

## Влияние внутренних отражателей на эффективность инфракрасных (850 нм) светодиодов

© А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, Р.А. Салий, А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Н.С. Потапович, В.М. Андреев

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

E-mail: amalevskaia@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 9 марта 2021 г.

В окончательной редакции 15 марта 2021 г.

Принята к публикации 15 марта 2021 г.

Выполнены исследования инфракрасных светодиодов с длиной волны излучения 850 нм на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, с брэгговским отражателем и дополнительным „отражающим“ слоем  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ , обеспечивающими снижение внутренних оптических потерь генерируемого излучения. Разработана постростовая технология формирования фронтальных полосковых омических контактов и текстурирования световыводящей поверхности, позволившая снизить омические потери и увеличить эффективность вывода излучения из кристалла. Внешний квантовый выход светодиодов с двумя внутренними отражателями и текстурированием составил  $> 9\%$  в диапазоне токов 0.1–1.4 А.

**Ключевые слова:** инфракрасный излучающий диод, брэгговский отражатель, текстурирование.

DOI: 10.21883/FTP.2021.07.51028.9646

Светоизлучающие диоды (СИД) инфракрасного (ИК) диапазона широко используются в различных устройствах, например, в пультах дистанционного управления, для ИК подсветки в камерах видеонаблюдения, в охранных системах. Разработаны СИД с длиной волны излучения  $\lambda = 800\text{--}870$  нм на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, получаемых методами жидкофазной эпитаксии [1–4] и МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) [5,6] на GaAs-подложках. Снижение внутренних оптических потерь генерируемого излучения на поглощение в GaAs-подложке достигается либо путем удаления (селективного травления) подложки после выращивания гетероструктуры [1–5], либо путем создания внутреннего брэгговского отражателя (БО) между GaAs-подложкой и  $p\text{--}n$ -переходом [6], отражающего часть генерированного излучения, распространяющегося от  $p\text{--}n$ -перехода в сторону подложки. Мощность излучения ( $P$ ) в ИК СИД на основе жидкофазных AlGaAs-гетероструктур, постростовые технологии которых включают операции удаления подложки GaAs, составила:  $P = 50$  мВт при токе 80 мА [1] и  $P > 150$  мВт при токах  $> 1$  А [2–4]. ИК СИД на основе МОС-гидридных гетероструктур с удаленной подложкой изготавливаются, например, методом „переноса“ AlGaAs-гетероструктуры с GaAs-подложкой на инородную (кремниевую) подложку с нанесенным на ее поверхность слоем отражателя (серебра) с последующим удалением подложки GaAs [5]. Встраивание в постростовую процесс операций, связанных с „переносом“ структур и с удалением подложки, значительно усложняют и удорожают процесс изготовления ИК СИД. В разработанных ранее СИД с внутренним брэгговским

отражателем максимальная мощность излучения составила 8 мВт при токе 60 мА [6].

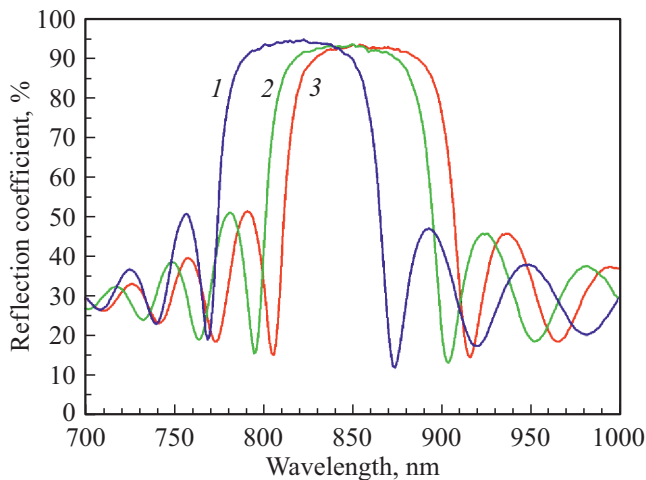
Целью настоящей работы являлось выяснение возможности увеличения внешнего квантового выхода и мощности СИД за счет встраивания в гетероструктуру AlGaAs/GaAs двух внутренних отражателей без использования сложных постростовых операций „переноса“ структур на инородный носитель и удаления поглощающей подложки.

