

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-54-60

УДК 621.315.592; 621.383.523

Лавинные фотодиоды на гетероструктурах InAlAs/InGaAs с сульфидно-полиамидной пассивацией меза-структуры

Николай Анатольевич Малеев¹✉, Александр Георгиевич Кузьменков²,
Марина Михайловна Кулагина³, Юлия Александровна Гусева⁴,
Алексей Петрович Васильев⁵, Сергей Анатольевич Блохин⁶,
Михаил Александрович Бобров⁷, Сергей Иванович Трошков⁸,
Владислав Васильевич Андриюшкин⁹, Евгений Сергеевич Колодезный¹⁰,
Владислав Евгеньевич Бугров¹¹, Виктор Михайлович Устинов¹²

1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

1, 6, 9, 10, 11 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

5, 12 Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹maleev@beam.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2500-1715>

²kuzmenkov@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7221-0117>

³Marina.Kulagina@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8721-185X>

⁴Guseva.Julia@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7035-482X>

⁵Vasiljev@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2181-5300>

⁶blokh@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5962-5529>

⁷bobrov.mikh@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7271-5644>

⁸S.Troshkov@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3307-6226>

⁹vvandriushkin@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

¹⁰evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

¹¹vladislav.bougrov@niuitmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>

¹²vmust@beam.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6401-5522>

Аннотация

Предмет исследования. Метод сульфидно-полиамидной пассивации поверхности меза-структуры InAlAs/InGaAs лавинных фотодиодов и исследования статических характеристик созданных кристаллов InAlAs/InGaAs лавинных фотодиодов. **Цель работы.** Исследование влияния сульфидно-полиамидной пассивации поверхности меза-структуры на основные характеристики лавинного фотодиода. **Метод.** Сульфидно-полиамидная пассивация поверхности меза-структуры представляет собой обработку поверхности в водном растворе сульфида аммония с последующей защитой слоем полиамида АД-9103-30. **Основные результаты.** Созданы и исследованы лавинные фотодиоды на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs. Поверхность меза-структуры лавинных фотодиодов была подвергнута сульфидно-полиамидной пассивации. Кристаллы лавинных фотодиодов с диаметром активной области 32 мкм воспроизводимо обеспечивали уровни темнового тока 10–20 нА при приложенном напряжении 0,9 от напряжения пробоя, однородное распределение значения пробивного напряжения по площади образца и долговременную стабильность характеристик. Спектральная чувствительность приборов в области 1550 нм составляет 0,85–0,88 А/Вт, а емкость — 0,11–0,12 пФ. Важным требованием к технологии пассивации является обеспечение воспроизводимости и долговременной стабильности характеристик. Измерения характеристик кристаллов лавинных фотодиодов с сульфидно-полиамидной пассивацией,

выполненные с интервалом в шесть месяцев, подтверждают временную стабильность темнового тока на уровне 5%. **Практическая значимость.** Предложенный в работе вариант пассивации поверхности меза-структуры InAlAs/InGaAs лавинных фотодиодов с использованием обработки в водном растворе сульфида аммония и последующей защиты слоем полиамида АД-9103-30 может быть использован для создания лавинных фотодиодов с воспроизводимым низким уровнем темновых токов.

Ключевые слова: гетероструктура, лавинный фотодиод, пассивация, меза-структура

Благодарность: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

Ссылка для цитирования: Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М., Гусева Ю.А., Васильев А.П., Блохин С.А., Бобров М.А., Трошков С.И., Андрушкин В.В., Колодезный Е.С., Бугров В.Е., Устинов В.М. Лавинные фотодиоды на гетероструктурах InAlAs/InGaAs с сульфидно-полиамидной пассивацией меза-структуры // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 11. С. 54–60. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-54-60

