

Исследование физических процессов в алмазных датчиках УФ излучения на основе спектральных и вольт-амперных характеристик

В.А. Шепелев¹, А.А. Алтухов¹, А.С. Сигов², В.С. Феценко¹

¹ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», г. Москва, valq2006@rambler.ru

²ФГБОУВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Таблица 1

Электронные свойства природного алмаза 2а-типа в сравнении со свойствами других материалов – кремний, арсенид галлия и карбид кремния

	Si	GaAs	β -SiC	Алмаз 2а-типа
Дрейфовая скорость насыщения, v_s , см/с	10^7	10^7	$2 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$
Электрическая прочность, F_c , В/см	$3 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^7$
Дрейфовая подвижность ($\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) при 300 К для электронов, μ_e для дырок, μ_h	1350 480	8500 450	1000 60	2500 2100
Теплопроводность при 300 К, χ , Вт/см·К	1,4	0,81	2,8	20 – 25

Аннотация — Изучение фотоэлектрических свойств алмазных датчиков актуально для разработки систем на их основе, применяемых в различных областях. В настоящей работе описаны результаты проведённых экспериментальных исследований данных свойств. Спектральные характеристики фоточувствительности алмазных датчиков УФ излучения существенным образом различаются по форме в зависимости от напряжения смещения. Полученные в работе данные представляют собой серию спектров фоточувствительности, снятых при незначительных изменениях приложенного напряжения смещения от спектра к спектру и объединённых в трёхмерные спектрально-вольт-амперные характеристики. При работе с полученными данными предложен метод исследования физических процессов в алмазных датчиках УФ излучения с помощью нормирования спектрально-вольт-амперных характеристик.

Ключевые слова — алмаз, планарная конструкция, УФ фотоприёмник, фотоэлектрические свойства.

I. ВВЕДЕНИЕ

Преимущества алмаза как материала электроники нового поколения были осознаны ещё в 80-х гг. прошлого века [1]. Алмаз является перспективным материалом для применений в электронике и применяется при разработке и изготовлении следующих элементов электроники [1,2]:

- Пассивные элементы электроники (теплоотводы, оптические окна, подложки и др.);
- Диоды и транзисторы;
- Оптоэлектронные приборы (датчики УФ излучения, оптоэлектронные коммутаторы, фотоэлектронные умножители и др.) [1-5];
- Детекторы ядерных и ионизирующих излучений [6,7].

Использование алмазов в электронике связано с типовыми электронными свойствами, приведёнными в табл. 1 [1] для алмазов 2а-типа.

Алмаз является непрямозонным материалом с большой шириной запрещенной зоны, равной 5,5 эВ при температуре 300К [8]. Структура типовых примесных уровней в алмазных материалах представлена на рис. 1. Положение уровней идеализировано. В реальных кристаллах уровни размыты по энергии и образуют некий рельеф плотности состояний. Рельеф плотности состояний зависит от количественного содержания разных типов примесных дефектов в каждом кристалле. Содержание примесей и характер дефектов может быть уникальным для каждого кристалла природного алмаза, делая уникальным и его электронные свойства.

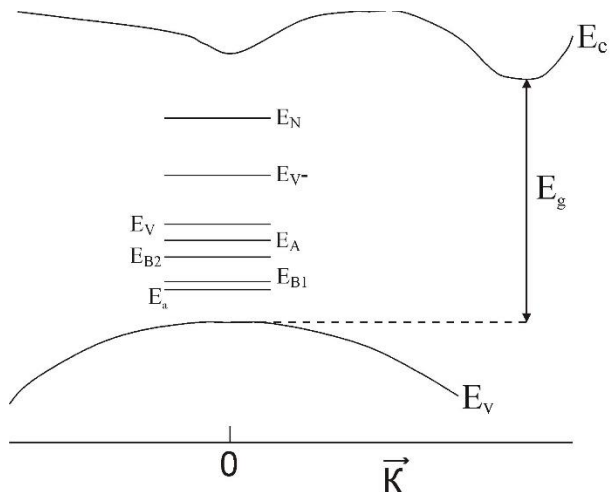


Рис. 1. Схематическая диаграмма энергетических уровней в запрещенной зоне алмаза. Представленные уровни имеют стандартные обозначения, взятые из литературы [1]

Проблема уникальности свойств каждого образца природного алмаза может быть решена получением экспериментальных данных для каждого кристалла или, в случае применения алмаза для создания УФ датчика, испытанием каждого созданного образца датчика на природном алмазе. В первую очередь речь идёт об измерении спектральных характеристик фоточувствительности УФ датчиков и об оценке влияния различных физических процессов на данную характеристику.

