

Высокоэффективные ($EQE = 37.5\%$) инфракрасные (850 нм) светодиоды с брэгговским и зеркальным отражателями

© А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Р.А. Салий, Д.А. Малевский,
М.В. Нахимович, В.Р. Ларионов, П.В. Покровский, М.З. Шварц, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 8 июля 2021 г.

В окончательной редакции 2 августа 2021 г.

Принята к публикации 2 августа 2021 г.

Разработаны и исследованы инфракрасные (850 нм) светодиоды на основе AlGaAs/Ga(In)As-гетероструктур, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии, включающие множественные InGaAs квантовые ямы в активной области, и двойной оптический отражатель, включающий брэгговскую многослойную $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ -гетероструктуру и зеркальный слой серебра. Изготовлены светодиоды с внешней квантовой эффективностью $EQE = 37.5\%$ при плотности тока $> 10 \text{ A/cm}^2$.

Ключевые слова: инфракрасный светодиод, AlGaAs/GaAs-гетероструктуры, брэгговский отражатель, квантовые ямы InGaAs.

DOI: 10.21883/FTP.2021.12.51709.9711

1. Введение

Уменьшение внутренних оптических потерь в AlGaAs/GaAs-светодиодах достигается либо удалением ростовой подложки GaAs после выращивания структуры [1–5], либо путем выращивания брэгговского отражателя (БО) на основе многослойной $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ -гетероструктуры между подложкой и активной областью светодиода [6,7].

Брэгговские отражатели характеризуются высоким (порядка 90%) коэффициентом отражения только для лучей в небольшом телесном угле порядка ± 20 угл. градусов [8]. По этой причине максимальные значения внешней квантовой эффективности, полученные в AlGaAs/GaAs-светодиодах на основе гетероструктур с БО, составляют не более 10% [6,7].

Высокоэффективные ИК светодиоды на основе МОС-гидридных AlGaAs/GaAs-гетероструктур изготавливаются [4,9] методом „переноса“ выращенной гетероструктуры на пластину-носитель с нанесенным на поверхность гетероструктуры зеркальным слоем серебра, выполняющим функцию отражателя, с последующим селективным стравливанием ростовой подложки GaAs. Коэффициент внутреннего отражения генерируемого изотропного излучения ($\lambda = 850 \text{ нм}$) составляет в таких структурах с Ag-отражателем величину $\sim 90\%$ практически для всех лучей, падающих на поверхность Ag-отражателя под разными углами, что обеспечивает значительно большую величину внешнего квантового выхода в AlGaAs/GaAs ИК светодиодах с „тыльным“ Ag-отражателем [4,9].

В настоящей работе представлены результаты разработок светодиодов ($\lambda = 850 \text{ нм}$) с двойным (селективным брэгговским и широкополосным зеркальным) отражателем.

2. Светоизлучающая гетероструктура AlGaAs/Ga(In)As

Светодиоды изготавливались на основе AlGaAs/Ga(In)As-гетероструктур (рис. 1), получаемых МОС-гидридной эпитаксией на подложках n -GaAs, удаляемых в процессе постростовой технологии изготовления светодиодов. Активная область светодиодов включает шесть квантовых ям GaInAs толщиной 3 нм каждая, заключенных между широкозонными n - и p -ограничивающими слоями $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.2–0.4$). Использование квантовых ям позволяет увеличить концентрацию носителей в тонком слое и получить усиление электронно-дырочного перекрытия, что приводит к увеличению скорости излучательной рекомбинации и, соответственно, к увеличению внутреннего квантового выхода. При этом использование множественных квантовых ям позволяет сохранять основной энергетический уровень квантовой ямы в качестве доминирующего канала рекомбинации даже при высоких уровнях накачки [9].

Для увеличения эффективности вывода света из кристалла между активной областью и тыльной поверхностью структуры выращивался брэгговский отражатель. В отличие от лазерных структур, требующих настройки БО на определенную длину волны, для светодиодов лучше использовать БО, обеспечивающие относительно протяженный спектральный диапазон отражаемого света (40–80 нм).