Коды OCIS: 250.1345, 130.5990

ВВЕДЕНИЕ

Лавинные фотодиоды (ЛФД) на гетероструктурах InAlAs¹/InGaAs², умножение носителей в которых происходит в слое InAlAs, имеют определенные преимущества по сравнению с широко используемыми ЛФД на структурах InP/InGaAs благодаря большому отношению коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок, позволяющему снизить шумы лавинного умножения [1], и повышенной температурной стабильности коэффициентов ударной ионизации, улучшающей температурную стабильность пробивного напряжения [2]. Лавинные фотодиоды на InAlAs/InGaAs демонстрируют высокую скорость приема данных (10–25 Гбит/с), надежность и улучшенную температурную стабильность [3, 4]. Как правило, для изоляции активной области ЛФД на гетероструктурах InAlAs/InGaAs в латеральном направлении используется травление меза-структуры. При этом серьезной проблемой является поверхностный ток утечки, который во многих случаях вносит основной вклад в темновой ток. Было показано, что форма меза-структуры относительно слабо влияет на поверхностный ток утечки, тогда как способ травления меза-структуры и дополнительная пассивация поверхности диэлектрическими пленками оказывают существенное воздействие [5, 6]. Для уменьшения поверхностных токов утечки был предложен ряд подходов, в частности пассивация поверхности мезы

полиамидом [7], травление трехступенчатой мезы без дополнительной пассивации поверхности [8] либо с ее пассивацией диэлектриком [9] или бензциклобутеном [4].

Классическим механизмом роста поверхностного тока утечки является увеличение скорости рекомбинации носителей на глубоких уровнях дефектов в приповерхностном слое. Для PIN-фотодиодов на основе InGaAs/InP был продемонстрирован эффективный метод пассивации поверхности меза-структур в водном растворе сульфида аммония ((NH₄)₂S_x) — так называемая сульфидная пассивация, при этом важным моментом для получения стабильного во времени снижения токов утечки является дополнительная защита пассивированной поверхности бескислородным диэлектрическим покрытием [10]. Наилучшие результаты (стабильное снижение темновых токов до уровня менее 1 нА при обратном напряжении 5 В у PIN-фотодиодов на InGaAs с диаметром мезы 100 мкм) были достигнуты при использовании оптимизированных режимов сульфидной пассивации поверхности меза-структуры с ее последующей защитой слоем полиамида [11]. Уровни рабочих напряжений и максимальные значения напряженности электрического поля структур ЛФД, как правило, существенно выше, чем у PIN-фотодиодов. В связи с этим у ЛФД на InAlAs/InGaAs в случае высоких напряженностей поля и поверхностных состояний акцепторного типа могут дополнительно проявляться эффекты стимулированного полем туннелирования носителей через ловушки [12]. Задача пассивации поверхности ЛФД

¹ Арсенид индия-алюминия

² Арсенид индия-галлия

актуальна как при их использовании в линейном режиме для задач оптической связи, так и для приборов, работающих в гейгеровском режиме счета одиночных фотонов, поскольку в этом случае используются максимально высокие значения напряженности электрического поля и требуется надежно подавить возможный поверхностный пробой при напряжениях, меньших напряжения объемного пробоя [13]. Проблема подавления поверхностного пробоя успешно решается в структурах InP/InGaAs ЛФД планарной конструкции, реализуемых по технологии локальной диффузии Zn, за счет формирования двухступенчатого профиля легирования и использования охранных колец [14]. В случае ЛФД на InAlAs/InGaAs для подавления поверхностного пробоя требуется тщательная отработка конструкции и технологии формирования меза-структуры, например, с использованием многоступенчатого травления [8, 9].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния сульфидно-полиамидной пассивации поверхности меза-структуры на основные характеристики ЛФД. Исследована возможность эффективной пассивации поверхности меза-структуры ЛФД на гетероструктуре InAlAs/InGaAs путем ее обработки в водном растворе сульфида аммония с последующей защитой слоем полиамида и показана возможность получения низких поверхностных токов утечки, улучшения воспроизводимости характеристик приборов и их стабилизации.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Гетероструктуры ЛФД выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках полуизолирующего InP(100). Они состояли из сильно легированного контактного слоя InGaAs *n*-типа, сильно легированного слоя InAlAs *n*-типа, нелегированного умножительного слоя InAlAs толщиной 850 нм, заряженного слоя InAlAs *p*-типа, нелегированного слоя InAlGaAs с градиентным изменением состава, нелегированного поглощающего слоя InGaAs толщиной 1700 нм, нелегированного слоя InAlGaAs с градиентным изменением состава, сильно легированного слоя InAlAs *p*-типа и тонкого сильно легированного контактного слоя InGaAs *p*-типа. После формиро-

