10

Комбинированный оптический отражатель в мощных инфракрасных (850 nm) AlGaAs/GaInAs светоизлучающих диодах

© А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, В.М. Емельянов, Р.А. Салий, Ф.Ю. Солдатенков, В.С. Эполетов, Д.А. Малевский

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 09.12.2025 г.
В окончательной редакции 07.04.2026 г.
Принята к публикации 26.08.2026 г.

Разработан многослойный комбинированный отражатель, встраиваемый в конструкцию инфракрасных (850 nm) светоизлучающих диодов на основе AlGaAs/GaInAs — гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Рассчитаны его оптические характеристики. Расчетное значение коэффициента отражения излучения от комбинированного отражателя, включающего структурный слой $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, диэлектрический (SiO_2) и металлические (NiCr, Ag) слои, превысило 99 %. Разработка конструкции оптического отражателя и оптимизация топологии контактной системы позволили достигнуть значений эффективности светоизлучающих диодов более 56 % при плотности тока 10 A/cm^2 и оптической мощности 700 mW при плотности тока 100 A/cm^2.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, оптический отражатель, эффективность.

DOI: 10.61011/OS.2026.09.63820.8867-26

Разработка конструкций оптических отражателей при создании многопроходных инфракрасных (850 nm) светоизлучающих диодов (ИК СИД) на основе AlGaAs/GaInAs — гетероструктур, выращиваемых методом МОС-гидридной эпитаксии, является весьма актуальной задачей [1–5]. Гетероструктуры исследуемых приборов формируются на поглощающих излучение GaAs — подложках, поэтому для повышения эффективности ИК СИД можно использовать отражатели излучения между гетероструктурой и подложкой. Известно, что высокие значения коэффициентов отражения Ag и Au позволяют создавать металлические отражатели на их основе: Ag, ITO/Ag, Ti/ITO/Ag, Ti/Au, Al/Au, Cu/Au, Ni/Au, обеспечивающие отражение 92−98 % поступающего излучения [6,7]. Однако потери 2−8 % излучения могут существенно сказаться на характеристиках приборов из-за многократного переотражения генерируемого в активной области излучения. Таким образом, возникает необходимость разработки новых конструкций с коэффициентом отражения более 98 %.

В настоящей работе для снижения оптических потерь излучения, распространяющегося в сторону подложки, реализовано формирование многослойного комбинированного отражателя между активной областью гетероструктуры и подложкой [8]. Технологический процесс изготовления ИК СИД с встроенным отражателем проводится в несколько этапов (рис. 1):

– формирование точечных контактов (диаметром 10 μm с шагом 75 μm) на основе слоев NiCr/Ag/Au к контактному слою гетероструктуры GaAs p-типа проводимости;

– формирование комбинированного отражателя;

– перенос тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель GaAs с использованием интерметаллического соединения Au-In;

– удаление ростовой подложки GaAs;

– формирование световыводящей поверхности СИД.

Разработанная конструкция комбинированного отражателя включает металлический (a), диэлектрический (b) и структурный (c) слои.

(a) Нанесение металлических слоев на основе Ag или Au, обладающих коэффициентом отражения до 98 % в исследуемом диапазоне длин волн (> 600 nm),

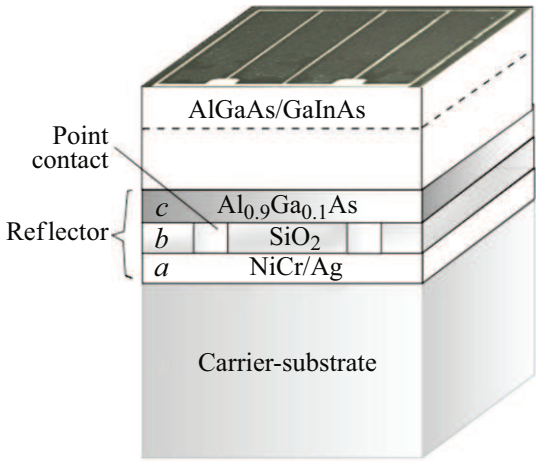

Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ИК СИД AlGaAs/GaInAs с многослойным комбинированным отражателем $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/SiO_2/NiCr/Ag$ на подложке-носителе.

