

07

## Взаимосвязь конструкций и эффективности инфракрасных светоизлучающих диодов на основе квантово-размерных гетероструктур AlGaAs

© А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.М. Андреев

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

Поступило в Редакцию 11 октября 2023 г.  
В окончательной редакции 28 декабря 2023 г.  
Принято к публикации 17 января 2024 г.

Выполнены исследования инфракрасных (850 nm) светоизлучающих диодов на основе квантово-размерных гетероструктур AlGaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, с множественными квантовыми ямами в активной области и с внутренними отражателями: с брэгговским отражателем, дополненным либо „отражающим“ слоем  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ , либо тыльным серебряным зеркалом. Исследованы постростовые технологии двух типов: планарная технология изготовления светоизлучающих диодов с сохранением ростовой подложки  $n$ -GaAs и технология „переноса“ выращенной гетероструктуры на пластину-носитель  $p$ -GaAs с последующим стравливанием ростовой подложки. Максимальная внешняя квантовая эффективность более 37% при токах 0.1–0.2 А получена в светоизлучающих диодах на основе гетероструктуры с брэгговским отражателем и дополнительным Ag-зеркалом, встроенным в светоизлучающих диодах методом переноса гетероструктуры на пластину  $p$ -GaAs с использованием серебряносодержащей пасты. Максимальная мощность излучения 275 мВт при токе 1.2 А достигнута в светоизлучающих диодах, полученных методом „переноса“ с использованием сплава Au + In.

**Ключевые слова:** инфракрасный светоизлучающий диод, AlGaAs/GaAs-гетероструктура, брэгговский отражатель, квантовые ямы.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57534.261-23

### Введение

Основной причиной низкого значения внешнего квантового выхода в инфракрасных (ИК) (850 nm) светоизлучающих диодах (СИД) на основе квантово-размерных гетероструктур AlGaAs, выращенных на подложке GaAs, является поглощение электролюминесцентного излучения в подложке. Увеличение внешнего квантового выхода возможно при разработке конструкций СИД с встроенными тыльными отражателями и удаленной ростовой подложкой. В такой конструкции электролюминесцентное излучение, падающее на световыводящую поверхность под углами, большими предельного угла полного внутреннего отражения, не поглощается внутри структуры, а также дает вклад в излучение, выходящее из структуры. Процессами, способствующими выводу излучения из структуры, являются либо отражение света от тыльной поверхности структуры, либо поглощение и вторичное переизлучение фотонов в материале активной области. Благодаря этим эффектам многопроходные гетеросветодиодные структуры позволяют значительно увеличить внешний квантовый выход излучения.

