

Влияние типа подложки-носителя на резистивные и оптические свойства AlGaAs/GaInAs светоизлучающих инфракрасных диодов

© А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Р.А. Салий, Ф.Ю. Солдатенков, Д.А. Малевский, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2025 г.

В окончательной редакции 30 сентября 2025 г.

Принято к публикации 6 октября 2025 г.

Выполнены исследования различных конструкций светоизлучающих инфракрасных (840 nm) диодов на основе AlGaAs/GaInAs-гетероструктур с множественными квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Снижение оптических потерь излучения в светоизлучающих диодах достигнуто при встраивании в конструкцию многослойных комбинированных отражателей путем переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель на основе полупроводникового материала (Si, GaAs) или металла (Cu, Au). Проведен анализ влияния конструкций прибора на характеристики светоизлучающих диодов. Максимальные значения эффективности 46 % при плотности тока 10–20 A/cm² достигнуты в приборах на GaAs-подложке-носителе. Снижение резистивных потерь и увеличение оптической мощности до 730 mW при рабочем токе 1.2 A получено в приборах на металлической подложке-носителе.

Ключевые слова: инфракрасный светоизлучающий диод, AlGaAs/GaInAs-гетероструктура, подложка-носитель.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62292.107-25

Введение

Область применения инфракрасных (ИК) светоизлучающих диодов (СИД) затрагивает различные сферы как научные, так и бытовые: медицинская диагностика, оптические датчики в беспроводных устройствах, системы ночного видения и др. [1–3]. Увеличение оптической мощности излучателей осуществляется путем разработки высокоэффективных гетероструктур с множественными квантовыми ямами [4,5], встроенными структурными отражателями [6], а также при модификации построения комплекса, направленного на формирование встроенных тыльных отражателей, обеспечивающих эффективный вывод генерированного в активной области излучения [7–10].

Формирование встроенных отражателей в ИК СИД с длиной волны излучения < 900 nm необходимо проводить непосредственно между активной областью гетероструктуры и GaAs-подложкой, поглощающей излучение в данном диапазоне длин волн. Встраивание отражателя осуществляется при переносе тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель [11,12]. Проведен анализ влияния конструкций прибора с различными материалами подложки-носителя на характеристики ИК СИД: последовательное сопротивление прибора, эффективность при различных рабочих токах, оптическая мощность излучателей.

В литературе [8–9] освещены вопросы изготовления ИК СИД на полупроводниковых подложках-носителях (Si), обладающих оптической мощностью излучения 180–280 mW при токе 200–300 mA. Однако на токовых

зависимостях оптической мощности наблюдается слабый прирост мощности с увеличением тока до значений, превышающих 150 mA, что свидетельствует о высоких резистивных потерях и не позволяет получать высоко-мощные приборы.

Основной задачей проводимого исследования является анализ резистивных потерь при использовании различных материалов в качестве подложки-носителя (полупроводники GaAs, Si или металлы Au, Cu и др.) и при варьировании методов переноса тонких слоев гетероструктуры, а также оптимизация резистивных и оптических свойств ИК СИД при различных рабочих токах.

1. Формирование ИК СИД на полупроводниковой и металлической подложке-носителе

В настоящей работе исследовались AlGaAs/GaInAs-гетероструктуры ИК (840 nm) СИД, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs *n*-типа проводимости. Рост гетероструктуры начинается с кристаллизации жертвенного слоя Al_{0.9}Ga_{0.1}As, обладающего высокой селективностью при химическом травлении ростовой подложки GaAs. Активная область гетероструктуры включает шесть GaInAs квантовых ям, заключенных между широкозонными барьерными Al_{0.2}Ga_{0.8}As- и Al_{0.4}Ga_{0.6}As-слоями *n*- и *p*-типа проводимости. Для уменьшения сопротивления растекания

