

Конструктивно-технологические решения алмазных многоэлементных УФ-фотоприемных устройств

А.А.Алтухов

«Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», г. Москва, altuhov_a@mirea.ru

Аннотация — Приводятся результаты исследований по разработке конструктивно-технологических решений многоэлементных фотоприемных алмазных устройств УФ-диапазона. Приведены результаты применения ионной имплантации бора и азота для формирования заглубленных фоточувствительных слоев. Показано, что полиэнергетическая имплантация больших доз бора позволяет получать слои с высокой проводимостью при комнатной температуре. Полученные экспериментальные зависимости по дозе и энергии ионов демонстрируют возможности создания сильно компенсированных, слаболегированных слоев р-типа и сильнолегированных слоев р⁺-типа. Показаны конструкция и топология фоточувствительных ячеек на основе ионно-имплантированных слоев матричных алмазных фотоприемников.

Ключевые слова — алмаз, фотоприемное устройство, ультрафиолетовый диапазон, многоэлементный фотоприемник, ионная имплантация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Использование алмазных материалов для разработки и изготовления приборов оптоэлектроники неуклонно расширяется [1 - 3]. Разработка алмазных фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ) УФ-диапазона (УФ-ФПУ) позволит создать новые приборы для контроля источников УФ-излучения [2, 3], для контроля электроразрядов и высокотемпературных факелов [3, 4], аппаратуру для астрономии и систем связи [5 - 7], для экологии [8, 9].

Одним из наиболее перспективных направлений алмазной УФ-оптоэлектроники является создание многоэлементных ФПУ (МЭ ФПУ). Подобные «солнечно-слепые» алмазные МЭ ФПУ формата (2х64), (64х64) и (128х128) эл/кристалл были разработаны и изготовлены [10, 11], которые были первыми подобными устройствами у нас в стране.

В качестве фоточувствительных элементов (пикселей) в разработанных УФ МЭ ФПУ использовались фоточувствительные структуры (ФЧС) фоторезистивного (ФР) [6, 7] типа. Для легирования алмаза акцепторными примесями наиболее успешно используется легирование бором, которое можно осуществить несколькими способами [13], среди которых наиболее предпочтительным, на наш взгляд, является метод ионной имплантации.

В работе приводятся результаты исследований по разработке конструктивно-технологических решений

формирования алмазных фоточувствительных элементов УФ-МЭФПУ с использованием ионной имплантации. Обсуждаются конструктивно-технологические решения по созданию планарных алмазных УФ-МЭФПУ на основе имплантированных бором и азотом слоев.

II. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для создания алмазных фоточувствительных элементов УФ-МЭФПУ в приповерхностной зоне необходимо формировать тонкие легированные ФЧС. Это связано с незначительной глубиной поглощения УФ-излучения в алмазе, а также его электрофизическими особенностями, включая зонную энергетическую структуру и особенности примесных уровней, наличием фоновых примесей и поверхностных состояний [14].

Создание в алмазе легированных слоев, особенно сильно-легированных, вызывает определенные технологические проблемы. Существует несколько способов легирования алмаза, и все они имеют свои особенности. Так при легировании алмаза бором в процессе роста методом CVD в СВЧ плазме [13] наблюдается низкая проводимость р-слоя вследствие достаточно высокой энергии активации бора ($E_a = 0,37\text{эВ}$) при его малых концентрациях.

Представляет особый интерес развитие метода ионной имплантации бора для формирования легированных слоев и сильнолегированных слоев при изготовлении алмазных ФЧС.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для экспериментов использовались алмазные монокристаллические CVD подложки ориентации (100) (3×3) мм. Концентрация азота составляла $(0,5-1)\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$. Удельное сопротивление нелегированных образцов было $\sim 10^{13}\text{ Ом}\cdot\text{см}$. Для формирования легированных слоев использовалась ионная имплантация (бор, В⁺) в диапазоне энергий $E = (25 - 95)\text{ кэВ}$. Выполнялась полиэнергетическая имплантация В⁺ с энергиями со следующими дискретными значениями (25; 36; 50; 71; 95) кэВ. На каждом шаге доза ионов В⁺ составляла $2\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$, суммарная доза составила $1\cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$. Постимплантационный отжиг проводился в вакууме при 1450°C в течение 30 минут. Проводимость исследовалась в вакуумном, термостабилизированном

азотном криостате методом Ван дер Пау в интервале температур (78–413) К. Технологической задачей было формирование в приповерхностной области алмаза однородно легированных слоев. Результаты, демонстрирующие зависимость проводимости (σ) имплантированного бором алмаза от температуры представлены на рис. 1.

