

УДК 621.382

## Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными одноэлементными фотоприемниками

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К.,  
Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 20.07.2018

Принята к печати 28.08.2018

Современные измерительные преобразователи систем оптической диагностики должны автоматически оценивать параметры оптического сигнала и переключаться между различными диапазонами энергетической и спектральной характеристиками чувствительности. Это требует применения нескольких фотоприемников, сложных оптических схем и сложных алгоритмов обработки измерительных сигналов. Целью работы являлся анализ применимости многофункциональных одноэлементных фотоэлектрических преобразователей на базе полупроводников с низкой концентрацией глубокой примеси, формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, в измерительных преобразователях систем оптической диагностики.

Относительная сложность физических процессов при перезарядке нескольких энергетических уровней многозарядной глубокой примеси позволяет реализовать многофункциональность фотоэлектрического преобразователя при простой конструкции чувствительного элемента.

Показано, что фотоэлектрические одноэлементные преобразователи характеризуются расширенными функциональными характеристиками и увеличенными диапазонами энергетической (на несколько десятков децибел) и спектральной характеристик чувствительности (со сдвигом на 2–4 мкм в диапазоне спектральной чувствительности 1–10 мкм) с возможностью переключения между поддиапазонами энергетической и спектральной характеристик чувствительности под действием как измерительного сигнала, так и дополнительных управляющих воздействий. В качестве основного материала резистивной или барьерной структуры фотоприемника могут использоваться германий, кремний, полупроводниковые соединения типа  $A^3B^5$  и другие материалы, в том числе совместимые с «не кремниевыми» технологиями и структурами на сапфировых подложках.

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, оптическая диагностика, датчик многофункциональный, фотоприемник, одноэлементный фотоприемник.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-3-215-226

**Адрес для переписки:**

Тявловский К.Л.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

**Address for correspondence:**

Tyavlovsky K.L.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

**Для цитирования:**

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К.,  
Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.  
Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными одноэлементными фотоприемниками. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 3. – С. 215–226.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-3-215-226

**For citation:**

Vorobei R.I., Gusev O.K., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K.,  
Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I.  
[Measuring transducers for optical diagnostic system with multifunctional unitary photovoltaic converters].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2018, vol. 9, no. 3, pp. 215–226 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-3-215-226

# Measuring transducers for optical diagnostic system with multifunctional unitary photovoltaic converters

Vorobei R.I., Gusev O.K., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 20.07.2018

Accepted for publication 28.08.2018

## Abstract

Modern measuring transducers for optical diagnostic system should perform automatic parameter estimation of optical signal and automatic switching between different energetic and optical sensitivity ranges. Traditional solution of this problem lies in the field of multi-sensory systems, complex optical schemes and complex signal processing algorithms. The paper aims at the development of new measuring transducers for optical diagnostic system on a basis of multifunctional unitary photovoltaic converters built on semiconductors with low-concentration deep dopants that form multiple energy levels for different charge states in the band gap.

Relative complexity of physical processes accompanying the recharge of several energy levels of multiply-charged deep dopant makes it possible to realize the multifunctionality of a photoelectric converter albeit simple sensor design.

The proposed unitary photovoltaic converters proved to have extended functional characteristics and increased ranges of energetic characteristic (by dozens dB) and spectral sensitivity characteristic with possible shifts of red margin by 2 to 4  $\mu\text{m}$  in the spectral sensitivity range of 1–10  $\mu\text{m}$ . Energetic and spectral sensitivity characteristic ranges could be switched either by measurement signal itself or by additional control inputs. Possible materials for resistive or barrier photovoltaic converter structure are Germanium, Silicon,  $\text{A}^3\text{B}^5$  systems and other semiconductors including that compatible with «non-silicon» technologies and structures on sapphire substrate.

**Keywords:** measuring transducer, optical diagnostics, multifunctional converter, photovoltaic converter, unitary photovoltaic.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-3-215-226

---

### Адрес для переписки:

Тявловский К.Л.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

### Address for correspondence:

Tyavlovsky K.L.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

### Для цитирования:

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К.,  
Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.  
Измерительные преобразователи систем оптической диагностики  
с многофункциональными одноэлементными фотоприемниками.  
Приборы и методы измерений.  
2018. – Т. 9, № 3. – С. 215–226.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-3-215-226

### For citation:

Vorobei R.I., Gusev O.K., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K.,  
Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I.  
[Measuring transducers for optical diagnostic system with  
multifunctional unitary photovoltaic converters].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2018, vol. 9, no. 3, pp. 215–226 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-3-215-226

## Введение

Оптические методы диагностики<sup>1</sup> обеспечивают, как правило, неразрушающий характер контроля, дистанционны, применимы для определения разнородных характеристик изделия – от его геометрических размеров до химического состава. Оптические методы применяются и для контроля технологических и физических процессов. Применение методов оптической диагностики целесообразно в противоположных случаях: когда необходимо исключить влияние средств измерения на объект контроля или в случае, когда сам объект контроля представляет опасность для измерительной аппаратуры и оператора. В основе оптических методов диагностики лежат как определенные модели исследуемого объекта, так и модели оптического сигнала и процессов формирования оптических характеристик сложных объектов, какими являются, например, неоднородная нестационарная плазма, двигательные реактивные установки, биоткани [1–3]. Системы диагностики с использованием оптических методов контроля можно разделить на три группы:

1. Визуальный и визуально-оптический методы основаны на оценке качества изделия оператором, наиболее просты, но характеризуются субъективностью и нестабильностью оценок.

2. Фотометрический, денситометрический, спектральный и телевизионный методы строятся на результатах аппаратурных измерений, обеспечивают объективность контроля, их применение близко к работе с электронно-измерительными приборами.

3. Интерференционный, дифракционный, рефрактометрический, поляризационный, стробоскопический и голографический методы используют волновые свойства света и позволяют производить неразрушающий контроль объектов с чувствительностью до десятых долей длины волны источника излучения.

Задачи оптической диагностики связаны с анализом и регистрацией изображений областей, находящихся в рассеивающих оптическое излучение средах. В любом случае сущность оптических методов сводится к регистрации

абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т. п. Каждому из методов, в зависимости от свойств объекта контроля среды передачи, должна соответствовать своя совокупность свойств источника и приемника излучения.

