

УДК 621.315.5:548.55

РАСЧЕТ УПРУГОНАПРЯЖЕННОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В.Н. Светогоров^{1,@},

Р.Х. Акчурин¹,

А.А. Мармалюк²,

М.А. Ладугин²,

И.В. Яроцкая²

¹Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²ООО «Сигм плюс», Москва 117342, Россия

@Автор для переписки, e-mail: svetogorvlad@mail.ru

Выполнены расчеты составов эпитаксиальных слоев, формирующих низкоразмерные гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для лазерных диодов с длиной волны излучения 1.55 мкм. При проведении расчетов ставилась задача обеспечения максимальной высоты энергетических барьеров для эффективного ограничения носителей заряда в квантовых ямах. Наряду с эффектом размерного квантования энергии свободных носителей заряда в разрешенных зонах, учитывалось влияние упругих напряжений в эпитаксиальных слоях на смещение краев энергетических зон. Показано, что для решения поставленных задач необходимо формирование гетероструктур с напряжениями упругого сжатия в квантовой яме и напряжениями упругого растяжения в барьерных слоях. Предложена структура, включающая барьерный слой $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ толщиной 110 Å и квантовую яму $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ в слое толщиной 55 Å со степенями рассогласования параметров кристаллической решетки с подложкой InP –0.8% и +1.4%, соответственно. По результатам расчетной оценки, указанные толщины эпитаксиальных слоев не превышают критических значений, способных привести к образованию дислокаций несоответствия на гетерограницах.

Ключевые слова: лазерные диоды, квантовая яма, $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, механические напряжения, уровни размерного квантования.

CALCULATION OF ELASTICALLY STRESSED QUANTUM WELLS
HETEROSTRUCTURE $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ FOR EFFICIENT
DIODE LASERS

V.N. Svetogorov^{1,@},

R.Kh. Akchurin¹,

A.A. Marmalyuk²,

M.A. Ladugin²,

I.V. Yarotskaya²

¹Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

²JSC “Sigm Plyus”, Moscow 117342, Russia

@Corresponding author e-mail: svetogorvlad@mail.ru

The compositions of epitaxial layers forming quantum-well heterostructures $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ for laser diodes with the radiation wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ are calculated. When carrying out the calculations, the problem was to provide the maximum height of the energy barriers for effective limitation of charge carriers in the quantum wells. Along with taking care of the effects of the dimensional quantization of the energy of free charge carriers in allowed zones, the effect of elastic stress in epitaxial layers on the displacement of the edges of the energy bands were taken into account in the calculation.

It is shown that in order to solve the posed problems it is necessary to form heterostructures with elastic compression stress in a quantum well and elastic tensile stress in the barrier layers. As a result of the calculations the authors suggest a structure that includes a barrier layer of $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ with a thickness of 110 \AA and a quantum well $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ in a layer with a thickness of 55 \AA (with the mismatch between the parameters of the crystal lattice and the InP substrate – 0.8% and + 1.4 %, respectively). According to the calculation results, the indicated thicknesses of epitaxial layers do not exceed the critical values that can lead to the formation of imperfect dislocations at heterointerfaces.

Keywords: laser diodes, quantum well, $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, mechanical stress, dimensional quantization levels.