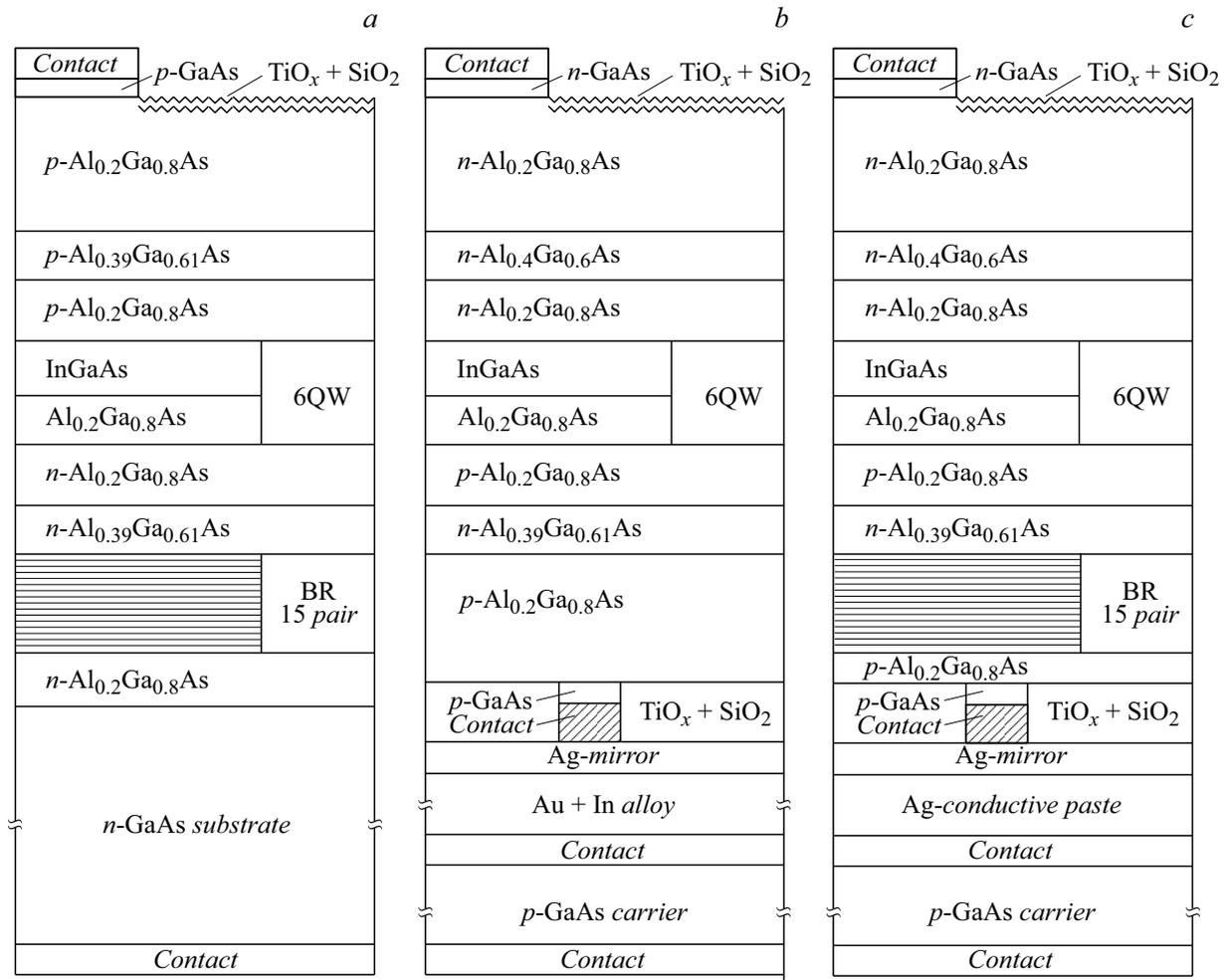
Первоначально многопроходные СИД изготавливались методом жидкофазной эпитаксии [1–4] с последующим удалением ростовой подложки GaAs. Существенным недостатком таких СИД является то, что высокие значения внешнего квантового выхода были получены

только при высоких плотностях тока  $j > 10^2$  А/см<sup>2</sup>, вследствие медленного увеличения внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации с увеличением тока. Основной причиной такой пологой зависимости внутреннего квантового выхода с увеличением тока является относительно большая толщина (более 1 μm) узкозонной активной области, в которой насыщение каналов безызлучательной рекомбинации достигалось только при плотностях тока  $j > 10^2$  А/см<sup>2</sup>.

Существенно меньшая толщина активной области реализуется в СИД на основе квантово-размерных гетероструктур, получаемых методом МОС-гидридной эпитаксии [5,6]. В таких СИД выход на максимальные значения внутреннего и внешнего квантового выхода достигается при плотностях тока менее 10 А/см<sup>2</sup> [5–7].

Снижение внутренних оптических потерь электролюминесцентного излучения (на поглощение в подложке) в СИД на основе МОС-гидридных квантово-размерных гетероструктур было достигнуто либо путем удаления (селективного стравливания) подложки после выращивания гетероструктуры [6], либо путем создания внутреннего брэгговского отражателя между GaAs-подложкой и  $p$ - $n$ -переходом [7].

В настоящей работе представлены результаты исследования ИК (850 nm) СИД на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии, с множественными квантовыми ямами в



**Рис. 1.** Три исследованных конструкции ИК (850 nm) СИД: *a* — „прямая“ структура с тыльным брэгговским отражателем и дополнительным отражающим слоем  $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ ; *b* — „обратная“ структура СИД с тыльным зеркальным слоем серебра; *c* — „обратная“ структура СИД с брэгговским отражателем, дополненным Ag-зеркалом.

активной области, с тыльным брэгговским отражателем, с  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  отражающим слоем и с тыльным серебряным зеркалом.

