

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ AlGaAs/GaAs-ДИОДЫ НА ОСНОВЕ InGaAs СКОМПЕНСИРОВАННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ С МИНИМИЗИРОВАННЫМИ ВНУТРЕННИМИ ПОТЕРЯМИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ 940 НМ

© 2024 г. Р. А. Салий<sup>1,\*</sup>, А. В. Малевская<sup>1</sup>, Д. А. Малевский<sup>1</sup>, С. А. Минтаиров<sup>1</sup>,  
А. М. Надточий<sup>1</sup>, Н. А. Калюжный<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: r.saliy@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 27.04.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Разработаны ИК-светоизлучающие диоды на основе InGaAs/AlGaAs множественных квантовых ям и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ -слоев, компенсирующих напряжения в активной области. Исследованы оптические потери на поглощение генерируемого активной областью излучения ( $\lambda = 940$  нм) при различном уровне легирования подложек  $n$ -GaAs. Показано, что уменьшение уровня донорного легирования с  $4 \times 10^{18}$  до  $5 \times 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$  дает прирост квантовой эффективности светодиодов  $\sim 30\%$ . Разработана технология, позволяющая полностью нивелировать оптические потери на поглощение при выводе излучения. Путем удаления подложки и переноса структуры прибора на подложку-носитель с формированием тыльного металлического отражателя созданы светодиоды, демонстрирующие двукратное повышение внешней квантовой эффективности и КПД ( $\sim 40\%$ ) по сравнению с технологией вывода излучения через подложку  $n$ -GaAs.

DOI: 10.31857/S0023476124040214, EDN: XBARUR

### ВВЕДЕНИЕ

Светоизлучающие диоды (СИД), работающие в ближнем ИК-диапазоне, имеют широкий спектр применения и используются, например, в приборах для медицинской диагностики, системах ночного видения, дальномерах для цифровой съемки, считывателях карт в транспортной сфере и воздушных дронах [1–3]. В частности, СИД с длиной волны  $\lambda = 940$  нм применяются в системах видеонаблюдения, дистанционного управления и датчиках времени полета, где они имеют ряд преимуществ как перед СИД на 850 нм (которые имеют слабое красное свечение, различимое камерами видеонаблюдения), так и перед вертикально-излучающими лазерами на таких же длинах волн (излучение СИД менее чувствительно к изменению температуры) [4, 5].

Одной из актуальных проблем является оптимизация конструкции и совершенства активной области прибора [6–8]. Использование InGaAs/AlGaAs множественных квантовых ям (МКЯ) в качестве активной области СИД дает ряд преимуществ относительно двойных гетероструктур, в частности улучшает их внутреннюю квантовую

эффективность [9, 10]. Однако  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слои МКЯ, состав и толщина которых рассчитаны на генерацию излучения с длиной волны  $\lambda = 940$  нм, создают механические напряжения в полупроводниковой матрице, что ведет к образованию дефектов и, как следствие, ограничениям по выходной мощности прибора [11]. В [12–14] продемонстрировано, что использование в активной области МКЯ слоев, компенсирующих напряжения, вызванных рассогласованием, позволяет значительно улучшить характеристики таких СИД. В данной работе проведено исследование влияния различных технологий, компенсирующих структурные напряжения, на люминесценцию активной области СИД.

Другой важной проблемой, рассмотренной в работе, являются оптические потери на вывод излучения из структуры СИД. То есть исследованы оптические потери, связанные с поглощением подзонного излучения в ростовой GaAs-подложке  $n$ -типа проводимости. Гетероструктуры СИД с  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  МКЯ, излучающие на длине волны 940 нм (1.32 эВ), формируются на основе широкозонных  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоев с концентрацией  $x > 0.2$ , что обеспечивает “прозрачность” гетероструктур для

(а)

$p$ -GaAs	Контакт	0.1 мкм
$p$ -Al <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As	Слой растекания	6 мкм
$p$ -Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	Барьер	0.3 мкм
МКЯ активная область		
$n$ -Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	Барьер	0.3 мкм
$n$ -GaAs	Подложка	450 мкм

(б)

$p$ -GaAs	Контакт	0.1 мкм
$p$ -Al <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As	Стоп слой	0.3 мкм
$p$ -Al <sub>0.9</sub> Ga <sub>0.1</sub> As	Барьер	0.3 мкм
$p$ -Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	Барьер	0.3 мкм
МКЯ активная область		
$n$ -Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	Барьер	0.3 мкм
$n$ -Al <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As	Слой растекания	6 мкм
$n$ -GaAs	Контакт	0.15 мкм
Al <sub>0.9</sub> Ga <sub>0.1</sub> As	Жертвенный слой	0.3 мкм
$n$ -GaAs	Подложка	450 мкм

**Рис. 1.** Гетероструктуры для изготовления СИД по стандартной постростовой технологии: прямого роста (а), с использованием технологии переноса на подложку-носитель – обратного роста (б).

такого излучения (значение ширины запрещенной зоны Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As составляет 1.72 эВ). Таким образом, самым узкозонным полупроводником в гетероструктурах оказывается ростовая подложка GaAs. Генерируемое активной областью излучение не должно поглощаться в чистом полупроводнике ( $E_{g\_GaAs} = 1.42$  эВ). В легированном GaAs  $n$ -типа проводимости имеет место поглощение фотонов с энергией меньше  $E_g$ , вызванное переходами между примесными “хвостами” зон [15, 16]. Однако для фотонов с энергией 1.32 эВ коэффициент поглощения такого подзонного излучения оказывается пренебрежимо мал вследствие его экспоненциального затухания в длинноволновой области согласно правилу Урбаха [17]. Таким образом, для излучения с  $\lambda = 940$  нм основным механизмом потерь в легированном GaAs может быть только поглощение на свободных носителях, которое характерно для сильнолегированных полупроводников и заметнее проявляется в GaAs  $p$ -типа проводимости [18]. Тем не менее ряд эмпирических данных [19, 20] указывает на наличие такого поглощения и в  $n$ -GaAs при различной концентрации акцепторной примеси. Генерируемое в активной области

длинноволновое излучение многократно проходит через гетероструктуру, в том числе подложку, поэтому, несмотря на небольшой коэффициент поглощения, эффективность вывода излучения из СИД падает.