II. ИСПЫТУЕМЫЙ АЛМАЗНЫЙ ДАТЧИК УФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для проведения измерений использовался УФ датчик, изготовленный в «Производственно-Технологическом Центре «УралАлмазИнвест» по собственной технологии [9]. Структура данного прибора (рис. 2) является планарной, и её условно можно назвать «сэндвичеобразной» благодаря технологии последовательного создания слоёв металлов на передней и задней сторонах алмазной пластины и как видно из рисунка. Полупрозрачный слой платины на передней пластине выполняет роль переднего электрода и обладает достаточным пропусканием в спектральной области чувствительности УФ датчиков на основе алмазов 2а типа. Алюминиевая точка на слое платины служит промежуточным звеном для точечной сварки проволоки от площадки корпуса до структуры датчика. Алюминиевый слой на задней стороне пластины выполняет роль заднего электрода.

Исследования образцов таких фотоприёмников обладают актуальностью, связанной с обработкой применяемых технологических процессов, используемых для создания других приборов на основе алмаза с планарной конструкцией, включая многоэлементные фотоприёмники и другие микросхемы [10].

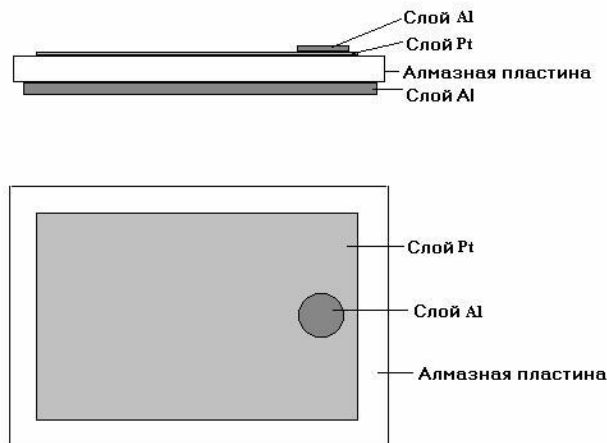


Рис. 2. Схематическое изображение слоёв металлов на используемой алмазной пластине для «сэндвичеобразного» УФ датчика

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была проведена серия измерений спектральных характеристик фоточувствительности УФ датчика на основе алмаза 2а-типа при значениях напряжений смещения между электродами от 0 до 150 В с шагом 10 В при переходе от спектра к спектру. На рис. 3,4 приведены некоторые из снятых спектральных характеристик, нормированные различным образом – либо на единственное максимальное значение, либо на максимальное значение выходного фотосигнала (фототока) для каждого спектра.

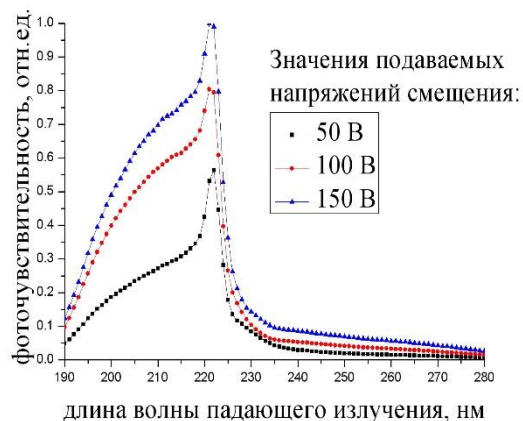


Рис. 3. Относительные спектральные характеристики фоточувствительности «сэндвичеобразного» алмазного УФ датчика, полученные при подачи различных значений напряжения смещения. Представленные значения нормированы на максимальное значение