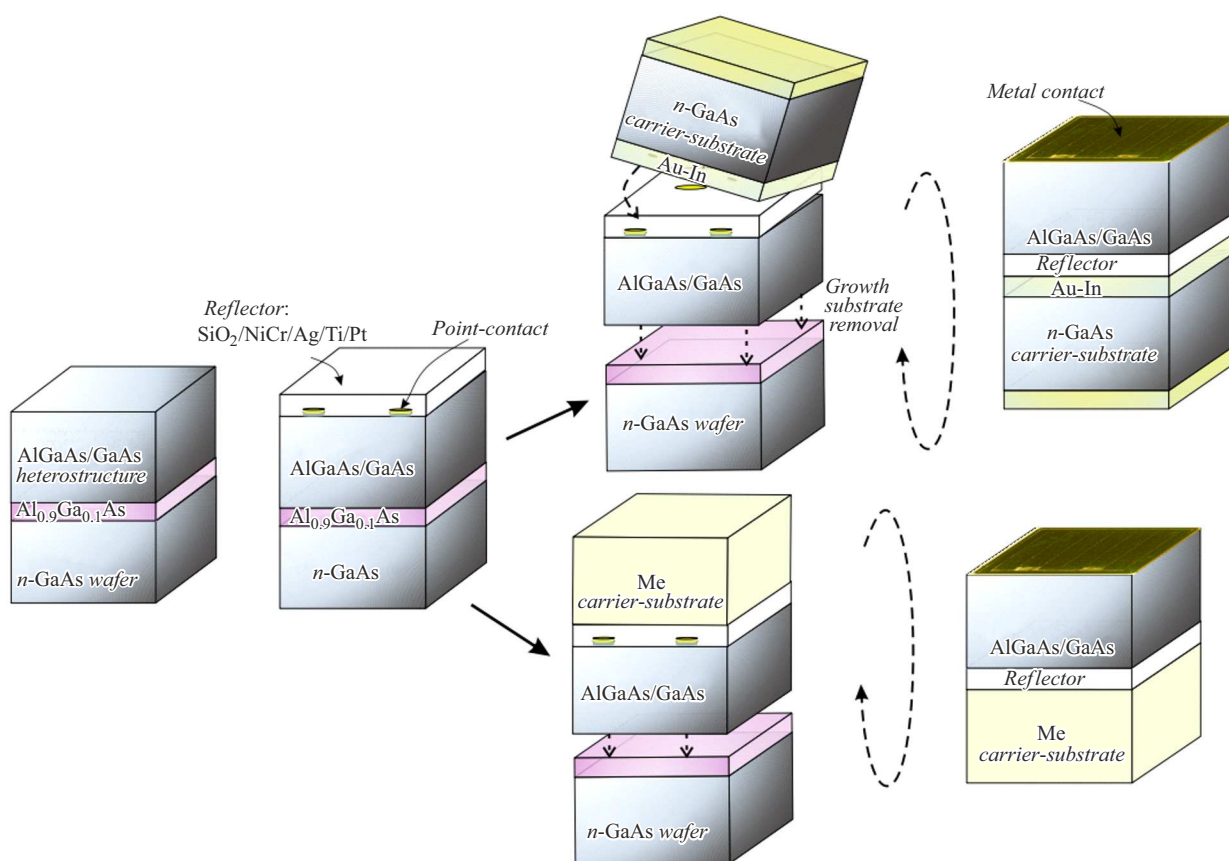


Рис. 1. Схематическое изображение этапов формирования ИК СИД с тыльным комбинированным отражателем SiO₂/NiCr/Ag/Ti/Pt на подложке-носителе n-GaAs или металла.