позволяет существенно увеличить долю отраженного излучения [9–11]. Однако данные слои обладают низкой адгезией к полупроводниковым материалам. Для улучшения адгезии Ag и Au предварительно наносили адгезионный материал — тонкий слой сплава NiCr. Коэффициент отражения от данного материала составляет порядка 50 %, что существенно ниже, чем у Ag и Au, однако осаждение слоя нанометровой толщины не ухудшает оптических свойств отражателя и позволяет существенно улучшить его адгезию.

(b) Введение в состав системы диэлектрического слоя преследовало две цели. Во-первых, некоторые этапы пострстовых технологических процессов сопровождаются температурным отжигом, в частности, формирование омических контактов осуществляется при температурах до 400 °C. При высоких температурах может проходить вплавление металлических слоев в поверхность полупроводниковой структуры, что сказывается на снижении оптических свойств. Для защиты и изоляции отражателя от полупроводника проводится дополнительное осаждение диэлектрического слоя на основе SiO_2, MgF_2, Si_3N_4. Во-вторых, введение данного слоя увеличивает долю отраженного излучения за счет возврата лучей, поступающих под углами, при которых выполняется условие полного внутреннего отражения (рис. 1). При этом материал диэлектрического покрытия выбирается по параметру коэффициента преломления (n), температурной стабильности слоя, адгезии к полупроводнику и методу нанесения. В конструкцию комбинированного отражателя введен слой SiO_2, что обусловлено возможностью осаждения методом магнетронного распыления, обеспечивающим высокую точность контроля толщины слоя и хорошую адгезию к материалу полупроводника. Кроме того, слой SiO_2 обладает высокой термической стойкостью, что особенно важно при проведении последующих технологических процессов, включающих высокотемпературную обработку до 200 °C. Низкий коэффициент преломления SiO_2 ($n = 1.48$) позволяет уменьшить угол полного внутреннего отражения. Таким образом, диэлектрический слой одновременно выполняет как защитную функцию, так и обеспечивает увеличение доли отраженного излучения.

(c) В состав многослойного отражателя ввели структурный широкозонный слой n-$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ толщиной порядка 300 nm, формируемый непосредственно при эпитаксиальном росте гетероструктуры. Показатель преломления данного слоя меньше, чем у прилегающего к нему узкозонного слоя гетероструктуры $Al_yGa_{1-y}As$ ($y < 0.2$), поэтому $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ отражает падающие на него лучи под углами, при которых происходит полное внутреннее отражение ($\sim 60°$) [9].

Для оценки эффективности разработанной конструкции многослойного комбинированного $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/SiO_2/NiCr/Ag$-отражателя был выполнен расчет коэффициента отражения падающего излучения с длиной волны 850 nm TM- и TE-поляризаций в зависимости от угла распространения света в

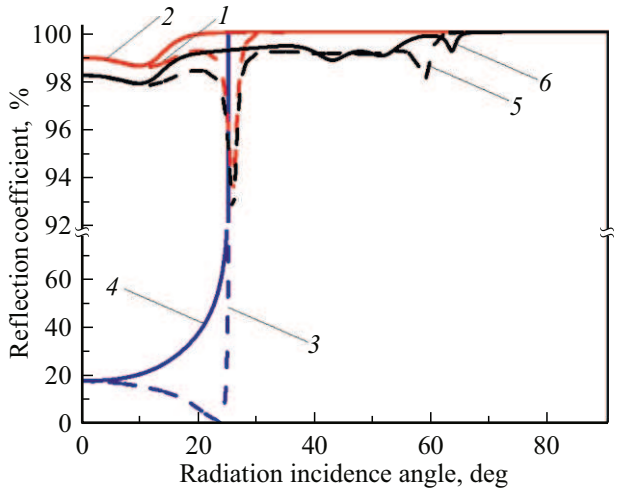

Рис. 2. Результаты расчета оптических характеристик комбинированного отражателя на основе $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/SiO_2/NiCr/Ag$ без учета затенения точечными контактами ($1, 2$), с затенением ($5, 6$) и на основе только слоя SiO_2 ($3, 4$) по методу матриц Абелеса для TM- ($1, 3, 5$) и TE- ($2, 4, 6$) поляризованного света ($\lambda = 850$ nm).