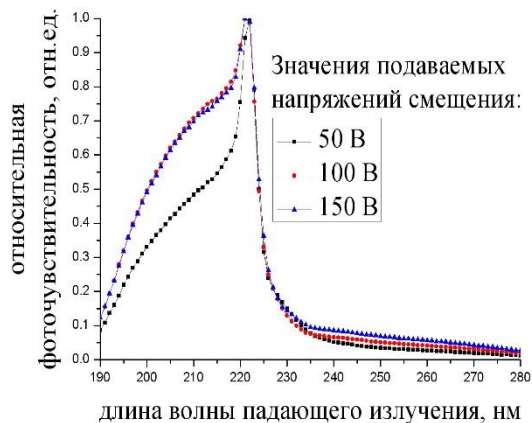


Рис. 4. Относительные спектральные характеристики фоточувствительности алмазного УФ датчика, полученные при подачи различных значений напряжения смещения. Представленные значения нормированы на максимальное значение фоточувствительности для каждого представленного спектра

Как видно из рис. 4, датчик обладает разными формами спектральных характеристик при разных значениях приложенного напряжения смещения. Иными словами, можно отметить, что величины фототока при различных длинах волн падающего излучения различным образом изменяется при изменении подаваемого напряжения. Данная особенность задавать форму спектра обуславливает возможность управлять характеристиками датчика с помощью схмотехнической подстройки. Это определяет требования к используемым в технике контроллерам [11,12].

Для установления необходимой формы спектральной чувствительности под какую-либо конкретную задачу, например для данного образца, необходимо подобрать соответствующий режим работы датчика по подаваемому напряжению смещения. Для удобства такого подбора, а также для выбора способа изготовления алмазного УФ датчика необходимо исследовать физические процессы, происходящие в датчиках под действием УФ излучения и приводящие к изменению форм спектральных и вольт-амперных характеристик. Также исследование данных процессов может быть полезно при выявлении свойств алмазных материалов, актуальных для разработки и изготовления и других элементов электроники, включая разработку перспективных микросхем.

Построение спектральных характеристик фоточувствительности алмазного датчика при различных значениях напряжения смещения на одном двухмерном графике позволяет наглядно оценить способность датчика менять спектральную характеристику при изменении напряжения смещения, но не позволяет понять суть тех физических процессов, которые приводят к данным изменениям. Суть таких

процессов помогают понять трёхмерные графики, образованные добавлением дополнительной оси – оси напряжения смещения. Такие графики можно назвать «спектрально-вольт-амперными характеристиками» (СВАХ). СВАХ, построенная на основе измеренных спектров, представлена на рис. 5.

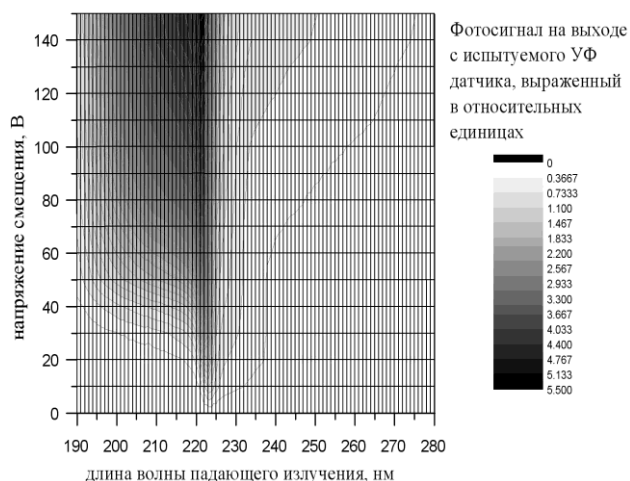


Рис. 5. Спектрально-вольт-амперная характеристика фоточувствительности алмазного УФ датчика

С помощью нормировки СВАХ на спектральную характеристику, соответствующую наибольшему значению напряжения смещения, можно оценить зависимость формы световой вольт-амперной характеристики от длины волн падающего излучения. Получаемую СВАХ после такой нормировки исходной СВАХ можно назвать семейством нормированных световых вольт-амперных характеристик, полученных при разных длинах волн падающего излучения. Представление данных после такой математической обработки позволяет оценить относительный вклад того или иного физического процесса в спектральную фоточувствительность для разных длин волн падающего излучения. Семейство вольт-амперных характеристик для данного образца представлено на рис. 6.

