внутри трап-детектора, справедливое как для  $p$ -поляризации, так и для  $s$ -поляризации.

Мощность, отразившаяся от поверхности фотодиода, равна произведению коэффициента отражения  $\rho_i$  данного фотодиода к падающей на него мощности оптического излучения  $P_{i-1}$ .

В табл. 1 – 4 приведены последовательности, в которых оптический луч отражается от фотодиодов внутри трап-детекторов различных конфигураций и указаны углы отражения луча от поверхности фотодиодов относительно нормали. Количество штрихов возле номера фотодиода означает количество повторных отражений от данного фотодиода.

Таблица 1

	Последовательность отражения оптического луча от фотодиодов внутри трехдиодного трап-детектора QED-100				
Номер фотодиода	1	2	3	2'	1'
Угол падения луча на фотодиод относительно нормали к его поверхности	45°	45°	0°	45°	45°

Таблица 2

	Последовательность отражения оптического луча от фотодиодов внутри трап-детектора Трап-100				
Номер фотодиода	1	2	3	2'	1'
Угол падения луча на фотодиод относительно нормали к его поверхности	9,1°	9,1°	0°	9,1°	9,1°

Таблица 3

	Последовательность отражения оптического луча от фотодиодов внутри трап-детектора QED-200				
Номер фотодиода	1	2	3	2'	1'
Угол падения луча на фотодиод относительно нормали к его поверхности	45°	45°	0°	45°	45°

Таблица 4

	Последовательность отражения оптического луча от фотодиодов внутри новой конфигурации трап-детектора (рис. 1)						
Номер фотодиода	1	2	3	1'	3'	2'	1''
Угол падения луча на фотодиод относительно нормали к его поверхности	45°	45°	22,5°	0°	22,5°	45°	45°

В конструкции трап-детектора QED-200 (табл. 3) из-за пространственного расположения фотодиодов относительно распространяющегося в нем луча векторы  $s$  и  $p$  поляризации при первом попадании на второй фотодиод и втором попадании на первый фотодиод меняются местами, т.е. мощность  $s$ -составляющей поляризации излучения становится равной мощности  $p$ -составляющей поляризации и наоборот.

Рассмотрим модель распространения плоско-поляризованного оптического излучения внутри трап-детектора более подробно.

На практике вращение плоско-поляризованного излучения на входе трап-детектора можно реализовать, выделив из деполаризованного излучения плоско-поляризованную волну при помощи призмы Глана, а затем вращать полученную плоско-поляризованную волну полуволновой поляризационной пластинкой.

Рассмотрим конструкции трап-детекторов у которых диоды расположены в одной плоскости. Это конструкции QED-100 с 4-диодным и 3-диодным исполнением, Трап-100 и новая модель трап-детектора. Для детектора QED-200 в расчетах при первом попадании на второй фотодиод и втором попадании на первый фотодиод значения мощностей для  $s$  и  $p$  поляризации меняются местами.

После поворота полуволновой пластины на угол  $\varphi$  относительно плоскости падения луча электрический вектор  $E$  можно разложить на две составляющие:

$$E_y = E \cos \varphi, \quad (1)$$

лежащую в плоскости падения луча на фотодиод и на перпендикулярную составляющую

$$E_x = E \sin \varphi. \quad (2)$$

Так как амплитуда электромагнитной волны  $A$  пропорциональна электрическому вектору  $E$ , то можно написать для амплитуд луча падающего на  $i$ -й фотодиод:

$$A_p = A \cos \varphi, \quad (3)$$

$$A_s = A \sin \varphi, \quad (4)$$

где индексами  $p$  и  $s$  обозначены плоскость падения луча на поверхность фотодиода и перпендикулярную к ней плоскость соответственно. При этом подразумевается, что плоскость падения  $p$  совмещена с осью  $y$ , а плоскость  $s$  – с осью  $x$ .