узкозонном материале с использованием метода матриц Абелеса [12]. При моделировании задавалась амплитуда падающей на отражатель электромагнитной волны из слоя на основе $Al_yGa_{1-y}As$ ($y < 0.2$) и оценивалась амплитуда отраженной волны. Оптические параметры для полупроводниковых и диэлектрических слоев были взяты из базы данных [13], для составлявших структуру материалов они соответствовали работам [14–16].

Результаты расчетов представлены на рис. 2 (линии *1* и *2*). Также приведены зависимости коэффициента отражения от границы $Al_yGa_{1-y}As/SiO_2$ (линии *3* и *4*). Видно, что для света TE-поляризации коэффициент отражения при углах падения менее 20° оказывается немногим меньше 100 %. При достижении угла полного внутреннего отражения от SiO_2 он приближается к 100 %. В случае света TM-поляризации имеет место сходная зависимость за исключением небольшого снижения коэффициента отражения вблизи псевдо-угла Брюстера для границы SiO_2 с металлическим слоем, который незначительно превышает угол полного внутреннего отражения. Наблюдаемый эффект является следствием конечной толщины слоя диэлектрика и неполного затухания поля электромагнитной волны на границе с металлом для этих углов.

Необходимо отметить, что при практической реализации приборных структур для обеспечения электрической проводимости между гетероструктурой и подложкой-носителем в диэлектрическом слое формируется массив точечных контактов, затеняющих 2 % площади отражателя, что ведет к небольшому снижению коэффициента отражения до 98–99 % (линии *5* и *6*).

На основе разработанной конструкции многослойного комбинированного отражателя изготовлены мощ-

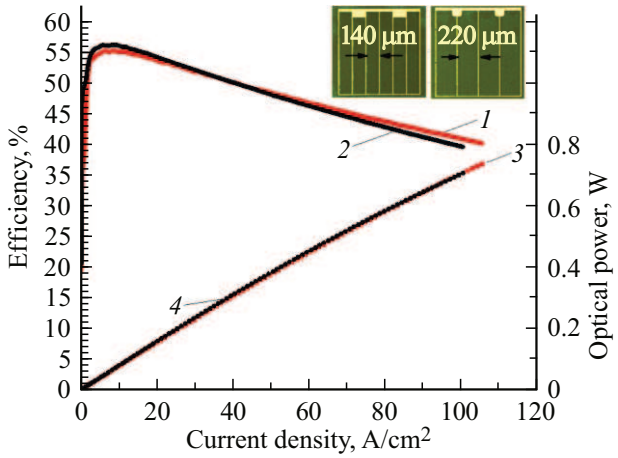

Рис. 3. Токовые зависимости эффективности (*1*, *2*), оптической мощности (*3*, *4*) ИК (850 nm) СИД с шагом контактной сетки 140 μm (*1*, *3*) и 220 μm (*2*, *4*).

ные кристаллы ИК СИД с использованием технологии переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель. Для снижения оптических потерь излучения со стороны световыводящей поверхности была разработана топология приборов размером 1×1 mm с шагом полосков фронтального омического контакта 140 и 220 μm.

Проведены измерения токовых зависимостей эффективности и оптической мощности ИК СИД (рис. 3). Для определения характеристик приборов необходимо исключить влияние электрического нагрева полупроводника от протекающего тока, в связи с этим измерения при высоком уровне протекающего тока проводятся в импульсном режиме (в качестве порогового значения была выбрана плотность тока 1 A/cm^2, что для разработанных образцов ИК СИД соответствует току 10 mA). Система управления и сбора данных, построенная на базе DAQ-платы NI USB 6351, под управлением разработанной программы выдает управляющие импульсы с варьируемой амплитудой напряжения для формирования импульсов тока небольшой длительности (порядка 300 μs) и скважностью 100, протекающих через ИК СИД. Одновременно с этим регистрируется ток, генерируемый контрольным ФЭП с известной спектральной фоточувствительностью на длинах волн исследуемых СИД (SR, A/W). Для минимизации эффекта угловой расходимости излучения исследуемого образца на результаты измерения испытуемый образец и контрольный фотоприёмник помещаются в интегрирующую сферу со светозащитным экраном, который препятствует прохождению прямого излучения. В качестве контрольного фотоприёмника используется кремниевый фотодиод ФДУК-100.