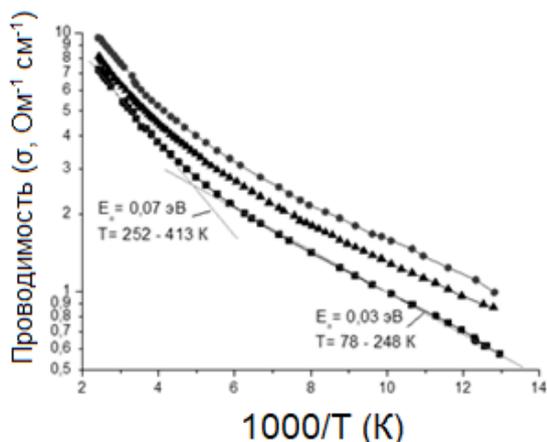


Рис. 1. Зависимость проводимости (σ) имплантированного бором алмаза от температуры

Из рис. 1 видно, что на зависимости проводимости от температуры наблюдаются три участка с различной энергией активации. Увеличение энергии активации с ростом температуры, вероятнее всего, связано с размытием акцепторного уровня бора в легированном слое в связи с неоднородностью распределения атомов бора по глубине (слоистая структура), которое обусловлено перекрытием пробегов.

На рис. 2 показана зависимость проводимости имплантированного бором алмаза для образца № 4, у которого был частично стравлен поверхностный слой.

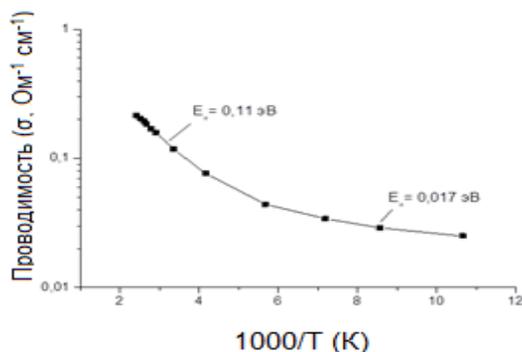


Рис. 2. Зависимость проводимости имплантированного бором алмаза (частично стравленная поверхность)

Зависимость проводимости имплантированного бором алмаза для образца № 4 на рис. 2, у которого был частично стравлен поверхностный слой, показывает, что его сопротивление примерно на порядок больше значений у первых трех образцов (рис. 1). Из данных приведенных на рис. 1 и 2 следует, что полиэнергетическая имплантация больших доз бора позволяет получать проводящие слои с высокой

проводимостью уже при комнатной температуре, что обусловлено низкой энергией активации имплантированного бора при высокой концентрации.

Для создания в приповерхностной зоне тонкого легированного слоя была выполнена низкоэнергетическая ионная имплантация бора (B^+) через маску из Al, и азота (азот, N^+) – без маски, в результате которой в алмазе формируется тонкий слой р-типа ~ 10 нм за счет компенсации бора азотом на «хвосте» профиля распределения бора. На рис. 3 и 4 показаны профили распределения по глубине внедренных в алмаз с различной энергией $E = (10-25)$ кэВ атомов бора (B^+) через маску из Al толщиной 30–80 нм (кривые 1–4) и без маски (кривые 5–6).