В данной работе экспериментально исследованы оптические потери при выводе излучения с  $\lambda = 940$  нм в структуре на  $n$ -GaAs-подложке при различном уровне ее легирования и показано, что уменьшение концентрации донорной примеси значительно увеличивает квантовую эффективность СИД. Один из подходов, позволяющих еще больше нивелировать поглощение в подложке, состоит в эпитаксиальном росте на границе гетероструктура/подложка брэгговского отражателя, коэффициент отражения от которого максимален в спектральной области  $\lambda = 940$  нм. Он будет отражать часть генерированного излучения, распространяющегося от  $p$ - $n$ -перехода в сторону подложки [21, 22]. В [23] с использованием данного подхода была продемонстрирована внешняя квантовая эффективность (EQE) 37.5% для СИД, излучающего на длине волны  $\lambda = 850$  нм. Однако брэгговский отражатель эффективен не для всех распространяющихся лучей, он отражает лучи, приходящие только в пределах угла падения  $20^\circ$ , доля которых составляет ~5% по отношению к падающему на него изотропному излучению. В данной работе применен другой подход – удаление (селективное травление) ростовой подложки с последующим переносом структуры на подложку-носитель [9, 24, 25]. Удаление подложки позволяет формировать тыльный металлический отражатель для эффективного выведения света, распространяющегося в сторону, противоположную световыводящей поверхности. Продемонстрировано существенное улучшение оптических параметров СИД при полном удалении GaAs-подложки, нанесении металлического отражателя и переносе гетероструктуры на подложку-носитель.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

*Материалы и методы изготовления структур.* Все экспериментальные гетероструктуры, включая гетероструктуры СИД, выращивали методом металлоорганической газофазной эпитаксии на установке с реактором горизонтального типа (AIXTRON200/4). В качестве источников элементов третьей группы использовали металлоорганические соединения: триметилгаллий (Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>), триметилалюминий (Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) и триметилиндий (In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>). Арсин (AsH<sub>3</sub>) и фосфин (PH<sub>3</sub>) использовали в качестве источников мышьяка и фосфора. Источниками донорной и акцепторной примесей были силан (SiH<sub>4</sub>) и диэтилцинк (Zn(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>) соответственно. Содержание сторонних примесей (в частицах на миллион) не превышает 1 ppm как

Таблица 1. Экспериментальные гетероструктуры МКЯ активной области

Структура	850R	940R	940SB1	940SB2	940SB3A	940SB3B
Барьер	$\text{Al}_{0,3}\text{GaAs}$					
Квантовая яма	$\text{In}_{0,10}\text{GaAs}$	$\text{In}_{0,14}\text{GaAs}$	$\text{In}_{0,17}\text{GaAs}$		$\text{In}_{0,14}\text{GaAs}$	
Промежуточный слой	$\text{Al}_{0,2}\text{GaAs}$	$\text{GaAs}$	$\text{Al}_{0,25}\text{GaAsP}_{0,04}$	$\text{GaAsP}_{0,06}$	$\text{Al}_{0,2}\text{GaAs}$ $\text{GaAsP}_{0,06}$	$\text{Al}_{0,2}\text{GaAs}$ $\text{GaAsP}_{0,06}$
Барьер	$\text{Al}_{0,3}\text{GaAs}$					
Буфер	$\text{GaAs}$					
Подложка	$\text{GaAs}$					

Примечание. Для краткой формы записи индекс значения концентрации атомов в подрешетках третьей или пятой группы указан только для одного из элементов соответствующей подрешетки.

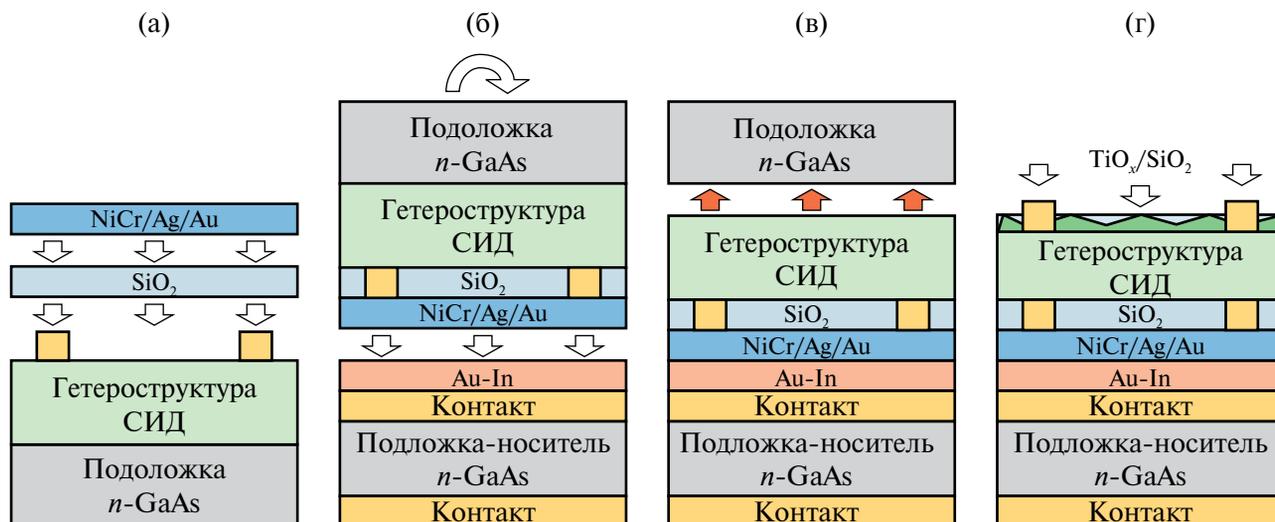
для металлоорганических соединений, так и для гидридов. Все использованные источники произведены в “Элма-хим”, Россия.