Варьирование шага фронтального контакта позволяет оптимизировать соотношение омических и оптических потерь ИК СИД в рабочем диапазоне плотности токов. Снижение оптических потерь излучения достигается при увеличении шага контактной сетки до 220 μm за счет снижения степени затенения световыводящей поверхности кристалла СИД, что позволило увеличить эффективность приборов до 56 % при плотности тока 5–10 A/cm^2. При увеличении плотности тока до значений более 40 A/cm^2 существенным становится сопротивление растекания по фронтальному слою гетероструктуры. Снижение резистивных потерь за счет уменьшения шага полосков (шириной 6 μm) контактной сетки до 140 μm позволило сохранить эффективность более 40 % и достигнуть выходной оптической мощности 700 mW при плотности тока 100 A/cm^2. Значение КПД 56 % несколько меньше представленных в литературе [7] значений, однако разработанные СИД демонстрируют возможность работы в большом диапазоне плотности тока: 5–100 A/cm^2.

Таким образом, выполнена разработка конструкции и технологических решений при формировании комбинированного отражателя $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/SiO_2/NiCr/Ag$ в мощных ИК (850 nm) СИД. Согласно представленному расчету, данный отражатель обеспечивает отражение более 99 % излучения. Разработка технологии формирования комбинированных оптических отражателей совместно с оптимизацией топологии контактов СИД позволила увеличить эффективность приборов до 56 % при плотности тока 5–10 A/cm^2 и достигнуть высоких значений оптической мощности порядка 700 mW при плотности тока 100 A/cm^2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] H.-J. Lee, G.-H. Park, L-K Kwac, J. Lee. Nanomaterials, **14** (4), 349 (2024). DOI: 10.3390/nano14040349
[2] Z.W. Wen, H.-Y. Lin, M.-J. Yang, S.-L. Li, J.-F. Bi, H.-S. Dai. IEEE Phot. Techn. Lett., **35** (9), 517 (2023). DOI: 10.1109/LPT.2023.3261925
[3] L. Han, M. Zhao, X. Tang, W. Huo, Zh. Deng. J. Appl. Phys. V. 127, (2020). DOI: 10.1063/1.5136300
[4] 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
[5] Z.W. Wen, H.-Y. Lin, M.-J. Yang, S.-L. Li, S.-Song, S.-F. Bao, D. Sun. IEEE Phot. J., **15** (1), 8200105 (2023). DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3230409
[6] 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
[7] H.-J. Lee, I.-K. Jang, D.-K. Kim, Y.-J. Cha, S.W. Cho. Micromachines, **13**, 695 (2022). DOI: 10.3390/mi13050695
[8] 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].

[9] А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Р.А. Салий, Ф.Ю. Солдатенков, М.В. Нахимович, Д.А. Малевский. ПЖТФ, **50** (18), 22 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58625.19946
[A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, R.A. Salii, F.Yu. Soldatenkov, M.V. Nakhimovich, D.A. Malevskii. Tech. Phys. Lett., **50** (9), 67 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.09.59159.19946].

[10] 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** (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551

[11] А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Ф.Ю. Солдатенков, Р.В. Левин, Р.А. Салий, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Р. Ларионов, В.М. Андреев. ЖТФ, **93** (1), 170 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54078.166-22
[A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, F.Y. Soldatenkov, R.V. Levin, R.A. Salii, D.A. Malevskii, P.V. Pokrovskii, V.R. Larionov, V.M. Andreev. Tech. Phys., **68** (1), 161 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.01.55451.166-22]

[12] F. Abelès. Annales de Physique, **12** (4), 596 (1950). DOI: 10.1051/anphys/195012050596

[13] M.N. Polyanskiy. Sci. Data, **11**, 94 (2024). DOI: 10.1038/s41597-023-02898-2

[14] D.E. Aspnes, S.M. Kelso, R.A. Logan, R. Bhat. J. Appl. Phys., **60**, 754 (1986).

[15] P.B. Johnson, R.W. Christy. Phys. Rev. B, **6**, 4370 (1972).

[16] D. Franta, D. Nečas, I. Ohlídal, A. Giglia. Proc. SPIE, **9890**, 989014 (2016).