Интенсивность и мощность луча пропорциональны квадрату амплитуды, т.е.

$$I \sim P \sim A^2. \quad (5)$$

Величины отраженных составляющих могут быть найдены с помощью формул Френеля:

$$R_{p_i} = \frac{n_2 \cos \theta_{1_i} - n_1 \cos \theta_{2_i}}{n_2 \cos \theta_{1_i} + n_1 \cos \theta_{2_i}} A_{p_{i-1}}, \quad (6)$$

$$R_{s_i} = \frac{n_1 \cos \theta_{1_i} - n_2 \cos \theta_{2_i}}{n_1 \cos \theta_{1_i} + n_2 \cos \theta_{2_i}} A_{s_{i-1}}, \quad (7)$$

где  $\theta_{1_i}$  и  $\theta_{2_i}$  – углы падения и преломления соответственно  $i$ -го фотодиода,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления воздуха и активного слоя фотодиода соответственно. Предполагаем, что  $n_2$  одинаков у всех фотодиодов в составе трап-детектора.

Исключим угол преломления луча  $\theta_{2_i}$ , воспользовавшись формулой Снелиуса:

$$n_1 \sin \theta_{1_i} = n_2 \sin \theta_{2_i}, \quad (8)$$

отсюда

$$\sin \theta_{2_i} = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{1_i}. \quad (9)$$

Воспользовавшись тригонометрическим соотношением

$$\sin^2 \theta_{2_i} + \cos^2 \theta_{2_i} = 1, \quad (10)$$

получим

$$\cos^2 \theta_{2_i} = 1 - \sin^2 \theta_{2_i} = 1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_{1_i}. \quad (11)$$

Тогда формулы Френеля запишутся так:

$$R_{p_i} = \frac{n_2 \cos \theta_{1_i} - n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_{1_i}}}{n_2 \cos \theta_{1_i} + n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_{1_i}}} A_{p_{i-1}}, \quad (12)$$

$$R_{s_i} = \frac{n_1 \cos \theta_{1_i} - n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_{1_i}}}{n_1 \cos \theta_{1_i} + n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_{1_i}}} A_{s_{i-1}}. \quad (13)$$

Возведем в квадрат левую и правую части (13), обозначив через  $r_{p_i}$  и  $r_{s_i}$  соответствующие дроби:

$$R_{p_i}^2 = r_{p_i}^2 A_{p_{i-1}}^2 = r_{p_i}^2 P_{p_{i-1}}, \quad (14)$$

$$R_{s_i}^2 = r_{s_i}^2 A_{s(i-1)}^2 = r_{s_i}^2 P_{s(i-1)}, \quad (15)$$

где учтено (5), которое справедливо и для составляющих амплитуды и мощности.

Теперь можно выразить суммарное значение мощности отраженного луча через квадрат модуля результирующего вектора амплитуды:

$$P_i \sim R_i^2 = R_{p_i}^2 + R_{s_i}^2 = r_{p_i}^2 A_{p(i-1)}^2 + r_{s_i}^2 A_{s(i-1)}^2. \quad (16)$$

Или после подстановки (3) – (4)

$$P_i \sim R_i^2 = r_{p_i}^2 A_{i-1}^2 \cos^2 \varphi + r_{s_i}^2 A_{i-1}^2 \sin^2 \varphi = A_{i-1}^2 (r_{p_i}^2 \cos^2 \varphi + r_{s_i}^2 \sin^2 \varphi). \quad (17)$$

Введем коэффициент отражения  $\rho_i$ , который показывает, какая часть энергии отражается по отношению к падающей (с учетом (17)):

$$\rho_i = \frac{R_i^2}{A_{i-1}^2} = \frac{A_{i-1}^2 (r_{p_i}^2 \cos^2 \varphi + r_{s_i}^2 \sin^2 \varphi)}{A_{i-1}^2} = r_{p_i}^2 \cos^2 \varphi + r_{s_i}^2 \sin^2 \varphi. \quad (18)$$

Соответственно коэффициент поглощения

$$\tau_i = \frac{T_i^2}{A_{i-1}^2}. \quad (19)$$

Из закона сохранения энергии (сумма отраженной и поглощенной энергии равна падающей энергии) получим

$$\tau_i + \rho_i = 1 \text{ или } \tau_i = 1 - \rho_i. \quad (20)$$

Ток фотодиода [3]

$$I = k\tau_i A_{i-1}^2 = \frac{qn\lambda}{hc} \eta (1 - \rho_i) P_{i-1}, \quad (21)$$

где учтено, что  $A_{i-1}^2 \sim P_{i-1}$  в соответствии с (5);  $P_{i-1}$  – мощность падающего луча,  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $e$  – элементарный заряд;  $n$  – коэффициент преломления воздуха;  $\lambda$  – длина волны излучения, падающего на фотодиод;  $\rho_i$  – коэффициент отражения от поверхности  $i$ -го фотодиода;  $\eta$  – внутренняя квантовая эффективность:

$$\eta = \zeta (1 - e^{-\alpha(\lambda)\omega}), \quad (22)$$

где  $\zeta$  – часть пар электрон-дырок, которая берет участие в фототоке (в относительных единицах);  $\alpha(\lambda)$  – зависящий от длины волны коэффициент поглощения активного слоя фотодиода;  $\omega$  – толщина слоя фотодиода, на которой поглощается оптическая мощность.