### 1. Получение гетероструктур для СИД

$\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры выращивались на подложках  $n\text{-GaAs}$  (рис. 1). Активная область, заключенная между широкозонными слоями, состоит из 6 пар слоев  $\text{InGaAs}$  квантовых ям, толщиной 3 nm каждая, разделенных  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -слоями толщиной 30 nm каждый [6]. Активная область суммарной толщиной 0.2  $\mu\text{m}$  с обеих сторон заключена в обкладки  $n$ - и  $p$ -типа, формируемые парами широкозонных слоев  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  (0.6  $\mu\text{m}$ ) и  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  (0.36  $\mu\text{m}$ ).

В структуре, представленной на рис. 1, *a*, между подложкой  $n\text{-GaAs}$  и активной областью с обкладками выращивались слои тыльного комбинированного отражателя: первый слой  $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , обеспечивающий отражение от гетерограницы „латеральных“ лучей, рас-

пространяющихся от  $p$ - $n$ -перехода в сторону подложки под углами более предельного угла полного внутреннего отражения ( $\sim 60^\circ$ ), которые поглотились бы в подложке при отсутствии этого „отражающего“ слоя  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ .

Затем кристаллизировались слои брэгговского отражателя, включающего 15 пар слоев  $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ , отражающего лучи в телесном угле с раскрытием  $\pm 20^\circ$ .

После выращивания слоев активной области кристаллизовался сильнолегированный слой  $p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  (5  $\mu\text{m}$ ). Выращивание гетероструктуры завершалось кристаллизацией сильнолегированного тонкого (0.1  $\mu\text{m}$ ) „контактного“ слоя  $p^+\text{-GaAs}$ , стравливаемого в местах, свободных от контактов. Рассмотренная структура далее будет называться „прямой“ структурой в отличие от двух „обратных“ структур, рассматриваемых ниже.

„Обратная“ структура, представленная на рис. 1, *b*, также выращивалась на подложке  $n\text{-GaAs}$ , однако последовательность слоев обратная по сравнению с рассмотренной выше „прямой“ структурой. Сначала кристал-

лизовался слой  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , используемый как „стоп“-слой при травлении ростовой подложки  $n\text{-GaAs}$  в процессе постростовой технологии переноса гетероструктуры на пластину-носитель ( $p\text{-GaAs}$ ) и полностью травливаемый после удаления подложки. Затем кристаллизовался контактный слой  $n\text{-GaAs}$ . Далее кристаллизовался слой  $n\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  толщиной  $4\ \mu\text{m}$ , показанный в верхней части рис. 1, *b*. Затем выращивались слои активной области и обкладок, такие же, как на рис. 1, *a*. После этого кристаллизовались буферный слой  $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  и тонкий ( $0.1\ \mu\text{m}$ ) контактный слой  $p\text{-GaAs}$  для нанесения „точечных“ контактов.

Отличие „обратной“ структуры, показанной на рис. 1, *c*, от структуры на рис. 1, *b* состоит в дополнительном брэгговском отражателе, кристаллизуемом между активной областью с обкладками и „буферным“ слоем  $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ .

## 2. Постростовые технологии изготовления СИД

При изготовлении СИД на основе „прямой“ структуры фронтальный полосковый омический контакт к слою  $\text{GaAs}$   $p$ -типа проводимости формировался путем напыления слоев  $\text{Ag}(\text{Mn})/\text{Ni}/\text{Au}$  толщиной  $0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$ , с переходным контактным сопротивлением порядка  $(3\text{--}5) \cdot 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Для увеличения проводимости контактных шин осуществлялось электрохимическое осаждение слоев  $\text{Ag}/\text{Ni}/\text{Au}$  толщиной  $2\text{--}4\ \mu\text{m}$ . На рис. 2 на вставке вверху слева показана топология контактной сетки СИД площадью  $1\ \text{mm}^2$ .

Для увеличения эффективности вывода излучения из кристалла осуществлялось текстурирование фронтальной световыводящей поверхности СИД.

Тыльный омический контакт к подложке  $\text{GaAs}$   $n$ -типа проводимости формировался на основе слоев  $\text{Au}(\text{Ge})/\text{Ni}/\text{Au}$ , с переходным контактным сопротивлением порядка  $(1\text{--}2) \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Для увеличения эффективности вывода света из кристалла СИД на его световыводящей поверхности формировалась силиконовая полусфера.