Характеристики систем оптической диагностики во многом определяются свойствами узлов измерительной системы, которые непосредственно взаимодействуют с объектом контроля. Это источники оптического излучения и фотоприемники измерительных преобразователей. Задачи, стоящие перед измерительными преобразователями систем оптической диагностики, обусловлены процессами, происходящими при взаимодействии внешнего оптического излучения со средой объекта контроля [1–3]. В ряде случаев сам объект контроля является источником излучения. И именно способность фотоприемника и измерительного преобразователя производить предварительную обработку и регистрацию абсолютных и относительных значений мощности оптического сигнала, его спектрального состава, временных параметров и т. д. определяет возможности системы диагностики в целом [4–6]. Сложность объектов контроля, их временная и пространственная нестабильность и неоднородность, широкие динамические диапазоны изменения параметров определяют необходимость использования измерительных преобразователей способных автоматически оценивать величину сигнала и переключаться между несколькими диапазонами измерения [6], формировать измерительный сигнал, определяемый несколькими входными факторами. Построение измерительных преобразователей систем оптической диагностики на базе традиционных фотоприемников требует применения нескольких фотоприемников, сложных оптических схем и сложных алгоритмов обработки измерительных сигналов.

Целью работы является анализ применимости многофункциональных одноэлементных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на базе полупроводников с низкой концентрацией глубокой примеси, формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, в измерительных преобразователях систем оптической диагностики.

<sup>1</sup>Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения / Национальный стандарт Российской Федерации. – ГОСТ Р 53696. – 2009.

## Измерительные преобразователи систем оптической диагностики

Многофункциональный датчик в общем случае может включать совокупность одного или нескольких конструктивно объединенных чувствительных элементов, размещенных в зоне действия нескольких физических величин, а также формирующих

соответствующие сигналы посредством преобразовательных (передаточных) функций [4, 6]. При этом многофункциональность датчика, включая внешнее или внутреннее управление диапазонами измерения, часто реализуется при изменении режимов и параметров питания и электрического смещения на управляющих электродах фотоэлектрического преобразователя ФЭП (рисунок 1).

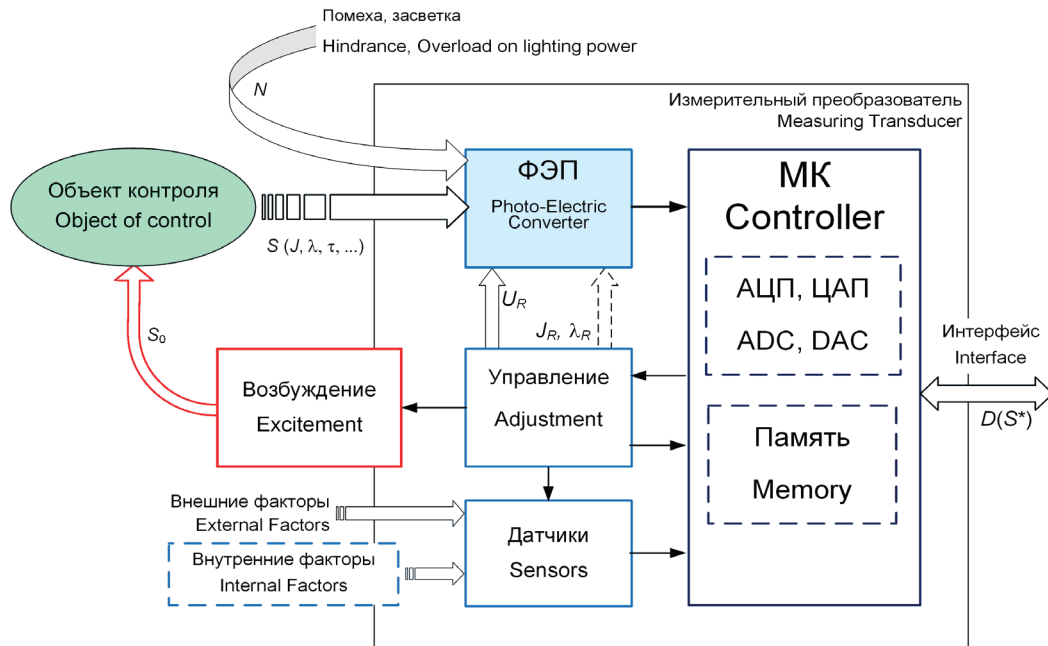


Рисунок 1 – Измерительный преобразователь системы оптической диагностики

Figure 1 – Measuring transducer for optical diagnostic system

В измерительном преобразователе системы оптической диагностики сигнал с выхода ФЭП поступает на входы микроконтроллера МК, содержащего встроенные узлы аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей АЦП, ЦАП, адаптеры интерфейсов для связи с остальными узлами системы оптической диагностики. МК выполняет формирование управляющих сигналов для изменения режимов работы и питания ФЭП, может производить и простые операции предварительной обработки информации, в том числе в зависимости от результата предыдущих процедур измерения. Формирование сигналов управления может производиться или только под действием программы, или в зависимости от сигналов датчиков состояния окружающей среды и внутренних узлов измерительного преобразователя, и в зависимости от внешних управляющих сигналов, поступающих через интерфейс. Выходным сигналом измерительного преобразователя является совокупность значений измерительного сигнала  $D$ , содержащая

информацию о значимых параметрах образа  $S^*$  входного оптического сигнала  $S$ .

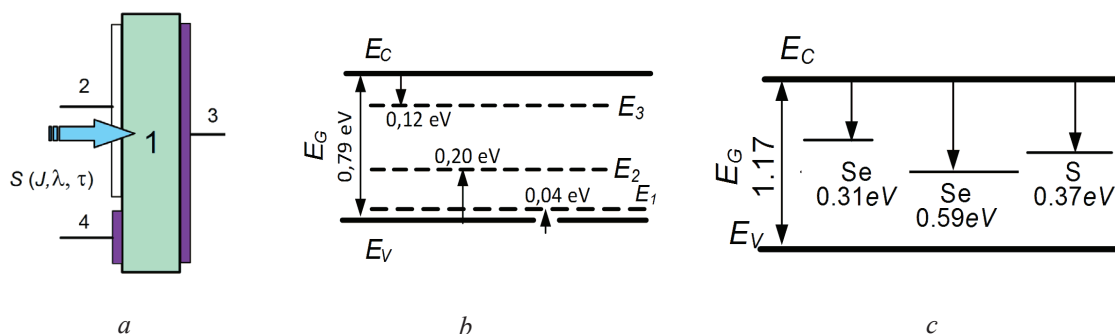
Характеристиками: функциональностью и параметрами ФЭП можно управлять выбором структуры и материала основного полупроводника, технологией изготовления, режимами питания и смещения, дополнительным оптическим излучением [4–8].

