

10-15-2019

FEATURES OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF n-GaP-p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x HETEROSTRUCTURE

Amin Safarbayevich Saidov

Physical-Technical Institute SPA "Physics-Sun" of ASUz, Tashkent, Uzbekistan., amin@uzsci.net

Ada Yulyevna Leyderman

Physical-Technical Institute SPA "Physics-Sun" of ASUz, Tashkent, Uzbekistan, ley@uzsci.net

Shukrullo Negmatovich Usmonov

Physical-Technical Institute SPA "Physics-Sun" of ASUz, Tashkent, Uzbekistan., sh_usmonov@rambler.ru

Umida Palvanovna Asatova

Urgench State University, Urgench, Uzbekistan, umida72@rambler.ru

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors>

Recommended Citation

Saidov, Amin Safarbayevich; Leyderman, Ada Yulyevna; Usmonov, Shukrullo Negmatovich; and Asatova, Umida Palvanovna (2019) "FEATURES OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF n-GaP-p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x HETEROSTRUCTURE," *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*. Vol. 1 : Iss. 5 , Article 2.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors/vol1/iss5/2>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

УДК 666.3.017

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
n-GaP-p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Саидов Амин Сафарбаевич, д.ф.-м.н., профессор, ведущий сотрудник Физико-технического института НПО “Физика-Солнце” АН РУз, Ташкент, Узбекистан. e-mail: amin@uzsci.net

Лейдерман Ада Юльевна, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Физико-технического института НПО “Физика-Солнце” АН РУз, Ташкент, Узбекистан. e-mail: ley@uzsci.net

Усмонов Шукрулло Негматович*, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Физико-технического института НПО “Физика-Солнце” АН РУз, Ташкент, Узбекистан. e-mail: sh_usmonov@rambler.ru

Асатова Умида Палвановна, базовый докторант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан. e-mail: umida72@rambler.ru

Аннотация. Исследована вольт-амперная характеристика n-GaP–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктур. Показано, что при малых напряжениях $V < 0,5$ В вольт-амперная характеристика описывается экспоненциальным законом: $I = I_0 \cdot \exp(qV / ckT)$, а при больших – от 0,5 до 1,8 В степенными законами: $I = A \cdot V^m$ с различными значениями коэффициента A и показателя степени m при различных напряжениях. При более высоких напряжениях – от 2.10 до 2.48 В наблюдается сублинейный участок, который описывается законом: $V = V_0 \cdot \exp(Iad / S)$. Результаты объясняются диффузионно-дрейфовым механизмом переноса тока в режиме диэлектрической релаксации, а также эффекта инжекционного обеднения.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, инжекционное обеднение, твердый раствор, гетероструктура.

FEATURES OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF
n-GaP–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x HETEROSTRUCTURE

Saidov Amin Safarbayevich, Dr. of Phys. and Math. Sc., Professor of the Physical-Technical Institute SPA “Physics-Sun” of ASUZ, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: amin@uzsci.net

Leyderman Ada Yulyevna, Dr. of Phys. and Math. Sc., Professor of the Physical-Technical Institute SPA “Physics-Sun” of ASUZ, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: ley@uzsci.net

Usmonov Shukrullo Negmatovich*, Dr. of Phys. and Math. Sc., Head of the Laboratory of the Physical-Technical Institute SPA “Physics-Sun” of ASUZ, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: sh_usmonov@rambler.ru

Asatova Umida Palvanovna, Basic doctoral student of Urgen State University, Urgench, Uzbekistan. e-mail: umida72@rambler.ru

Abstract. The current-voltage characteristic of n-GaP–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x ($0 \leq x \leq 0.05$) heterostructures has been studied. It has been shown that at low voltages $V < 0.5$ V, the current-voltage characteristic is described by the exponential law: $I = I_0 \cdot \exp(qV / ckT)$, and at large ones from 0.5 to 1.8 V power laws: $I = A \cdot V^m$ with different values of the coefficient A and exponent m at various voltages. At higher voltages - from 2.10 to 2.48 V, a sublinear part is observed, which is

described by the law: $V = V_0 \cdot \exp(I_{ad} / S)$. The results are explained by the diffusion-drift mechanism of current transfer in the regime of dielectric relaxation, as well as the effect of injection depletion.