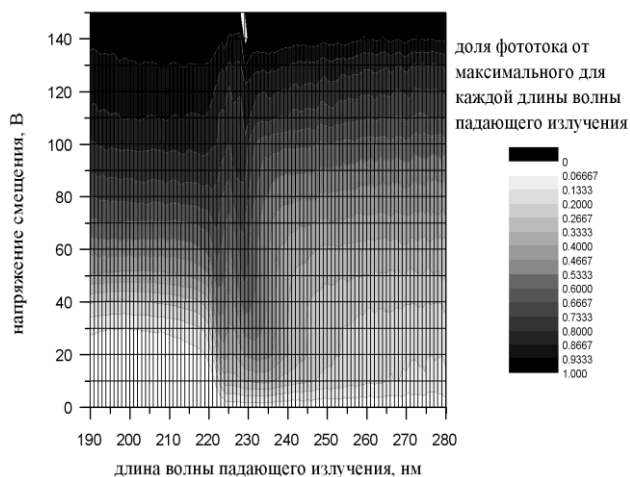


Рис. 6. Семейство нормированных вольт-амперных характеристик освещаемого алмазного УФ датчика

Некоторые вертикальные сечения трёхмерного графика, представленного на рис.6, отдельно представлены также на рис. 7. На примере данных нормированных вольт-амперных характеристик можно сделать следующие предположения относительно физических процессов, возникающих в испытанном датчике:

- Поскольку основные примеси в алмазе 2а-типа являются донорными, но их уровни располагаются относительно близко к потолку валентной зоны, при облучении квантами излучения с энергией меньше ширины запрещённой зоны (это можно видеть на примере длины волны 260 нм, что отдельно показано на рис. 8) происходит образование электронного тока с большим относительным вкладом в общий фотосигнал, чем при межзонном поглощении (например, при длинах волн падающего излучения 200 и 223 нм, что также продемонстрировано на рис. 8) Преобладание доли электронного фототока по отношению к дырочному и приводит к относительной прямизне вольт-амперной характеристики при относительно больших длинах волн падающего излучения, поскольку искривление зависимости дрейфовой скорости дырок от напряжённости электрического поля достигается при меньших полях, а значит – и при меньших подаваемых напряжениях. Возможность выделения электронного фототока позволяет задавать условия для повышенного быстродействия фотоприёмников [13,14].
- Провал вольт-амперной характеристики при относительно больших длинах волн падающего излучения (как опять же видно на примере 260 нм, согласно рис. 8) связан с влиянием заряженных доноров на рассеяние «медленных» носителей, т.е. электронов при относительно небольших подаваемых напряжениях.
- Влияние приложения напряжения смещения на процесс поверхностной рекомбинации неравновесных носителей наиболее существенно при относительно коротких длинах волн падающего излучения (это можно видеть на примере длины волны 200 нм, согласно рис. 8), когда поглощение излучения происходит в наиболее тонком слое алмаза. Этот эффект обуславливает особое поведение вольт-амперных характеристик с провалом при относительно невысоких напряжениях смещения и при таких длинах волн падающего излучения. Таким образом видно, как поверхностная рекомбинация препятствует образованию фотосигнала.

Исследование описанных выше процессов, действующих в фотоприёмнике, может быть отнесено проблемам фундаментального характера, которые следует решать для активного внедрения устройств микросхематехники в различную аппаратуру, вплоть до космической техники [15].

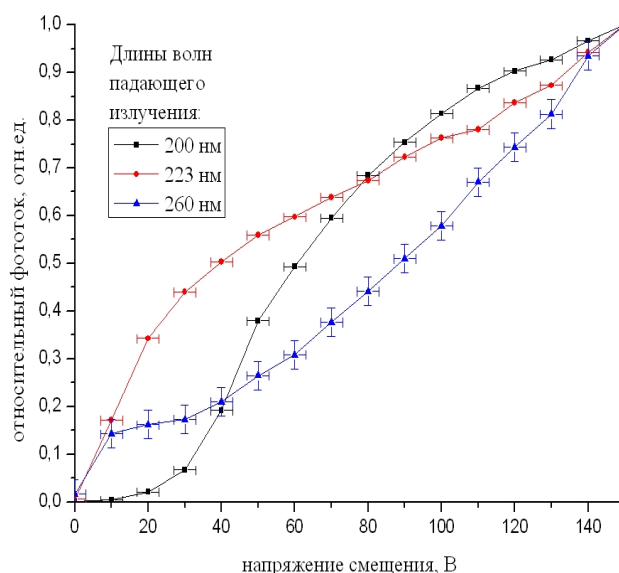


Рис. 8. Нормированные вольт-амперные характеристики алмазного УФ датчика, полученные при различных значениях падающих длин волн излучения

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Относительные спектральные характеристики fotocувствительности алмазных датчиков УФ излучения могут существенным образом различаться в зависимости от величины подаваемого напряжения смещения.