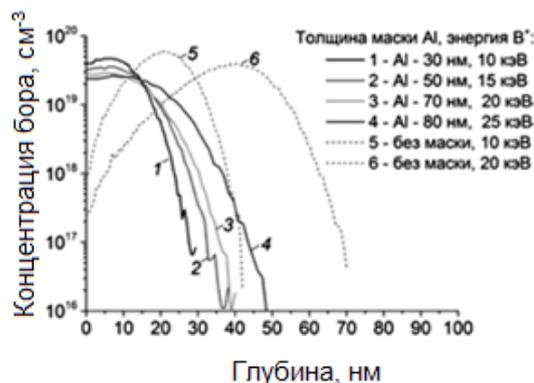


Рис. 3. Распределение по глубине атомов бора (B^+), внедренных в алмаз с различной энергией через маску из Al и без маски

Были выполнены расчеты методом SRIM профилей распределения имплантированных ионов с энергией $E = (10-25)$ кэВ: через маску из алюминия (Al) атомов бора и без маски – атомов азота, а также разработан и исследован технологический маршрут формирования тонкого легированного слоя.

Толщина маски из Al для соответствующей энергии ионов бора подбиралась таким образом, чтобы проецированный пробег ионов бора в Al лежал на границе раздела «маска-алмаз».

Из рис. 3 видно, что при наличии Al маски максимум профиля распределения атомов бора лежит непосредственно в приповерхностном слое толщиной (15–20) нм (кривые 1–4), а «хвост» профиля (максимальный пробег ионов B^+) тянется до глубины (30–50) нм.

Имплантация ионов B^+ в непокрытый алмаз (кривые 5 и 6) приводит к тому, что в приповерхностном слое на глубине 10 нм концентрация атомов бора почти на два порядка ниже, чем в окрестности проецированного пробега, что не позволяет создавать поверхностный легированный слой без травления поверхности на глубину (20–30) нм.

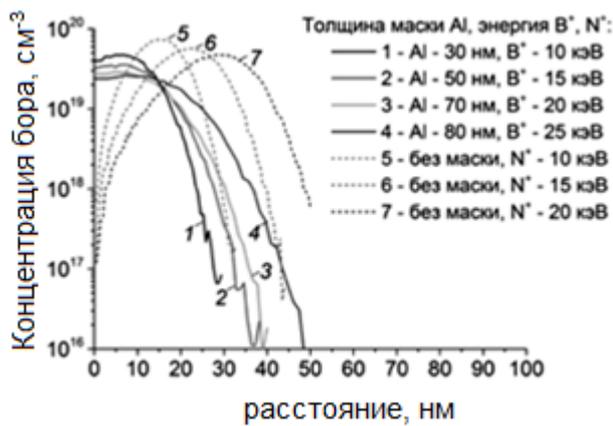


Рис. 4. Распределение по глубине внедренных в алмаз с различной энергией через маску из Al атомов бора (B⁺) и без маски – атомов азота (N⁺)

Азот является глубоким донорным центром в алмазе с энергией активации $E_a=1,7$ эВ, поэтому его вклад в электропроводность пренебрежимо мал. Как видно из рис. 4, в приповерхностной области на глубине 10 нм концентрация атомов азота, внедренных с энергией 15–20 кэВ (кривые 6 и 7), на порядок ниже, чем концентрация атомов бора (кривые 1–4), поэтому в этой области бор не будет перекомпенсироваться азотом и в ней сформируется тонкий легированный бором слой. В области «хвоста» профиля распределения атомов бора концентрация азота превышает концентрацию бора, поэтому азотные донорные центры скомпенсируют акцепторные центры бора и эта область будет обладать сопротивлением, превышающим сопротивление тонкого p-слоя на несколько порядков.

Полученные экспериментальные зависимости проводимости имплантированного бором алмаза от температуры, а также формирование концентрационных профилей распределения бора и азота по глубине алмазных монокристаллов, как по отдельности, так и в совокупности могут быть использованы в технологии создания алмазных ФЧС различного типа, в т.ч. для ФЧ элементов (пикселей) планарных структур УФ МЭ ФПУ.

Подбирая дозу имплантированных ионов бора (в зависимости от концентрации азотных донорных центров) и энергию ионов бора, в объеме алмаза можно создавать захороненные сильно компенсированные, слабелегированные слои p-типа и сильнолегированные проводящие слои p⁺-типа.