сформирован слой Al_{0,2}Ga_{0,8}As *n*-типа проводимости толщиной 4–6 μm, снижение контактного сопротивления достигается при формировании сильнолегированных слоев GaAs *n*- и *p*-типа проводимости. Постростовая технология изготовления приборов включает следующие этапы [13]:

- формирование точечного контакта *p*-типа проводимости на основе слоев NiCr/Ag/Au на поверхности гетероструктуры;
- нанесение многослойного комбинированного отражателя на основе слоев SiO₂/NiCr/Ag/Ti/Pt;
- перенос гетероструктуры на подложку-носитель (GaAs или Au);
- удаление ростовой подложки и жертвенного слоя Al_{0,9}Ga_{0,1}As методом селективного химического травления;
- формирование фронтального омического контакта *n*-типа проводимости на основе слоев Pd/Ge/Au;
- текстурирование световыводящей поверхности.

Снижение резистивных потерь ИК СИД возможно при разработке оптимальной конфигурации омических контактов, обеспечивающих минимальный вклад в сопротивление растекания, удельное контактное сопротивление и последовательное сопротивление прибора в

целом, а также при оптимизации технологии монтажа подложки-носителя из материала с высокой удельной электропроводностью.

Использование полупроводниковой подложки-носителя из GaAs обусловлено сходным с материалом эпитаксиальной гетероструктуры коэффициентом термического расширения, что особенно важно для предотвращения деградации ИК СИД при нагреве в ходе их изготовления и эксплуатации [11]. Однако монтаж GaAs подложки-носителя осуществляется путем механической стыковки через интерметаллическое соединение Au–In, что может вести к образованию микропор на гетерогранице структура–Au–In-подложка и соответственно к увеличению резистивных потерь [12].

Использование золотой подложки-носителя обусловлено высокой электрической проводимостью и химической стойкостью к воздействию окружающей среды, при этом использование альтернативных металлов позволяет снизить себестоимость кристаллов СИД. Формирование металлической подложки-носителя осуществляется путем электрохимического наращивания металла непосредственно на поверхности тыльного комбинированного отражателя гетероструктуры (рис. 1). Преимуществом данной технологии является отсутствие механи-

ческой стыковки гетероструктуры и подложки-носителя. Однако различие коэффициентов термического расширения материала гетероструктуры (AlGaAs/GaInAs) и металлов (Cu, Au) может вести к возникновению микродефектов в гетероструктуре, что требует более детальной проработки конструкции носителя и режимов его формирования.

Формирование металлической подложки-носителя выполнялось методом электрохимического осаждения золота из цианистого электролита в два этапа: при катодной плотности тока 0.01 mA/mm^2 на начальном этапе зародышеобразования для обеспечения высокой адгезии к поверхности структуры и при рабочей плотности тока $0.08\text{--}0.1 \text{ mA/mm}^2$ для формирования монолитной подложки-носителя толщиной $60\text{--}80 \text{ }\mu\text{m}$.

После формирования подложки-носителя осуществляется удаление ростовой подложки GaAs и жертвенного слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, далее выполняется напыление фронтального омического контакта. Из-за разницы в коэффициентах термического расширения материала гетероструктуры и металлической подложки-носителя необходимо минимизировать термическое воздействие на кристалл СИД. Использование контактной системы Pd/Ge/Au, обладающей низким значением удельного контактного сопротивления $\sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ к контактному слою GaAs *n*-типа проводимости при низких температурах вжигания $\sim 185^\circ\text{C}$ предотвращает термическую деградацию ИК СИД [14].

Снижение резистивных потерь ИК СИД достигнуто при увеличении толщины контактных шин до $2\text{--}4.5 \text{ }\mu\text{m}$ путем электрохимического осаждения контактных материалов на основе слоев Ag/Ni/Au. При разработке конструкции приборов на металлической подложке-носителе основной задачей является увеличение эффективности СИД на больших токах, что ведет к необходимости формирования контактных шин большей площади поперечного сечения (толщиной $4.5 \text{ }\mu\text{m}$ при ширине $8 \text{ }\mu\text{m}$). В конструкциях СИД на GaAs подложке-носителе, предназначенных для работы на низких токах, основной задачей является снижение оптических потерь, что достигается при уменьшении степени затенения световыводящей поверхности при формировании контактных шин с меньшей площадью сечения (толщиной $2 \text{ }\mu\text{m}$ при ширине $7 \text{ }\mu\text{m}$).