вания верхнего кольцевого контакта Ti-Pt-Au проводилось травление меза-структуры в растворе $H_3PO_4:HBr:K_2Cr_2O_7$ (1:1:1) с заглублением в сильно легированные слои *n*-типа, расположенные между умножительным слоем и подложкой. Подробные данные по толщине, составу и уровню легирования эпитаксиальных слоев, описание технологического маршрута изготовления кристаллов ЛФД без использования сульфидно-полиамидной пассивации, типичная форма меза-структуры после травления и характеристики изготовленных ЛФД приведены в публикации [15]. Как было показано, пассивация поверхности мезы слоем SiN_x ведет к существенному возрастанию темнового тока, что коррелирует с опубликованными данными [10]. В качестве альтернативного варианта пассивации боковой поверхности меза-структуры в настоящей работе исследовалась обработка поверхности в водном растворе сульфида аммония с последующей защитой слоем полиамида АД-9103-30 (сульфидно-полиамидная пассивация). Для адекватной оценки влияния пассивации из фрагментов одной эпитаксиальной гетероструктуры изготавливались две группы образцов кристаллов ЛФД. Для изготовления реперных образцов использовался базовый технологический маршрут изготовления кристаллов ЛФД. Поверхности второй группы образцов непосредственно после травления меза-структур обрабатывались в сульфиде аммония (10 мин) и промывались в деионизованной воде. Далее проводилось нанесение слоя полиамида толщиной около 5 мкм, его термообработка (имидизация) в атмосфере N_2 , напыление слоя металла, фотолитография, травление рисунка в металле для формирования маски, формирование топологического рисунка в пассивирующем слое полиамида травлением в плазме O_2 и удаление маскирующего слоя металлизации. В результате по периметру меза-структуры формировалось защитное кольцо из слоя полиамида (рис. 1), имеющее достаточно плавные края стенок, что облегчает последующее формирование соединения кольцевого *p*-контакта и анодной контактной площадки. После этого формировались *n*-контакты, проводилось травление изолирующей мезы до подложки InP, локальное удаление сильно легированного контактного слоя *p* + InGaAs в пределах фоточувствительной области, нанесение

просветляющего диэлектрического покрытия (слой SiNx толщиной 0,22 мкм, полученный методом плазмо-химического осаждения из газовой фазы), вскрытие окон в слое диэлектрика и формирование металлизации контактных площадок. Фотография изготовленного кристалла ЛФД приведена на рис. 2. Геометрия контактных площадок позволяет обеспечить различные варианты монтажа для последующей стыковки с оптическим волокном.

Характеристики кристаллов ЛФД измерялись на пластине с использованием зондовой станции. Вольт-амперные характеристики измерялись с использованием прибора для

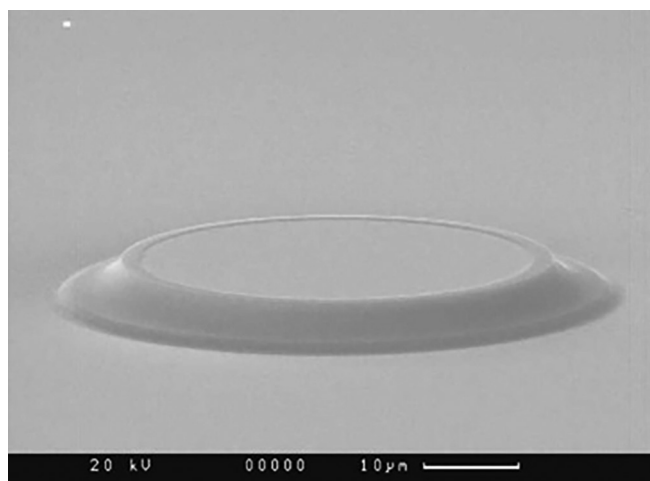


Рис. 1. Изображение меза-структуры после формирования защитного слоя полиамида, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