Ниже описывается постростовая технология получения СИД на основе „обратных“ структур. Сначала на поверхности выращенной гетероструктуры создавались точечные контакты ( $\varnothing 10\ \mu\text{m}$ , шаг  $75\ \mu\text{m}$ ) к контактному слою  $p^+\text{-GaAs}$ . Затем осуществлялось селективное удаление контактного слоя  $p\text{-GaAs}$  в местах, свободных от контактов, с последующим нанесением диэлектрических покрытий  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$  для защиты поверхности полупроводника от непосредственного контакта с напыляемым затем на диэлектрическое покрытие слоем серебряного зеркала. Диэлектрическое покрытие также выполняет функцию дополнительного слоя отражателя, обеспечивающего отражение лучей, падающих на него под углами больше угла полного внутреннего отражения, от границы диэлектрик–полупроводник.

Перенос  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры на  $\text{GaAs}$ -подложку–носитель осуществлялся с использованием электропроводящей серебряной пасты ( $\text{Ag}$ -пасты) (рис. 1, *c*) или  $\text{Au}\text{--}\text{In}$ -сплава (рис. 1, *b*). Использование  $\text{Ag}$ -пасты не позволяет формировать низкоомное соединение гетероструктуры и подложки–носителя, что приводит к значительным омическим потерям при увеличении рабочего тока. Перенос гетероструктуры на подложки–носители с использованием сплава золота с индием ведет к образованию кристаллического интерметаллического соединения  $\text{Au}\text{--}\text{In}$ , что обеспечивает снижение последовательного сопротивления СИД.

Финальные стадии изготовления структур: удаление ростовой подложки  $n\text{-GaAs}$  в селективном травителе; изготовление полосковых контактов; удаление контактного слоя  $p\text{-GaAs}$  в местах, свободных от контактов; текстурирование световыводящей поверхности; нанесение антиотражающего покрытия  $\text{TiO}_x + \text{SiO}_2$ .

Таким образом, были изготовлены СИД трех типов с одинаковыми активными областями, отличающиеся структурой тыльных отражателей.

1-й тип СИД (рис. 1, *a*) выполнен на основе „прямой“ структуры с брэгговским рефлектором, обеспечивающим отражение лучей в телесном угле с раскрытием  $\pm 20^\circ$ , и с дополнительным слоем  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , обеспечивающим отражение латеральных лучей, падающих на гетерограницу под углами, большими предельного угла полного внутреннего отражения.

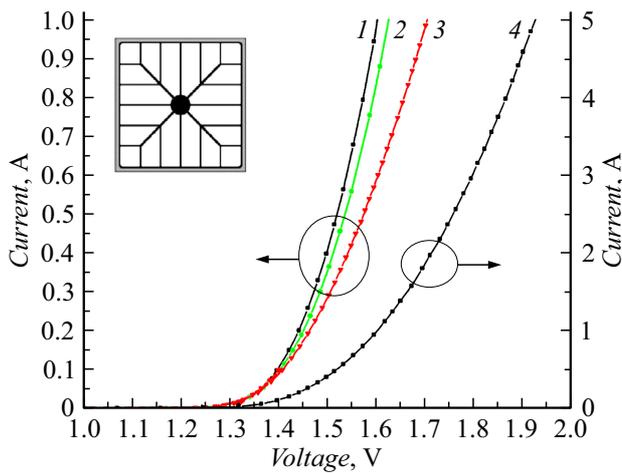
2-й тип СИД (рис. 1, *b*) выполнен на основе „обратной“ гетероструктуры с тыльным  $\text{Ag}$ -зеркалом, изготовленной методом переноса гетероструктуры на носитель  $p\text{-GaAs}$  с использованием  $\text{Au} + \text{In}$ -сплава.

3-й тип структуры (рис. 1, *c*) отличается от 2-го типа наличием брэгговского рефлектора и тем, что перенос гетероструктуры на носитель осуществляется с использованием серебряной пасты.