Было выращено два типа гетероструктур СИД: прямого и обратного эпитаксиального роста. Для исследования влияния эффекта поглощения гетероструктуру первого типа (рис. 1а) выращивали на двух видах подложек  $n\text{-GaAs}$ : сильно- ( $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и слаболегированной ( $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Второй тип гетероструктуры (рис. 1б) с инвертированным порядком роста слоев предназначался для изготовления СИД по технологии, включающей в себя процесс удаления подложки и переноса гетероструктуры на подложку-носитель с нанесенным тыльным металлическим отражателем.

Для нахождения оптимальной конструкции активной области СИД (на рис. 1 обозначена как “МКЯ активная область”) также вырастили экспериментальные образцы гетероструктур, на которых исследовали подходы к компенсации структурных напряжений, вызванных рассогласованием параметров решетки. В качестве реперных образцов без компенсирующих слоев были созданы две гетероструктуры на основе МКЯ, излучающие на длинах волн 850 и 940 нм. Обе структуры включали в себя широкозонные барьеры AlGaAs толщиной 200 и 50 нм, между которыми находилась активная область из нескольких квантовых ям (КЯ). Гетероструктура на  $\lambda = 850$  нм состояла из шести  $\text{In}_{0,11}\text{Ga}_{0,89}\text{As}/\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,80}\text{As}$  КЯ (образец 850R), разделенных промежуточными слоями (спейсерами) на основе твердого раствора  $\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,80}\text{As}$ . В случае МКЯ на  $\lambda = 940$  нм гетероструктура включала в себя пять  $\text{In}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}/\text{GaAs}$  КЯ (образец 940R) с промежуточными слоями GaAs. Толщины КЯ составляли 3 и 7 нм для образцов 850R и 940R соответственно. Подробно последовательность слоев этих структур представлена в табл. 1. Для оптимизации МКЯ активной области в экспериментальных гетероструктурах с МКЯ варьировали

толщины промежуточных слоев AlGaAs и GaAs, а также исследовали различные типы и толщины компенсирующих слоев в составе этих слоев.

Изготовление СИД из гетероструктур прямого роста (рис. 1а), выращенных на двух подложках с разным уровнем легирования, проводилось по одинаковой постростовой технологии, включающей в себя следующие операции. Сначала выполнялось текстурирование поверхности СИД путем жидкостного химического травления для увеличения эффективности вывода излучения из кристалла. Затем проводилось осаждение просветляющего покрытия на основе слоев  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ , обеспечивающего увеличение выхода излучения из кристалла и выполняющего защитную функцию световыводящей поверхности СИД. Фронтальный полосковый омический контакт к слою GaAs  $p$ -типа проводимости формировался путем напыления слоев NiCr/Ag/Au толщиной 0.2–0.3 мкм, что обеспечивало получение низкого переходного контактного сопротивления  $\sim(2-4) \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ . Тыльный омический контакт к подложке GaAs  $n$ -типа проводимости формировался на основе слоев Au(Ge)/NiV/Au толщиной 0.15–0.2 мкм с контактным сопротивлением  $\sim(1-2) \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ . Для увеличения проводимости контактных шин и тыльного омического контакта осуществлялось электрохимическое осаждение слоев Ag/Ni/Au толщиной 2–4 мкм. Затем путем жидкостного химического травления слоев гетероструктур и подложки создавали мезоструктуру, которая обеспечивала снижение токов утечки по боковой поверхности разделительной канавки травления (мезы) при резке гетероструктуры на отдельные чипы. В итоге изготовлены СИД, образцы которых обозначены как “LDS-led” (“low-doped-substrate”, на подложке GaAs с концентрацией донорной примеси  $\sim 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) и “HDS-led” (“high-doped-substrate”, на подложке с концентрацией примеси  $\sim 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ).



**Рис. 2.** Последовательность постростовых операций при изготовлении инвертированных СИД на основе гетероструктур обратного роста с технологиями их переноса на подложку-носитель и нанесения тыльного металлического отражателя.

При изготовлении “инвертированных” СИД на основе гетероструктур обратного роста (рис. 1б) была применена технология их переноса на подложку-носитель с последующим удалением ростовой подложки. Последовательность операций данной технологии показана на рис. 2 и условно включает в себя четыре этапа. На первом этапе (рис. 2а) на поверхности гетероструктуры формируются точечные контакты диаметром 10 мкм  $p$ -типа проводимости на основе слоев NiCr/Ag/Au с шагом 75 мкм. Далее контактный слой  $p$ -GaAs удаляется путем травления в местах, свободных от точечных контактов, для формирования прозрачных окон для генерируемого излучения. После этого осаждается диэлектрическое покрытие на основе слоев  $\text{SiO}_2$  и на его поверхности формируется сплошной тыльный металлический отражатель на основе слоев NiCr(1 нм)/Ag/Au, закрытый дополнительными защитными барьерными слоями. На втором этапе (рис. 2б) осуществляется переворот гетероструктуры и ее фиксация с помощью сплава AuIn на подложке-носителе ( $n$ -GaAs) с предварительно осажденными контактными слоями на ее фронтальной и тыльной поверхностях. На третьем этапе (рис. 2в) проводится удаление ростовой подложки  $n$ -GaAs путем ее селективного травления до стоп-слоя  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ , который также выполняет роль “жертвенного” слоя и затем травится до появления контактного слоя  $n$ -GaAs. На четвертом этапе (рис. 2г) проводится текстурирование световыводящей поверхности СИД с последующим формированием просветляющего покрытия  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и напылением полосковых контактов Au(Ge)/NiV/Au к слою  $n$ -GaAs. Далее проводили формирование разделительной мезоструктуры.