На рис. 5 показана структура фоточувствительного элемента (пикселя) УФ МЭФПУ, формируемого с помощью ионной имплантации бора. Цифрами обозначены: (1) - подложка; (2) - приповерхностные и заглубленные имплантированные B⁺ ($E=25-500$ кэВ) области; (3) металлизация Pt/Al (1-ый уровень); (4) - металлизации Pt/Al (2-й уровень); (5) область генерации электронно-дырочных пар; (6) - захороненная компенсированная область (0,5 – 1) мкм; (7) – диэлектрик; (8) – межслойный диэлектрик.

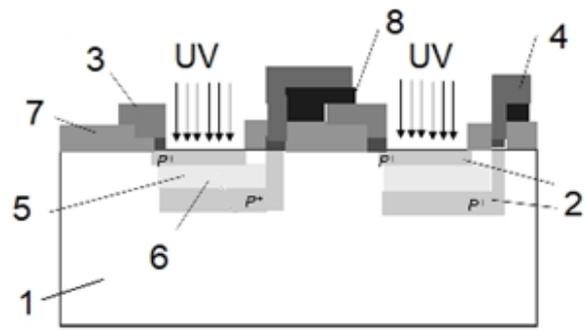


Рис. 5. Структура фоточувствительного элемента УФ МЭФПУ формируемого ионной имплантацией

Реализуемость представленной на рис. 5 УФ МЭФПУ обусловлена тем, что нелегированный алмаз обладает огромным удельным сопротивлением $10^{12}-10^{13}$ Ом·см, что позволяет исключить дополнительные решения для изоляции ионно-имплантированных ФЧ элементов от друга. Особенностью представленной на рис. 5 УФ МЭ ФПУ является то, что захороненный активный слой располагается в области генерации носителей и одновременно он удален от поверхности; тем самым подавляется поверхностная рекомбинация. Активная захороненная область глубиной 0,5–1 мкм является высокоомной компенсированной (фактически близкой к собственной), области под контакты делаются сильнолегированными (p⁺).

Преимуществом подобного элемента для УФ-МЭФПУ является низкое напряжение смещения на фоторезисторе и повышение квантовой эффективности (и следовательно, обнаружительной способности), так как засветка осуществляется непосредственно в алмаз, а не через полупрозрачный Pt-электрод с определенным коэффициентом поглощения.

На рис. 6 показана предложенная и реализованная нами топология УФ МЭФПУ ФР-типа (топологический фрагмент), на основе планарных фоторезисторов, показанной на рис. 5.

На рис. 6 цифрами обозначены: (1) ФЧС ФР-типа; (2) – диэлектрик; (3) – строчные шины; (4) – столбцовые шины; (5) - межслойный диэлектрик; (6) - область, защищенная фоторезистом; (7) – мультиплексор строк (основной) 1; (8) - мультиплексор столбцов 2;

ФЧС сформированная на основе тонкого захороненного слоя (например ионно-имплантированного) обладает рядом преимуществ относительно объемных ФЧС, в т.ч. тех, которые работают «через объем» кристалла, см. гибридный МЭФПУ УФ-диапазона, см. [4, 11, 12].

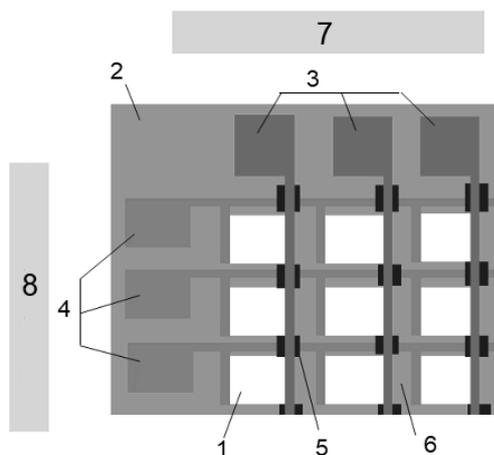


Рис. 6. Топология УФ-МЭФП ФР-типа на основе матрицы планарных фоторезисторов

На рис. 7 представлен схематический разрез конструкции подобного гибридного УФ МЭ ФПУ.