Ток трап-детектора определяется, как сумма токов всех фотодиодов, которые входят в его состав. При этом необходимо учитывать, что, токи отдельных фотодиодов являются суммой токов возникших в результате нескольких попаданий луча на данный фотодиод. Количество и последовательность таких попаданий отображено в табл. 1 – 4.

Таким образом, ток фотодетектора определяется из выражения

$$I = \sum_{i=1}^N (k\tau_i A_{i-1}^2) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{qn\lambda}{hc} \eta (1 - \rho_i) P_{i-1} \right), \quad (23)$$

где  $i$  – порядковый номер отражения оптического луча в трап-детекторе;  $N$  – количество отражений оптического луча в трап-детекторе.

### Результаты моделирования поляризационной зависимости для различных конфигураций трап-детекторов

Рассмотрим 3-диодные конструкции трап детекторов и сравним полученные поляризационные зависимости излучения, прошедшего через трап-детектор. Критерием оценки может служить зависимость тока на выходе детектора от поляризации входного оптического излучения и внешняя квантовая эффективность трап-детекторов. Чем меньше зависимость от поляризации и выше внешняя квантовая эффективность, тем детектор более полно поглощает мощность оптического излучения, преобразуя ее в фототок.

На рис. 2 представлена конструкция детектора, являющаяся 3-диодным аналогом «плоского» 4-диодного трап-детектора, представленного в [1] и являющегося первой предложенной конструкцией трап-детектора. Конструкция на рис. 2, является прототипом предлагаемой нами модели трап-детектора и их сравнение позволит выделить преимущества предложенной модели.

Детектор Trap-100 является конструктивно наиболее близким 3-диодным промышленно-выпускаемым детектором к предлагаемой новой модели детектора, представленной на рис. 1. В то же время наиболее используемым трап-детектором оптического излучения является 3-диодный «пространственный» трап-детектор QED-200. Поэтому с этими типами трап-детекторов также было проведено сравнение предлагаемой новой конструкции.

Таким образом, детектор, являющийся аналогом QED-100, но состоящий из трех диодов (рис. 2), мы рассматриваем как наиболее подобный новой предлагаемой конструкции – в новой конструкции изменен только угол наклона третьего диода относительно оптической оси детектора. Детектор TRAP-100 наиболее схожий с новой конструкцией промышленно-выпускаемый трап-детектор. Пространственная конструкция QED-200 является наиболее используемым в настоящее время в метрологии и промышленности типом трап-детектора.

Численное моделирование поляризационной зависимости и квантовой эффективности рассматриваемых трап-детекторов осуществлялось для параметров, приведенных в табл. 5.

Таблица 5

Мощность оптического излучения на входе трап-детектора, $P$	100 мВт
Коэффициент поглощения, $\alpha(\lambda)$	$1 \times 10^5$
Толщина поглощающего слоя, $\omega$	$2 \times 10^{-5}$ м
Часть электрон-дырок, $\zeta$	1
Длина волны, $\lambda$	633 нм
Коэффициент преломления воздуха, $n$	1

Результат моделирования зависимостей фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для исследуемых детекторов и фотодиодов 1 – 3 их составляющих, представлены на рис. 3 – 6. Фотодиоды 1 – 3 пронумерованы в соответствии с их расположением по ходу оптического луча в трап-детекторе.