Keywords: current-voltage characteristic, injection depletion, solid solution, heterostructure.

1. Введение

Узкозонные полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$ являются перспективными материалами для создания на их основе оптоэлектронных приборов, работающих в средней и дальней инфракрасной (ИК) области спектра излучения. Проводятся интенсивные поисковые работы по созданию и исследованию различных приборных структур на основе InSb, InAs, GaSb и их твердых растворов (ТР) [1-4]. Среди этих материалов соединения InSb представляют особый интерес, поскольку подвижность электронов и дырок в них имеет большое значение [5], следовательно, на их основе могут быть разработаны быстродействующие оптоэлектронные приборы. Кроме того ТР замещения $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ дают возможность расширить спектральный диапазон действия структур на их основе до 11 мкм [6].

2. Методика исследования

С целью изучения механизма переноса тока в $n-GaP-p-(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктуре была исследована ее вольт-амперная характеристика (ВАХ). Структуры были изготовлены выращиванием эпитаксиального слоя твердого раствора $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ на $n-GaP$ подложках из жидкой фазы [7]. Выращенные пленки имели дырочный тип проводимости и толщину 14 мкм. Они обладали слабой варизонностью, поскольку ширина запрещенной зоны в них менялась от 0.1 до 0.18 эВ (рис. 1).

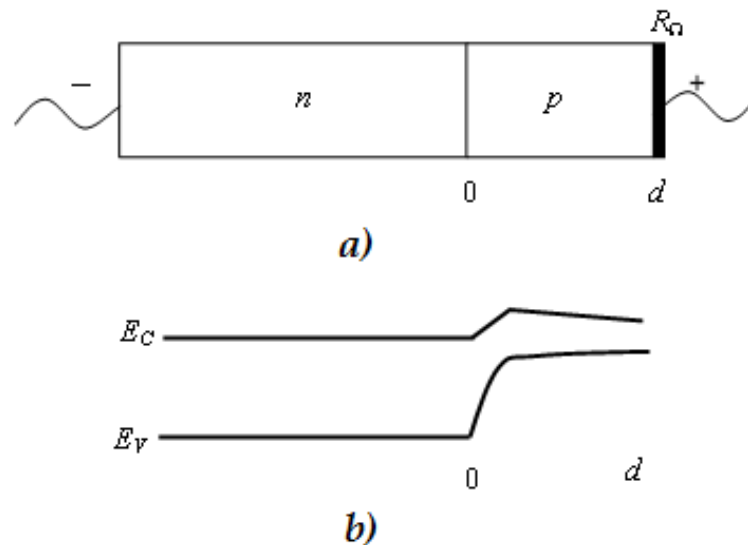


Рис.1. Схема (а) и энергетическая зонная диаграмма (б) $n-GaP-p-(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ гетероструктуры.

Для снятия ВАХ к гетероструктуре $n-GaP-p-(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ методом напыления серебра в вакууме были нанесены омические контакты – сплошные со стороны подложки и четырехугольные с площадью 12 мм² со стороны эпитаксиального слоя. ВАХ снималась в темноте при температуре 300 К.

3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 представлена типичная ВАХ исследованной структуры. На начальном участке при напряжениях смещения (V) от 0.08 до 0.50 В ВАХ хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (рис. 2, b) вида [8]:

$$I = I_0 \exp(qV / ckT), \quad (1)$$

характерной для так называемого «длинного» p - n - диода с тыловым омическим контактом, причём показатель « c » имеет вид:

$$c = \frac{2b + ch(d / L_n) + 1}{b + 1}, \quad (2)$$

где $b = \mu_n / \mu_p$ - отношение подвижностей электронов и дырок. Значение b для чистого соединения InSb составляет $b \approx 21$ [5, 9-10]. При легировании InSb подвижность носителей уменьшается, в связи с этим для оценки характеристических параметров базовой области исследованной структуры мы принимали $b = 15$. Экспоненциальный участок ВАХ дал значение $c = 3.6$. Зная величины b и c , мы нашли значение произведения подвижности на время жизни неосновных носителей заряда - $\mu_n \cdot \tau_n = qL_n^2 / (kT) = 4.79 \cdot 10^{-6}$ см²/В.