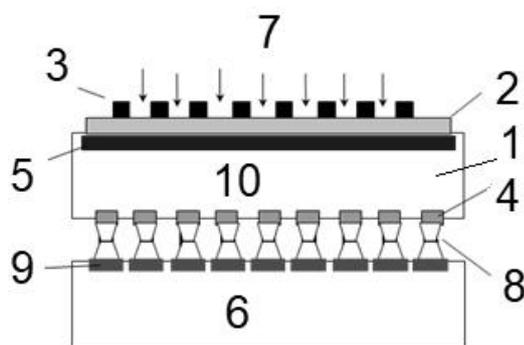


Рис. 7. Схематический разрез конструкции гибридного МЭ-ФПУ УФ-диапазона

На рис. 7 цифрами обозначены: (1) - алмазная подложка; (2) - полупрозрачный слой Pt; (3) - металлизация на основе Al (непрозрачный слой); (4) - нижний электрод (Pt/Al); (5) - область генерации носителей; (6) - Si-мультиплексор; (7) - УФ излучение; (8) - In-столбики (встречные); (9) - ячейка считывания. Захороненный ФР-слой (рис. 5) требует по сравнению с «объемным» ФР-слоем (алмазная подложка 300 мкм с вытягиванием носителей через объем кристалла), гораздо меньшей величины $E_{см}$, подаваемого на элементы матрицы с сохранением высокой величины тянущего электрического поля, поскольку значительно уменьшается расстояние между токовыми контактами фоторезистора, которые располагаются в области генерации носителей. Поэтому для данного варианта планарной матрицы по сравнению с вариантом гибридного МЭ-ФПУ результатом будет значительный выигрыш в пороговой чувствительности.

На рис. 8 представлены сравнительные расчетные пороговые характеристики для ФР двух типов: ионно-имплантированный захороненный слой относительно ФР-слоя объемного типа. На рис. 8 цифрами обозначены: (1) - порог чувствительности ФЧС на основе ионно-имплантированного слоя (см. рис.5); (2) -

порог чувствительности ФЧС «объемного» типа в гибридном УФ-МЭ ФПУ (см. рис. 7).

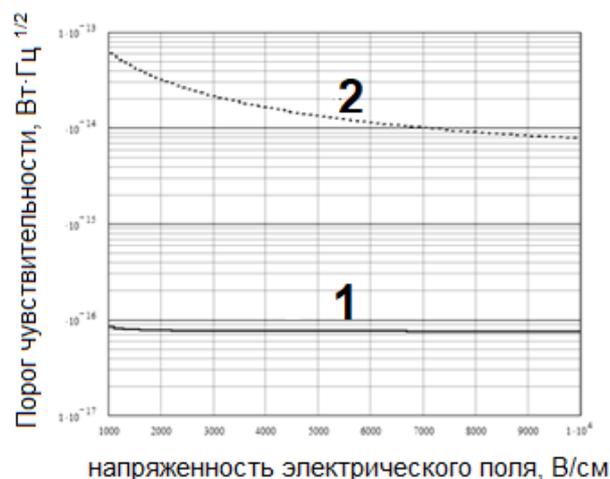


Рис. 8. Зависимость порога чувствительности ФЧ слоев ФР-типа от напряженности поля

Из анализа зависимостей на рис. 8, следует, что планарные ФЧС «захороненного» типа (ионно-имплантированный ФР-слой) при напряжении смещения (0,5–1) В будут иметь обнаружительную способность в 100–200 раз больше, чем ФЧС ФР-типа, изготовленные на нелегированном алмазе (в т.ч. алмазе 2а типа) при напряжениях смещения (200–250) В. У фоторезисторов на основе нелегированных кристаллов алмаза (в т.ч. алмазе 2а типа) толщиной (200–300) мкм порог чувствительности сильно зависит от напряженности электрического поля (напряжения смещения), тогда как планарные ФЧС «захороненного» типа (интегральный ионно-имплантированный ФР-слой) в области полей $E = 10^3$ – 10^4 В/см имеют практически постоянный порог чувствительности, см. рис. 8. В области полей свыше 10^4 В/см наступает насыщение дрейфовой скорости носителей и порог чувствительности выходит на насыщение. Подтверждением этого является зависимость токовой чувствительности алмазного ФЧС ФР-типа (300 мкм, см. рис. 7), от приложенного напряжения смещения, приведенная на рис. 9.