Введение

Лазерные диоды с длиной волны $1.55 \mu\text{m}$ на основе гетероструктур (ГС) $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$, используемые в настоящее время в волоконно-оптических линиях связи, весьма чувствительны к изменениям рабочей температуры. Это связано с относительно малой величиной энергетического барьера для электронов в квантовых ямах (КЯ) из-за небольшой величины разрыва зоны проводимости ($\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$) на границе с барьерными слоями [1, 2]. Разработка альтернативных четырехкомпонентных ГС для указанных лазеров, способных работать при повышенных температурах без термоэлектрического охлаждения, диктует необходимость поиска новых полупроводниковых композиций. Одним из вариантов таких композиций являются ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с упругонапряженными КЯ, характеризующиеся существенно бóльшим значением разрыва зоны проводимости ($\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$) [2]. Благодаря большой глубине потенциальной ямы для электронов, рассматриваемая ГС становится наиболее перспективной для реализации приборов с повышенной температурной стабильностью порогового тока лазерной генерации. Возможность изготовления механически сильнонапряженных эпитаксиальных слоев в таких структурах с различием параметров кристаллических решеток вплоть до 1.5% позволяет дополнительно улучшить рабочие характеристики лазерных диодов [3]. Установлено, что лазерные диоды с ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ способны достигать значения порогового тока 20 mA [4–7]. В ГС с КЯ $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ со степенью рассогласования +1% значение порогового тока равнялось 25 mA [7]. Аналогичная ГС со степенью рассогласования +1.37% и степенью рассогласования в барьерных слоях –0.6% обладала значением порогового тока 20 mA [5], что объясняют влиянием упругих напряжений, вызванных рассогласованием параметров решеток на рабочие характеристики. Следует также отметить, что в ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженными слоями легче регулировать величину энергетического зазора в КЯ при той же величине вводимых напряжений, чем в ГС $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$, благодаря малой разнице параметров кристаллической решетки GaAs и AlAs (около 0.12%).

Цель данной работы – расчет составов эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, формирующих упругонапряженные слои КЯ, и барьерных слоев (БС) в лазерных диодах с длиной волны излучения 1.55 мкм, с учетом эффекта размерного квантования энергии свободных носителей заряда и влияния упругих напряжений на смещение краев энергетических зон.

В связи с влиянием инверсии населенности носителей заряда расчет был ориентирован на длину волны излучения 1.53 мкм (величина оптического перехода 0.81 эВ). Необходимым условием при этом являлось обеспечение максимальной высоты энергетических барьеров для эффективного ограничения носителей заряда в КЯ и неперевышение в сопрягаемых слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, наращиваемых на подложки InP, критических напряжений, способных привести к образованию дислокаций несоответствия на гетерограницах.

Методика расчета

Основные параметры эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ рассчитывали по правилу Вегарда:

$$\text{par}_{\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}} = x \times \text{par}_{\text{AlAs}} + y \times \text{par}_{\text{GaAs}} \times (1 - x - y) \times \text{par}_{\text{InAs}} \quad (1)$$

Расчет составов твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ с задаваемой степенью рассогласования параметров решетки с подложкой InP проводили с использованием зависимости, характерной для твердого раствора типа $\text{A}_x\text{B}_y\text{C}_{1-x-y}\text{D}$ [8]:

$$y = A_0 + B_0 \times x \quad (2)$$

Граничные результаты расчета относятся к двум тройным твердым растворам $\text{Ga}_w\text{In}_{1-w}\text{As}$ и $\text{Al}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$, определяющим анализируемый твердый раствор. Из (2) следует, что коэффициент A_0 равен мольной доле GaAs в твердом растворе $\text{Ga}_w\text{In}_{1-w}\text{As}$, а коэффициент $B_0 = \frac{-A_0}{z}$, где z – мольная доля AlAs в твердом растворе $\text{Al}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$.

С учетом возрастания пластичности материала с температурой, оценку критических толщин эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, наращиваемых на подложку InP, осуществляли для температуры роста слоев с использованием уравнения Мэттьюса-Блэкли [9]:

$$\frac{h_c}{b} = \frac{(1 - 0.25 \times \nu)}{4 \times \pi \times (1 + \nu) \times \Delta a} \times \ln\left(\frac{h_c}{b} + 1\right), \quad (3)$$

где $\nu = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{11}}$ – коэффициент Пуассона;

b – вектор Бюргерса, равный $\frac{a}{\sqrt{2}}$ для 60° -дислокаций с учетом направления роста 100;

Δa – степень рассогласования;

h_c – критическая толщина слоя.

Параметры кристаллической решетки подложки и эпитаксиального слоя при температуре роста рассчитывали с учетом соответствующих коэффициентов термического расширения (КТР) [10]:

$$a_T = a_{T_k} + \alpha_T \times a_{T_r} \times (T - T_k), \quad (4)$$

где a_T и a_{T_k} – параметры решетки при температуре роста (T) и комнатной температуре (T_k), соответственно;

α_T – КТР при температуре роста.

