Uzbek Journal of Physics

Vol.21(№3) 2019 PP.139-146

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ Au-vGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au-СТРУКТУРЫ С ПЛЕНОЧНЫМИ ГЕТЕРОСЛОЯМИ

Д.М. Ёдгорова, Ф.А. Гиясова, Ш.М. Кулиев, А.А. Якубов, Г. Муродуллаева, Ж.Х. Шертоев

Физико-технический институт АН РУз, 100084 Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, 2б, Узбекистан, yodgorova@uzsci.net

(Получена 28.11.2018)

Монокристалл арсенид галлийли тагликка вакуумда пуркаш йўли билан индий фосфиди ва кадмий сульфиди юпқа қатламлари сепиш билан олинган кўп қаватли фотосезгир структуралар тадқиқ қилинган. Улар кенг спектрал оралиқда (0.5–1.7 мкм) киришмалар соҳасида максимал сезгирликка эгалиги тажрибада кўрсатилган. Спектрал фототокни ишчи кучланиши билан суперчизиқли ошиши бирламчи фототокни ички кучайтириш эффекти мавжудлиги билан боғлиқ.

Проведены исследования фоточувствительных многослойных полупроводниковых Au-vGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структур, полученных методом вакуумного напыления тонких пленок сульфида кадмия и фосфида индия на монокристаллическую подложку арсенида галлия. Экспериментально показано, что они отличаются фоточувствительностью в широком спектральном диапазоне (0.5−1.7 мкм) с максимальной фоточувствительностью в примесной области спектра (1.2 и 1.55 мкм) при комнатной температуре. При этом зависимости спектрального фототока от рабочего напряжения приобретают суперлинейный характер, что обусловлено наличием эффекта усиления первичного фототока.

The photosensitive sandwich-structured Au-vGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au semiconductor formed by vacuum deposition of thin films of cadmium sulfide and indium phosphide on a single-crystal substrate of gallium arsenide has been studied. It was experimentally shown that the structures are characterized by photosensitivity in a wide spectral range (0.5–1.7 microns) with maximum photosensitivity in the impurity spectral region (1.2 and 1.55 microns) at room temperature. In this case, the dependence of the spectral photocurrent on the operating voltage acquires a superlinear character, which is due to the presence of the amplification effect of the primary photocurrent.

В последнее время при создании полупроводниковых приборов наблюдается тенденция перехода на пленочные структуры, которые отличаются сравнительно простой технологией получения и дешевизной в отличие от эпитаксиальной технологии [1, 2]. Исторически, можно сказать, что фотоприемники первого поколения были изготовлены на основе PbS с областью спектральной чувствительности 1–3 мкм. Далее, для инфракрасного диапазона (ИК) были разработаны поликристаллические фоторезисторные структуры на основе PbSe, а для видимой области спектра на основе CdS. По мере освоения ИК диапазона стали изготавливать фоторезисторы и фотодиоды на основе InSb и InAs. Затем был совершен переход на полупроводниковые твердые растворы $In_xGa_{1-x}As$ для изготовления быстродействующих фотодиодов для волоконно-оптических систем со спектральным диапазоном 1.3 и 1.55 мкм [3]. Элементарные полупроводники, такие как кремний и германий, заняли свою нишу при изготовлении

фотоприемников видимого и ИК диапазонов [4]. Кроме того, структуры металл-полупроводник-металл стали использоваться для снижения темнового тока фотодиодных структур. Как показано в работе [5], на структурах металл-полупроводник-металл на основе сверхрешетки типа ZnSe/ZnTe с площадью 100×100 мкм^2 получены низкие темновые токи 10^{-8} А/см^2, максимальный фотоотклик на длине 620 нм составил 0.22 А/Вт и внешний квантовый выход порядка 44% при комнатной температуре. При этом в области 620 нм и 870 нм наблюдаются пики фототока. Вместе с тем арсенидгаллиевые p^+-i-n^+ фотодиоды стали применять для регистрации ядерного излучения, а возможности увеличения быстродействия показаны на гетеропереходных структурах. В частности, арсенидгаллиевые меза p^+-i-n^+ фотодиоды диаметром 200 мкм и толщиной 7.7 мкм, имея низкие значения темнового тока 1 нА/см^2, представляют интерес для регистрации рентгеновского излучения в области длин волн от 580 до 980 нм. Из исследований фототока в ближней ИК области определена толщина (0.16 мкм) неактивного (мертвого) слоя [6], а на основе исследования численным методом моделирования физических процессов в фотоприемниках с гетеропереходами $p^+Al_{0.3}Ga_{0.7}As/i$-GaAs/n^+-$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ и гетероструктурой металл/n-$Al_{0.3}Ga_{0.7}As/n^+$-GaAs установлено [7], что они обладают высоким быстродействием 1.6–1.7 пс и могут использоваться для оптической стыковки элементов интегральной оптики.