По результатам проведенных исследований изготовлены два типа кристаллов ИК (840 nm) СИД площадью 1 mm^2 на подложках-носителях, выполненных из GaAs (толщиной $400\text{--}450 \text{ }\mu\text{m}$) и Au (толщиной $60\text{--}80 \text{ }\mu\text{m}$), проведен их монтаж на керамические теплопроводящие основания. Выполнено формирование оптического элемента в виде силиконовой полусферы на световыводящей поверхности СИД для увеличения вывода излучения из кристалла [11].

2. Методика исследования характеристик кристаллов СИД

Для анализа влияния конструкций и методов изготовления ИК СИД на характеристики изготовленных приборов выполнены измерения вольт-амперных и оптических ватт-амперных характеристик, токовых зависимостей эффективности, рассчитаны значения последовательного и шунтирующего *p-n*-переход сопротивления. Измерения в квазипостоянном режиме при низкой плотности тока ($10^{-7}\text{--}10^{-1} \text{ A/cm}^2$) проводились с использованием источника-измерителя Keithley 2400 для задания тока и регистрации напряжения, а также вольтметра АКИП В7/78 для регистрации токового сигнала от контрольного фотоприемника. Измерения при высокой плотности тока (до 100 A/cm^2) проводились в импульсном режиме (длительность единичного импульса $10\text{--}100 \text{ }\mu\text{s}$, скважность > 1000) с использованием цифровой системы ввода-вывода данных для регистрации тока, напряжения исследуемого СИД и сигнала от контрольного фотоприемника. Развертка по напряжению ИК СИД осуществлялась с применением биполярного усилителя. Для снижения влияния угловой расходимости излучения СИД измерения проводились в интегрирующей сфере (рис. 2). Регистрация спектров люминесценции выполнялась спектрометром с диапазоном чувствительности $350\text{--}1100 \text{ nm}$ (рис. 3, а).

Дополнительно для обнаружения локальных дефектов использовался метод электролюминесценции с помощью камеры, обладающей чувствительностью в диапазоне длин волн $350\text{--}1050 \text{ nm}$. Равномерное распределение электролюминесценции ИК СИД по всей площади кристалла СИД свидетельствует об отсутствии дефектов на поверхности, а также об оптимальном выборе конфигурации фронтального омического контакта и параметров $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -слоя растекания (рис. 3, б).

3. Влияние резистивных потерь на эффективность и оптическую мощность ИК СИД

Для оценки последовательного сопротивления ИК СИД проведено измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) (рис. 4) и выполнена аппроксимация идеализированной (при $R_s = 0 \Omega$) ВАХ. Результаты измерений показали, что при монолитном электрохимическом наращивании металлической (Au) подложки-носителя на поверхность гетероструктуры с отражателем последовательное сопротивление СИД площадью 1 mm^2 составляет $R_s = 0.24 \Omega$. При механической стыковке гетероструктуры и подложки-носителя GaAs через соединение Au-In наблюдается увеличение последовательного сопротивления приборов до