Поэтому важной задачей при разработке систем оптической диагностики является оценка возможностей первичных измерительных преобразователей с использованием фотоприемников. Многообразие свойств объектов контроля требует применения в измерительных преобразователях фотоприемников с различными функциональными свойствами, чувствительных или нечувствительных к спектральному составу оптического излучения, чувствительных к слабым оптическим сигналам или сохраняющим чувствительность при высокой интенсивности сигнала [6–7]. В ряде случаев требуется применение фотоприемников чувствительных к нескольким физическим параметрам.

## Многофункциональные фотоприемники на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями

Фотоэлектрические преобразователи [4–7] изготавливают на основе либо полупроводников с примесной (с концентрацией до  $10^{19}$  см $^{-3}$ ) проводимостью, либо полупроводников с собственной фотопроводимостью. В первом случае достигается высокая чувствительность, но уже при малой плотности мощности наблюдается насыщение передаточной характеристики. Во втором случае насыщения не происходит и

при высоких плотностях мощности оптического излучения, но чувствительность фотоприемника существенно ниже. В основе предлагаемых для построения измерительных преобразователей систем оптической диагностики ФЭП лежит физическая интеграция процессов внутри объема чувствительного элемента, построенного на базе полупроводника с низкой концентрацией глубокой примеси [6], формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, с поверхностно-барьерной или резистивной структурой (рисунок 2).



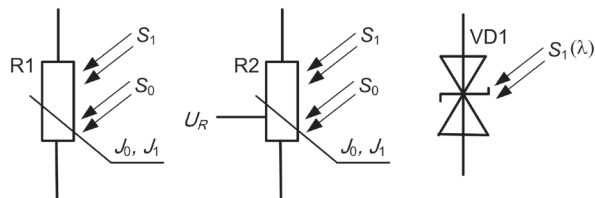
**Рисунок 2** – Конструкция ФЭП (a) и энергетические диаграммы собственного полупроводника: (b) Ge, легированного Pt ( $E_1, E_2, E_3$  – энергетические уровни платины в зарядовых состояниях  $(-2, -1), (-3, -2), (-1, 0)$  eV) и энергетические уровни примесей Se и S в кремнии (c)

**Figure 2** – Photovoltaic converter design (a) and energy diagrams of intrinsic semiconductor: (b) Ge doped with Pt ( $E_1, E_2, E_3$  are Platinum energy levels for charge states  $(-2, -1), (-3, -2), (-1, 0)$  eV) and (c) energy levels of Se and S dopants in Silicon

Для формирования таких ФЭП (рисунок 2a) в полупроводник 1 с собственной проводимостью вводится известная многозарядная примесь в заданной концентрации и путем использования механизмов управления зарядовым состоянием [9] глубоких примесных центров (рисунок 2b, c) реализуется расширение функциональных возможностей ФЭП и диапазонов преобразования оптического излучения [6, 8]. Конструкция ФЭП на основе собственного полупроводника 1 (рисунок 2a), слаболегированного глубокой примесью акцепторного (рисунок 2b) или донорного типов (рисунок 2c), весьма проста. Однако относительная сложность физических процессов при перезарядке нескольких энергетических уровней многозарядной глубокой примеси позволяет реализовать многофункциональность фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) при простой конструкции чувствительного элемента [6]. ФЭП представляет собой фоторезистивную R1, R2 или барьерную структуру VD1 с длинной базой (рисунок 3) в зависимости

от типа используемых контактов 2 и 3 (омический контакт или барьер Шоттки). Контакт 2, через который вводится оптический сигнал  $S$ , выполняется полупрозрачным, причем для уменьшения коэффициента оптического отражения поверхность полупроводника может профилироваться. Контакт 4 наносится при необходимости управления свойствами ФЭП с использованием электрического канала управления (R2 на рисунке 3). При управлении характеристиками ФЭП дополнительным оптическим сигналом ( $S_0$  на рисунке 1), часто вне спектрального диапазона чувствительности датчика, он вводится вместе с основным через прозрачный электрод 2 или с торца ФЭП. На рисунке 3 приведены упрощенные обозначения ФЭП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями. Многофункциональность и возможность управления характеристиками таких ФЭП определяет значительно большую сложность их эквивалентных схем, используемых при моделировании электрических схем измерительных преобразователей.

Например, эквивалентная схема барьерной структуры VD1 с длинной базой со встречно включенными диодами Шоттки включает в себя источники напряжения, управляемые светом, фоторезисторы, элементы цепей внутренней обратной связи.

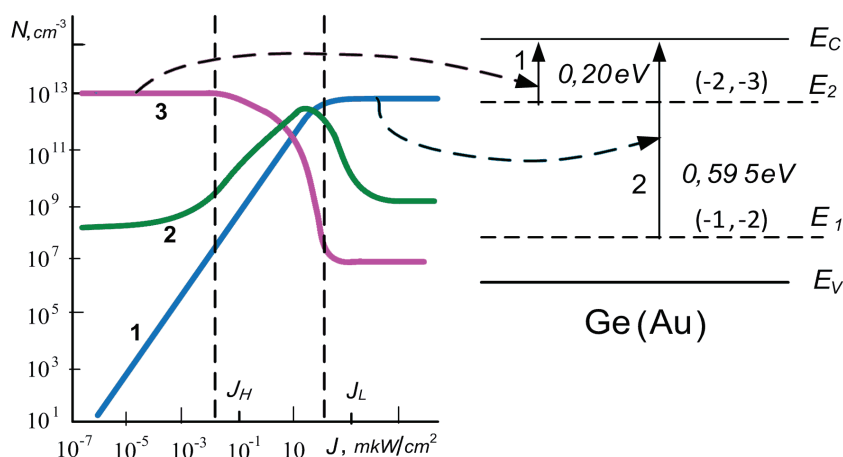


**Рисунок 3** – Приборные структуры ФЭП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями

**Figure 3** – Photovoltaic converter device structures based on semiconductors with deep multiply-charged dopants

Физической основой работы объемно перезаряжаемых светом или электрическим смещением структур является изменение времени жизни и подвижности [8–10] неравновесных носителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси (рисунок 2b, c). Причем для полупроводников с примесью акцепторного типа изменение постоянных времени жизни и рекомбинации достигает нескольких десятичных порядков [8–10], а для полупроводников с примесью донорного типа это изменение составляет величину менее 1 %, что связано с тем, что энергетические уровни примеси уже заполнены (рисунок 2c).