Предложен метод исследования физических процессов в алмазных датчиках УФ излучения с помощью нормирования спектрально-вольт-амперных характеристик.

Нормировка полученной спектрально-вольт-амперной характеристики позволяет установить наличие следующих эффектов в кристалле алмазного датчика:

- различие характера насыщения дрейфовой скорости для разных типов носителей при увеличении приложенного внешнего электрического поля;
- рассеяние медленных носителей заряда на заряженных примесях;
- поверхностная рекомбинация носителей, которая преодолевается при приложении высокого напряжения смещения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Квасков, В.Б. Природные алмазы России / В.Б. Квасков, М.:Полярон, 1997. – 303 с.
- [2] Карасев В.Ю., Мозгин А.А. Новый взгляд на применение кристаллов алмаза в микроэлектронике и нанотехнологиях // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем - 2006. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2006. С. 295-299.
- [3] BenMoussa, A. Diamond detectors for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA2 / A. BenMoussa, J.F.

- Hochedez, U. Schuhle [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2006. – №15. – p. 802-806.
- [4] BenMoussa, A. Solar blind diamond detectors for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA II / A. BenMoussa, J.F. Hochedez, W.K. Schmuts [et. al.] // *Experimental astronomy*. – 2003. – №16. – p.141-146.
- [5] BenMoussa, A. PIN diamond detector development for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA II / A. BenMoussa, U. Schuhle, K. Haenen [et. al.] // *Phys. Stat. Sol.* – 2004. – Vol 201, №11. – p.2536-2541.
- [6] Kania D.R., Landstrass M.I., Plano M.A., Pan L.S., Han S. Diamond radiation detectors // *Diamond and Related Materials*. 1993. V. 2. P. 1012–1019.
- [7] Shimaoka T., Kaneko J.H., Ochiai K., Tsubota M., Shimmyo H., Chayahara A., Umezawa H., Watanabe H., Shikata Sh., Isobe M., Osakabe M. A diamond 14 MeV neutron energy spectrometer with high energy resolution // *Rev. Sci. Instrum*. 2016. V. 87. P. 023503.
- [8] Shirafuji, J. Electrical properties of diamond surfaces / J. Shirafuji, T.Sugino // *Diamond and Related Materials*. – 1996. – Vol. 5. – p. 706-713.
- [9] Mityagin, A.Yu. UV Photodetectors Based on Natural Diamond / A.Yu. Mityagin, V.S. Feshchenko. – Odessa: Politehperiodika, 2013. – 128 p.
- [10] Пугачев А.А., Стемпковский А.Л. КМОП-фотоприемный элемент с высокой эффективностью сбора фотогенерированных носителей заряда // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2010. С. 648-653.*
- [11] Адамов Ю.Ф. Проблемы проектирования и производства контроллеров интеллектуальных датчиков // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2010. С. 597-600.*
- [12] Сомов О.А., Адамов Ю.Ф., Горшкова Н.М., Сибатагуллин А.Г. Реконфигурируемые контроллеры для интеллектуальных датчиков // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2010. С. 601-604.*
- [13] Писаренко И.В., Рындин Е.А. Расширенная диффузионно-дрейфовая модель быстродействующих фотодетекторов для оптических межсоединений интегральных схем // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем(МЭС). 2018. Вып. 3. С. 75-81. doi:10.31114/2078-7707-2018-3-75-81*
- [14] Писаренко И.В., Рындин Е.А. Физико-топологическое моделирование фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации на основе материалов типа АШВВ с учетом зависимостей подвижностей носителей заряда от напряженности электрического поля // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2016. № 4. С. 16-23.*
- [15] Жуков А.А., Стешенко В.Б., Капустян А.В. Проблемы разработки и применения нано- и микросистемной техники в перспективных изделиях РКТ // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 612-617.*

Research of Physical Processes in Diamond UV Radiation Sensors Based on Spectral and Current-Voltage Characteristics

V.A. Shepelev¹, A.A. Altukhov¹, A.S. Sigov², V.S. Feshchenko¹

¹Industrial Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd, Moscow, Russia, valq2006@rambler.ru

²RTU-MIREA, Moscow, Russia

Abstract — The study of the photoelectric properties of diamond sensors is relevant for the development of systems based on them used in various fields. This paper describes the results of experimental studies of these properties. The spectral characteristics of the photosensitivity of diamond UV radiation sensors differ significantly in shape depending on the bias voltage. The data obtained in this work is a series of photosensitivity spectra recorded with insignificant changes in the applied bias voltage from spectrum to spectrum and combined into three-dimensional spectral-current-voltage characteristics. When working with the data obtained, a method has been proposed for studying physical processes in diamond sensors of UV radiation using the normalization of the spectral-volt-ampere characteristics.

