УДК 628.9

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

© 2024 г. Р.А. Салий^{1,*}, А.В. Малевская¹, Д.А. Малевский¹, С.А. Минтаиров¹, А.М. Надточий¹, Н.А. Калюжный¹

¹Физико-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 Al_xGa_{1-x}As_yP_{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 × 10¹⁸ до 5 × 10¹⁷ см⁻³ дает прирост квантовой эффективности светодиодов ~ 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 (~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 преимушеств 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 (**MKЯ**) в качестве активной области СИД дает ряд преимуществ относительно двойных гетероструктур, в частности улучшает их внутреннюю квантовую эффективность [9, 10]. Однако $In_xGa_{1-x}As$ -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 $In_xGa_{1-x}As$ MKЯ, излучающие на длине волны 940 нм (1.32 эВ), формируются на основе широкозонных $Al_xGa_{1-x}As$ -слоев с концентрацией x > 0.2, что обеспечивает "прозрачность" гетероструктур для

<i>p</i> -GaAs	Контакт	0.1 мкм
$p-Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	Слой растекания	6 мкм
$p-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	Барьер	0.3 мкм
	МКЯ активная область	
$n-\mathrm{Al}_{0.3}\mathrm{Ga}_{0.7}\mathrm{As}$	Барьер	0.3 мкм
<i>n</i> -GaAs	Подложка	450 мкм

(a)

110,	4
(6	1
(0)

<i>p</i> -GaAs	Контакт	0.1 мкм			
$p-Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	Стоп слой	0.3 мкм			
$p-Al_{0.9}Ga_{0.1}As$	Барьер	0.3 мкм			
$p-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	Барьер	0.3 мкм			
МКЯ активная область					
$n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	Барьер	0.3 мкм			
$n-Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	Слой растекания	6 мкм			
n-GaAs	Контакт	0.15 мкм			
$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$	Жертвенный слой	0.3 мкм			
<i>n</i> -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_{0.2}Ga_{0.8}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 $(E_{g \text{ GaAs}} = 1.42 \text{ эВ})$. В легированном GaAs *n*-типа проводимости имеет место поглощение фотонов с энергией меньше Eg, 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 (ЕОЕ) 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°, доля которых составляет ~5% по отношению к падающему на него изотропному излучению. В данной работе применен другой подход – удаление (селективное стравливание) 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 СИЛ 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 металлорганические соединения: триметилгаллий (Ga(CH₃)₃), триметилалюминий (Al(CH₃)₃) и триметилиндий (In(CH₃)₃). Арсин (AsH₃) и фосфин (PH₃) использовали в качестве источников мышьяка и фосфора. Источниками донорной и акцепторной примесей были силан (SiH₄) и диэтилцинк (Zn(C₂H₅)₃) соответственно. Содержание сторонних примесей (в частицах на миллион) не превышает 1 ррт как

Структура	850R	940R	940SB1	940SB2	940SB3A	940SB3B
Барьер	Al _{0.3} GaAs					
Квантовая яма	In _{0.10} GaAs	In _{0.14} GaAs	In _{0.17} GaAs	In _{0.14} GaAs		
Промежуточный слой	Al _{0.2} GaAs	GaAs	Al _{0.25} GaAsP _{0.04}	GaAsP _{0.06}	Al _{0.2} GaAs	Al _{0.2} GaAs
					GaAsP _{0.06}	GaAsP _{0.06}
Барьер	Al _{0.3} GaAs					
Буфер	GaAs					
Подложка	GaAs					

Таблица 1. Экспериментальные гетероструктуры МКЯ активной области

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

для металлорганических 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*-GaAs: сильно- (4×10^{18} см⁻³) и слаболегированной (5×10^{17} 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 In_{0.11}Ga_{0.89}As/A_{10.20}Ga_{0.80}As КЯ (образец 850R), разделенных промежуточными слоями (спейсерами) на основе твердого раствора Al_{0 20}Ga_{0 80}As. В случае МКЯ на $\lambda = 940$ нм гетероструктура включала в себя пять In_{0.14}Ga_{0.86}As/GaAs KЯ (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