В фотоприемниках, слабо легированных рядом примесей с акцепторными свойствами [8, 11], примесь формирует два или три глубоких уровня в нескольких зарядовых состояниях. При этом характеристики приборной структуры с глубокими многозарядными примесями определяются в основном характером рекомбинационных процессов через уровни примеси [11]. Закономерности формирования сигнала ФЭП связаны с изменением эффективного времени жизни и подвижности с уровнем инжекции. Зависимость времени жизни основных  $\tau_n$  и неосновных  $\tau_p$  носителей заряда от уровня возбуждения для германия и кремния, легированного глубокими примесями с несколькими многозарядными уровнями, характеризуется диапазоном изменения до четырех десятичных порядков величины [8, 11]. Моделирование рекомбинационных процессов в приборных структурах с многозарядными примесями [8] показывает, что на зависимости времени жизни основных и неосновных носителей заряда от плотности мощности оптического излучения существуют две области линейной рекомбинации, разделенной областью нелинейной рекомбинации (рисунок 4). Следствием этого является формирование двух поддиапазонов энергетической характеристики с высокой степенью линейности (рисунок 5). На рисунке 4 приведены зависимости концентрации ионов меди в зарядовых состояниях (-3), (-2), (-1) от плотности мощности оптического излучения в германии n-типа.

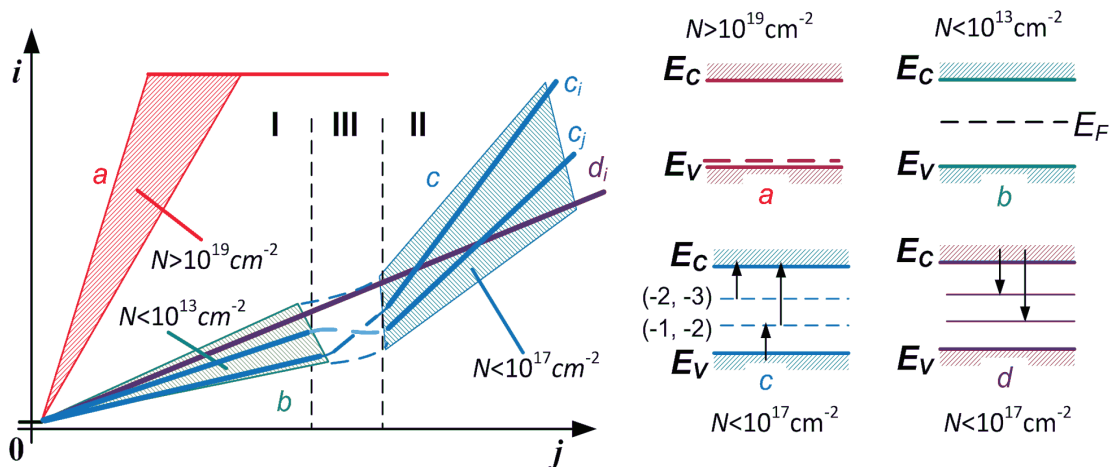


**Рисунок 4** – Зависимости концентрации ионов меди в германии n-типа в зарядовых состояниях (-3), (-2), (-1), линия 3, 2 и 1 соответственно от плотности мощности оптического излучения (справа энергетическая диаграмма; зарядовые состояния приведены в скобках)

**Figure 4** – Dependence graphs of Cuprum ion concentration in n-type Germanium for charge states (-3), (-2), (-1), respective lines 3, 2 and 1, on optical power density (right: energy diagram; charge states are given in brackets)

Автоматическая перезарядка зарядовых состояний глубокой многозарядной примеси при увеличении плотности мощности оптического

сигнала приводит [8] к формированию двух поддиапазонов энергетической характеристики фотоприемника (рисунок 5).



**Рисунок 5** – Энергетические характеристики ФЭП с примесной (a) и собственной (b) проводимостью, с многозарядными примесными центрами акцепторного (c) и донорного (d) типа; и соответствующие энергетические диаграммы материалов этих ФЭП

**Figure 5** – Energetic performance of photovoltaic converters with dopant conductivity (a), intrinsic conductivity (b), with multiply-charged donor (c) and acceptor (d) type dopant centers; and corresponding energy diagrams for these photovoltaic converters materials

Первый поддиапазон соответствует линейной рекомбинации при низких плотностях мощности оптического излучения, меньших некоторого порогового значения  $J_L$ , а второй поддиапазон линейности энергетической характеристики наблюдается при высоких плотностях мощности оптического излучения больших  $J_H$ . При мощности оптического излучения  $J < J_L$  большинство примесных ионов находится в зарядовом состоянии  $(-3)$ , а концентрация зарядовых состояний  $(-2)$  и  $(-1)$  существенно меньше (рисунок 4). При мощности оптического излучения  $J > J_L$  большинство ионов многозарядной примеси находятся в зарядовом состоянии  $(-1)$ , включается энергетический уровень глубокой примеси  $E_1$ , а уровень  $E_2$  не работает. При последовательном заполнении уровней многозарядной примеси во время освещения с увеличивающейся плотностью мощности реализуется передаточная характеристика, обусловленная суммой зависимостей заполненности уровней  $E_1$  и  $E_2$ . Результатом является расширение динамического диапазона чувствительности фотоприемника (рисунок 5). Отметим, что внутри поддиапазонов  $J > J_L$  и  $J < J_H$  энергетическая характеристика фотоприемника практически линейна (с отклонением от линейности не более 1%), а внутри поддиапазона

$J_L < J < J_H$  вид энергетической характеристики может отличаться от линейной [8].