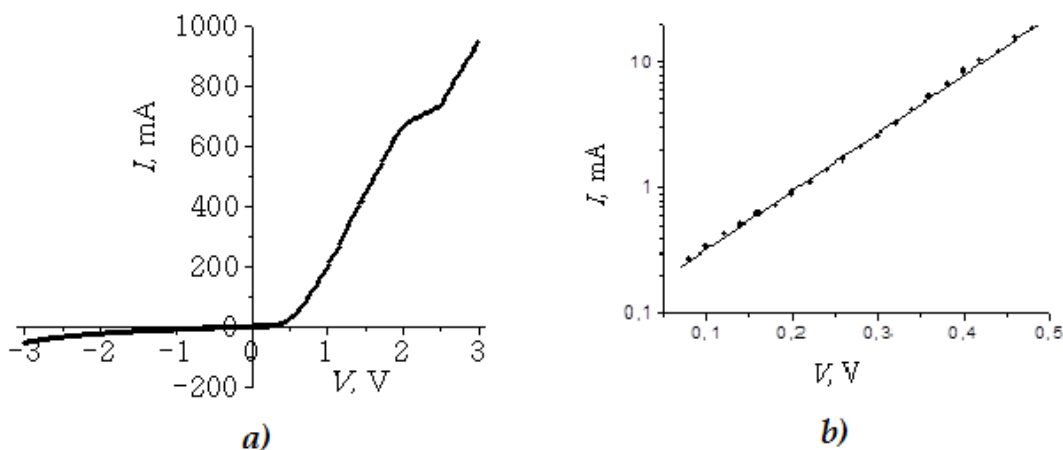


Рис.2. Темновая вольт-амперная характеристика p -GaP- p -(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктуры (a) и ее прямая ветвь в полулогарифмическом масштабе (b) при температуре 300 К.

За экспоненциальным участком на ВАХ следуют степенные зависимости типа $I = A \cdot V^m$ с различными значениями показателя степени m и коэффициента A . При $V = (0.60-0.80)$ В участок $I = A \cdot V^{3.1}$ с $A = 220$ мА/В^{3.1}; при $V = (0.80-0.90)$ В - $I = A \cdot V^{2.5}$ с $A = 195$ мА/В^{2.5}; при $V = (0.90-1.40)$ В - $I = A \cdot V^{2.1}$ с $A = 195$ мА/В^{2.1}, при $V = (1.40-1.80)$ В - $I = A \cdot V^{1.5}$ с $A = 232$ мА/В^{1.5}. Далее при напряжениях от 2.10 до 2.48 В наблюдается сублинейный участок, где ток слабо зависит от приложенного напряжения, который может быть хорошо описан в рамках теории «эффекта инжекционного обеднения» [11] закономерностью вида:

$$V = V_0 \cdot \exp(Iad / S). \quad (3)$$

Такая ВАХ реализуется в структурах, содержащих высокие концентрации глубоких центров прилипания, в условиях встречных направлений амбиполярных диффузии и дрейфа, причем S – площадь сечения, а параметр « a » описывается выражением [6]:

$$a = 1/(2qD_p N_t), \quad (4)$$

где N_t – концентрация глубоких центров прилипания, D_p – коэффициент диффузии основных носителей (дырок). Значение параметра a , вычисленное на основе экспериментальных точек сублинейного участка ВАХ, составляло $a = 3.03 \cdot 10^3$ см/А, что позволило вычислить произведение подвижности основных носителей (μ_p) на концентрацию глубоких примесей (N_t), ответственных за появление сублинейного участка (3) - $\mu_p \cdot N_t = 4 \cdot 10^{16}$ см⁻¹·В⁻¹·с⁻¹. За сублинейным участком на ВАХ следует участок степенной зависимости $I = 207 \cdot V^{1.38}$.

Наблюдаемая последовательность ВАХ на первый взгляд кажется совершенно непонятной, поскольку в классической теории инжекции режимы $I \propto V^3$ и $I \propto V^2$ должны следовать друг за другом в обратном порядке, а для появления зависимости $V \propto \exp(Iad/S)$ должны реализоваться встречные направления диффузии и дрейфа, а у нас структура типа n - p - $R\Omega$ (рис.1), так что кажется, что нельзя ожидать дрейфа носителей со стороны омического контакта. Однако, в силу слабой варизонности полученного материала (см. рис. 1, b) любое возбуждение приводит к возникновению встречных потоков носителей от области с меньшей шириной запрещенной зоны к области с большей шириной.