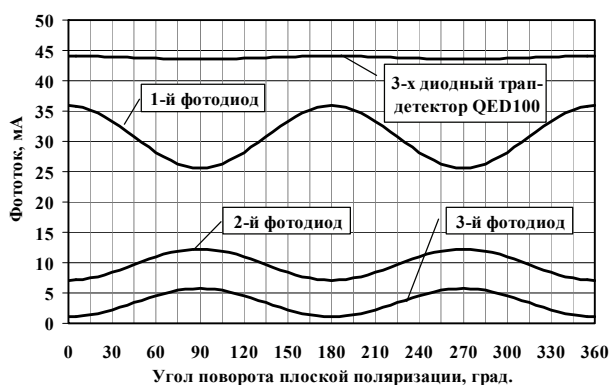


Рис. 3. Зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для 3-диодного аналога трап-детектора QED100 и фотодиодов, его составляющих (рис. 2)

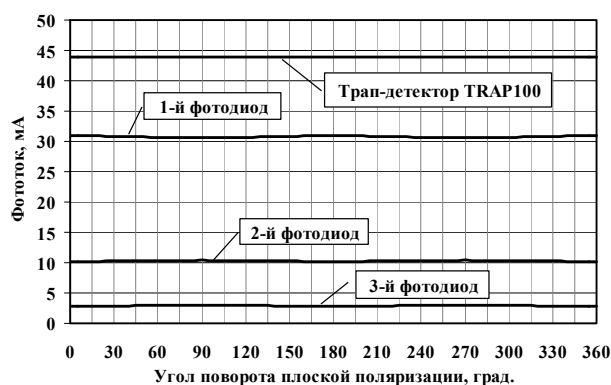


Рис. 4. Зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для Z-образного трап-детектора TRAP100 и фотодиодов, его составляющих

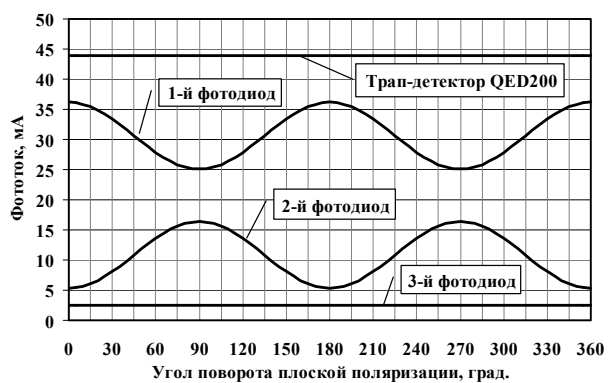


Рис. 5. Зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для трап-детектора QED200 и фотодиодов, его составляющих

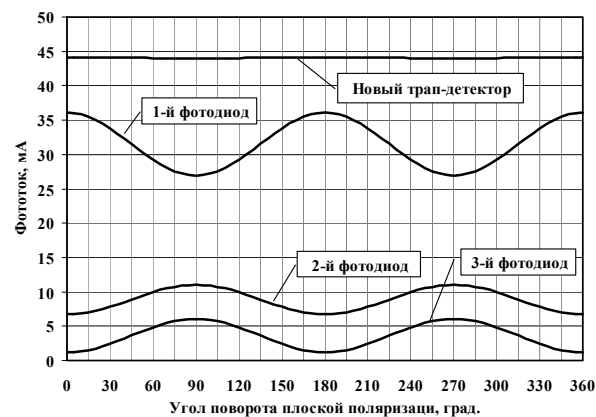


Рис. 6. Зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для нового трап-детектора и фотодиодов, его составляющих (рис. 1)

Сравнение зависимостей фототоков четырех исследуемых детекторов от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения на их входе представлены на рис. 7.

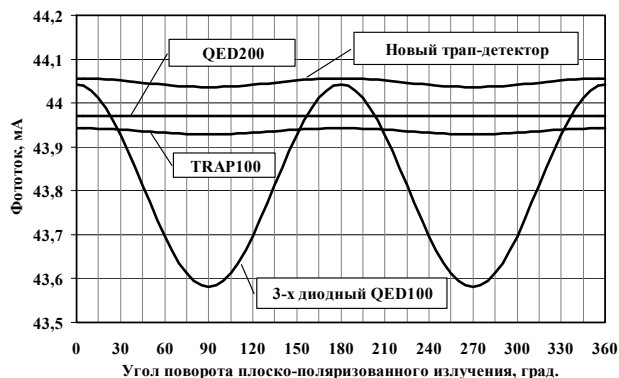


Рис. 7. Зависимости фототоков четырех исследуемых детекторов от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения на их входе

Форма кривых поляризационных зависимостей совпадает с формой полученных численным моделированием зависимостей в [8, 9].

Коэффициенты поляризации рассматриваемых детекторов приведены в табл. 6.