3. Оптические характеристики брэгговского отражателя

В данной работе БО формировался из AlGaAs-слоев с максимально различными значениями показателя пре-

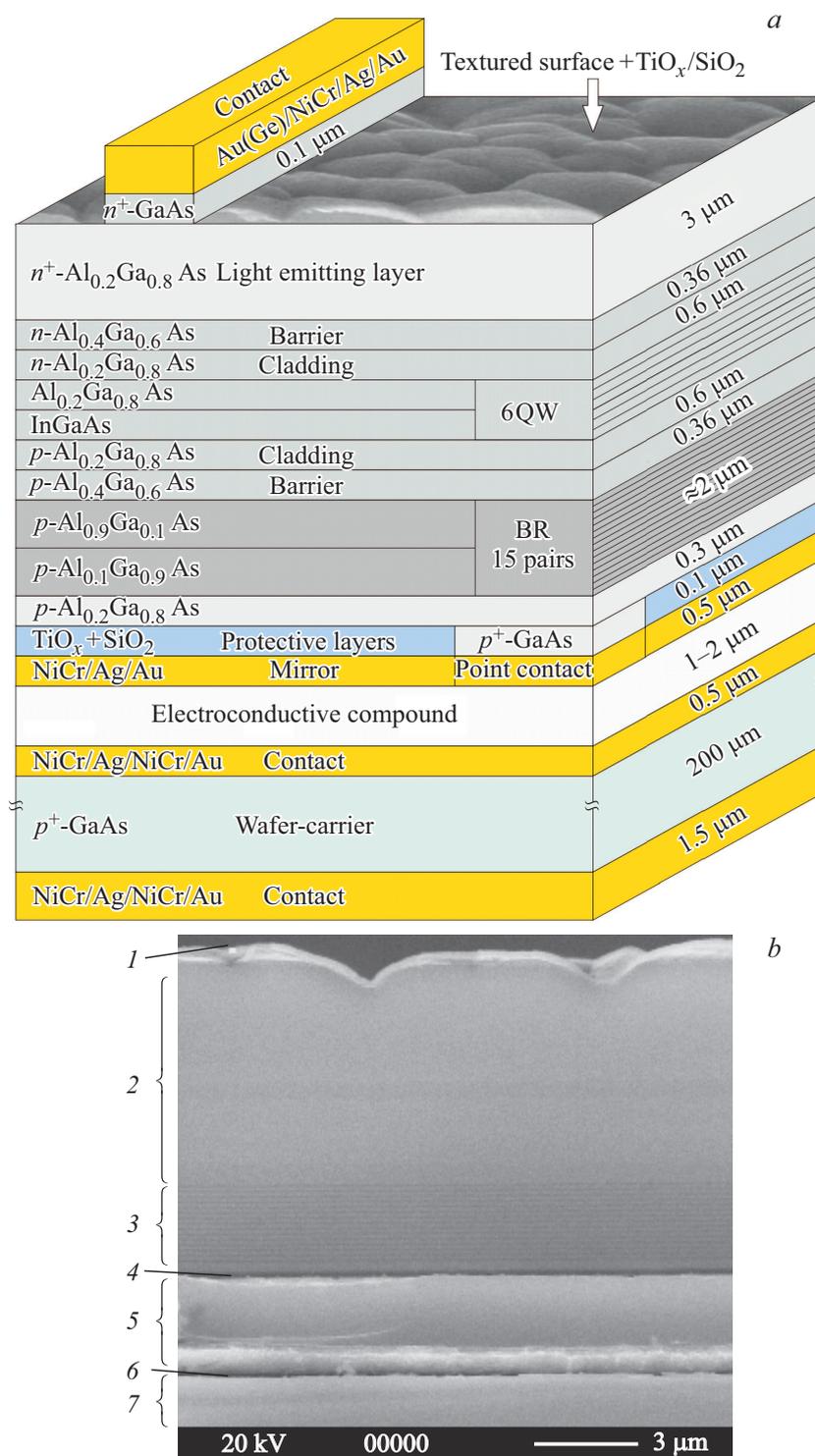


Рис. 1. Схема (a) и изображение скола (b), полученное на растровом электронном микроскопе, светодиода после переноса гетероструктуры на пластину-носитель (p^+ GaAs), удаления ростовой подложки n -GaAs, текстурирования световыводящей поверхности, нанесения антиотражающего покрытия и омических контактов. 1 — текстурированная поверхность, 2 — слои гетероструктуры, 3 — БО, 4 — зеркальный отражатель, 5 — серебросодержащий компаунд, 6 — контакт к подложке p -GaAs, 7 — подложка p -GaAs.