В работе [8] рассмотрена монолитная сборка активного фотопикселя, выполненного из InSb на подложке GaAs, которая подходит для крупномасштабной интеграции в инфракрасной области спектра. Пиксельная адресация обеспечивается комбинированием GaAs MESFET полевого транзистора с фотодиодом из InSb. Для поддержания высокого квантового выхода разрабатываются новые высокоскоростные фотодиоды [9], которые позволяют на основе InP поддерживать неизменную высокую внешнюю эффективность (~74%, без просветляющего покрытия) в широком оптическом диапазоне (от 0.85 до 1.55 мкм) за счет устранения медленного дрейфа дырок в коллекторном слое на основе $In_{0.53}Ga_{0.47}As$.

В работе [10] показана возможность достижения высокой полосы пропускания (свыше 3 мэВ) за счет интеграции арсенидгаллиевого p-i-n фотодиода с квантовыми точками путем эпитаксиального нанесения на пъезоэлектрик $LiNbO_3$, который возбуждается акустической волной.

Появление узкозонного материала полупроводника – твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$, положило начало развитию тепловидения [11]. На его основе стали изготавливать тепловизионные камеры ночного видения.

В связи с развитием технологии получения эпитаксиальных слоев молекулярно-лучевой эпитаксией и газофазной эпитаксией из паров металлоорганических соединений стали создавать многослойные гетеро- и квантоворазмерные структуры [12]. Возможность их совмещения с интегральными схемами вместо дискретных фотоприемников позволила создавать фотоприемные устройства, которые объединяют в себе функции детектора оптического сигнала и его преобразования – предварительного усиления, задержки, интегрирования и т. д.

Среди освоенных типов фотоприемников следует отметить p-i-n и лавинные фотодиоды на основе кремния и InGaAs, которые относятся к фотоприемникам с внутренним усилением фототока за счет лавинного размножения носителей заряда в режиме пробоя. Однако в этих структурах темновые токи оказались большими.

Так, при изготовлении лавинных *p*-*i*-*n* фотодиодов для уменьшения темнового тока использовали охранное кольцо [13], препятствующее достижению *p*-*n*-перехода носителями заряда, генерированными на периферии кристалла. При этом им не удалось уменьшить емкость структуры (<130 пФ). В работе [14] для уменьшения емкости фотодиода была изготовлена полупроводниковая пластина с гетероструктурой GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделенными чувствительной (диаметр 50 мкм) и контактной мезами, соединенными мостиковым фронтальным контактом.

Анализ известных работ указывает на то, что проблемы расширения спектрального диапазона, процессы усиления первичного фототока и снижения удельного значения темнового тока, а также емкости фотоприемников остаются без должного внимания.

Ранее нами были обсуждены проблемы создания фоточувствительных многослойных структур на объемных полупроводниковых толстопленочных структурах. Установлены особенности фоточувствительности многобарьерных структур [15] и двухбазовых структур с барьерами Шоттки и Мотта, а также инжекционно-полевой фотодиодной структуры на основе арсенида галлия [16].

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования световых и спектральных характеристик многослойных полупроводниковых структур с пленочными гетерослоями на основе арсенида галлия.

Эксперимент. Гетерослои *n*CdS и *n*InP толщиной порядка 0.4 мкм получены последовательным вакуумным напылением из размельченных источников на подложку арсенида галлия. Подложка представляет собой монокристалллический GaAs марки АГЧПМ (арсенид галлия, полученный методом Чохральского для модуляторов, легированный кислородом) с удельным сопротивлением 1×10^7 Ом·см и ориентированный в кристаллографическом направлении (100), толщиной 350 мкм при диаметре 3 см [17]. Слой *n*CdS получен напылением в вакуумной установке при температуре подложки арсенида галлия 750°C, а слои *n*InP – при температуре 500°C. Полупрозрачные слои золота также получены напылением в вакууме при температуре 420°C.