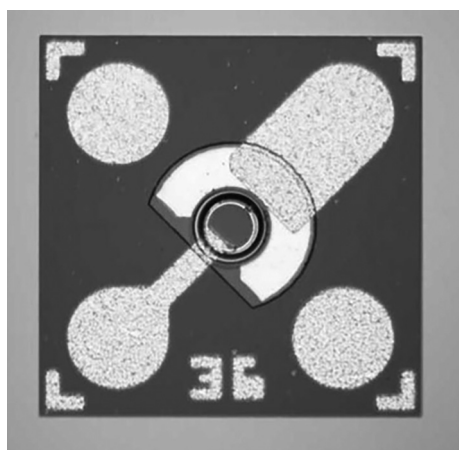


Рис. 2. Изображение изготовленного кристалла ЛФД

испытания полупроводниковых структур *Agilent B1500*, а для измерений фототока использовался лазерный диод *ML976H6F-E01* спектрального диапазона 1550 нм, излучение которого вводилось в многомодовое или одномодовое оптическое волокно. Фоточувствительная область исследуемого ЛФД освещалась через линзу, сформированную на конце волокна. Полная мощность на выходе оптического волокна определялась с использованием калиброванного фотоприемника большой площади. В случае использования одномодового волокна при настройке на максимум фототока в линейном режиме работы обеспечивался практически полный сбор излучения, поскольку уровень фототока сформированных на поверхности гетероструктуры рабочих ЛФД и тестовых ЛФД большой площади практически совпадал. Значения емкости исследуемых кристаллов ЛФД измерялась с помощью мостового LCR-измерителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены зависимости темнового тока и фототока от приложенного напряжения одного из изготовленных ЛФД на *InAlAs/InGaAs* с сульфидно-полиамидной пассивацией меза-структуры диаметром 32 мкм, измеренные при комнатной температуре, а также соответствующая зависимость коэффициента лавинного умножения.

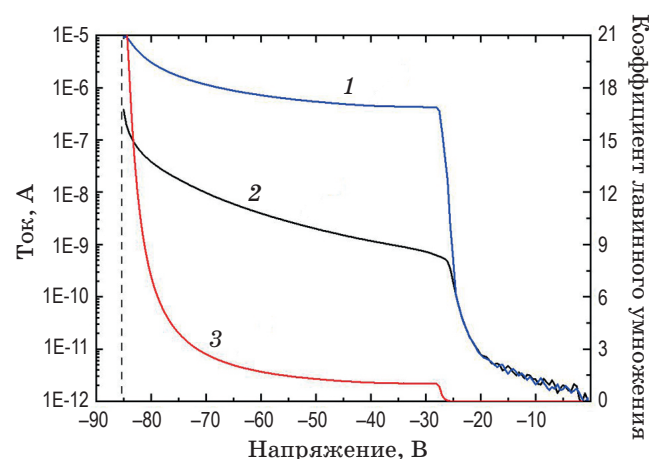


Рис. 3. Характеристики изготовленного ЛФД на основе *InAlAs/InGaAs* с грибовидной меза-структурой. Зависимости фототока (1), темнового тока (2) и коэффициента лавинного умножения (3) от приложенного напряжения

Коэффициент лавинного умножения рассчитывался по соотношению

$$M = (I_{\text{ph}}(U) - I_{\text{dark}}(U)) / (I_{\text{ph}}(U_0) - I_{\text{dark}}(U_0)),$$

где $I_{\text{dark}}(U)$ и $I_{\text{ph}}(U)$ — темновой ток и фототок при заданном напряжении U , $I_{\text{dark}}(U_0)$ и $I_{\text{ph}}(U_0)$ — темновой ток и фототок при напряжении U_0 , незначительно превышающем напряжение прокола U_p , когда коэффициент лавинного умножения ЛФД практически равен единице [16]. Пробивное напряжения U_{br} составляет -85 В, а напряжение прокола $U_p = -25$ В. Согласно опубликованным данным, при комнатной температуре и напряжении $U = 0,9U_{\text{br}}$ ЛФД на InAlAs/InGaAs демонстрируют темновые токи 30 [7], 13 [4] и 3 [17] нА при пассивации поверхности соответственно полиамидом, бензциклобутеном и негативным фоторезистом SU8. Характерные значения темнового тока при $U = 0,9U_{\text{br}}$ изготовленных ЛФД составляют 10–11 нА, что подтверждает эффективность предложенной схемы пассивации.