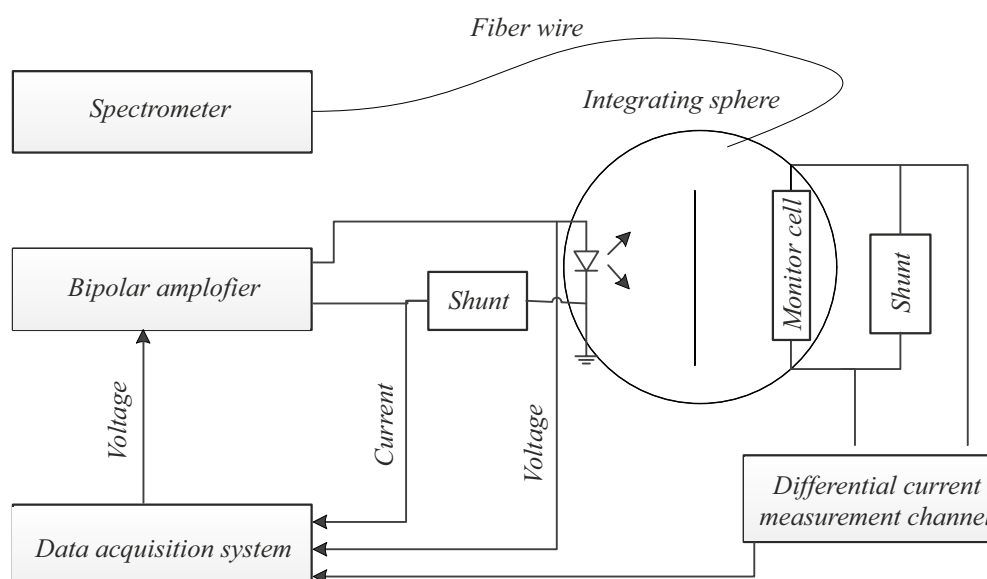


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения эффективности, ВАХ и ватт-амперных характеристик СИД.

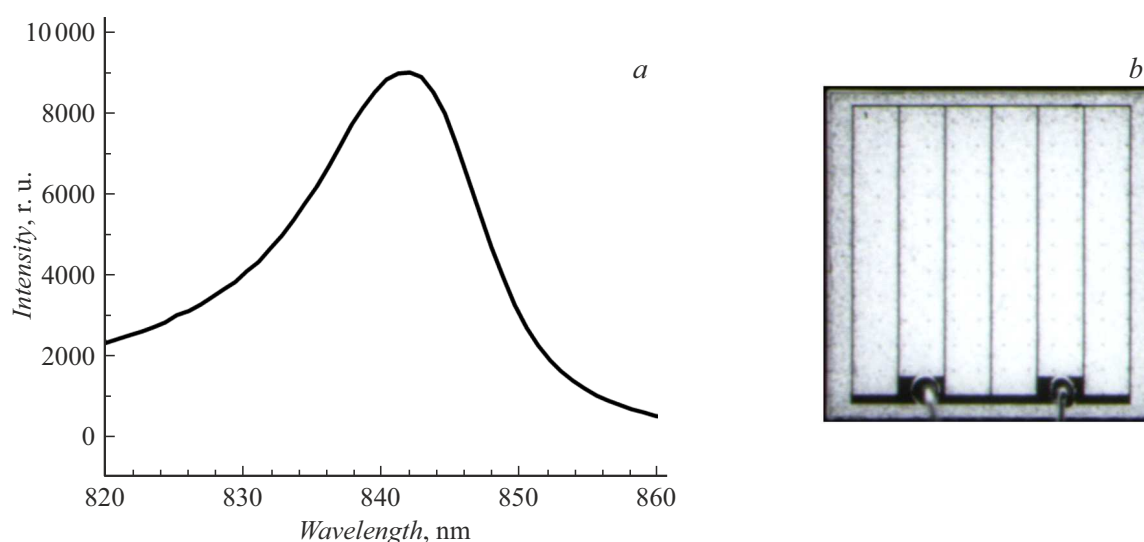


Рис. 3. Спектральная характеристика кристалла ИК (840 nm) СИД размером 1×1 mm (a) и распределение электролюминесценции (b).

$R_s = 0.36 \Omega$. Таким образом, использование металлической подложки-носителя обеспечивает снижение резистивных потерь и позволяет более эффективно преобразовывать электроэнергию при высоких токах (> 100 – 200 mA).