## 3. Исследование характеристик СИД

Измерения вольт-амперных ( $\text{ВАХ}$ ) и ватт-амперных характеристик СИД (рис. 2) осуществлялись следующим образом: через исследуемый образец пропускались токовые импульсы постоянной амплитуды ( $\tau_{\text{imp}} = 5\text{--}300\ \mu\text{s}$ ), регистрировалось напряжение, излучение светодиода поглощалось контрольным фотоприемником с известной спектральной зависимостью фоточувствительности ( $SR_{\text{pd}}, \text{A}/\text{W}$ ), фиксировался ток фотоприемника ( $I_{\text{pd}}, \text{A}$ ), рассчитывалась оптическая мощность светодиода:  $P_{\text{opt}} = I_{\text{pd}}/SR_{\text{pd}}, \text{W}$ .

С использованием измеренных ватт-амперных характеристик были рассчитаны токовые зависимости внешней квантовой эффективности ( $\eta_{\text{ext}}$ ) [8], определяемой как отношение количества вышедших из СИД квантов излучения ( $N_{\text{hv}} = P_{\text{opt}}/h\nu$ ) к количеству инжектированных электронов ( $N_e = I/e$ ):  $\eta_{\text{ext}} = P_{\text{opt}}e/h\nu \cdot I$ , где  $P_{\text{opt}}$  — оптическая мощность светодиода,  $I$  — ток



**Рис. 2.** ВАХ и топология СИД на основе структур, показанных на рис. 1: кривые 1, 2, 4 — СИД на основе „прямой“ структуры (рис. 1, а); 3 — СИД с тыльным Ag-зеркалом на основе структуры, показанной на рис. 1, б, перенос которой на пластину-носитель *p*-GaAs осуществлен с использованием сплава Au + In.

светодиода,  $h\nu$  — энергия излучаемых квантов и  $e$  — заряд электрона.

При токах до 1–5 А и площади чипов 1 mm<sup>2</sup> импульсный режим позволял проводить испытания до плотностей тока 100–500 А/см<sup>2</sup> в разработанных СИД, смонтированных на основания, выполненные из металлизированной алюмо-оксидной теплопроводящей электроизолирующей керамики.

ВАХ, показанная кривыми 1, 4 на рис. 2, измерена в СИД, полученных на основе „прямой“ структуры, при изготовлении которых нанесение центральной контактной площадки диаметром 150 μm осуществлялось прямо на контактный слой *p*-GaAs. ВАХ, показанная на кривой 2 на рис. 2, получена в СИД, при изготовлении которых нанесение центральной контактной площадки производилось на дополнительный слой диэлектрика диаметром 130 μm, нанесенного для предотвращения протекания тока непосредственно под этой контактной площадкой с целью уменьшения оптических потерь на поглощение излучения в контактном слое. Однако обнаруженное в ВАХ (рис. 2, кривая 2) увеличение последовательного сопротивления СИД с подслоем диэлектрика и ухудшение адгезии контактного слоя металла к диэлектрику, и, как следствие этого, уменьшение КПД, вынудило нас отказаться от нанесения дополнительного слоя диэлектрика под центральную контактную площадку.

Измеренные величины последовательного сопротивления СИД площадью 1 mm<sup>2</sup> составили  $R = 0.08 \Omega$  в СИД на основе „прямой“ структуры. Сопротивление  $R = 0.16 \Omega$  было измерено (кривая 3 на рис. 2) в СИД, полученных переносом „обратной“ структуры на носитель *p*-GaAs с использованием Au + In-сплава. Увеличение в несколько раз сопротивления и разброс

его значения наблюдалось в СИД с переносом обратной структуры, осуществляемом с использованием Ag-пасты.

В исследованных СИД мощность излучения  $P$  составила:

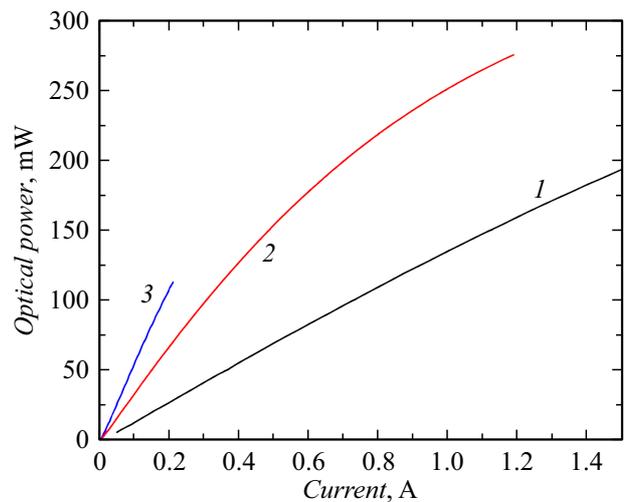
- в СИД на основе „прямой“ структуры  $P = 190 \text{ mW}$  при токе  $I = 1.5 \text{ A}$  (рис. 3, кривая 1);
- в СИД, полученном методом переноса гетероструктуры на носитель с использованием Au + In-сплава, мощность излучения составила  $P = 250 \text{ mW}$  при токе  $I = 1 \text{ A}$  (рис. 3, кривая 2) и  $P = 275 \text{ mW}$  при токе  $I = 1.2 \text{ A}$ ;
- в СИД, полученном методом переноса с использованием Ag-пасты  $P = 110 \text{ mW}$  при токе  $I = 0.2 \text{ A}$  (рис. 3, кривая 3).

Таким образом, максимальная мощность получена в СИД, изготовленных методом „переноса“ с использованием Au + In-сплава.

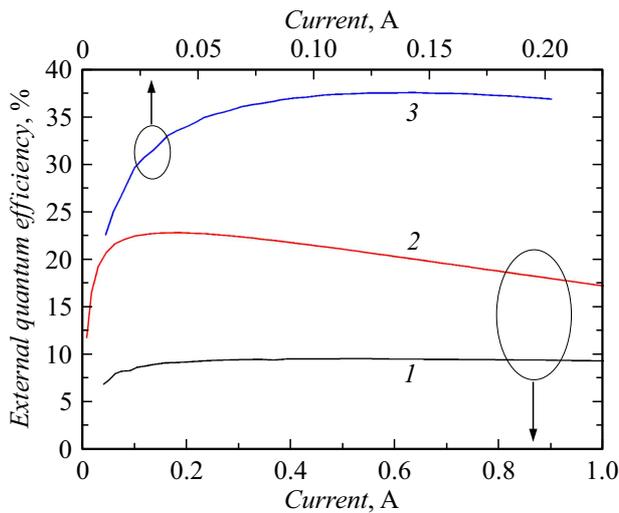
Значения внешней квантовой эффективности в этих СИД составили (рис. 4):

- 9–9.5% в диапазоне токов 0.2–1 А в СИД на основе „прямой“ структуры (кривая 1 на рис. 4);
- 23% при токе 0.2 А и 17% при токе 1 А (кривая 2 на рис. 4) в СИД на основе конструкции с Ag-зеркалом, полученной переносом гетероструктуры на носитель с использованием сплава Au + In;
- 37% в диапазоне токов 0.1–0.2 А (кривая 3 на рис. 4) получены в СИД на основе конструкции с Ag-зеркалом и брегговским отражателем, полученной переносом гетероструктуры на носитель с использованием Ag-пасты.

По результатам измерений ВАХ и ватт-амперных характеристик СИД могут быть сделаны следующие выводы:



**Рис. 3.** Ватт-амперные характеристики СИД: 1 — СИД на основе „прямой“ гетероструктуры; 2 — СИД на основе „обратной“ гетероструктуры с тыльным Ag-зеркалом; 3 — СИД на основе структуры с брегговским отражателем и тыльным Ag-зеркалом.



**Рис. 4.** Токвые зависимости внешней квантовой эффективности: 1 — СИД на основе „прямой“ структуры; 2 — СИД с тыльным Ag-зеркалом и с Au + In эвтектикой; 3 — СИД с Ag-зеркалом, с брэгговским отражателем, дополненный Ag-зеркалом, и с Ag-пастой.

Максимальная величина внешней квантовой эффективности достигается в СИД на основе структуры с брэгговским отражателем и встроенным в конструкцию с тыльным серебряным зеркалом. При этом уменьшение внутреннего сопротивления и увеличение мощности СИД достигается при замене Ag-пасты на прослойку из Au + In-сплава в технологии переноса гетероструктуры с ростовой n-GaAs-подложки на пластину-носитель p-GaAs.