Таблица 6

Название детектора	Количество переотражений	Коэффициент поляризации
3-диодный QED-100	5	5,26E-03
TRAP-100	5	1,63E-04
QED-200	5	0
Новая модель	7	2,25E-04

В табл. 7 представлены результаты численного моделирования фототоков рассматриваемых трап-детекторов. Показаны абсолютные значения фототоков детекторов и их квантовая эффективность при угле поворота плоскости поляризации входящего плоско-поляризованного оптического излучения  $90^{\circ}$  и  $180^{\circ}$ . Квантовая эффективность условно определялась из соотношения тока рассматриваемых детекторов и идеализированного значения фототока, найденного по выражению (23) при нулевом коэффициенте отражения с прочими равными условиями и равного  $i_{ideal}=44,06$  мкА.

Таблица 7

Название детектора	Угол поворота плоскости поляризации излучения			
	$90^{\circ}$		$180^{\circ}$	
	Фототок	Квантовая эффективность	Фототок	Квантовая эффективность
	мА	%	мА	%
3-диодный QED-100	43,58	98,9156	44,04	99,9619
TRAP-100	43,93	99,7033	43,94	99,7358
QED-200	43,97	99,7967	43,97	99,7967
Новая модель	44,04	99,9483	44,06	99,9933

## Выводы

Анализируя графики рис. 3 – 7 и табл. 6 – 7, можно сделать вывод, что наиболее поляризационно-зависимым является рассматриваемый 3-диодный QED-100. Детектор QED-200 в идеальном случае обладает нулевой зависимостью от поляризации входящего оптического излучения, но у него не самая высокая из рассматриваемых конструкций квантовая эффективность (определяющая уровень фототока). Детектор TRAP-100 и новая конструкция детектора обладают незначительной зависимостью от поляризации входящего излучения, значения которой на порядок лучше точностных требований, предъявляемых к передаточным эталонам (transfer standard) на основе трап-детекторов и приближается к точностям криогенного радиометра. При этом на выходе новой конструкции трап-детектора генерируется максимальный уровень тока из всех рассматриваемых типов детекторов, т.е. новая конструкция обладает наибольшей квантовой эффективностью. Квантовая эффективность новой конструкции на 0,25 – 0,26 % выше детектора TRAP-100 и на 0,15-0,2 % выше детектора QED-200 (для длины волны излучения 633 нм). Относительно детектора QED-100 в 3-диодной конфигурации, квантовая эффективность новой конструкции выше более чем на 1 %. Это довольно хороший результат, учитывая то, что точность воспроизведения единицы мощности оптического излучения эталонов на базе трап-детекторов менее 0,1 %.

**Список литературы:** 1. E. F. Zalewski. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency / E. F. Zalewski, C. R. Duda // Applied Optics. – 15 September 1983. – Vol. 22, № 18. – p. 2867-2873. 2. Absolute radiometric detector: patent 4498012 United States: Int. Cl. G01J 1/42 / C. Richard Duda – № 463258; filed Feb. 2, 1983; Feb. 5, 1985. 3. Татьяна, Д.Н. Трап детектор оптического излучения с улучшенными характеристиками / Д.Н. Татьяна // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8, № 1. – С. 94-98. 4. K. D. Stock. Spectral characterization of InGaAs trap detectors and photodiodes used as transfer standards / K. D. Stock, R. Heine. // Metrologia. – 2000. – 37. – p. 449-452. 5. J. M. Palmer. Alternative Configurations for Trap Detectors / J. M. Palmer // Metrologia. – 1993. – 30. – p. 327-333. 6. Трап-детектор: патент на винахід 87197 Україна: МПК (2009) G01J 5/02, G01J 5/20, G01J 1/42 / Татьяна Д. М. – № а200710120; заявл. 10.09.2007; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12/2009. 7. Трап-детектор: патент на изобретение 2405129 Российская Федерация: МПК G01J 1/42 (2006.01) / Татьяна Д. Н. – № 2008137072/28; заявл. 15.09.2008; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 33. 8. R. Goebel. Polarization dependence of trap detectors / R. Goebel, S. Yilmaz, R. Pello // Metrologia. – 1996. – 33 – pp. 207-213. 9. P. Kohns. Influence of polarization and misalignment of the signal of a trap detector. / P. Kohns, A. Krasnogorov, Yu. Machechin // Радиотехника. – 2003. – Вып. 131 – С. 150-154.

ИРЭ НАНУ

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.01.2014