ломления: контраст меньшему показателю преломления (n) широкозонного $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ составлял узкозонный $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ с большим значением показателя пре-

ломления. Использование $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ вместо GaAs позволило минимизировать поглощение излучения (850 нм) в БО. Увеличение коэффициента отражения можно полу-

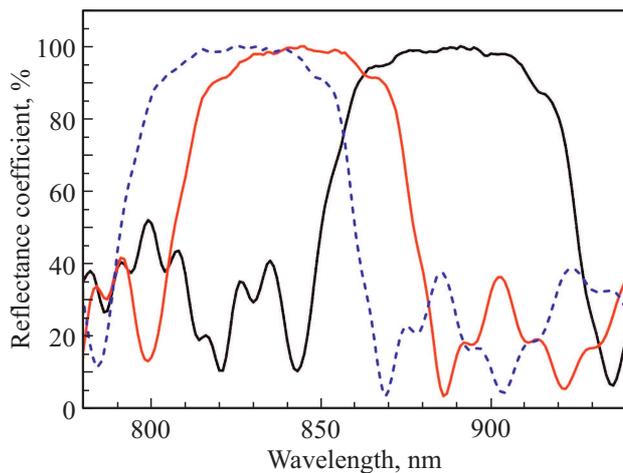


Рис. 2. Спектры отражения структур с брэгговскими отражателями, включающими 15 пар слоев $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ с различными толщинами.

чить не только за счет увеличения разницы показателей преломления слоев, но и за счет увеличения числа периодов. В разработанной структуре светодиода БО состоял из 15 пар слоев $p\text{-Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/p\text{-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$.

На рис. 2 представлены спектры отражения трех гетероструктур БО, с максимумом отражения, варьируемым в диапазоне $\lambda = 800\text{--}920$ нм для лучей, падающих на поверхность брэгговских отражателей перпендикулярно плоскостям эпитаксиальных слоев структуры и под углами порядка ± 20 угл. градусов относительно нормали [8]. Эффективное отражение генерированного в активной области светодиода излучения ($\lambda = 850$ нм) и падающего на БО под большими углами может быть получено при увеличении толщины слоев БО. При этом появляется смещение максимумов БО отражения в длинноволновую область спектра для лучей, падающих на БО под углами падения, близкими к прямым. Расширение спектра отражения и, соответственно, углов отражения может быть достигнуто в структурах с двухсекционными БО. Однако было установлено, что увеличение количества и суммарной толщины слоев в БО приводит к увеличению омических потерь [10]. Многочисленные потенциальные барьеры, образуемые слоями с разной шириной запрещенной зоны, препятствуют прохождению носителей заряда в структурах БО и приводят к увеличению последовательного сопротивления, особенно при использовании слоев p -типа [11]. Проблема эффективного транспорта дырок в слоях БО p -типа, вследствие их большой эффективной массы [12], действительно существует, а сопутствующее этому возросшее последовательное сопротивление вызывает термический нагрев и, как следствие, ухудшает работу прибора.

Экспериментальные образцы светодиодов изготавливались на основе структур с односекционными брэгговскими отражателями с максимумом отражения в диапазоне длин волн 830–870 нм и дополнялись зер-

кальным Ag-отражателем, встраиваемым в светодиод в процессе постростовой обработки и увеличивающим эффективность вывода лучей из кристалла.