Попытаемся объяснить наблюдаемую последовательность характеристик. Основное уравнение задачи, описывающее распределение свободных носителей в p -базе в стационарных условиях можно записать в виде [11]

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \mathcal{G}_a \frac{dn}{dx} - \frac{n - n_n}{\tau_n} = 0, \quad (5)$$

где первый член описывает диффузию свободных носителей, второй – дрейф, третий – их рекомбинацию согласно статистике Шокли-Рида. \mathcal{G}_a - амбиполярная скорость дрейфа p -базы имеет вид [11]

$$\mathcal{G}_a = \frac{\mu_p}{(b\gamma + b + 1)n} \left\{ N_a - \left[\frac{dE^*}{dx} p - p \frac{d^2 E^*}{dp^2} \right] + \left[N_t^- - n \frac{dN_t^-}{dn} \right] \right\} E_j \quad (6)$$

где, $\gamma = N_t / n_{1t}$ - фактор прилипания для электронов, $n_{1t} = N_c \cdot \exp(-(E_c - E_t) / kT)$ - фактор Шокли-Рида для уровня прилипания E_t , N_t^- - концентрация заряженных центров прилипания для электронов, N_a - концентрация мелких акцепторов, определяющих тип проводимости, $E^* = \varepsilon E / (4\pi q)$, где ε - диэлектрическая постоянная, $E_j = J / (q\mu_n(bn + p))$ – электрическое поле (при пренебрежении полем Дембера).

Уравнение (5) описывает все известные режимы двойной инжекции, но в общем виде аналитически не может быть решено. Однако, хорошо известны его решения при различных режимах.

1. Если дрейф значительно слабее диффузии, то вторым членом в (5) можно пренебречь, тогда реализуется так называемый «диффузионный» режим двойной инжекции, главной ВАХ которого для «длинного» диода (когда $d / L_n > 1$) является известная экспоненциальная ВАХ, полученная В.И. Стафеевым, т.е. ВАХ (1).

2. Когда с ростом уровня инжекции поле растет и уже нельзя пренебрегать дрейфом носителей, в условиях

$$N_a > \frac{dE}{dx} - n \frac{d^2 E}{dx^2} \quad (7)$$

реализуется режим омической релаксации объемного заряда, описываемый известным законом Ламперта:

$$J = \frac{9}{8} q \mu_p \mu_n \tau_n N_a \frac{V^2}{d^3} \quad (8)$$

3. С дальнейшим ростом уровня инжекции, когда полевые члены начинают превосходить концентрацию легирующих акцепторов, т.е. неравенство (7) меняет знак на обратный, реализуется режим диэлектрической релаксации и ВАХ имеет вид:

$$J \approx \frac{125}{18} \mu_p \mu_n \tau_n \frac{V^3}{d^5} \quad (9)$$

У нас характеристика не $I \propto V^3$, а $I \propto V^{3.1}$. Хочется отметить что она, безусловно, относится к режиму диэлектрической релаксации. Хорошо известно, что точная характеристика $I \propto V^3$ практически никогда не наблюдается, поскольку для её реализации нужно очень большое отношение $d / L \approx 100$, так как при её получении не учтены диффузионные процессы на $n-p$ и $n-n^+$ переходах. В то же время несколько более сильная зависимость $I \propto V^{3.1}$ наблюдалась многими авторами.