Для анализа влияния последовательного сопротивления на характеристики ИК СИД проведены измерения токовых зависимостей эффективности и оптической мощности для двух типов конструкций приборов (рис. 5). Максимальные значения эффективности $\eta = 46\%$ достигнуты в ИК СИД (1 mm^2) на GaAs подложке-носителе при плотности тока 10 – 20 A/cm^2 и $\eta = 37\%$ в СИД на золотой подложке-носителе при плотности тока 100 A/cm^2 .

Преимущество золотой подложки в диапазоне больших токов (100 – 120 A/cm^2) сказывается на увеличении эффективности на 5% . В диапазоне до 20 A/cm^2 для таких СИД регистрировались несколько меньшие эффективности (на 1% – 2%) в сравнении с СИД на GaAs-носителе. Это обусловлено напряжениями, передаваемыми от золотого носителя к AlGaAs/GaInAs-гетероструктуре, с образованием микродефектов, а также с конфигурацией фронтального омического контакта с увеличенной площадью поперечного сечения контактных шин, которая ведет к снижению резистивных потерь при больших плотностях тока, но в то же время приводит к небольшому росту оптических потерь, что сказывается на падении эффективности.

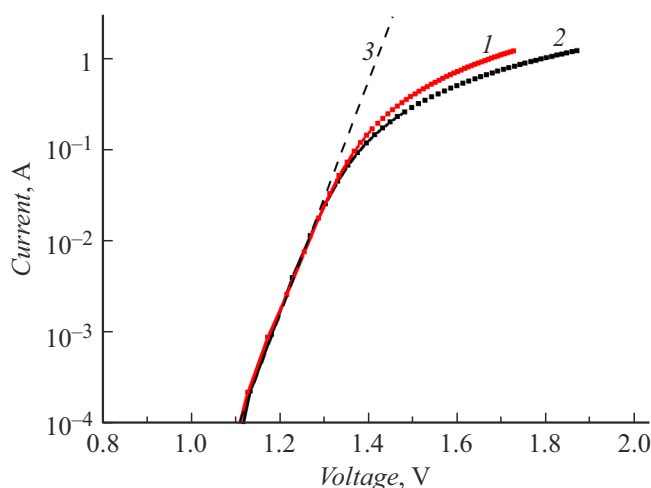


Рис. 4. ВАХ ИК (840 nm) СИД на подложке-носителе, выполненной из Au (1) или GaAs (2); аппроксимация идеализированной ВАХ (3).

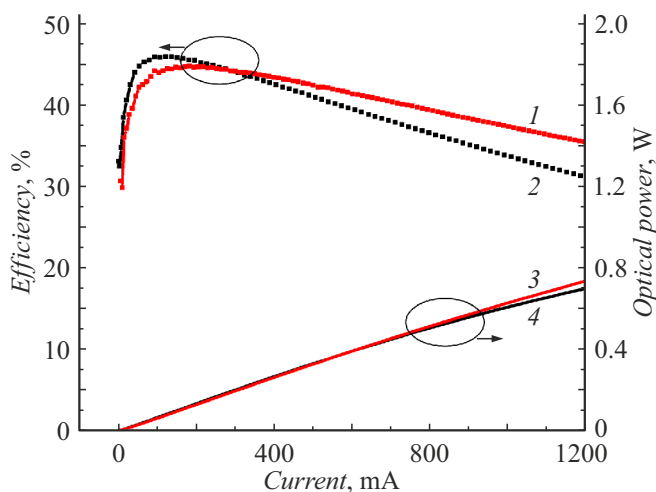


Рис. 5. Токовые зависимости эффективности и оптической мощности ИК (840 nm) СИД на подложке-носителе из Au (1, 3) или GaAs (2, 4).