Основой модели, описывающей поведение фоторезистивного ФЭП [4, 8], является система кинетических уравнений, описывающая процессы рекомбинации с участием многозарядной примеси, имеющей произвольное количество ( $i$ ) уровней в запрещенной зоне полупроводника. В результате моделирования [8] определяются зависимости концентрации ионов примеси в различных зарядовых состояниях (рисунок 4) и зависимости времени жизни основных и неосновных носителей заряда от плотности мощности оптического излучения:

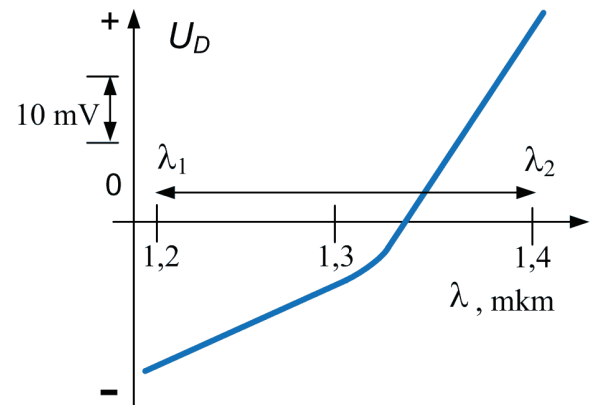
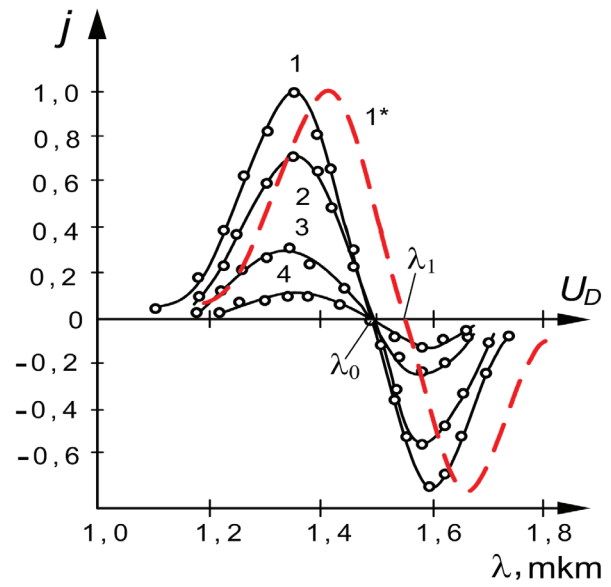
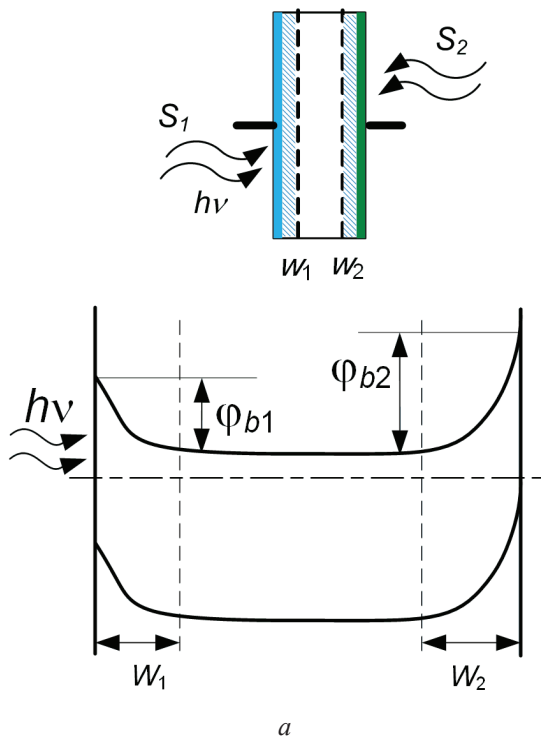
$$\tau_n = \frac{\Delta n}{U_{n1} + U_{n2}}, \quad \tau_p = \frac{\Delta p}{U_{p1} + U_{p2}}.$$

Границами поддиапазонов энергетической характеристики чувствительности  $J_L$  и  $J_H$  можно управлять изменением концентрации многозарядной примеси и ее типом [6, 8]. Отметим, что при переходе от одного поддиапазона к другому, вследствие задействования различных энергетических переходов, изменяется и вид спектральной характеристики чувствительности такого ФЭП [6, 11]. При этом диапазон спектральной чувствительности ФЭП перекрывает

значения ближнего и среднего ИК излучения (1,2 мкм – 10 мкм), а положение «красной» границы чувствительности может смещаться на величину до нескольких (2–4) мкм.

Несмотря на простоту конструкции фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с собственной проводимостью, на их основе можно построить ряд многофункциональных одноэлементных сенсоров, чувствительных как к нескольким параметрам оптического излучения, так и к другим воздействующим факторам [6].

Наибольший интерес вызывают некоторые из них. Например, наличие в структуре ФЭП встречно включенных барьерных структур (рисунок 6а) может привести к появлению на спектральной характеристике чувствительности (рисунок 6б) области с инверсией знака фото-ЭДС [6, 11–12]. Такая структура представляет собой по существу функциональный преобразователь, в котором взаимосвязь четырех параметров  $I$ ,  $\lambda$ ,  $V$ ,  $\Delta z$  дает возможность функционального выражения одной физической величины через другую (или совокупность нескольких величин) и использования прибора в качестве фотоприемника для сравнения интенсивностей излучения в разных спектральных диапазонах, детектора длины волны монохроматического излучения и др., приема и передачи информации, координатно-чувствительного элемента [6].