На рис. 9 цифрами обозначены значения напряжения смещения (В): (1) – 5; (2) – 10; (3) – 15; (4) – 30; (5) – 50; (6) – 100; (7) – 150; (8) – 200.

Как видно из рис. 9, с ростом тянущего электрического поля отклик УФ ФП увеличивается. Смещение максимума спектральной чувствительности в коротковолновую область при увеличении смещения объясняется вытягиванием неравновесных носителей (электронов), генерированных более коротковолновым, сильно поглощаемым излучением вблизи поверхности со стороны освещаемого Pt-контакта для ФР-слоя объемного типа (300 мкм). Тогда как при низких полях эти носители за время жизни ($\tau \sim 10^{-9}$ с) не успевают продрейфовать к противоположной стороне кристалла. Более длинноволновое излучение поглощается в объеме кристалла, и часть носителей

при более низких полях успевает достигнуть вытягивающего электрода. Данный эксперимент дополнительно показывает, что вблизи области фундаментального поглощения алмаз имеет сильную зависимость коэффициента поглощения от длины волны УФ-излучения.

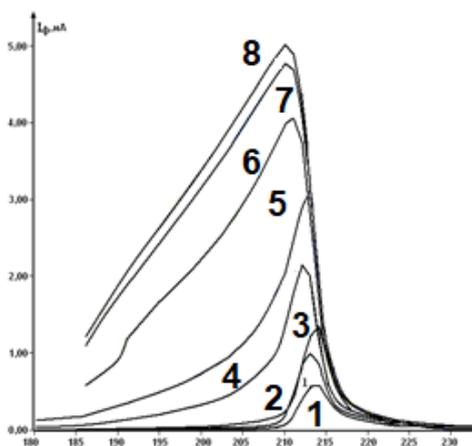


Рис. 9. Зависимость спектральной характеристики объемного (300 мкм) алмазного ФЧ слоев объемного ФР-типа от напряжения смещения (В)

IV. ВЫВОДЫ

Полиэнергетическая ионная имплантация больших доз ионов бора позволяет получать проводящие слои с высокой проводимостью при комнатной температуре, что обусловлено низкой энергией активации имплантированного бора при высокой концентрации.

Полученные экспериментальные зависимости проводимости имплантированного бором алмаза от температуры, а также возможность формирования необходимых концентрационных профилей распределения бора и азота по глубине алмазных монокристаллов, как по отдельности, так и в совокупности, могут быть использованы в технологии создания алмазных ФЧС различного типа, в т.ч. для формирования единичных ФЧ элементов (пикселей) для планарных УФ МЭ ФПУ.

Подбирая дозу имплантированных ионов бора (в зависимости от концентрации азотных донорных центров) и энергию ионов бора можно создавать захороненные сильно компенсированные, слаболегированные слои р-типа и сильнолегированные проводящие слои р⁺-типа. При переходе к планарной технологии изготовления УФ МЭФПУ на основе ионно-имплантированных ФЧС можно получить существенный в $(1-2) \cdot 10^2$ раз выигрыш в пороге чувствительности по сравнению с МЭФПУ на основе нелегированного алмаза.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Y. J. Lu, C. N. Lin, and C. X. Shan, "Optoelectronic diamond: growth, properties, and photodetection applications," *Adv. Opt. Mater.* 6(20), 1800359 (2018). doi.org/10.1002/adom.201800359

[2] Jia, L., Zheng, W. & Huang, F. Vacuum-ultraviolet photodetectors. *PhotonIX* 1, 22 (2020). doi.org/10.1186/s43074-020-00022-w

[3] Altukhov, A.A., Afanas'ev, M.S., Kvaskov, V.B. et al. Application of Diamond in High Technology. *Inorganic Materials* 40, S50–S70 (2004). https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000036328.94568.7c

[4] Алтухов А.А., Гуляев Ю.В., Талипов Н.Х. [и др.]. О возможности создания солнечно-слепых планарных матричных фотоприемников УФ-диапазона на основе алмаза для космической аппаратуры. Сборник научных трудов «XX Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России». 10-12. 09 2015 г. Москва, С.185-190.