Важным требованием к технологии пассивации является обеспечение воспроизводимости и долговременной стабильности характеристик. Изготовленные приборы де-

монстрируют высокую однородность пробивного напряжения, значение которого составляет 85 В. Спектральная чувствительность (фотоотклик) в области 1550 нм составляет 0,85–0,88 А/Вт, а емкость — 0,11–0,12 пФ. При этом темновой ток в обследованных диодах не превышает 20 нА. Измерения характеристик кристаллов ЛФД с сульфидно-полиамидной пассивацией, выполненные с интервалом в шесть месяцев, подтверждают временную стабильность темнового тока на уровне 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пассивация поверхности меза-структуры InAlAs/InGaAs ЛФД с использованием обработки в водном растворе сульфида аммония и последующей защитой слоем полиамида АД-9103-30 (сульфидно-полиамидная пассивация) диодов диаметром активной области 32 мкм позволяет воспроизводимо обеспечить уровни темнового тока 10–20 нА при приложенном напряжении 0,9 от напряжения пробоя, однородное распределение пробивного напряжения по площади образца на уровне -85 В и долговременную стабильность характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Goh Y.L., Marshal A.R.J., Massey D.J., et al. Excess avalanche noise in In_{0.52}Al_{0.48}As // IEEE J. Quantum Electron. 2007. V. 43. № 5–6. P. 503–507. DOI: 10.1109/JQE.2007.897900
- Tan L.J.J., Ong D.S.G., Ng J.S., et al. Temperature dependence of avalanche breakdown in InP and InAlAs // IEEE J. Quantum Electron. 2010. V. 46. № 8. P. 1153–1157. DOI: 10.1109/JQE.2010.2044370
- Abdulwahid O.S., Sexton J., Kostakis I., et al. Physical modelling and experimental characterisation of InAlAs/InGaAs avalanche photodiode for 10 Gb/s data rates and higher // IET Optoelectronics. 2018. V. 12. № 1. P. 5–10. DOI: 10.1049/iet-opt.2017.0068
- Huang J.J.S., Chang H.S., Jan Y.H., et al. Highly reliable, cost-effective and temperature-stable top-illuminated avalanche photodiode (APD) for 100G inter-datacenter ER4-lite applications // Photonics. 2018. P. 119–124. DOI: 10.5220/0006510601190124
- Ma Y., Zhang Y., Gu Y., et al. Impact of etching on the surface leakage generation in mesa-type InGaAs/InAlAs avalanche photodetectors // Opt. Exp. 2016. V. 24. № 7. P. 7823–7834. DOI: 10.1364/OE.24.007823
- Zhou Y., Ji X., Shi M., et al. Impact of SiNx passivation on the surface properties of InGaAs photo-detectors // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 3. P. 034507. DOI: 10.1063/1.4926736
- Liu J.J., Ho W.J., Chen J.Y., et al. The fabrication and characterization of InAlAs/InGaAs APDs based on a mesa-structure with polyimide passivation // Sensors. 2019. V. 19. № 15. P. 3399. DOI: 10.3390/s19153399
- Yuan Y., Li Y., Abell J., et al. Triple-mesa avalanche photodiodes with very low surface dark current // Opt. Exp. 2019. V. 27. № 16. P. 22923–22929. DOI: 10.1364/OE.27.022923
- Li B., Lv Q.Q., Cui R., et al. A low dark current mesa-type InGaAs/InAlAs avalanche photodiode // IEEE Photonics Technol. Lett. 2014. V. 27. № 1. P. 34–37. DOI: 10.1109/LPT.2014.2361202

10. Ravi M.R., DasGupta A., DasGupta N. Silicon nitride and polyimide capping layers on InGaAs/InP PIN photodetector after sulfur treatment // *J. Crystal Growth*. 2004. V. 268. № 3–4. P. 359–363. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2004.04.054
11. Sheela D., DasGupta N. Optimization of surface passivation for InGaAs/InP PIN photodetectors using ammonium sulfide // *Semiconductor Sci. and Technol.* 2008. V. 23. № 3. P. 035018. DOI: 10.1088/0268-1242/23/3/035018
12. Chen J., Zhang Z., Zhu M., et al. Optimization of InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes // *Nanoscale Research Lett.* 2017. V. 12. № 1. P. 1–6. DOI: 10.1186/s11671-016-1815-9
13. Chen L., Haifeng Y., Yanli S. Advances in near-infrared avalanche diode single-photon detectors // *Chip*. 2022. P. 100005. DOI: 10.1016/j.chip.2022.100005
14. Liu Y., Forrest S.R., Hladky J., et al. A planar InP/InGaAs avalanche photodiode with floating guard ring and double diffused junction // *J. Lightwave Technol.* 1992. V. 10. № 2. P. 182–193. DOI: 10.1109/50.120573
15. Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М. и др. Грибовидная меза-структура для лавинных фотодиодов на гетероструктурах InAlAs/InGaAs // *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47. № 21. С. 36–38. DOI:10.21883/PJTF.2021.21.51627.18939
16. Zheng X.G., Hsu J.S., Hurst J.B., et al. Long-wavelength In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As large-area avalanche photodiodes and arrays // *IEEE J. Quantum Electron.* 2004. V. 40. № 8. P. 1068–1073. DOI: 10.1109/JQE.2004.831637
17. Meng X., Xie S., Zhou X., et al. InGaAs/InAlAs single photon avalanche diode for 1550 nm photons // *Royal Society Open Science*. 2016. V. 3. № 3. P. 150584. DOI: 10.1098/rsos.150584