В расчетах принимали $T = 903$ К [11]. В отсутствие данных по α_T необходимые значения получали решением многочлена Лагранжа II степени:

$$\alpha_T = \left(\frac{T - T_1}{T_0 - T_1} \right) \times \left(\frac{T - T_2}{T_0 - T_2} \right) \times \alpha_{T_0} + \left(\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \right) \times \left(\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} \right) \times \alpha_{T_1} + \left(\frac{T - T_0}{T_2 - T_0} \right) \times \left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \right) \times \alpha_{T_2} \quad (5)$$

где T_0, T_1, T_2 – значения температур, для которых соответствующие им значения α находили по имеющимся в литературе графическим зависимостям [12–14].

Для учета возрастания пластичности материала при температуре роста рассчитывали изменение констант упругости (C_{ij}) с температурой, применяя уравнение [15]:

$$\frac{C_{ij}}{C_{ijk}} = \exp \left(-\delta_{ij} \times \beta \times (T - T_K) \times \left(1 + \frac{\delta_{ij} \times \beta \times (T - T_K)}{2} + \frac{\delta_{ij}^2 \times \beta^2 \times (T - T_K)^2}{3} \right) \right), \quad (6)$$

где C_{ijk} – константы упругости при комнатной температуре;

$\beta = 3 \times \alpha_T$ – объемный коэффициент термического расширения при комнатной температуре;

δ_{ij} – параметр Андерсона-Грюнайтца, в первом приближении для данного расчета принимали равным 3 для всех полупроводниковых соединений [16].

Интервал значений состава твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ с $E_g = 0.81$ эВ определяли по зависимости [17]:

$$E_g^{\text{Тк}} = 0.359 + 2.093 \times x + 0.629 \times y + 0.577 \times x^2 + 0.436 \times y^2 + 1.013 \times x \times y - 2 \times x \times y \times (1 - x - y) \quad (7)$$

Изменения энергетического положения зоны проводимости ΔE^e и валентной зоны тяжелых дырок ΔE^{hh} , вызванные упругими напряжениями, рассчитывали в соответствии с [18]:

$$\Delta E^e = 2 \times a \times \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \times \Delta a \quad (8)$$

$$\Delta E^{hh} = -b \times \left(1 + 2 \times \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \times \Delta a, \quad (9)$$

где a – гидростатический деформационный потенциал для запрещенной зоны;

b – сдвиговой деформационный потенциал.

Учет эффекта размерного квантования проводили для рабочей температуры лазерного диода (300 К). Уровни размерного квантования (ε) в потенциальных ямах вычисляли согласно трансцендентному уравнению [18]:

$$\pm \left(\sqrt{\frac{m_{qw}}{m_{bar}} \times (U - \varepsilon)} \right)^{\pm 1} = \text{tg} \left(\sqrt{\frac{m_{qw} \times \varepsilon}{2}} \times \frac{L}{\hbar} \right), \quad (10)$$

где m_{qw} и m_{bar} – эффективные массы частиц в КЯ и барьере, соответственно;
 L – ширина КЯ.

Энергию оптического перехода в данной упругонапряженной КЯ рассчитывали по формуле:

$$h\nu = E_g^{qw} + \Delta E^c + \Delta E^{hh} + \varepsilon_e + \varepsilon_{hh}. \quad (11)$$

U – величины потенциальных барьеров – определяли по формулам:

$$U_e = (1-Q) \times (E_g^{bar} - E_g^{eff_{hh}}); \quad (12)$$

$$U_{hh} = Q \times (E_g^{bar} - E_g^{eff_{hh}}), \quad (13)$$

где E_g^{qw} и E_g^{bar} – ширина запрещенных зон ненапряженных КЯ и барьера;

Q – относительный разрыв валентной зоны для тяжелых дырок.