Далее у нас наблюдаются более слабые зависимости: $I \propto V^{2.5}$, $I \propto V^{2.1}$, и наконец $I \propto V^{1.5}$, что, на первый взгляд, кажется парадоксальным, поскольку за режим омической релаксации отвечает легирующая примесь N_a и только когда условие (7) меняет знак, наступает режим диэлектрической релаксации. Однако, этой смене ВАХ можно дать разумное объяснение, если предположить, что концентрация легирующих акцепторов может изменяться в процессе роста возбуждения полупроводника. По-видимому, в процессе получения данного варизонного ТР неизбежно возникают неконтролируемые примеси различной природы, некоторые из которых могут образовывать с легирующими акцепторами комплексы типа донорно-акцепторных пар. В процессе роста инжекционного возбуждения эти комплексы распадаются, что приводит к возникновению новых свободных акцепторов. Когда их концентрация станет достаточно велика, условие (7) поменяет знак и режим диэлектрической релаксации будет ослабевать, поскольку начнут работать оба члена в квадратной скобке выражения для \mathcal{G}_a (6) и режим омической релаксации придет на смену режиму диэлектрической релаксации. Далее у нас наблюдается ВАХ типа $I \propto V^{1.5}$. Такая зависимость характерна для дрейфового режима в условиях биполярной рекомбинации, что вполне возможно с ростом уровня инжекции. Затем наблюдается ВАХ (3), которая присуща эффекту инжекционного обеднения. Такая ВАХ реализуется в полупроводнике с высокой концентрацией глубоких примесей N_t , ответственных за появление двух последних членов в выражении для амбиполярной скорости дрейфа (6) в случае встречных направлений диффузии и дрейфа свободных носителей заряда.

4. Заключение

Таким образом, исследование прямой ветви ВАХ $n\text{-GaP-p-(InSb)}_{1-x}\text{(Sn}_2\text{)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) - гетероструктуры показывает, что при слабых возбуждениях перенос тока определяется диффузионным механизмом с учетом модуляцией заряда в области p - базы. С ростом уровня инжекции носителей заряда существенную роль в механизме переноса тока играет как диэлектрическая релаксация, так и омическая релаксация объемного заряда в базовой области гетероструктуры, и далее существенная роль играет модуляция заряда глубоких примесных центров.

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФА-Ф2-003 Республики Узбекистан.

Литература

1. C.L. Hinkle, E.M. Vogel, P.D. Ye, R.M. Wallace. Interfacial chemistry of oxides on $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ and implications for MOSFET applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2011, vol. 15, Issue 5, pp. 188-207 doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.005
2. M. Razeghi, D. Hoffman, B.-M. Nguyen, P.-Y. Delaunay, E.K. Huang, M.Z. Tidrow. Recent advances in LWIR Type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors and focal plane arrays at the Center for Quantum Devices. *Proc. SPIE 6940, Infrared Technology and Applications XXXIV*, 694009 (2 May 2008) doi.org/10.1117/12.782854
3. N.A. Valisheva, A.V. Bakulin, M.S. Aksenov, S.E. Khandarkhaeva, S.E. Kulkova. Passivation Mechanism of the Native Oxide/InAs Interface by Fluorine. *J. Phys. Chem. C* 2017, 121, 38, 20744-20750 doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b03757
4. М.П. Михайлова, Э.В. Иванов, Л.В. Данилов, Р.В. Левин, И.А. Андреев, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. Электролюминесценция в гетероструктурах $n\text{-GaSb/InAs/p-GaSb}$ с одиночной квантовой ямой, выращенных методом МОГФЭ. *Физика и техника полупроводников*, 2019, том 53, вып. 1, стр. 50-54 doi:10.21883/FTP.2019.01.46986.8958
5. О. Маделунг. *Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп*. 1976, Москва, Мир, 478 с.
6. А.С. Саидов А.Ш. Раззаков Д.В. Сапаров. Получение эпитаксиальных слоев твердого раствора $(\text{Sn}_2)_{1-x}(\text{InSb})_x$ из жидкой фазы. *Письма в Журнал технической физики*, 2002, том 28, вып. 22, стр.7-10.
7. A.S. Saidov, M.S. Saidov, Sh.N. Usmonov, and U.P. Asatova. Growth of $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ films on GaAs substrates by liquid-phase epitaxy. *Semiconductors*. 2010, Vol. 44, No.7, pp.938-945 doi.org/10.1134/S1063782610070183
8. Ш.А. Мирсагатов, И.Б. Сапаев. Механизм переноса тока в инжекционном фотоприемнике на основу структуры $M(\text{In})\text{-n-CdS-p-Si-M}(\text{In})$. *Физика твердого тела*. 2015, том 57, вып. 4, стр. 646-660.
9. Handbook series on semiconductor parameters. Vol. 2, Ternary and quaternary III-V compounds [editors Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M.]. (Singapore, London: World Scientific. 1999).

10. В.А. Бродовой, Н.Г. Вялый, Л.М. Кнорозок. Оптические свойства кристаллов твёрдых растворов $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$. Физика и техника полупроводников. 1998, том 32, № 3, стр.303-306.