Масса компонентов для получения полупрозрачных металлических слоев определялась при помощи электронных весов типа Digital Analitical Balance Scale (U.S. SOLID), предназначенных для точного определения массы тел. Для этих весов цена деления оптической шкалы равновесия составляла 0.1 мг/дел. Погрешность цены деления оптической шкалы установки нуля не более ±0.003 мг/дел. Для напыления использовали 16 мг компонентов золота. При этом толщина напыленного слоя была порядка 100 Å. В частности, на одну структуру площадью 1.0 см^2 расходовали 7.72 мг золота.

Вольтамперные характеристики в темноте и при подсветке снимали по стандартной схеме. Рабочее напряжение подавали от блоков питания типа Б5-48 и Б5-50 с шагом 0.05 вольт. Напряжение и ток фиксировали универсальным вольтметром В7-21А и В7-35. Минимальный ток был равен 1 нА, относительная погрешность измерения 0.2–0.4%.

Спектральные характеристики исследуемых образцов снимали с помощью монохроматора фирмы Carl Zeiss Jena (Германия) с оптическим диапазоном 0.3–3 мкм. Образцы помещали в измерительную камеру, в центре которой сфокусировали монохроматическое излучение от монохроматора. Диапазон измерений охватывал от 0.4 до 2.2 мкм.

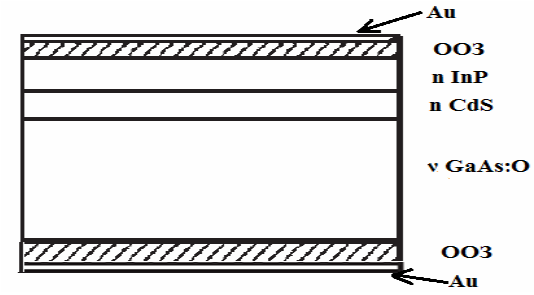


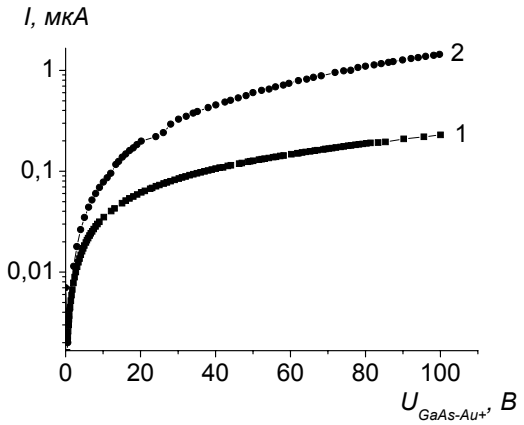
Рис. 1. Поперечный разрез фоточувствительной многослойной полупроводниковой Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры: Au – полупрозрачный выпрямляющий слой, ООЗ – область объемного заряда; *n*InP – напыленные слои фосфида индия и сульфида кадмия *n*CdS толщиной 0.4 мкм; νGaAs:O – подложка арсенида галлия.

Таким образом, были получены многослойные Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры [18], которые скрайбировали на дискретные образцы размерами 3×4 мм^2 (рис. 1).

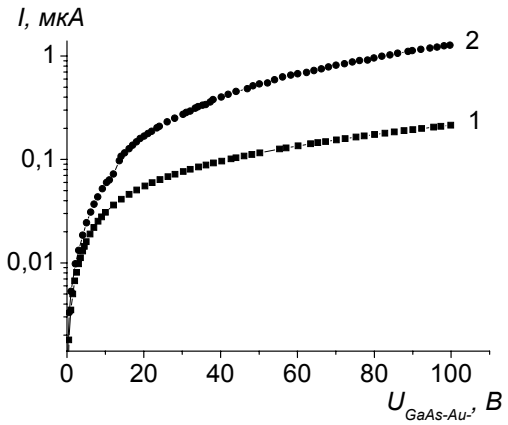
Результаты и обсуждение. Зависимости светового фототока при монохроматическом освещении длиной волны 1.2 мкм и темнового тока от напряжения приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что по мере увеличения напряжения фототок, то есть разность светового и темнового токов, возрастает

$$I^{\Phi} = I^{свет} - I^{тем}. \qquad (1)$$

Действительно фототок от напряжения для прямого смещения Au-νGaAs:O-перехода исследуемой Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au-структуры увеличивается, стремясь к суперлинейной зависимости (рис. 3), что подтверждает наличие эффекта усиления первичного фототока.