В разработанной гетероструктуре светодиода имеет место дополнительное отражение лучей от БО за счет эффекта полного внутреннего отражения от массива слоев $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ БО, характеризующегося „средним“ содержанием AlAs, равным 50%, и эффективным показателем преломления $n \approx 3.3$. Содержание AlAs в среде $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, из которой излучение падает на БО, аппроксимировано в данной гетероструктуре значением $x = 20\%$, т.е. содержание AlAs в этой среде принято равным содержанию AlAs во фронтальном световыводящем слое структуры. Расчетным путем с использованием результатов работы [7] было установлено, что угол полного внутреннего отражения „латеральных“ лучей от границы $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ составляет ~ 20 угл. градусов. При этом доля генерированного изотропного излучения, претерпевающая полное внутреннее отражение от этой гетерограницы, составляет 35%.

4. Постростовая технология

Технология изготовления светодиодов на основе выращенных гетероструктур (рис. 1) включала следующие операции:

- создание точечных контактов диаметром 10 мкм с шагом 75 мкм к поверхностному слою $p^+\text{GaAs}$;
- удаление контактного слоя $p^+\text{GaAs}$ в местах, свободных от точечных контактов для формирования прозрачных окон для генерируемого излучения;
- нанесение диэлектрического покрытия (например, $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$, Si_3N_4) в местах, свободных от контактов для защиты и избежания деградации оптических свойств тыльного зеркала;
- нанесение слоя Ag с тонким (1–2 нм) адгезионным слоем NiCr, выполняющего функцию тыльного зеркала с последующим напылением „защитного“ слоя золота;
- переворот и фиксация структуры с помощью серебросодержащего компаунда на пластине-носителе $p^+\text{GaAs}$ с предварительно осажденными контактными слоями на фронтальной и тыльной поверхностях;
- селективное травление ростовой подложки $n\text{-GaAs}$;
- травление слоя $n^+\text{GaAs}$ в местах, свободных от контактов для открытия световыводящей поверхности;
- текстурирование световыводящей поверхности;
- формирование просветляющего покрытия на основе слоев $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ или Si_3N_4 ;
- создание полосковых контактов к слою $n^+\text{GaAs}$;
- монтаж изготовленных чипов светодиодов на теплоотводящую печатную плату и монтаж силиконовой полусферы.

Текстурирование световыводящей поверхности, обеспечивающее увеличение эффективности вывода излучения из светодиодов, выполнялось методом жидкостного

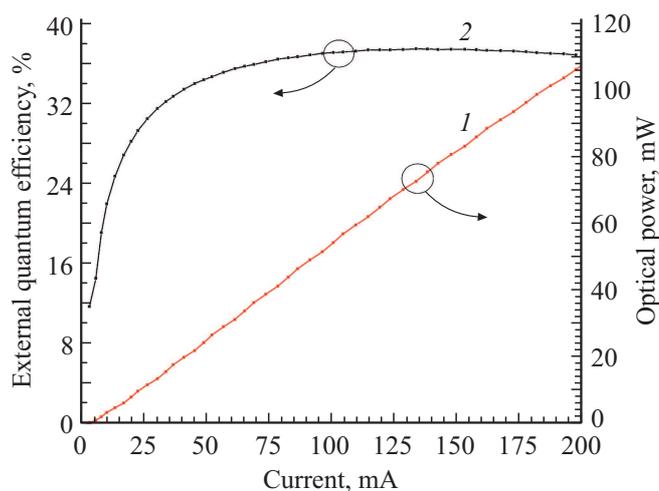


Рис. 3. Ватт-амперная характеристика (1) и токовая зависимость внешней квантовой эффективности (2) светодиода с двойным (БО + серебряное зеркало) отражателем.

химического травления в составе на основе плавиковой кислоты, фтористого аммония и перекиси водорода с образованием полусфер высотой 0.2–0.5 мкм, что обеспечило максимальное увеличение интенсивности электролюминесценции и эффективности светодиода. Осаждение диэлектрического просветляющего покрытия на текстурированную поверхность выполняет защитную функцию и обеспечивает снижение френелевского отражения излучения, выходящего из кристалла.

5. Характеристики светодиодов

Для анализа электролюминесцентных характеристик светодиодов были проведены исследования ватт-амперных характеристик и внешней квантовой эффективности светодиодов, полученных с использованием разработанных ростовой и постростовой технологий. Измерения выполнены в диапазоне токов 0–200 мА, пропускаемых через исследуемые образцы в импульсном режиме.