**Рисунок 6** – Одноэлементный двухбарьерный ФЭП (а) и спектральные характеристики фототока короткого замыкания преобразователя (Ni–nGe(Cu)–Ni) для различных плотностей мощности оптического излучения: 1 –  $J = 10$  мкВт/см<sup>2</sup>; 2 –  $J = 5$  мкВт/см<sup>2</sup>; 3 –  $J = 3$  мкВт/см<sup>2</sup>; 4 –  $J = 1,5$  мкВт/см<sup>2</sup> (б); с – характеристика преобразования двухбарьерного ФЭП

**Figure 6** – Unitary two-barrier photovoltaic converter (а) and short-circuit photocurrent spectral dependencies for (Ni–nGe(Cu)–Ni) converter for different levels of optical power density: 1 –  $J = 10$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup>; 2 –  $J = 5$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup>; 3 –  $J = 3$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup>; 4 –  $J = 1,5$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup> (б); с – transducer characteristic of two-barrier photovoltaic converter

При освещении оптическим излучением с одной стороны (только сигнал  $S_1$  или только  $S_2$ ) двухбарьерный ФЭП характеризуется линейной передаточной характеристикой интенсивности света  $I$  и нелинейной характеристикой чувствительности к длине волны (рисунок 6с) вследствие [6] поглощения света по глубине структуры,



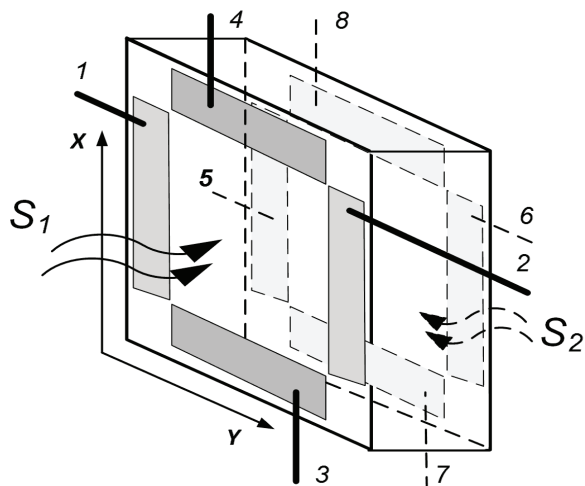
отражения от передней и тыльной сторон структуры и т. д. Однако при освещении ФЭП с двух сторон оптическим сигналом  $S_1$  анализируемого изображения и сигналом  $S_2$  опорного изображения нелинейности передаточных характеристик взаимно компенсируются и выходной сигнал  $J$  будет равен нулю при равенстве оптических сигналов  $S_1, S_2$  по обоим параметрам: интенсивности и длины волны света.

Если выводы на противоположных сторонах ФЭП выполнить не в виде полупрозрачных электродов на всей поверхности структуры, а в виде совокупности электродов 1–4 и 5–6, размещенных по контуру структуры (рисунок 7), то такой ФЭП, реализующий функцию оптического компаратора, будет чувствителен также к форме и положению элементов изображения относительно центра структуры [6]. Отметим, что в оптико-электронных компараторах сравниваются не собственно изображения, а сигналы, несущие информацию о наиболее важных свойствах изображения. В простейшем случае используются два фотоприемника, сигналы с выхода которых поступают на входы обычного электронного компаратора для формирования признака равенства оптических сигналов в виде выходного электрического сигнала заданного уровня. Недостатком таких компараторов является низкое быстродействие и невозможность сравнения оптических сигналов по нескольким параметрам одновременно. Оптические компараторы, образованные связанными волноводными разветвлениями [13], характеризуются высоким быстродействием, но имеют сложную конструкцию, приводящую к оптическим потерям, и также не позволяют сравнивать изображения по нескольким параметрам.

Одноэлементный координатно-чувствительный ФЭП (рисунок 7) будет формировать нулевой выходной электрический сигнал, как ФЭП со сплошными электродами, при равенстве всех параметров величин  $I, \lambda$  и  $Z$ , где  $Z$  – параметры формы и местоположения изображения на чувствительной поверхности ФЭП.

Изменение смещения на парах электродов 1–2 и 3–4 до достижения условия равенства нулю выходного тока позволит определить возможные смещения изображений, формирующих сигналы  $S_1, S_2$  по координатам  $X, Y$ . Изменение смещения между электродами 1–4 и 5–8 также до достижения условия равенства нулю выходного тока позволит определить изменения максимумов в спектре излучения изображений 1 и 2.

Дополнительно параметрами преобразования оптико-электронного компаратора, если в качестве основы ФЭП используется полупроводник слабо легированный глубокой примесью, формирующей несколько уровней с различными зарядовыми состояниями, можно управлять, используя внешнее оптическое излучение [11]. Изменяя интенсивность управляющего излучения, можно управлять концентрацией примеси в различных зарядовых состояниях с разными уровнями энергии ионизации. В зависимости от плотности мощности оптического сигнала (дополнительного или основных сигналов  $S_1, S_2$ ) реализуются различные зарядовые состояния многозарядной примеси. Изменение интенсивности управляющей подсветки позволяет изменять относительную чувствительность фотоприемного устройства к излучению в диапазоне длин волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$  из области примесного поглощения (от 1,5 до 12 мкм).



**Рисунок 7** – Оптико-электронный компаратор на базе одноэлементного двухбарьерного координатно-чувствительного ФЭП: 1–4 – совокупность электродов на стороне А; 5–8 – совокупность электродов на стороне В;  $S_1, S_2$  – оптические сигналы

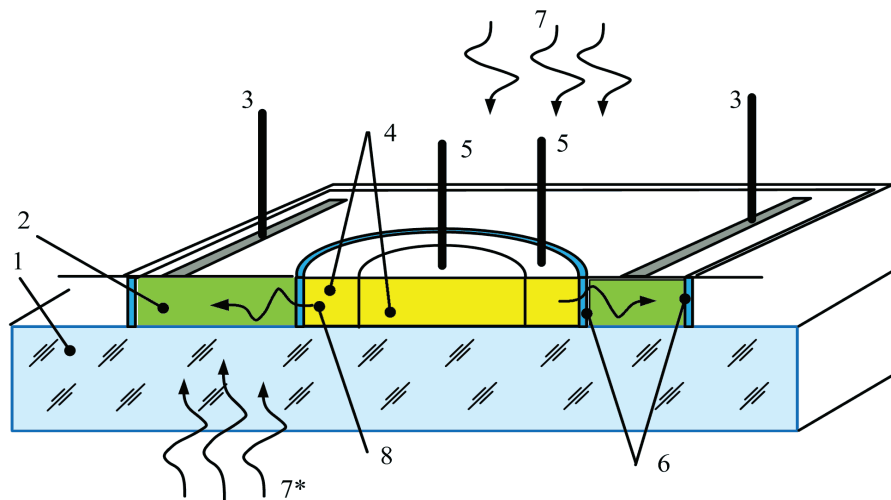
**Figure 7** – Photovoltaic comparator based on two-barrier coordinate-sensitive converter: 1–4 – set of electrodes on the side A; 5–8 – set of electrodes on the side B;  $S_1, S_2$  – optical signals

В зависимости от требуемых диапазонов чувствительности оптико-электронного компаратора по мощности и спектральному составу сравниваемых оптических сигналов ФЭП может быть выполнен на базе различных полупроводниковых материалов и с различной технологией формирования приборных структур. При этом реализация различных характеристик преобразования предложенного оптико-электронного компаратора производится

с использованием одноэлементной полупроводниковой структуры без необходимости использования дополнительных оптических элементов.