Гетероструктуры AlGaAs/GaAs для СИД выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках  $n\text{-GaAs}$ . Активная область гетероструктур состоит из 6 квантовых ям толщиной 3 нм каждая, заключенных между широкозонными  $n$ - и  $p$ -эмиттерами  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $x = 0.2\text{--}0.4$ ).

Между тыльным эмиттером и подложкой выращивались два отражателя, один из которых — брэгговский отражатель (БО) [7], выполненный из 15 пар слоев  $n\text{-}Al_{0.9}Ga_{0.1}As/n\text{-}Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  с применением технологии легирования, уменьшающей его последовательное сопротивление [8].

На рис. 1 приведены спектры отражения трех гетероструктур БО, выращенных на подложках GaAs. Величина коэффициента отражения БО в спектральном диапазоне 800–900 нм составляет  $> 90\%$  для лучей, падающих на БО перпендикулярно плоскостям эпитаксиальных слоев и под углами, близкими к  $90^\circ$ . При уменьшении угла падения увеличивается доля лучей, проходящих сквозь БО без отражения и поглощающихся в подложке.

Для отражения лучей, прошедших сквозь БО, в структуре между подложкой и БО выращивался дополнительный широкозонный слой  $n\text{-}Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  (300 нм),



**Рис. 1.** Спектры отражения трех гетероструктур с брэгговскими отражателями, в которых толщины слоев  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  и  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  увеличиваются в последовательности  $1 \rightarrow 3$ .

имеющий меньшее значение показателя преломления по сравнению с узкозонным слоем  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y < 0.2$ ), прилегающим к слою  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ , и отражающий лучи, падающие на этот слой под углами, при которых имеет место полное внутреннее отражение.

На рис. 2 приведены расчетные значения доли отраженного от гетерограницы  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  изотропного излучения в зависимости от содержания AlAs в „отражающем“ слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при трех различных составах „эмитирующего“ слоя  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , из которого излучение падает на гетерограницу. Содержание AlAs в слое  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  взято изменяющимся от  $x = 0$  до  $x = 1$ , а составы „эмитирующего“ слоя  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  выбраны дискретными: кривая 1 — слой GaAs, 2 — слой  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  и 3 — слой  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ . При расчетах излучение в узкозонном слое принято изотропным. При расчете доли отраженных лучей учитывалось как полное внутреннее отражение, так и френелевское отражение. Из рис. 2 видно, что более половины генерируемого  $p-n$ -переходом изотропного излучения отражается от гетерограницы  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при составах, соответствующих  $x = 0.9$  в отражающем слое и  $y = 0-0.2$  в слое, в котором распространяется излучение.

Фактором, благоприятствующим увеличению внешнего квантового выхода СИД на основе гетероструктур с двумя отражателями, является преимущественное отражение от слоя  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  латеральных лучей, распространяющихся от  $p-n$ -перехода под углами  $< 30-35^\circ$  к гетерограницам, т.е. лучей, для которых первичный отражатель (БО) является практически прозрачным и которые при отсутствии дополнительного „отражающего“ слоя  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  были бы поглощены в подложке GaAs.

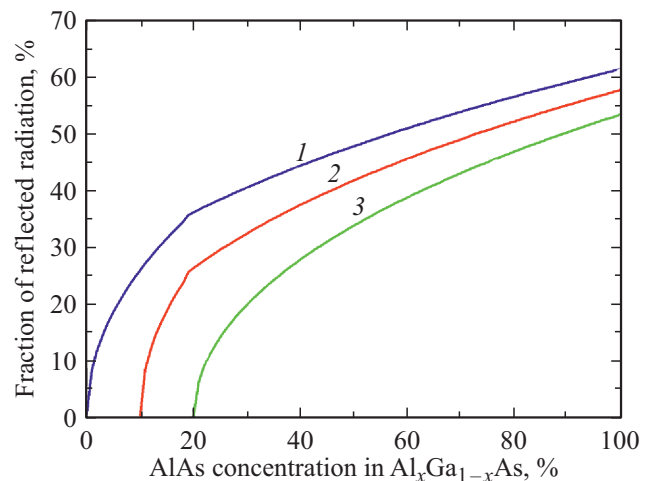
Для увеличения эффективности и мощности СИД необходимо снижение омических потерь на растекание и на полосковых фронтальных контактах. Для сниже-

ния сопротивления растекания фронтальной  $p$ -области гетероструктуры после выращивания барьерного слоя  $p\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  был кристаллизован сильно легированный слой  $p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  (5 мкм). Для снижения омических потерь на сопротивлении полосковых контактов к фронтальной поверхности структуры выращивание гетероструктуры завершалось кристаллизацией сильно легированного тонкого „контактного“ слоя  $p^+\text{-GaAs}$ , стравливаемого в местах, свободных от контактов.