## Заключение

Выполнены исследования влияния конструкций и технологий ИК (850 nm) СИД на основе квантово-размерных гетероструктур с брэгговским отражателем в комбинации с тыльным „отражающим“ слоем  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ , а также СИД с брэгговским отражателем и Ag-зеркалом, полученных методом переноса AlGaAs-гетероструктуры на пластину-носитель с последующим травлением ростовой подложки.

Максимальная внешняя квантовая эффективность более 37% в диапазоне токов 0.1–0.2 А получена в СИД с тыльным брэгговским рефлектором и Ag-зеркалом, изготовленных по технологии „переноса“ с использованием серебряносодержащей пасты. Максимальные величины мощности излучения  $P = 275 \text{ mW}$  при токе 1.2 А получены в СИД, изготовленном по технологии переноса гетероструктуры на носитель с использованием Au + In-сплава.

Для каждого типа исследованных СИД может быть определена своя ниша применения. СИД малой площади на основе „прямой“ структуры с комбинированным внутренним отражателем, изготавливаемые по простой

планарной постростовой технологии, могут найти применение в оптоэлектронных интегральных СВЧ схемах.

Высокоэффективные СИД, изготовленные по технологии „переноса“ с использованием Ag-пасты могут найти применение в маломощных ( $P < 100 \text{ mW}$ ) оптоэлектронных устройствах.

Высокоэффективные мощные СИД ( $P > 250 \text{ mW}$ ), изготавливаемые по технологии „переноса“ с использованием Au + In-сплава могут найти широкое применение, например, для ИК подсветки и в охранных системах.

Относительно перспектив увеличения эффективности ИК СИД. Одним из путей решения этой задачи является создание двухсекционного брэгговского отражателя, первая секция которого обеспечивает отражение лучей в телесном угле от нормали до  $30^\circ$ , а вторая секция, изготавливаемая с увеличенным в 1.3 раза (ориентировочно) периодом пар слоев  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ , обеспечит отражение лучей в телесном угле с раскрытием  $30\text{--}60^\circ$  по отношению к нормали к гетерограницам. Данный диапазон углов является „черной дырой“ (без второй секции), в которую проникает электролюминесцентное излучение, не отраженное как первой секцией брэгговского отражателя, так и излучение, не отраженное от гетерограницы со слоем  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ , отражающей латеральные лучи с углами падения  $60\text{--}90^\circ$  к нормали, превышающими предельный угол полного внутреннего отражения. Таким образом, вторая секция двухсекционного брэгговского отражателя может „закрыть“ эту „черную дыру“ и обеспечить снижение оптических потерь.

Реализация данной структуры двухсекционного брэгговского отражателя в комбинации с  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  отражательным слоем и Ag-зеркалом должна обеспечить существенный прирост эффективности СИД.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность М.З. Шварцу, Н.Д. Ильинской, С.А. Минтаирову, Р.А. Салию, Ю.М. Задиранову, Н.С. Потапович, Ф.Ю. Солдатенкову и Р.В. Лёвину 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. *ЖТФ*, **48** (4), 809 (1978).
- [2] А.Л. Закгейм, В.М. Марахонов, Р.П. Сейсян. Письма в *ЖТФ*, **6** (17), 1034 (1980).
- [3] У. Бекирев, С. Бабенко, В. Крюков, Б. Потапов, А. Скипер. *Электроника*, **00137**, 137 (2014).
- [4] Электронный ресурс. *АО Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов* Режим доступа: <https://www.niipp.ru/>

- [5] Патент US20230335681A1 от 19.10.2023.
- [6] А.В. Малевская, Н.А. Каложный, Д.А. Малевский, С.А. Мингаиров, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Ф.Ю. Солдатенков, М.З. Шварц, В.М. Андреев. ФТП, **55** (8), 699 (2021). DOI: 10.21883/ФТП.2021.08.51143.9665
- [7] Su-Chang Ahn, Byung-Teak Lee, Won-Chan An, Dae-Kwang Kim, In-Kyu Jang, Jin-Su So, Hyung-Joo Lee. J. Korean Phys. Society, **69** (1), 91 (2016).
- [8] E.F. Schubert, Light-Emitting Diodes, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press (2006).