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ том 69 № 4 2024

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 TiO_x/SiO₂, 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 ~ $(2-4) \times 10^{-6}$ Ом·см². Тыльный омический контакт к подложке GaAs n-типа проводимости формировался на основе слоев Au(Ge)/NiV/Au толшиной 0.15-0.2 мкм с контактным сопротивлением ~ $(1-2) \times 10^{-6}$ Ом·см². 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 ~5 × 10^{17} см⁻³) и "HDS-led" ("high-dopedsubstrate", на подложке с концентрацией примеси $\sim 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).



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 SiO₂ 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. 26) осуществляется переворот гетероструктуры и ее фиксация с помошью 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 стравливания до стоп-слоя Al_{0.9}Ga_{0.1}As, который также выполняет роль "жертвенного" слоя и затем стравливается до появления контактного слоя n-GaAs. На четвертом этапе (рис. 2г) проводится текстурирование световыводящей поверхности СИД с последующим формированием просветляющего покрытия TiO, /SiO₂ 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 фотолюминесценции (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 (η) 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 фоточувствительностью 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). Beличина 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/aизмеряется в миллионных долях (parts per million, [26]). Для образца 940R эта величина оказалась в 2 раза больше: +135000 ppm·нм против +63000 ррт•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 толшины 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: $Al_xGa_{1-x}As_vP_{1-v}$ и $GaAs_xP_{1-x}$.

Рассогласование параметра решетки (da/a) между Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} и матрицей составляет ~ -2000 ррт 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 KЯ InGaAs составляет 17%, а толщина $h_{OW} = 46$ Å. Для расчета

Образец	xIn в InGaAs, %	$t_{\rm KR},$ Å	Промежуточный слой	<i>t_{sp}</i> , нм	(<i>da/a</i>) <i>h</i> , ppm·нм	<i>I</i> _{<i>PL</i>max} , отн. ед.
850R	10	30	Al _{0.2} GaAs	30	+63000	0.132
940R	14	70	GaAs	14	+135000	0.045
940SB1	17	46	$Al_{0.25}GaAsP_{0.04}$	45	+17500	0.048
940SB2	14	70	GaAsP _{0.06}	14	+78000	0.064
940SB3A	14	70	Al _{0.2} GaAs/GaAsP _{0.06}	4/10	+96500	0.056
940SB3B	14	70	Al _{0.2} GaAs/GaAsP _{0.06}	4/18	+64000	0.066

Таблица 2. Ростовые и оптические параметры экспериментальных гетероструктур МКЯ

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 In_{0.17}GaAs/Al_{0.25}GaAsP_{0.04} МКЯ (серия образцов 940SB1).

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

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

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

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

Согласно расчету оптимальная толщина компенсирующего слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ составляет 45 нм.

Для экспериментальной проверки расчета был выращен ряд гетероструктур с МКЯ $In_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$, 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_{PLmax}) от толщины промежуточного слоя (рис. 4) видно, что значение оптимальной толщины компенсирующего слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ лежит в диапазоне 45–50 нм, что полностью согласуется с расчетной оценкой, полученной с применением теории упругости сплошных сред.

Однако применение компенсирующего слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$ 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 $GaAs_{x}P_{1-x}$, который обеспечивает большую деформацию сжатия при концентрации фосфора в подрешетке пятой группы ~6%. В таком случае рассогласование da/a между GaAs_{0.94}P_{0.06} и матрицей составляет ~ -4000 ppm. Согласно расчету по твердотельной модели при замене AlGaAs на промежуточные слои GaAs $P_{0.06}$ толщина КЯ составит 70 Å (при концентрации In ~ 14%), а расчет по формуле (2) дает толщину компенсирующего слоя GaAs_{0 94}P_{0 06}, равную 14 нм. Гетероструктура СИД, выращенная на основе МКЯ In_{0.14}Ga_{0.86}As/GaAs_{0.94}P_{0.06}, обозначена как 940SB2.