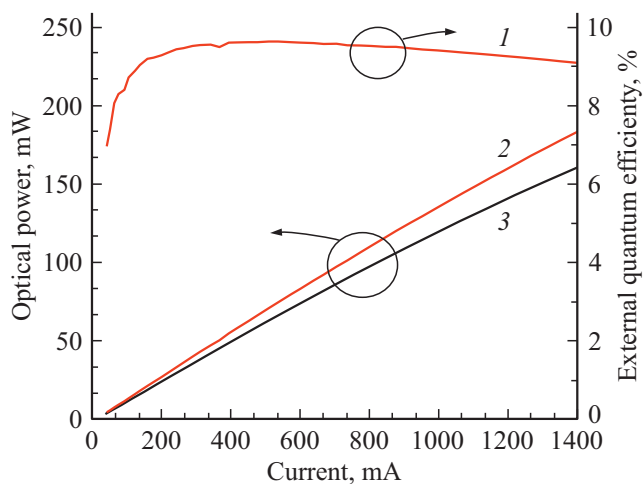
Для увеличения эффективности вывода излучения из кристалла осуществлялось текстурирование фронтальной световыводящей поверхности СИД [9]. Наиболее технологичным способом текстурирования поверхности является метод жидкостного химического травления. Широкий спектр химических реактивов обеспечивает возможность формирования необходимого профиля световыводящей поверхности.

В работе исследованы различные травители твердых растворов AlGaAs на основе разбавленной азотной кислоты, плавиковой кислоты, фторида аммония, перекиси водорода. Текстурирование в разбавленной азотной кислоте ( $\text{HNO}_3$  20–25%) позволяет проводить травление контактного слоя  $p^+\text{-GaAs}$  и слоя твердого раствора  $p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  в едином технологическом цикле за счет отсутствия селективности травления. Однако высокая скорость травления (0.5–0.7 мкм/с) приводит к снижению точности профиля текстурированной поверхности: высота пиков (пирамид) составляет 1–1.5 мкм при очень коротком времени травления 1.5–2 с.

При использовании травителя на основе плавиковой кислоты, фторида аммония и перекиси водорода необходимо проводить предварительное стравливание контактного слоя  $p^+\text{-GaAs}$  для вскрытия нижележащего слоя твердого раствора  $p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  (из-за селективности травления). Скорость травления  $p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  при



**Рис. 2.** Зависимости доли отраженного изотропного излучения, падающего на гетерограницу, от параметра состава  $x$  в отражающем слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при различных составах слоя, в котором распространяется излучение: 1 — GaAs, 2 — слой  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ , 3 — слой  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ .



**Рис. 3.** Токовая зависимость внешнего квантового выхода (1) и ватт-амперные характеристики (2, 3) СИД с двумя внутренними отражателями: 1, 2 — с текстурированной поверхностью СИД, 3 — без текстурирования.

использовании травителя данного состава значительно ниже (0.8–1.2 мкм/мин), что обеспечивает высокую степень контроля процесса и возможность формирования пиков заданной высоты (0.5–1 мкм). Варьирование профиля текстурированной поверхности излучателей позволяет достигнуть существенного увеличения эффективности вывода излучения.

При изготовлении СИД фронтальный полосковый омический контакт к слою GaAs *p*-типа проводимости формировали путем напыления слоев Ag(Mn)/Ni/Au толщиной 0.2–0.3 мкм, что обеспечивало получение низкого переходного контактного сопротивления,  $\sim (3-5) \cdot 10^{-5}$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup>. Тыльный омический контакт к подложке GaAs *n*-типа проводимости формировали на основе слоев Au(Ge)/Ni/Au, с переходным контактным сопротивлением  $\sim (3-5) \cdot 10^{-6}$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup>. Для увеличения проводимости контактных шин осуществлялось электрохимическое осаждение слоев Ag/Ni/Au толщиной 2–4 мкм. Для увеличения эффективности СИД на его световыводящую поверхность приклеивали оптический элемент (силиконовую полусферу). При площади чипов СИД 1 мм<sup>2</sup> оптимальный диаметр полусферы элемента составлял 3–4 мм.