Структура многофункционального датчика, используемого в составе измерительных преобразователей систем оптической диагностики, в общем случае может включать совокупность одного или нескольких конструктивно объединенных чувствительных элементов, размещенных в зоне действия нескольких физических величин, а также формирующих соответствующие сигналы посредством преобразовательных (передаточных) функций. Фотоприемники на основе полупроводниковых структур с многозарядной примесью характеризуются свойствами управляемости своих параметров (энергетической характеристикой, спектральной характеристикой чувствительности, быстродействием и др.) под действием внешних и внутренних факторов, в первую очередь дополнительного освещения [6, 11]. В связи с этим вызывает интерес дополнение базовых структур одноэлементных фотоприемников [6] комбинированными полупроводниковыми структурами на сапфировых подложках [14]. Важные достоин-

ства сапфировой подложки – отличные диэлектрические характеристики, инертность, способность работы при высоких температурах и механических нагрузках. Поэтому их применяют даже в случаях, когда параметры кристаллической решетки не совсем совпадают с параметрами гетероэпитаксиальных структур. Сапфировые подложки используются для эпитаксии многих полупроводниковых материалов (Si, SiGe, GaN, AlGaIn, тройных и четверных соединений типа  $A^3B^5$  и других) и изготовления интегральных схем [15]. Приблизительное совпадение кристаллофизических свойств сапфира (постоянная кристаллической решетки, коэффициенты термического расширения) и ряда полупроводниковых материалов позволяют использовать сапфировые подложки для изготовления приборных структур на основе нескольких разнородных материалов, в том числе со свойствами [14–16], не реализуемыми методами традиционных технологий. На рисунке 8 приведена упрощенная приборная структура фотоэлектрического преобразователя 2 на основе полупроводника с глубокой многозарядной примесью и управляющим его характеристиками излучателем 4.



**Рисунок 8** – Структура управляемого ФЭП на сапфировой подложке: 1 – сапфировая подложка; 2 – фоторезистивный ФЭП на основе полупроводника с глубокой многозарядной примесью; 3 – выводы ФЭП; 4 – управляющий  $p$ - $n$  светодиода; 5 – выводы светодиода; 6 – слои изолирующего диэлектрика; 7 – входной оптический сигнал; 8 – управляющее излучение

**Figure 8** – Schematic diagram of photovoltaic converter on sapphire substrate: 1 – sapphire substrate; 2 – photoresistive converter based on semiconductor with deep multiply-charged dopant; 3 – photovoltaic converter stubs; 4 – controlling  $p$ - $n$  LED; 5 – LED stubs; 6 – insulating dielectric layers; 7 – incoming optical signal; 8 – controlling optical emission

В одной приборной структуре совмещаются технологии светодиодных 4 приборов на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  и фотоприемных структур 2 на основе Si, Ge, Si: Ge и других материалов [14–17]. При этом входной оптический

сигнал 7 может вводиться в структуру ФЭП как со стороны полупроводниковых слоев 7, так и через подложку 7\*, так как сапфир характеризуется и отличными оптическими свойствами в ближнем и среднем ИК оптическом диапазоне.

## Заключение

Установлено, что одноэлементные фотоэлектрические преобразователи на базе полупроводников с низкой концентрацией глубокой примеси, благодаря формированию в запрещенной зоне нескольких энергетических уровней для разных зарядовых состояний, позволяют реализовать измерительные преобразователи систем оптической диагностики с новыми функциональными характеристиками и расширенными диапазонами преобразования, чувствительные к нескольким воздействующим факторам различной физической природы. Они также характеризуются увеличенными диапазонами энергетической (на несколько десятков децибел) и спектральной характеристик чувствительности (с переключаемым сдвигом «красной границы» на 2–4 мкм) с возможностью переключения между поддиапазонами энергетической и спектральной характеристик чувствительности под действием как измерительного сигнала, так и дополнительных управляющих воздействий.

Показано, что многофункциональные одноэлементные фотоэлектрические преобразователи на основе полупроводников с собственной проводимостью позволяют реализовать в одном измерительном преобразователе с одноканальной схемой измерения одновременное определение нескольких параметров оптического излучения, например, длины волны и мощности оптического излучения, геометрических параметров изображения, сравнение характеристик изображения по нескольким параметрам одновременно. Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники для заданного диапазона плотностей мощности излучения, спектрального диапазона и функциональности.

Показано, что ФЭП с управляемыми характеристиками на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями совместимы с «около кремниевыми» технологиями и технологиями «полупроводник на сапфире». Предложены приборные структуры одноэлементных оптического компаратора и управляемого фотоприемника на сапфировой подложке.

## Список использованных источников

1. Балин, А. Оптическая диагностика атмосферы / А. Балин // Фотоника. – 2009. – № 5. – С. 30–33.

2. Гуляев, П.Ю. Оптическая диагностика процессов горения и взрыва в порошковой металлургии / П.Ю. Гуляев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://elib/books/Files/va1998\\_1/pages/08\\_p.htm](http://elib/books/Files/va1998_1/pages/08_p.htm). – Дата доступа: 26.02.2015.

3. Лысенко, С.А. Методы оптической диагностики биологических объектов / С.А. Лысенко. – Минск : БГУ, 2014. – 231 с.

4. Филачев, А.М. Фотоприемники в оптико-электронных приборах и системах / А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. – М. : Физматкнига, 2016. – 104 с.