Таким образом, с использованием технологии переноса на подложку-носитель был изготовлен образец СИД “TCS-led” (“transferred-to-carrier-substrate”).

После завершения постростовых операций все типы гетероструктур разделяли по мезоструктуре на отдельные СИД, проводили их монтаж на керамические теплоотводящие основания, разварку токоотводящих проволочек и монтаж оптических элементов в виде силиконовых полусфер.

**Методики исследования.** Экспериментальные гетероструктуры с МКЯ исследовали путем анализа спектров фотолуминесценции (ФЛ), которые записывали при двух плотностях оптического возбуждения твердотельным лазером модели DTL-413 с излучением на длине волны 527 нм.

Для изучения изготовленных СИД провели измерения ватт-амперных характеристик, внешней квантовой эффективности (внешнего квантового выхода, EQE) и энергоэффективности ( $\eta$ ) светодиодов. Измерения выполнены в широком диапазоне токов 0–1000 мА, пропускаемых через исследуемые образцы в импульсном режиме. Измерения проводили с помощью контрольного фотоприемника с известной спектральной fotocувствительностью на длине волны  $\lambda = 940$  нм.

Определение спектральных характеристик осуществлялось в спектральном диапазоне 300–1100 нм. Для этого через чип СИД пропускали импульсный ток (5–300 мкс, скважность менее 1%) и проводили регистрацию напряжения на нем. Генерируемое излучение СИД поглощалось контрольным фотопреобразователем, выполнялась регистрация протекающего тока, после чего

проводили расчет оптической мощности СИД. Внешнюю квантовую эффективность определяли с использованием измеренных ватт-амперных характеристик, а КПД оценивали как соотношение выведенной оптической мощности к введенной в СИД электрической.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложен способ оценки накопленного упругого напряжения в КЯ для обеих гетероструктур. Определена сумма произведений величин рассогласования параметров решетки материалов КЯ и матрицы ( $da/a$ ) на значения их толщин ( $h$ ). Величина  $da/a$  может иметь как положительное, так и отрицательное значение, а итоговая сумма позволяет приблизительно оценить упругое напряжение, которое нужно скомпенсировать за счет увеличения толщины слоев с обратным относительно полученного суммарного значения знаком. Размерность оценочной величины – ppm·нм, где  $da/a$  измеряется в миллионных долях (parts per million, [26]). Для образца 940R эта величина оказалась в 2 раза больше: +135000 ppm·нм против +63000 ppm·нм для образца 850R, что объясняет низкий максимум ФЛ для 940R (рис. 3). Результаты расчета и величины интенсивности ФЛ сведены в табл. 2.

Для увеличения интенсивности фотолюминесценции от МКЯ на  $\lambda = 940$  нм и улучшения структурного качества гетероструктуры необходимо минимизировать суммарное напряжение, для чего были рассмотрены два подхода: уменьшение концентрации In в КЯ (относительно 14% в реперной структуре) и использование слоев, компенсирующих напряжения в структуре. Согласно расчетам на основе твердотельной модели КЯ [27] для уменьшения концентрации In до 10%, как в образце 850R (при условии сохранения целевой длины волны 940 нм), требуется увеличение толщины КЯ до 10 нм и более. Эта величина приближается к величине критической толщины псевдоморфного слоя InGaAs [28], при которой происходит релаксация напряжений с образованием дислокаций

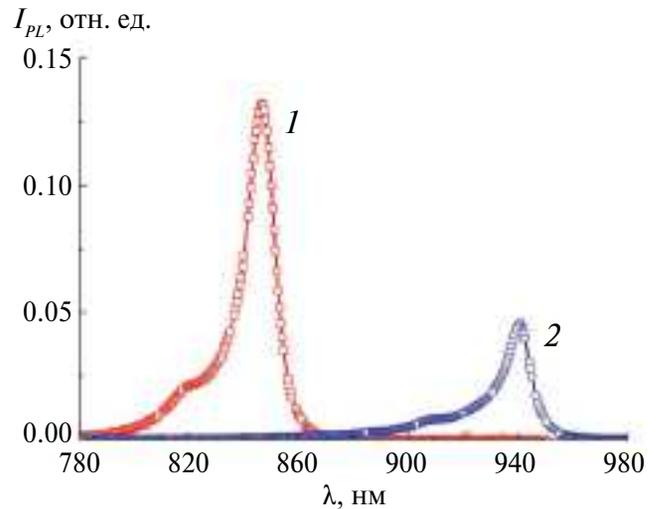


Рис. 3. Спектры ФЛ для гетероструктур 850R (1) и 940R (2) при комнатной температуре.

несоответствия на границе слоев. Это приведет к появлению прорастающих дислокаций, ухудшающих электрофизические свойства материала и, соответственно, параметры СИД [29].

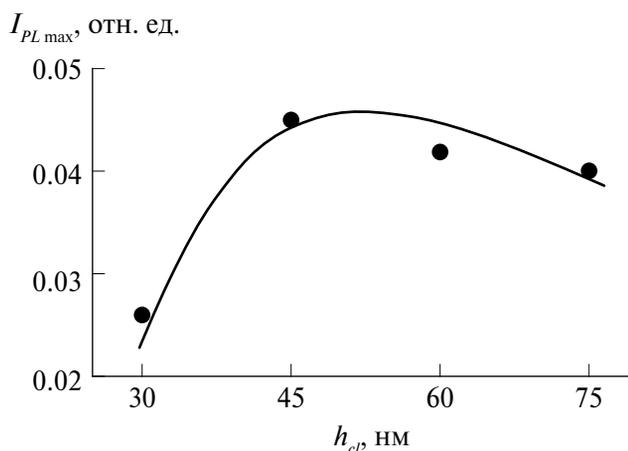
Перспективным подходом является внедрение в МКЯ слоев, компенсирующих напряжения. Чтобы компенсировать деформацию сжатия, вызванную МКЯ, необходимо внести в структуру соразмерную деформацию растяжения. Рассчитаны параметры для двух типов компенсирующих слоев:  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  и  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ .

Рассогласование параметра решетки ( $da/a$ ) между  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  и матрицей составляет  $\sim -2000$  ppm для составов с  $x = 0.25$  и  $y = 0.96$ . Согласно расчету по твердотельной модели [30] при использовании слоя с такими параметрами в качестве компенсирующего (с полной заменой AlGaAs промежуточного слоя) для длины волны излучения  $\lambda = 940$  нм концентрация In в КЯ InGaAs составляет 17%, а толщина  $h_{QW} = 46$  Å. Для расчета

Таблица 2. Ростовые и оптические параметры экспериментальных гетероструктур МКЯ

Образец	xIn в InGaAs, %	$t_{\text{КЯ}}$ , Å	Промежуточный слой	$t_{\text{сп}}$ , нм	$(da/a)h$ , ppm·нм	$I_{\text{PLmax}}$ , отн. ед.
850R	10	30	$\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}$	30	+63000	0.132
940R	14	70	GaAs	14	+135000	0.045
940SB1	17	46	$\text{Al}_{0.25}\text{GaAsP}_{0.04}$	45	+17500	0.048
940SB2	14	70	$\text{GaAsP}_{0.06}$	14	+78000	0.064
940SB3A	14	70	$\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAsP}_{0.06}$	4/10	+96500	0.056
940SB3B	14	70	$\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAsP}_{0.06}$	4/18	+64000	0.066

Примечание. Для краткой формы записи индекс значения концентрации атомов в подрешетках третьей или пятой группы указан только для одного из элементов соответствующей подрешетки.



**Рис. 4.** Зависимость максимума  $I_{PL}$  от толщины компенсирующего слоя в серии образцов  $\text{In}_{0.17}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.25}\text{GaAsP}_{0.04}$  МКЯ (серия образцов 940SB1).

оптимальной толщины компенсирующего слоя для такой КЯ использовано выражение из теории упругости сплошных сред [26, 30]:

$$h_{cl} = h_{QW} \left[ \frac{A_{QW} a_{cl}^2 (a_0 - a_{QW})}{A_{cl} a_{QW}^2 (a_{cl} - a_0)} \right], \quad (1)$$

где  $a_0$  – постоянная решетки подложки,  $A_{cl}$  и  $A_{QW}$  – константы жесткости компенсирующего слоя и КЯ, зависящие от коэффициентов жесткости  $C_{11}$  и  $C_{12}$ :

$$A_i = C_{11,i} + C_{12,i} - \frac{2C_{12,i}^2}{C_{11,i}}. \quad (2)$$

Согласно расчету оптимальная толщина компенсирующего слоя  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04}$  составляет 45 нм.

Для экспериментальной проверки расчета был выращен ряд гетероструктур с МКЯ  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04}$ , в которых толщина компенсирующего слоя варьировалась от 30 до 75 нм (серия образцов 940SB1), и измерены их спектры ФЛ. Из зависимости максимальной интенсивности ФЛ ( $I_{PL\max}$ ) от толщины промежуточного слоя (рис. 4) видно, что значение оптимальной толщины компенсирующего слоя  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04}$  лежит в диапазоне 45–50 нм, что полностью согласуется с расчетной оценкой, полученной с применением теории упругости сплошных сред.

Однако применение компенсирующего слоя  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04}$  имеет два недостатка. Во-первых, толщины промежуточных слоев более 45 нм слишком велики для создания эффективной

активной области СИД (уменьшаются электронно-дырочное перекрытие и скорость излучательной рекомбинации). Во-вторых, большая концентрация In (17%) ведет к условиям приближения толщины КЯ к критической, что также может отрицательно повлиять на качество гетероструктуры. Поэтому для уменьшения толщины компенсирующего слоя были рассчитаны его параметры на основе твердого раствора  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ , который обеспечивает большую деформацию сжатия при концентрации фосфора в подрешетке пятой группы ~6%. В таком случае рассогласование  $da/a$  между  $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$  и матрицей составляет ~–4000 ppm. Согласно расчету по твердотельной модели при замене AlGaAs на промежуточные слои  $\text{GaAsP}_{0.06}$  толщина КЯ составит 70 Å (при концентрации In ~ 14%), а расчет по формуле (2) дает толщину компенсирующего слоя  $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$ , равную 14 нм. Гетероструктура СИД, выращенная на основе МКЯ  $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}/\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$ , обозначена как 940SB2.

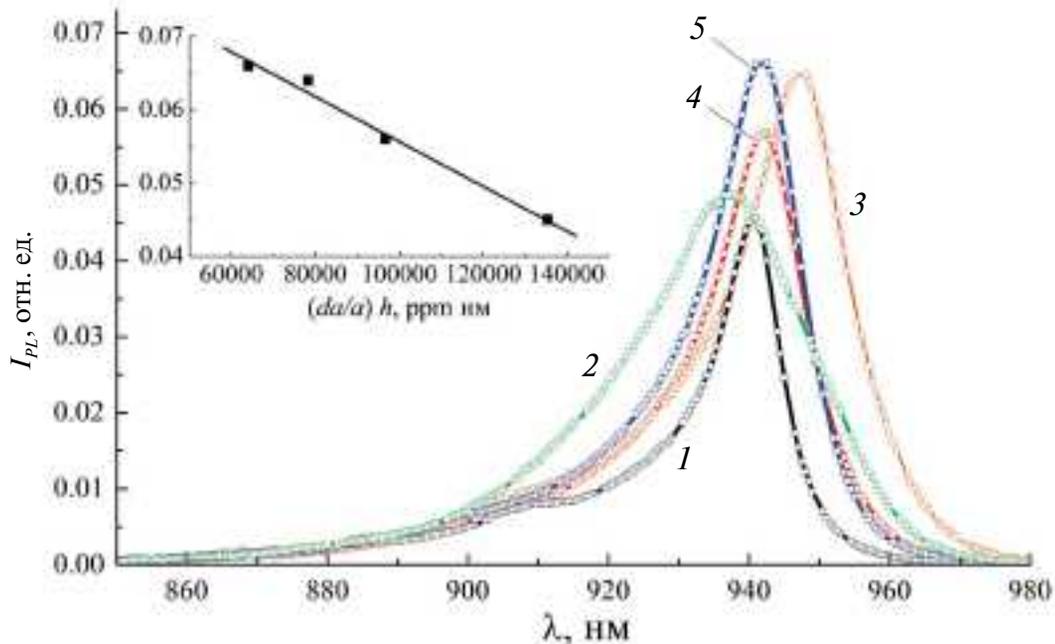
Можно оценить, что компенсирующие слои на основе как  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04}$ , так и  $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$  обеспечивают значение параметра решетки всей активной области с МКЯ ( $a_{MQW}$ ), близкое к окружающим их в структуре  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  слоям (рис. 1), параметр решетки которых равен 5.656 Å. Если провести оценку по формуле, связывающей  $a_{MQW}$  и параметры решетки КЯ и компенсирующего слоя [29]:

$$a_{MQW} = \frac{h_{QW} a_{QW} + h_{cl} a_{cl}}{h_{QW} + h_{cl}}, \quad (3)$$

где  $h_{QW}$  и  $h_{cl}$  – толщины КЯ и компенсирующего слоя соответственно,  $a_{QW}$  и  $a_{cl}$  – их параметры решеток, то величина  $a_{MQW}$  для компенсирующего слоя  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04}$  составит 5.632 Å, а для  $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$  – 5.655 Å.

В [31] предложен подход, в котором в качестве компенсирующего слоя использована комбинация пар слоев AlGaAs и GaAsP. Отмечалось, что тонкий слой AlGaAs можно использовать, чтобы уменьшить “резкость” изменения баланса деформации растяжения и сжатия от двух смежных слоев КЯ InGaAs и компенсирующего слоя GaAsP. Для исследования данного подхода были выращены гетероструктуры с МКЯ  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAsP}_{0.06}$  (образцы 940SB3A и 940SB3B), различающиеся толщиной компенсирующего слоя  $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$ . В табл. 1 представлена последовательность слоев во всех выращенных гетероструктурах с МКЯ, а в табл. 2 сведены их ростовые и оптические параметры с указанием оценки изменения суммарного напряжения в гетероструктурах. Сравнение спектров ФЛ от всех исследованных гетероструктур с МКЯ приведено на рис. 5.

Образцы с комбинированными компенсирующими слоями 940SB3A и 940SB3B продемон-



**Рис. 5.** Спектры ФЛ при комнатной температуре для гетероструктур с МКЯ: 1 – 940R, 2 – 940SB1, 3 – 940SB2, 4 – 940SB3A, 5 – 940SB3B; на вставке – зависимость максимума  $I_{PL}$  при комнатной температуре от произведения  $da/a$  на толщину слоев.

стрировали увеличенный максимум ФЛ  $I_{PL}$  по сравнению с образцом 940SB1 (рис. 5, кривые 4, 5 и 1 соответственно). Относительный прирост  $I_{PL}$  для образца 940SB3B составил 32%. Приведенная оценка величины суммарного упругого напряжения (произведения  $da/a$  на толщины слоев активной области) образца 940SB3B практически совпадает с аналогичным оценочным значением  $da/a$  для реперного образца 850R. В результате построенная зависимость  $I_{PL}$  (рис. 5, вставка) от приведенной оценочной величины  $(da/a)h$  для всех исследованных гетероструктур достаточно хорошо коррелирует с оптическим качеством гетероструктуры, выраженным максимумом ФЛ.

Таким образом, в соответствии с разработанной технологией компенсации напряжений в активной области гетероструктур СИД обоих типов роста (рис. 1) были использованы слои  $In_{0.14}Ga_{0.86}As/Al_{0.20}Ga_{0.80}As/GaAs_{0.94}P_{0.06}$  МКЯ, обеспечившие максимальный уровень ФЛ.

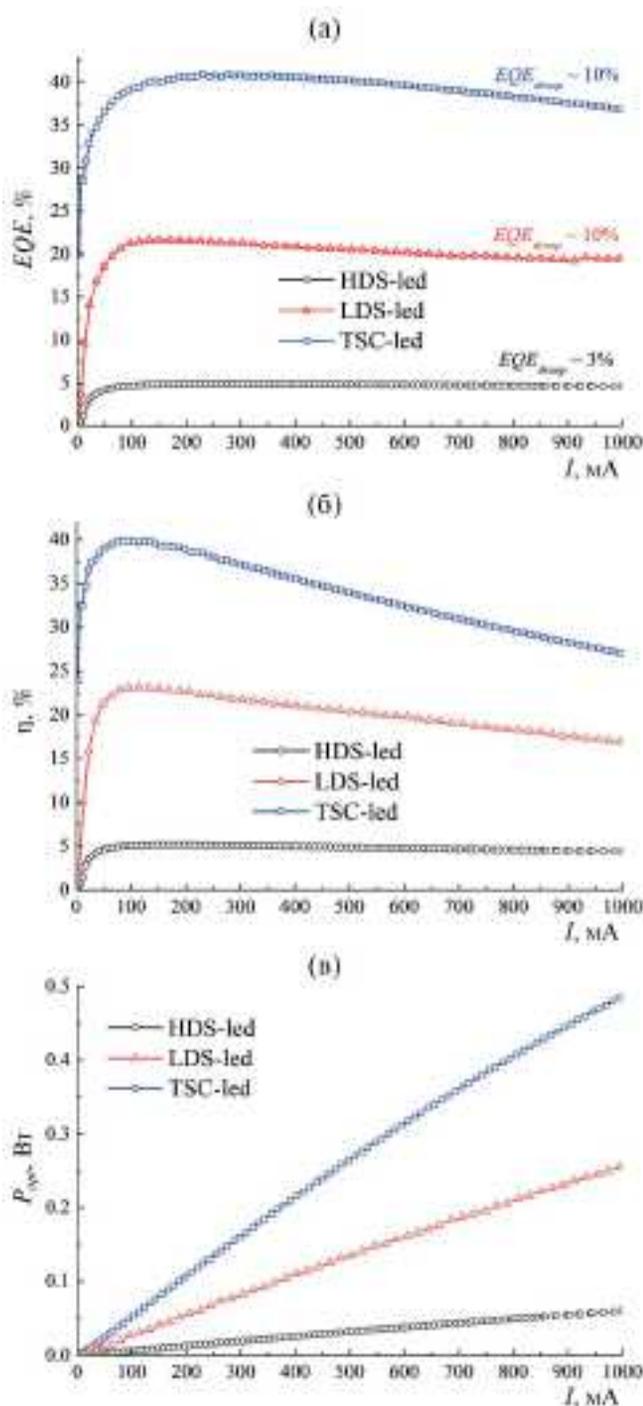
На рис. 6 представлены токовые зависимости  $EQE$ ,  $\eta$  и выходной оптической мощности ( $P_{opt}$ ) полученных СИД.