[5] ChaoNan Lin, YingJie Lu, YongZhi Tian [et al.]. Diamond based photodetectors for solar-blind communication" *Opt. Express* 27, 29962-29971 (2019) doi.org/10.1364/OE.27.029962

[6] A.A. Altukhov. Ultraviolet Photodetectors Fabricated on Natural-Diamond Substrates for Optoelectronic Systems. / A.A. Altukhov, V.A. Kireev, N.M. Kirilin [at. al.]// *J. of Comm. Tech. and Electr.* 2006. №51. P. 1437 – 1440.

[7] Алтухов А.А., Ключкова А.М., Митягин А.Ю. [и др.]. Фотоприёмники ультрафиолетового диапазона на основе алмаза 2а типа для нового поколения аппаратуры наблюдения и распознавания объектов. // *Радиотехника и электроника.* -2007- Т.52- №13- С.1-4.

[8] Measuring the optical density of wastewater by means of a diamond UV photodetector. Shepelev V.A., Feshchenko V.S., Altukhov A.A., [et al.]. *Russian Engineering Research.* 2017. Т. 37. № 3. С. 273-275.

[9] M. Liao and Y. Koide, "High-performance metal-semiconductor-metal deep-ultraviolet photodetectors based on homoepitaxial diamond thin film," *Appl. Phys. Lett.* 89(11), 113509 (2006).

[10] A.A. Altukhov, A.M. Klochkova, A.Yu. Mityagin [et al.]. Diamond-Based Photosensitive Matrix Elements for the UV Range. *J. of Communications Technology and Electronics.* – 2008. – №53 P. 941–945

[11] Фещенко, А.А. Алтухов, А.Ю. Митягин, [и др.]. Матричный фотоприемник для регистрации изображений в ультрафиолетовой области спектра // *Датчики и системы.* - 2010. - N 1. - С. 50-54.

[12] Фотовольтаический приёмник ультрафиолетового диапазона на основе алмаза. Патент РФ 2270494. МПК H01L 31/18. А.А. Алтухов, В.В. Гаврилов, В.В. Ерёмин [и др.], опубл. 20.02.2006.

[13] H. El-Hajj. Characteristics of boron δ -doped diamond for electronic applications. / H. El-Hajj, A. Denisenko, A. Bergmaier [et. al.]// *Diamond and Related Materials.* 2008. № 17. P. 409 – 414.

[14] Шепелев В.А., Алтухов А.А., Сигов А.С., Фещенко В.С. Исследование физических процессов в алмазных датчиках УФ излучения на основе спектральных и вольт-амперных характеристик // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС).* 2021. № 3. С. 146-151. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-3-146-151.

[15] А. А. Алтухов, А. Ю. Митягин, Н. Х. Талипов, В. С. Фещенко, В. А. Шепелев / *Ультрафиолетовый фотоприемник форматом 128×128 пикселей на основе алмазного чувствительного элемента // Радиотехника и электроника.* 2010, Т. 55, № 6, с. 764-768.

Structural and Technological Solutions of Diamond-based Multi-element UV Photodetectors

A.A. Altukhov

UralAlmazInvest Production and Technology Center, Moscow, altuhov_a@mirea.ru

Abstract — The results of research on the development of constructive and technological solutions for photosensitive elements of multi-element diamond UV-photodetectors are presented. The results of the application of ion implantation of boron and nitrogen ions for the formation of buried photosensitive layers in diamond are presented. It has been shown that poly-energy implantation of large doses of boron makes it possible to obtain layers with high conductivity at room temperature. The obtained experimental dependences on ion dose and energy demonstrate the possibilities of creating highly compensated, weakly doped p-type layers and highly doped p-type layers. The design and topology of photosensitive cells based on ion-implanted layers for matrix diamond photodetectors are shown.