5. Формозов, Б.Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / Б.Н. Формозов. – СПб. : СПбГУАП, 2002. – 120 с.

6. Гусев, О.К. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О.К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.

7. Масол, И.В. Информационные нанотехнологии. / И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев. – Киев : Изд-во Макрос, 2011. – 560 с.

8. Гусев, О.К. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями / О.К. Гусев, А.И. Свистун, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Датчики и системы. – 2011. – № 1. – С. 19–23.

9. Глинчук, К.Д. Рекомбинационные характеристики германия и кремния, используемых в полупроводниковом приборостроении / К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, Е.Г. Миселюк // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. – 1978. – № 21. – С. 3–22.

10. Яшин, А.Н. Применимость упрощенной модели Шокли-Рида-Холла для полупроводников с различными типами дефектов / А.Н. Яшин // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 11. – С. 131–133.

11. Vorobei, R.I. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R.I. Vorobei [et al.] // Przeglad elektrotechniczny. – 2014. – No. 5. – P. 5–78. doi: 10.12915/pe.2014.05.16

12. Khudaverdyan, S.Kh. Photo-detecting characteristics of double barrier structures // ELSEVIER, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2003. – Vol. 504/1–3. – P. 350–353. doi: 10.1016/S0168-9002(03)00768-X

13. Соколов, С.В. Оптический компаратор. Пат. РФ № 2020551 Кл. G06E3. – 1994.

14. Козлов, Ю.Ф. Структуры кремния на сапфире: технология, свойства, методы контроля, применение / Ю.Ф. Козлов, В.В. Зотов. – М. : МИЭТ, 2004. – 380 с.

15. Andreou, A.G. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems / A.G. Andreou [et al.] // Circuits and Systems. – 2001. – Vol. 1. – P. 22–30. doi: 10.1109/7384.963464

16. Витязь, П.А. Наноматериаловедение. / П.А. Витязь, Н.А. Свидуневич, Д.В. Куис. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.

17. Wado H. Epitaxial growth of SiGe on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gas and Ge solid source molecular beam epitaxy / H. Wado, K. Ohtani, M. Ishida // *J. Crystl. Growth*. – 1996. – V. 169. – P. 457–462. doi: 10.1016/S0022-0248(97)80004-8

## References

1. Balin A. [Optical diagnostics of atmosphere]. *Fotonika* [Photonics], 2009, no. 5, pp. 30–33 (in Russian).

2. Gulyaev P.Yu. *Opticheskaya diagnostika processov goreniya i vzryva v poroshkovoy metallurgii* [Optical diagnostics of combustion and explosion processes in powder metallurgy]. Available at: [http://elib/books/Files/va1998\\_1/pages/08\\_p.htm](http://elib/books/Files/va1998_1/pages/08_p.htm) (accessed 26.02.2015).

3. Lysenko S.A. *Metody opticheskoy diagnostiki biologicheskikh obyektov* [Optical diagnostic methods for biological objects]. Minsk, BSU Publ., 2014, 231 p.

4. Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. *Fotopriyemniki v optiko-elektronnykh priborakh i sistemakh* [Photovoltaic converters in optoelectronic devices and systems]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2016, 104 p.

5. Formozov B.N. *Aerokosmicheskiye fotopriyemnyye ustroystva v vidimom i infrakrasnom diapazone* [Aerospace photodetectors for visible and infrared ranges]. Saint Petersburg, SPbGUAP Publ., 2002, 120 p.

6. Gusev O.K., Vorobei R.I., Zharin A.L., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L. *Metodologiya i sredstva izmereniy parametrov objektov s neopredelennymi sostoyaniyami* [Methodology and means of measurement for objects in indefinite states]. Minsk, BNTU Publ., 2010, 582 p.

7. Masol I.V., Osinsky V.I., Sergeev O.T. *Informatsionnyye nanotekhnologii* [Informational nanotechnologies]. Kiev, Makros Publ., 2011, 560 p.

8. Gusev O.K., Svistun A.I., Shadurskaya L.I., Yarzhebetskaya N.V. [Design and management of metrological characteristics of photovoltaic converters based on semiconductors with multiply charged dopants].

*Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2011, no. 1, pp. 19–23 (in Russian).

9. Glinchuk K.D., Litovchenko N.M., Miselyuk Ye.G. [Recombination characteristics of Germanium and Silicon used in semiconductor instrumentation engineering] *Poluprovodnikovaya tehnika i mikroelektronika* [Semiconductor technics and microelectronics], 1978, no. 21, pp. 3–22 (in Russian).

10. Yashin A.N. [Applicability of the simplified Shockley-Read-Hall model for semiconductors with different types of defects]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2005, vol. 39, no. 11, pp. 131–133 (in Russian).

11. Vorobei R.I., Gusev O.K., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Svistun A.I., Shadurskaya L.I., Yarzhebetskaya N.V., Kierczynski K. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. *Przeglad electrotechniczny*, 2014, no. 5, pp. 5–78. doi: 10.12915/pe.2014.05.16

12. Khudaverdyan S.Kh. Photo-detecting characteristics of double barrier structures. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A*, 2003, vol. 504/1-3, pp. 350–353. doi: 10.1016/S0168-9002(03)00768-X

13. Sokolov S.V. *Opticheskii komparator* [Optical comparator]. Patent RF, no. 2020551, 1994.

14. Kozlov Yu.F., Zotov V.V. *Struktury kremniya na sapphire: tekhnologiya, svoystva, metody kontrolya, primeneniye* [Silicon-on-sapphire structures: technology, properties, methods of control, applications]. Moscow, MIET Publ., 2004, 380 p.

15. Andreou A.G., Kalayjian Z.K., Apsel A., Pouliquen P.O., Athale R.A., Simonis G., Reedy R. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems. *Circuits and Systems*, 2001, vol. 1, pp. 22–30. doi: 10.1109/7384.963464

16. Vityaz P.A., Svidunovich N.A., Kuis D.V. *Nanomaterialovedeniye* [Nanomaterials science]. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ., 2015, 511 p.

17. Wado H., Ohtani K., Ishida M. Epitaxial growth of SiGe on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gas and Ge solid source molecular beam epitaxy. *J. Crystl. Growth*, 1996, vol. 169, pp. 457–462. doi: 10.1016/S0022-0248(97)80004-8