Прямое смещение Au-νGaAs:O-перехода: *1* – темновой ток; *2* – световой ток при λ=1.2 мкм.



В режиме запирания Au-νGaAs:O-перехода: *1* – темновой; *2* – световой ток при λ=1.2 мкм.

Рис. 2. Зависимости темнового и светового тока (для монохроматического излучения 1.2 мкм) от рабочего напряжения.

Как известно, токовая фоточувствительность диодной структуры S_i^{ϕ} определяется отношением создаваемого фототока к падающей световой мощности

$$S_i^{\phi} = \frac{I^{\phi}}{\Phi}, \text{ (А/Вт)}, \qquad (2)$$

где $\Phi_{лм} = E_{лк} \times S$, $I^{\phi} = I^{св} - I^{тем}$.

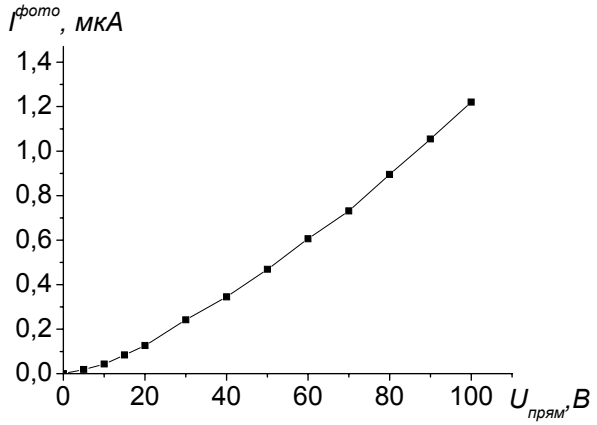


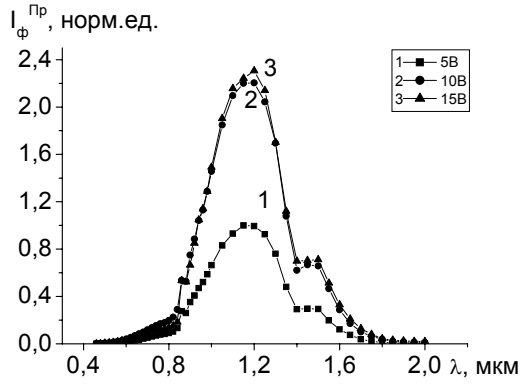
Рис. 3. Зависимость спектрального фототока от рабочего напряжения при возбуждении монохроматическим светом с λ=1.2 мкм со стороны Au-νGaAs:O-перехода.

Соответственно для интегрального света с максимумом 0.55 мкм 1 люмен = 0.0015 Вт [19]. Как следует из формулы (2), величина фототока прямо пропорционально зависит от интенсивности излучения

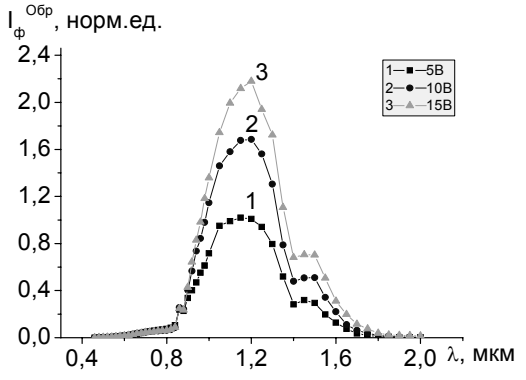
$$I^{\phi} = S_i^{\phi}\Phi\,. \qquad (3)$$

Так как измерения проводятся при заданной длине волны, увеличение фототока обусловлено повышением фоточувствительности от рабочего напряжения. Следует отметить, что наблюдаемые зависимости световых характеристик от рабочего напряжения объясняются усилением первичного фототока.

Исследования спектральных характеристик двухсторонне чувствительной многослойной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры с площадью 12 мм^2 показали, что их оптический спектральный диапазон охватывает от 0.5 мкм до 1.6 мкм с характерными особенностями (рис. 4, 5).



В режиме прямого смещения освещаемого Au-νGaAs:O-перехода.