На рис. 3 представлены токовые зависимости выходной оптической мощности (кривая 1) и внешней квантовой эффективности (EQE, кривая 2) светодиода площадью 1 мм². Максимальное полученное значение внешней квантовой эффективности светодиода составило $EQE = 37.5\%$ в диапазоне токов 100–200 мА.

6. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии изготовлены AlGaAs/Ga(In)As-гетероструктуры для светодиодов ($\lambda = 850$ нм) с двойным (БО + серебряное зеркало) отражателем. Показано, что структура брэгговского отражателя обеспечивает как зеркальное отражение для лучей, проходящих к БО под углами, близкими к нормали,

так и полное внутреннее отражение для „латеральных“ лучей, падающих на БО под углами ~ 20 угл. градусов к плоскости слоев гетероструктуры. Разработана постростовая технология изготовления светодиодов, включающая перенос структуры с зеркальным (Ag) слоем на пластину-носитель p^+ GaAs с последующим травлением ростовой n -GaAs подложки, текстурированием световыводящей поверхности и нанесением просветляющего покрытия и омических контактов.

В изготовленных светодиодах зарегистрировано значение внешней квантовой эффективности $EQE = 37.5\%$, заметно превосходящее результаты для приборов на основе подобных гетероструктур, включающих либо брэгговский [7], либо зеркальный (серебряный) [9] отражатели.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидюк, Б.В. Егоров, Б.В. Пушный, Л.Т. Чичуа. ФТП, **48** (4), 809 (1978).
- [2] А.Л. Закгейм, В.М. Марахонов, Р.П. Сейсян. Письма ЖТФ, **6** (17), 1034 (1980).
- [3] Электронный ресурс АО „Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов“. <https://www.niipp.ru/>
- [4] Электронный ресурс „EPiSTAR corporation“. <https://www.epistar.com/EpistarEn/prodInfo>
- [5] Peng Bai, Yueheng Zhang, Tianmeng Wang, Zhiwen Shi, Xueqi Bai, Chaoying Zhou, Yaning Xie, Lujie Du, Mengting Pu, Zhanglong Fu, Juncheng Cao, Xuguang Guo, Wenzhong Shen. *Semicond. Sci. Technol.*, **35** (3), 035021 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab6dbf
- [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).
- [7] А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, Р.А. Салий, А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Н.С. Потапович, В.М. Андреев. ФТП, **55** (7), 614 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.07.51028.9646
- [8] E. Fred Shubert. *Light-emitting diodes* (second ed.), (Cambridge University Press, 2006).
- [9] 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
- [10] В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц. ФТП, **54** (4), 400 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.04.49148.9321
- [11] K. Tai, L. Yang, Y.H. Wang, J.D. Wynn, A.Y. Cho. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 2496 (1990). DOI: 10.1063/1.10286
- [12] F.A.I. Chahmaqchee, S. Mazzucato, Y. Sun, N. Balkan, E. Tiras, M. Hugues, M. Hopkinson. *Mater. Sci. Engin. B*, **177**, 739 (2012). DOI: 10.1016/j.mseb.2011.12

Редактор Г.А. Оганесян

High efficiency (EQE = 37.5%) infrared (850 nm) light-emitting diodes with Bragg and mirror reflectors

*A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov,
R.A. Salii, D.A. Malevskii, M.V. Nakhimovich,
V.R. Larionov, P.V. Pokrovskii,
M.Z. Shvarts, V.M. Andreev*

loffe Intitute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Developed and investigated are IR light-emitting (850 nm) diodes based on AlGaAs/Ga(In)As heterostructures grown by the method of MOC-hydride epitaxy, with multiple quantum wells in active region, and a double optical reflector, consisted of multilayer $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ Bragg heterostructure and argentine mirror layer. Light-emitting diodes with the external quantum efficiency $\text{EQE} = 37.5\%$ at current densities more than 10 A/cm^2 have been fabricated.