Можно оценить, что компенсирующие слои на основе как $Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04}$, так и $GaAs_{0.94}P_{0.06}$ обеспечивают значение параметра решетки всей активной области с МКЯ (a_{MQW}), близкое к окружающим их в структуре $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 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]:

$$a_{MQW} = \frac{h_{QW}a_{QW} + h_{cl}a_{cl}}{h_{OW} + h_{cl}},$$
(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 Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.96}P_{0.04} составит 5.632 Å, а для GaAs_{0.94}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 In_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.20}Ga_{0.80}As/GaAsP_{0.06} (образцы 940SB3A и 940SB3B), различающиеся толщиной компенсирующего слоя GaAs_{0.94}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, η 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 × 10¹⁸ см⁻³) подложке GaAs *n*-типа проводимости. Вывод излучения из СИД критично уменьшается, и максимальная внешняя квантовая эффективность приборов в этом случае составляет ~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 η 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 доходить до 50%. К основным механизмам безызлучательной рекомбинации, которые лежат в основе падения EQE, принято относить оже-рекомбинацию, утечку



Рис. 6. Токовые зависимости внешней квантовой эффективности (а), энергоэффективности (б), выходной оптической мощности для СИД на подложке с уровнем легирования 4×10^{18} см⁻³ (HDS-led), 5×10^{17} 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	<i>EQE</i> _{max} , % (<i>I</i> , мА)	η _{max} , % (<i>I</i> , мА)
HDS-led	14.1 (~300–700)	13.6 (~200–400)
LDS-led	21.6 (150)	23.1 (114)
TCS-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 СИЛ с активной областью на основе InGaAs/AlGaAs MKЯ, излучающие на длине волны $\lambda = 940$ 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 Al_{0.20}Ga_{0.80}As/GaAs_{0.94}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 ($\lambda = 940$ нм) излучения из СИД при различном уровне легирования ростовой подложки *n*-GaAs. Показано, что уменьшение уровня донорного легирования с 4×10^{18} до 5×10^{17} 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. tions. 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

В результате применения технологии изготовле-

ния таких инвертированных СИД со встроенным металлическим отражателем продемонстрированы

значения $\eta = 39.8\%$ при токе 85 мА и *EOE* = 40.9%

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Vasilopoulou M., Fakharuddin A., Pelayo García de

Lee H.-J., Park G.-H., So J.-S. et al. // Infrared Phys.

Entropa A.G., Vasenev A. // Energy Proc. 2017. V. 132.

Kitabayashi H., Ishihara K., Kawabata Y. et al. // SEI

Arquer F. et al. // Nat. Photon. 2021. V. 15. P. 656.

https://doi.org/10.1038/s41566-021-00855-2

https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103879

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.636

при токе 275 мА.

Technol. 2021. V. 118.

Tech. Rev. 2010. V. 72. P. 71.

1.

2.

3.

4.

5.

P. 63.

- 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
- 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
- 15. *Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B.* Semiconductor Opto-Electronic. Butterworth & Co. Ltd, 1973. https://doi.org/10.1016/C2013-0-04197-7

- 16. *Pankove J.I.* Optical processes in semiconductors. Prentice-Hall. Inc., 1971.
- 17. 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
- 19. *Гуревич С.А., Федорович А.Е., Федоров А.В. //* Физика и техника полупроводников. 1991. Т. 5. С. 769.
- Abroug S., Saadallah F., Yacoubi 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
- 22. *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., Минтаиров 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
- 25. 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
- 27. Van de Walle C.G. // Phys. Rev. 1989. V. 39. № 3. P. 1871.

https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.1871

- 28. *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
- 29. *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
- 32. *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. Salii*, 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 $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ -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 4×10^{18} to $5 \times \times 10^{17}$ cm⁻³ gives an increase in the quantum efficiency of LEDs by ~ 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 (~ 40%) compared to the technology of outputting radiation through an *n*-GaAs substrate.