Заключение

Выполнены исследования и разработки различных конструкций ИК (840 nm) СИД с встроенным многослойным комбинированным отражателем, изготовленных путем переноса тонких слоев AlGaAs/GaInAs-гетероструктуры на подложку-носитель, выполненную из металла или полупроводникового материала. При малых плотностях тока резистивные потери не оказывают влияния на эффективность приборов, что позволило достигнуть максимальных значений эффективности 46 % при плотности тока 10–20 А/см² в приборах на GaAs подложке-носителе. Снижение резистивных потерь и увеличение оптической мощности до 730 mW при рабо-

чем токе 1.2 А получено в приборах на металлической подложке-носителе.

В ходе исследования были изучены возможности получения ИК СИД, работающих в различных диапазонах токов. Для каждого типа исследованных приборов может быть определена своя область применения. Высокоэффективные СИД, изготовленные на GaAs подложке-носителе, могут использоваться в мало-мощных оптоэлектронных устройствах. Мощные СИД ($P_{rad} > 700 \text{ mW}$) на металлической подложке-носителе могут найти широкое применение, например, для ИК подсветки и в охранных системах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Vasilopoulou, A. Fakharuddin, F.P. Arquer, D.G. Georgiadou, H. Kim, A.R. Yusoff, F. Gao, M.K. Nazeeruddin, H.J. Bolik, E.H. Sargent. *Nat. Photon.*, **15**, 656 (2021). DOI: 10.1038/s41566-021-00855-2
- [2] A.G. Entrop, A. Vasenev. *Energy Proc.*, **132**, 63 (2017). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.636
- [3] M. Kitamura, T. Imada, S. Kako, Y. Arakawa, Y. Jpn. J. Appl. Phys., **43**, 2326 (2004). DOI: 10.1143/JJAP.43.2326
- [4] L. Han, M. Zhao, X. Tang, W. Huo, Zh. Deng. *J. Appl. Phys.*, **127**, (2020). DOI: 10.1063/1.5136300
- [5] Y. Yu, X. Qin, B. Huang, J. Weia, H. Zhou, J. Pan, W. Chen, Yun Qi, X. Zhang, Z. Ren. *Vacuum*, **69**, 489 (2003). DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00560-2
- [6] Su-Chang Ahn, Byung-Teak Lee, Won-Chan An, Dae-Kwang Kim, In-Kyu Jang, Jin-Su So, Hyung-Joo Lee. *J. Korean Phys. Soc.*, **69** (1), 91 (2016). DOI: 10.3938/jkps.69.91
- [7] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, Ch.-H. Lee, J.-H. Kim, L.-K. Kwac. *Infrared Phys. Technol.*, **118**, 103879 (2021). DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103879
- [8] H.-J. Lee, I.-K. Jang, D.-K. Kim, Y.-J. Cha, S.W. Cho. *Micromachines*, **13**, 695 (2022). DOI: 10.3390/mi13050695
- [9] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, J.-H. Kim, H.-G. Kim, L.-K. Kwac. *Current Appl. Phys.*, **22**, 36 (2021). DOI: 10.1016/j.cap.2020.12.002
- [10] E.F. Shubert. *Light-Emitting Diodes* (second edition) (Cambridge University Press, 2006)
- [11] А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Ф.Ю. Солдатенков, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **55** (8), 699 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.08.51143.9665 [A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, D.A. Malevskii, S.A. Mintairov, A.M. Nadtochiy, M.V. Nakhimovich, F.Y. Soldatenkov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Semiconductors*, **55** (8), 686 (2021). DOI: 10.1134/S1063782621080121]

- [12] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **262**, 112251 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551
- [13] А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Р.А. Салий, Ф.Ю. Солдатенков, М.В. Нахимович, Д.А. Малевский. Письма в ЖТФ, **50** (18), 22 (2024). DOI:10.61011/PJTF.2024.18.58625.19946
- [14] A.V. Malevskaya, F.Yu. Soldatenkov, R.V. Levin, N.A. Kalyuzhnyy, M.Z. Shvarts. Vacuum, **233**, 114030 (2025). DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114030