11. А.Ю. Лейдерман, У.Т. Рахронов, А.К. Утениязов, Р.М. Турманова. В сб. : Республиканская конференция «Современные проблемы физики полупроводников» (СПФП-2019) (Нукус 2019), стр. 75.

References

1. C.L. Hinkle, E.M. Vogel, P.D. Ye, R.M. Wallace. Interfacial chemistry of oxides on $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ and implications for MOSFET applications. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2011, vol. 15, Issue 5, pp. 188-207 doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.005

2. M. Razeghi, D. Hoffman, B.-M. Nguyen, P.-Y. Delaunay, E.K. Huang, M.Z. Tidrow. Recent advances in LWIR Type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors and focal plane arrays at the Center for Quantum Devices. Proc. SPIE 6940, Infrared Technology and Applications XXXIV, 694009 (2 May 2008) doi.org/10.1117/12.782854

3. N.A. Valisheva, A.V. Bakulin, M.S. Aksenov, S.E. Khandarkhaeva, S.E. Kulkova. Passivation Mechanism of the Native Oxide/InAs Interface by Fluorine. J. Phys. Chem. C 2017, 121, 38, 20744-20750 doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b03757

4. M.P. Mihailova, Je.V. Ivanov, L.V. Danilov, R.V. Levin, I.A. Andreev, E.V. Kunitsyna, Yu.P. Yakovlev. *Elektrolyuminescenciya v geterostrukturakh n-GaSb/InAs/p-GaSb s odinochnoy kvantovoy yamoy, vyrashennykh metodom MOGFYe* [Electroluminescence in single-well n-GaSb/InAs/p-GaSb heterostructures grown by the MOVPE method]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2019, vol. 53, No. 1, pp. 50-54 doi:10.21883/FTP.2019.01.46986.8958 (In Russ.).

5. O. Madelung. *Fizika poluprovodnikovykh soedinenii elementov III i V grupp* [Physics of semiconductor compounds of elements of groups III and V]. 1976, Moscow, Publ. Mir, 478 p. (In Russ.).

6. A.S. Saidov, A.Sh. Razzakov, D.V. Saparov. *Poluchenie epitaksial'nykh sloev tverdogo rastvora $(\text{Sn}_2)_{1-x}(\text{InSb})_x$ iz zhidkoy fazy* [Obtaining epitaxial layers of the $(\text{Sn}_2)_{1-x}(\text{InSb})_x$ solid solution from the liquid phase]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2002, vol. 28, no. 22, pp.7-10. (In Russ.).

7. A.S. Saidov, M.S. Saidov, Sh.N. Usmonov, and U.P. Asatova. Growth of $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ films on GaAs substrates by liquid-phase epitaxy. Semiconductors. 2010, Vol. 44, No.7, pp.938-945 doi.org/10.1134/S1063782610070183

8. Sh.A. Mirsagatov, I.B. Sapaev. *Mekhanizm perenosa toka v inzhektionsionnom fotopriemnike na osnovu struktury $M(\text{In})\text{-n-CdS-p-Si-M}(\text{In})$* [The mechanism of current transfer in the injection photodetectors based on the structure of $M(\text{In})\text{-n-CdS-p-Si-M}(\text{In})$]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. 2015, vol. 57, No. 4, pp. 646-660. (In Russ.).

9. Handbook series on semiconductor parameters. Vol. 2, Ternary and quaternary III-V compounds [editors Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M.]. (Singapore, London: World Scientific. 1999).

10. V.A. Brodovoi, N.G. Vialyi, L.M. Knorozok. *Opticheskie svoystva kristallov tvyordykh rastvorov (InSb)_{1-x}(CdTe)_x* [Optical Properties of (InSb)_{1-x}(CdTe)_x Solid Solution Crystals]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors]. 1998, vol. 32, No. 3, pp.303-306 (In Russ.).
 11. A.Yu. Leiderman, U.T. Rahmonov, A.K. Uteniyazov, R.M. Turmanova. *V sb.: Respublikanskaya konferentsiya «Sovremennye problemy fiziki poluprovodnikov»* [In the collection: Republican Conference “Modern Problems of Semiconductor Physics”] (MPSP-2019) (Nukus 2019), p. 75 (In Russ.).
-