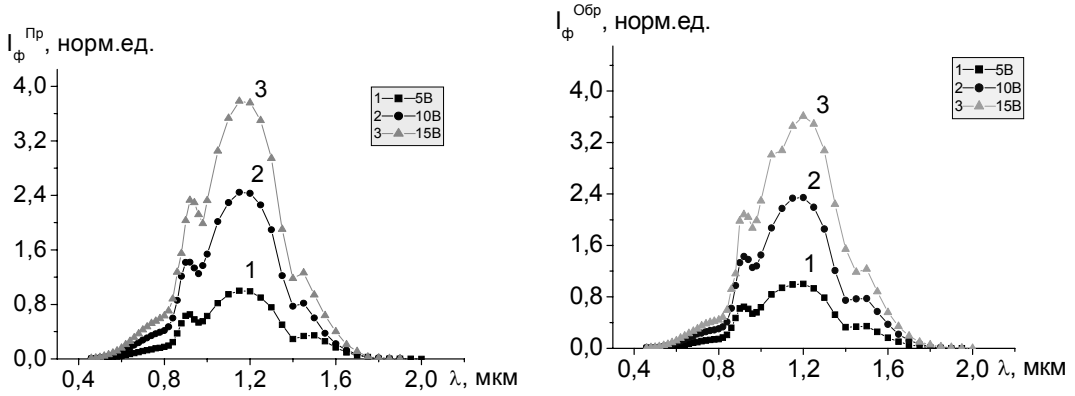
В режиме запирания освещаемого Au-νGaAs:O-перехода.

Рис. 4. Спектральная характеристика Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au-структуры.

Так, при освещении со стороны Au-νGaAs:O-перехода в режиме прямого смещения до 10 вольт и выше спектральный фототок выходит на насыщение, а при запирающем режиме по мере увеличения рабочего напряжения от 5 В до 15 В спектральный фототок последовательно увеличивается в 2.4 раза с соответствующими пиками при 1.2 мкм и 1.5 мкм. При этом в собственной области (0.87 мкм) наклон нарастания спектральной характеристики сменяется, а в длинноволновой области спектра при 1.5 мкм создается ступенька, связанная с уровнем кислорода 0.8 эВ [20, 21]. Её проявление при обеих полярностях связано с падением напряжения в базовой области, откуда происходит генерация носителей с уровня кислорода.

При освещении со стороны гетероперехода *n*InP-Au как в режиме прямого, так и обратного смещения спектральный фототок в полтора раза становится больше по сравнению со случаем освещения со стороны Au-νGaAs:O-перехода.

В собственной области поглощения пик становится более заметным, а в примесной области создается максимум при 1.2 мкм, обусловленный собственными дефектами, глубиной залегания 0.35–04 эВ [22].



В режиме прямого смещения освещаемого *n*InP-Au перехода.

В режиме запирания освещаемого *n*InP-Au перехода.

Рис. 5. Спектральная характеристика Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au-структуры при разных напряжениях.

Здесь характерным является то, что при малых напряжениях (5 В) во всем диапазоне спектральные чувствительности близки (связанные с собственной, дефектной примесной 1.2 мкм и кислородными уровнями). Однако по мере увеличения прилагаемого напряжения спектральный фототок в области, связанной с дефектами, приобретает максимальное значение, что, по-видимому, связано с меньшим количеством концентрации активной примеси кислорода.

Таким образом, из анализа спектральных характеристик многослойной гетероизотипной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры следует, что при возбуждении монохроматическим излучением со стороны *n*InP-Au перехода имеет место разделение фотогенерированных носителей из собственной области, затем с увеличением рабочего напряжения поле в базовой области возрастает и разделение фотоносителей осуществляется с примесной областью (с уровней собственных дефектов и далее из уровней кислорода), которое способствует обеспечению

высокой чувствительности со стороны *n*InP, имеющего меньшее удельное сопротивление (с большей собственной концентрацией носителей). При возбуждении гетероизотипной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры со стороны арсенида галлия (подложки) с меньшей собственной концентрацией носителей на границе с металлом создаются сильные поля, где происходит превалирование генерации носителей с примесных областей спектра с меньшей фоточувствительностью. В целом, такая структура представляет интерес в качестве приемника для волоконно-оптических систем.

Заключение. Фоточувствительные многослойные полупроводниковые Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры, полученные методом вакуумного напыления тонких пленок сульфида кадмия и фосфида индия на монокристаллическую подложку арсенида галлия, обладают чувствительностью в широком спектральном диапазоне от 0.5 до 1.7 мкм.