Сравнение характеристик образцов HDS-led и LDS-led показывает существенное влияние степени легирования полупроводниковой подложки на внутренние оптические потери изготовленных СИД. Во-первых, наблюдается интенсивное поглощение на свободных носителях излучения  $\lambda = 940$  нм в сильнолегированной ( $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )

подложке GaAs  $n$ -типа проводимости. Вывод излучения из СИД критично уменьшается, и максимальная внешняя квантовая эффективность приборов в этом случае составляет  $\sim 14\%$ . При уменьшении уровня легирования подложки GaAs почти на порядок эффективность увеличилась на 30 отн. %.

Максимальный прирост как оптической, так и энергоэффективности достигается за счет полного удаления ростовой подложки GaAs и формирования тыльного металлического отражателя, обеспечивающего вывод излучения, распространяющегося в противоположную сторону от поверхности СИД (т.е. при технологии переноса гетероструктуры на подложку-носитель). Максимумы величин  $\eta$  и  $EQE$  инвертированного СИД TCS-led составили 39.8 и 40.9% соответственно. В табл. 3 представлены максимумы величин электрооптических характеристик, а также величины инжектируемого тока, при которых они были достигнуты.

Отметим, что обычно для СИД характерен эффект падения величины  $EQE$  при увеличении инжектируемого тока [32]. Эффект падения  $EQE$  – это проблема, широко обсуждаемая в литературе главным образом в отношении СИД на основе GaN, в которых степень падения внешней квантовой эффективности ( $EQE_{droop}$ ) может достигать до 50%. К основным механизмам безызлучательной рекомбинации, которые лежат в основе падения  $EQE$ , принято относить оже-рекомбинацию, утечку



**Рис. 6.** Токвые зависимости внешней квантовой эффективности (а), энергоэффективности (б), выходной оптической мощности для СИД на подложке с уровнем легирования  $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (HDS-led),  $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (LDS-led) и для СИД, изготовленного с использованием технологии переноса на подложку-носитель (TSC-led) (в).

**Таблица 3.** Максимумы характеристик изготовленных СИД

Образец	$EQE_{\max}$ , % ( $I$ , mA)	$\eta_{\max}$ , % ( $I$ , mA)
HDS-led	14.1 (~300–700)	13.6 (~200–400)
LDS-led	21.6 (150)	23.1 (114)
TSC-led	40.9 (275)	39.8 (85)

носителей заряда, нагрев прибора, а также увеличение стока инжектированных носителей к центрам рекомбинации Шокли–Рида–Холла в дефектных участках КЯ [33]. Однако величина  $EQE_{droop}$  для всех исследованных в данной работе образцов не превышает 10% с увеличением инжектируемого тока вплоть до 1 А. Такой результат может быть следствием уменьшения плотности дефектов в МКЯ за счет применения технологии слоев, компенсирующих структурные напряжения. Выходная оптическая мощность полученных СИД сублинейно увеличивается с ростом инжектируемого тока и не достигает насыщения на всем диапазоне исследуемых токов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы и исследованы ИК СИД с активной областью на основе InGaAs/AlGaAs МКЯ, излучающие на длине волны  $\lambda = 940 \text{ нм}$ . Показано, что применение компенсирующих слоев в МКЯ таких СИД позволяет улучшить люминесцентные свойства активной области: зарегистрировано увеличение интенсивности ФЛ экспериментальных структур с промежуточными слоями  $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}$  более чем на 30% по сравнению с реперными образцами без компенсирующих слоев. Благодаря уменьшению плотности дефектов, которые являются центрами безызлучательной рекомбинации в МКЯ, падение внешней квантовой эффективности изготовленных СИД не превышало 10% при увеличении рабочего тока до 1 А.

Исследованы оптические потери, вызванные поглощением на свободных носителях, при выводе генерируемого активной областью ( $\lambda = 940 \text{ нм}$ ) излучения из СИД при различном уровне легирования ростовой подложки  $n$ -GaAs. Показано, что уменьшение уровня донорного легирования с  $4 \times 10^{18}$  до  $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  дает относительный прирост эффективности СИД порядка 30%.

Наибольшие значения оптической и энергоэффективности достигнуты за счет полного удаления ростовой подложки GaAs и формирования тыльного металлического отражателя, обеспечивающего вывод излучения, распространяющегося в противоположную сторону от поверхности СИД.