It is shown that the difference in the spectra is explained by the different contribution to the photocurrent of carriers of different types at different radiation wavelengths. Different

types of carriers, electrons and holes, differ in the nature of the saturation of the drift velocity with an increase in the applied field (bias voltage). This makes it possible to establish the degree of contribution of various carriers to the total photocurrent depending on the energy of the incident radiation quanta, as well as to estimate the effect of ionization of impurities on the photocurrent and the character of carrier scattering by them. The difference in spectral characteristics depending on the bias voltage during interband absorption is explained by the influence of the applied field on the surface recombination process.

Keywords — diamond, planar structure, UV photodetector, photoelectric properties.

REFERENCES

- [1] Kvaskov, V.B. Prirodnye almazы Rossii (Nature diamonds of Russia) / V.B. Kvaskov, Moscow.:Polyaron, 1997. – 303 p.

- [2] Karasev V.Yu., Mozgin A.A. New issues in application of diamond crystals in microelectronics and nanotechnologies // Problems of Perspective Microelectronic Systems Development - 2006. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2006. P. 295-299.
- [3] BenMoussa, A. Diamond detectors for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA2 / A. BenMoussa, J.F. Hochedez, U. Schuhle [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2006. – №15. – p. 802-806.
- [4] BenMoussa, A. Solar blind diamond detectors for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA II / A. BenMoussa, J.F. Hochedez, W.K. Schmuts [et. al.] // Experimental astronomy. – 2003. – №16. – p.141-146.
- [5] BenMoussa, A. PIN diamond detector development for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA II / A. BenMoussa, U. Schuhle, K. Haenen [et. al.] // Phys. Stat. Sol. – 2004. – Vol 201, №11. – p.2536-2541.
- [6] Kania D.R., Landstrass M.I., Plano M.A., Pan L.S., Han S. Diamond radiation detectors // Diamond and Related Materials. 1993. V. 2. P. 1012–1019.
- [7] Shimaoka T., Kaneko J.H., Ochiai K., Tsubota M., Shimmyo H., Chayahara A., Umezawa H., Watanabe H., Shikata Sh., Isobe M., Osakabe M. A diamond 14 MeV neutron energy spectrometer with high energy resolution // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 023503.
- [8] Shirafuji, J. Electrical properties of diamond surfaces / J. Shirafuji, T.Sugino // Diamond and Related Materials. – 1996. – Vol. 5. – p. 706-713.
- [9] Mityagin, A.Yu. UV Photodetectors Based on Natural Diamond / A.Yu. Mityagin, V.S. Feshchenko. – Odessa: Politehperiodika, 2013. – 128 p.
- [10] Pugachev A.A., Stempkovsky A.L. CMOS-APS element with high charge-collection efficiency // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2010. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2010. P. 648-653.
- [11] Adamov Yu.F. Designing and production problems of smart sensors controllers // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2010. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2010. P. 597-600.
- [12] Somov O.A., Adamov Yu.F., Gorshkova N.M., Sibagatullin A.G. Reconfigurable Smart Sensor Controllers // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2010. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2010. P. 601-604.
- [13] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Extended Drift-Diffusion Model of High-Speed Photodetectors for On-Chip Optical Interconnections // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 3. P. 75-81. doi:10.31114/2078-7707-2018-3-75-81
- [14] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Physical and Topological Simulation of Photodetectors for AIIBV Integrated Optical Commutation Systems Taking into Account Dependence of Charge Carriers Mobilities on Electric Field // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2016. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2016. Part 4. P. 16-23.
- [15] Zhukov A.A., Steshenko V.B., Kapustyan A.V. Working out and application problems nano - and the microsystem technique in perspective products of space technics // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2012. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2012. P. 612-617.