Максимальная фоточувствительность в фоточувствительной многослойной полупроводниковой Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуре достигается в примесной области спектра (1.2 и 1.55 мкм) при комнатной температуре за счет фотогенерированных носителей в базовой области, где электрические поля возрастают с ростом рабочего напряжения.

Работа выполнена в рамках проекта ВА-ФА-Ф-2-005 «Физические закономерности процессов переноса носителей тока в полупроводниковых структурах, полученных новыми технологическим подходами на основе Si, Cu_2ZnSn $(S_{1-x}Se_x)_4$ и широкозонных полупроводников».

ЛИТЕРАТУРА

1. О.Т. Тимошенко. Новая многокомпонентная полупроводниковая система InP-CdS. Её поверхностные физико-химические свойства: Дис. канд. хим. наук: 02.00.04, 181, (2006).
2. А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, Ф.А. Гиясова, Т.М. Азимов, У.М. Бузруков, А.А. Якубов, Технология и конструирование в электронной аппаратуре № 4, 23, (2007).
3. N.K. Dhar, N.K.Dhar, R. Dat, A.K. Sood, Optoelectronics - Advanced Materials and Devices. Eds S.L.Pyshkin, J.M. Ballato. InTech. Chap. 7, 149 (January 2013).
4. S. Tong, J.L. Wan, K. Wang, Appl. Phys. Lett. **80**, №7, 1189 (2002).
5. S.V. Averin, P.I. Kuznetzov, V.A. Zhitov, L.Y. Zakharov, V.M. Kotov, Optical and Quantum Electronics **50**, Issue 10 (2018).
6. G. Lioliou, X. Meng, J.S. Ng, A.M. Barnett, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **813**, 1 (2016).
7. I.V. Pisarenko, E.A. Ryndin, Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering **10**, 224 (2016).
8. C. Xie, V. Pusino, A. Khalid, M.J. Steer, M. Sorel, I.G. Thayne, D.R. Cumming, IEEE Transactions on Electron Devices **62**, Issue 12, 4069 (2015).
9. J.-W. Shi, K.-L. Chi, C.-Y. Li, J.-M. Wun, Journal of Lightwave Technology **33**, Issue 4, 921 (2015).
10. J. Pustiowski, K. Müller, M. Bichler, G. Koblmüller, J.J. Finley, A. Wixforth, H.J. Krenner, Applied Physics Letters **106**, Issue 1 (2015).
11. F. Sizov, Z. Tsybrii, M. Vuichyk, et àl., Sensor Electronics and Microsystem Technologies **13**, Issue 1, 49 (2016).

12. H.J. Zhu, M. Ramsteiner, H. Kostial, M. Wassermeier, H.P. Shonherr, Phys. Rev. B **87**, 016601 (2001).
13. Yu.G. Dobrovolsky, A.A. Asheulov, ТКЕА №3, 27 (2011).
14. I.A. Andreev, O.Yu. Serebrennikova, G.S. Sokolovsky, V.V. Dyudelev, N.D. Ilinsky, G.G. Konovalov, E.V. Kunisina, Yu.P. Yakovlev, Semiconductors **47**, № 8, 1109 (2013).
15. A.V. Karimov, D.M. Yodgorova, and O.A. Abdulkhaev. In book "Photodiodes - World Activities in 2011". Ed. Jeong-Woo Park (Tech. 2011), chapter 2, 23-36 (ISBN: 978-953 (2011).
16. Д.М. Ёдгорова, А.В. Каримов, Ф.М. Ашрапов и др. Патент РУз № IAP 03974, Бюл. №7 (2009).
17. А.Я. Нашельский. Производство полупроводниковых материалов (Москва, Металлургия, 1989).
18. Д.М. Ёдгорова, А.В. Каримов, Р.А. Саидова, Ф.А. Гиясова, М.А. Мирджалилова. Патент на изобретение РУз № IAP 04002, Бюл. №8 (2009).
19. Н. Уваров, Алгоритмы безопасности №6, 14 (2002).
20. Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола. Полевые транзисторы на арсениде галлия (Москва, Радио и связь, 1988).
21. В.И. Фистуль. Введение в физику полупроводников (Москва, Высшая школа, 1984).
22. Г.И. Жовнир, В.Ф. Коваленко, В.А. Краснов, И.Е. Марончук, ЖТФ **56**, №9, 1814 (1985).