Keywords — diamond, photodetector, ultraviolet range, multi-element photodetector, ion implantation.

REFERENCES

- [1] Y. J. Lu, C. N. Lin, and C. X. Shan, "Optoelectronic diamond: growth, properties, and photodetection applications," *Adv. Opt. Mater.* 6(20), 1800359 (2018). doi.org/10.1002/adom.201800359
- [2] Jia, L., Zheng, W. & Huang, F. Vacuum-ultraviolet photodetectors. *PhotoniX* 1, 22 (2020). doi.org/10.1186/s43074-020-00022-w
- [3] Altukhov, A.A., Afanas'ev, M.S., Kvaskov, V.B. et al. Application of Diamond in High Technology. *Inorganic Materials* 40, S50–S70 (2004). https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000036328.94568.7c
- [4] Altukhov A.A., Gulyaev Yu.V., Talipov N.H. [et al.]. On the possibility of creating solar-blind planar matrix photodetectors of the UV range based on diamond for space equipment. Collection of scientific papers "XX International Scientific and Technical Conference "High Technologies in Russian industry". 10-12. 09, 2015 Moscow, pp.185-190.
- [5] ChaoNan Lin, YingJie Lu, YongZhi Tian [et al.]. Diamond based photodetectors for solar-blind communication" *Opt. Express* 27, 29962-29971 (2019) doi.org/10.1364/OE.27.029962
- [6] A.A. Altukhov. Ultraviolet Photodetectors Fabricated on Natural-Diamond Substrates for Optoelectronic Systems. / A.A. Altukhov, V.A. Kireev, N.M. Kirilin [at. al.]// *J. of Comm. Tech. and Electr.* 2006. №51. P. 1437 – 1440.
- [7] Altukhov A.A., Klochkova A.M., Mityagin A.Yu. [et al.]. Ultraviolet photodetectors based on type 2a diamond for a new generation of object observation and recognition equipment. // *Radio engineering and electronics.* -2007- Vol.52- No.13- p.1-4.
- [8] Measuring the optical density of wastewater by means of a diamond UV photodetector. Shepelev V.A., Feshchenko V.S., Altukhov A.A., [et al.]. *Russian Engineering Research.* 2017. T. 37. № 3. C. 273-275.
- [9] M. Liao and Y. Koide, "High-performance metal-semiconductor-metal deep-ultraviolet photodetectors based on homoepitaxial diamond thin film," *Appl. Phys. Lett.* 89(11), 113509 (2006).
- [10] A.A. Altukhov, A.M. Klochkova, A.Yu. Mityagin [et al.]. Diamond-Based Photosensitive Matrix Elements for the UV Range. *J. of Communications Technology and Electronics.* – 2008. – №53 P. 941–945
- [11] Feshchenko, A.A. Altukhov, A.Yu. Mityagin, [et al.]. Matrix photodetector for recording images in the ultraviolet region of the spectrum // *Sensors and systems.* - 2010. - N 1. - pp. 50-54.
- [12] Photovoltaic receiver of the ultraviolet range based on diamond. RF Patent 2270494. IPC H01L 31/18. A.A. Altukhov, V.V. Gavrillov, V.V. Eremin [et al.], publ. 02/20/2006.
- [13] Characteristics of boron δ -doped diamond for electronic applications. /H. El-Hajj, A. Denisenko, A. Bergmaier [et. al.]// *Diamond and Rel. Materials.* 2008. -17. P. 409 – 414.
- [14] Shepelev V.A., Altukhov A.A., Sigov A.S., Feshchenko V.S. Investigation of physical processes in diamond UV radiation sensors based on spectral and current-voltage characteristics // *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development* - 2021. Issue 3. P. 146-151. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-146-151
- [15] A. A. Altukhov, A. Yu. Mityagin, N. H. Talipov, Ultraviolet photodetector in 128×128 pixels format based on a diamond sensing element // *Radio Engineering and Electronics.*2010, vol. 55, No. 6, pp. 764-768.