В результате применения технологии изготовления таких инвертированных СИД со встроенным металлическим отражателем продемонстрированы значения  $\eta = 39.8\%$  при токе 85 мА и  $EQE = 40.9\%$  при токе 275 мА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vasilopoulou M., Fakhruddin A., Pelayo García de Arquer F. et al. // Nat. Photon. 2021. V. 15. P. 656. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00855-2>
- Lee H.-J., Park G.-H., So J.-S. et al. // Infrared Phys. Technol. 2021. V. 118. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103879>
- Entropa A.G., Vasenev A. // Energy Proc. 2017. V. 132. P. 63. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.636>
- Kitabayashi H., Ishihara K., Kawabata Y. et al. // SEI Tech. Rev. 2010. V. 72. P. 71.
- Infrared Illumination for Time-of-Flight Applications. 2008. <https://lumileds.com/wp-content/uploads/files/WP35.pdf>
- Kim D.K., Lee H.J., Won-Chan An. et al. // J. Korean Phys. Soc. 2018. V. 72. № 9. P. 1020. <https://doi.org/10.3938/jkps.72.1020>
- Lin Hl., Zeng Xh., Shi Sm. et al. // Optoelectron. Lett. 2019. V. 15. № 2. P. 113. <https://doi.org/10.1007/s11801-019-8113-6>
- Peng Bai P., Zhang Y., Wang T. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2020. V. 35. № 3. P. 035021. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab6dbf>
- Shubert E.F. Light-Emitting Diodes (second edition). Cambridge University Press, 2006. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
- Малевская А.В., Калюжный Н.А., Малевский Д.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55. № 8. С. 699. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.08.51143.9665>
- Kim S.-D., Lee H., Harris J.S.J. // Electrochem. Soc. 1995. V. 142. № 5. P. 1667. <https://doi.org/10.1149/1.2048636>
- Yu Y., Qin X., Huang B. et al. // Vacuum. 2003. V. 69. P. 489. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00560-2](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00560-2)
- Kim D.-K., Lee H.-J. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2018. V. 18. № 3. P. 2014. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.14952>
- Xu D.P., D'Souza M., Shin J.C. et al. // J. Cryst. Growth. 2008. V. 310. P. 2370. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2007.11.218>
- Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. Semiconductor Opto-Electronic. Butterworth & Co. Ltd, 1973. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04197-7>
- Pankove J.I. Optical processes in semiconductors. Prentice-Hall. Inc., 1971.
- Urbach F. // Phys. Rev. 1953. V. 92. P. 1324. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1324>
- Casey H.C., Sell D.D., Wecht K.W. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 1. P. 250. <https://doi.org/10.1063/1.321330>
- Гуревич С.А., Федорович А.Е., Федоров А.В. // Физика и техника полупроводников. 1991. Т. 5. С. 769.
- Abroug S., Saadallah F., Yasoubi N. // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2008. V. 153. P. 29. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2008-00386-7>
- Малевская А.В., Калюжный Н.А., Малевский Д.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55. № 7. С. 614. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.07.51028.9646>
- Ahn S.-C., Lee B.-T., An W.-C. et al. // J. Korean Phys. Soc. 2016. V. 69. № 1. P. 91. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.91>
- Малевская А.В., Калюжный Н.А., Минтауров С.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55. № 12. С. 1218. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.12.51709.9711>
- Tzou A.-J., Lin B.-Ch., Lee Ch.-Y. et al. // J. Photon. Energy. 2015. V. 5. P. 057604–14. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.5.057604>
- Малевская А.В., Калюжный Н.А., Солдатенков Ф.Ю. и др. // ЖТФ. 2023. Т. 93. № 1. С. 170. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.01.54078.166-22>
- Bailey C.G., Hubbard S.M., Forbes D.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. № 20. P. 203110. <https://doi.org/10.1063/1.3264967>
- Van de Walle C.G. // Phys. Rev. 1989. V. 39. № 3. P. 1871. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.1871>
- Rudinsky M.E., Karpov S. Yu., Lipsanen H. et al. // Mat. Phys. Mechanics. 2015. V. 24. № 3. P. 278. <https://doi.org/10.1134/S1063782613090054>
- Redaelli L., Mukhtarova A., Valdueza-Felip S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. № 13. P. 131105. <https://doi.org/10.1063/1.4896679>
- Ekins-Daukes N.J., Kawaguchi K., Zhang J. // Cryst. Growth Des. 2002. V. 2. № 4. P. 287. <https://doi.org/10.1021/cg025502y>
- An W.-C., Kim H.-G., Kwac L.-K. et al. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2019. V. 19. P. 2224. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.15974>
- Cho J., Schubert E.F., Kim J.K. // Laser Photon. Rev. 2013. V. 7. № 3. P. 408. <https://doi.org/10.1002/lpor.201200025>
- Fu H., Zhao Y. Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs) (Second Edition). Elsevier Ltd, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101942-9.00009-5>

## LIGHT-EMITTING ALGAAS/GAAS DIODES BASED ON INGAAS STRAIN-COMPENSATED QUANTUM WELLS WITH MINIMIZED INTERNAL LOSSES OF 940 NM RADIATION ABSORPTION

R. A. Saliy\*, A. V. Malevskaya, D. A. Malevskii, S. A. Mintairov,  
A. M. Nadtochiy, N. A. Kalyuzhnyy

*Ioffe Institute, 26 Politekhnicheskaya, 194021 St. Petersburg, Russia*

*\*e-mail: r.saliy@mail.ioffe.ru*

**Abstract.** IR light-emitting diodes based on InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ -layers that compensate stresses in the active region have been developed. The optical losses caused by absorption of radiation generated by the active region ( $\lambda = 940$  nm) were studied at different doping levels of  $n$ -GaAs substrates. It has been shown that reducing the donor doping level from  $4 \times 10^{18}$  to  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  gives an increase in the quantum efficiency of LEDs by  $\sim 30\%$ . A technology that eliminates optical losses caused by absorption during radiation output has been developed. By removing the growth substrate and transferring the device structure to a carrier substrate with the formation of a rear metal reflector, LEDs were created that demonstrate a twofold increase in external quantum efficiency and efficiency ( $\sim 40\%$ ) compared to the technology of outputting radiation through an  $n$ -GaAs substrate.