АВТОРЫ

Николай Анатольевич Малеев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 7007028437; <https://orcid.org/0000-0003-2500-1715>; maleev.beam@mail.ioffe.ru

Александр Георгиевич Кузьменков — кандидат физико-математических наук, старший инженер, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 16233645500; <https://orcid.org/0000-0002-7221-0117>; kuzmenkov@mail.ioffe.ru

Марина Михайловна Кулагина — научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 6602557154; <https://orcid.org/0000-0002-8721-185X>; Marina.Kulagina@mail.ioffe.ru

Юлия Александровна Гусева — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 57366225400; <https://orcid.org/0000-0002-7035-482X>; Guseva.Julia@mail.ioffe.ru

Алексей Петрович Васильев — ведущий технолог, Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 7402046721; <https://orcid.org/0000-0002-2181-5300>; Vasiljev@mail.ioffe.ru

AUTHORS

Nikolai A. Maleev — PhD, Senior Researcher, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Senior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 7007028437 <https://orcid.org/0000-0003-2500-1715>; maleev.beam@mail.ioffe.ru

Aleksandr G. Kuzmenkov — PhD, Senior Engineer, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 16233645500; <https://orcid.org/0000-0002-7221-0117>; kuzmenkov@mail.ioffe.ru

Marina M. Kulagina — Researcher, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 6602557154; <https://orcid.org/0000-0002-8721-185X>; Marina.Kulagina@mail.ioffe.ru

Julia A. Guseva — Junior Researcher, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 57366225400; <https://orcid.org/0000-0002-7035-482X>; Guseva.Julia@mail.ioffe.ru

Alexey P. Vasiljev — Senior Technologist, Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 7402046721; <https://orcid.org/0000-0002-2181-5300>; Vasiljev@mail.ioffe.ru

Сергей Анатольевич Блохин — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 6701373717; <https://orcid.org/0000-0002-5962-5529>; blokh@mail.ioffe.ru

Михаил Александрович Бобров — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 40461011800; <https://orcid.org/0000-0001-7271-5644>; bobrov.mikh@gmail.com

Сергей Иванович Трошков — научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 6505788427; <https://orcid.org/0000-0002-3307-6226>; S.Troshkov@mail.ioffe.ru

Владислав Васильевич Андриушкин — аспирант, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 57209329441; <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>; vvandriushkin@itmo.ru

Евгений Сергеевич Колодезный — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 56520395600; <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>; evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

Владислав Евгеньевич Бугров — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 8321276100; <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>; vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Виктор Михайлович Устинов — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 35393681800; <https://orcid.org/0000-0002-6401-5522>; vmust@beam.ioffe.ru

Sergei A. Blokhin — PhD, Senior Researcher, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Senior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 6701373717; <https://orcid.org/0000-0002-5962-5529>; blokh@mail.ioffe.ru

Mikhail A. Bobrov — Junior Researcher, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 40461011800; <https://orcid.org/0000-0001-7271-5644>; bobrov.mikh@gmail.com

Sergey I. Troshkov — Researcher, Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 6505788427; <https://orcid.org/0000-0002-3307-6226>; S.Troshkov@mail.ioffe.ru

Vladislav V. Andryushkin — PhD Student, Junior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 57209329441; <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>; vvandriushkin@itmo.ru

Evgenii S. Kolodeznyi — PhD, Senior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 56520395600; <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>; evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

Vladislav E. Bougrov — Doctor of Science, Chief Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 8321276100; <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>; vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Victor M. Ustinov — Doctor of Science, Leading Researcher, Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 35393681800; <https://orcid.org/0000-0002-6401-5522>; vmust@beam.ioffe.ru