В СИД, изготовленных из гетероструктур AlGaAs/GaAs без внутренних отражателей, внешний квантовый выход составлял  $\sim 1\%$  без силиконовой полусферы и  $\sim 2\%$  с полусферой. Такие значения эффективности являются типичными для СИД AlGaAs/GaAs с поглощающей GaAs-подложкой.

Измерения ватт-амперных характеристик СИД (рис. 3) осуществляли в непрерывном и импульсном (длительность импульсов 5 и 300 мкс) режимах. При токах до 1 А и площади чипов 1 мм<sup>2</sup> результаты непрерывных и импульсных измерений практически совпадают, что свидетельствует об эффективном

отводе тепла при плотностях тока до 100 А/см<sup>2</sup> в разработанной конструкции с монтажом готовых чипов СИД на основания, выполненные из алюмооксидной теплопроводящей электроизолирующей керамики.

На рис. 3 представлены токовая зависимость внешнего квантового выхода и ватт-амперные характеристики СИД на основе гетероструктуры с двумя внутренними отражателями, измеренные на различных этапах изготовления СИД: до текстурирования поверхности и после текстурирования.

Ватт-амперные характеристики практически линейны в исследованном диапазоне токов (до значений  $> 2$  А). Величина внешнего квантового выхода СИД составила:  $\eta = 9.6\%$  при токе 0.4 А и 9.1% при токе 1.4 А (рис. 3, кривая 1).

Таким образом, методом МОС-гидридной эпитаксии созданы AlGaAs-гетероструктуры СИД с длиной волны излучения  $\lambda = 850$  нм и двумя внутренними отражателями: с брэгговским отражателем и дополнительным отражающим слоем Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As. Разработаны постростовые технологии изготовления ИК излучателей, обеспечившие снижение внутренних оптических, омических потерь и увеличение эффективности вывода излучения из кристалла. Созданы СИД с внешним квантовым выходом  $> 9\%$  в диапазоне токов 0.1–1.4 А, при изготовлении которых не использовались сложные и дорогостоящие операции переноса гетероструктуры на инородный носитель и селективного удаления поглощающей подложки GaAs.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность М.З. Шварцу, Н.Д. Ильинской, Ю.М. Задиранову, Ф.Ю. Солдатенкову и С.О. Когновицкому за помощь и консультации при проведении экспериментов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Ж.И. Алферов, 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] У. Бекирев, С. Бабенко, В. Крюков, Б. Потапов, А. Скипер. Электроника. Спецвыпуск 00137, 137 (2014).
- [4] Электронный ресурс АО „Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов“ <https://www.niipp.ru/>
- [5] <https://www.epistar.com/EpistarEn/prodInfo>
- [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] V.M. Lantratov, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts. Adv. Sci. Technol., **74**, 225 (2010).

- [8] В.М. Емельянов, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц. ФТП, **54** (4), 400 (2020).
- [9] I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau, T.J. Gmitter, A. Scherer. Appl. Phys. Lett., **63**, 2174 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

### **Internal reflectors influence on IR (850 nm) light-emitting diodes efficiency**

*A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, D.A. Malevskii, S.A. Mintairov, R.A. Saliy, A.N. Panchak, P.V. Pokrovskii, N.S. Potapovich, V.M. Andreev*

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Investigated are IR light-emitting diodes with 850 nm radiation wavelength, based on AlGaAs/GaAs heterostructures grown by the method of MOC-hydride epitaxy with a Bragg reflector and additional „reflecting“ layer  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , which ensures the decrease of optical losses of the generated radiation. Developed is the post growth technology for forming frontal ohmic contacts and for texturing the light-emitting surface, which ensures the decrease of ohmic losses and the increase of the radiation extraction efficiency from a crystal. External quantum efficiency of light-emitting diodes with two internal reflectors and surface texturing exceeded 9% in the current range 0.1–1.4 A.