Справочные значения, использованные при расчете, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физические параметры InP, GaAs, InAs и AlAs, использованные в расчетах [7, 9, 13]

T = 300 K	InP	GaAs	InAs	AlAs
a [Å]	5.8687	5.6533	6.0583	5.6614
$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	4.60	5.73	4.52	4.28
$C_{11} \cdot 10^{10}$ [H/M ²]		5.38	4.53	5.72
$C_{12} \cdot 10^{10}$ [H/M ²]		0.34	0.38	0.28
m_{el}/m_0		0.067	0.024	0.124
m_{hh}/m_0		0.55	0.36	0.81
a [эВ]		-7.17	-5.08	-5.64
b [эВ]		-1.7	-1.8	-1.5

Результаты и их обсуждение

Интервалы значений составов твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ для различных степеней рассогласования параметров решетки с подложкой InP в интервале от -1.5% до +1.5%, рассчитанные с использованием уравнений (2), (4) и (5), и составы твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ с $E_g = 0.81$ эВ (300 К), полученные по уравнению (7), приведены на рис. 1. Искомые значения составов находятся на пересечении приведенных зависимостей.

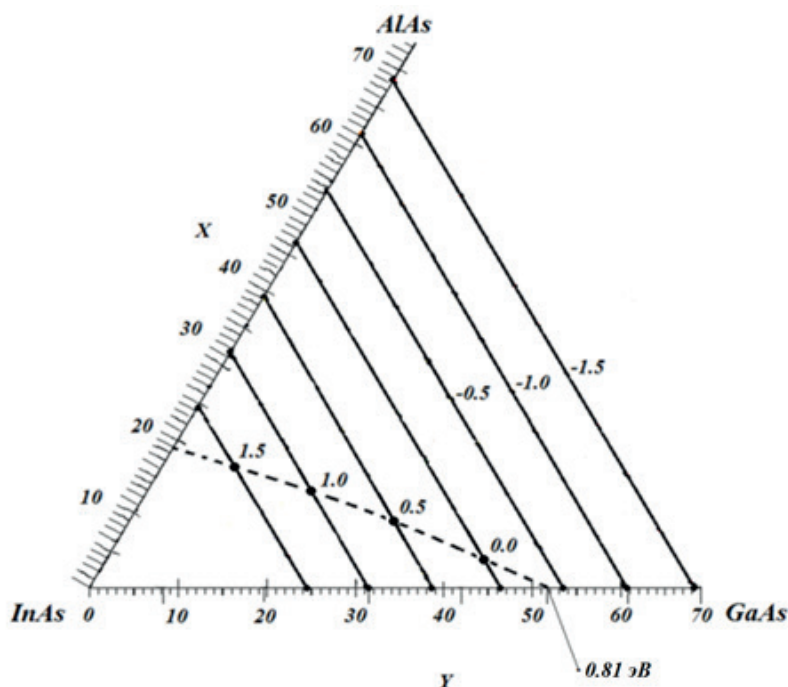


Рис. 1. Расчетная концентрационная зависимость степени рассогласования параметров решетки твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ с подложкой InP (сплошные линии) и составы, отвечающие $E_g = 0.81$ эВ (штриховая линия).

Результаты расчета показывают, что для объемного твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ значения $E_g = 0.81$ эВ могут быть достигнуты в интервале составов, отвечающих значениям $\Delta a/a$ примерно от 0 до +1.5%. При формировании ГС с КЯ необходима корректировка составов с учетом изменений, вносимых в зонную структуру упругими напряжениями и квантоворазмерными эффектами.

Необходимость исключения образования дислокаций несоответствия на гетерограницах требует расчетной оценки критических толщин эпитаксиальных слоев $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ с разной степенью решеточного рассогласования с InP. Требуемые для этого расчетные значения параметров кристаллической решетки исходных соединений, полученные с использованием скорректированных для $T = 903$ К значений КТР, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Рассчитанные значения параметров решетки и КТР для $T = 903$ К

$T = 903$ К	InP	GaAs	InAs	AlAs
$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	7.40	7.20	6.21	5.88
a [Å]	5.8949	5.6778	6.0810	5.6815

Результаты расчета критических толщин эпитаксиальных слоев показали, что для составов с $\Delta a = 1.5\%$ величина h_c составляет около 54.3 \AA , что в первом приближении определяет предельную толщину слоев, образующих КЯ. Для устранения эффекта туннелирования толщина барьерного слоя (БС) принималась равной 110 \AA . Расчет состава такого слоя проводился с учетом необходимости обеспечения максимальной высоты энергетического барьера, избегая при этом образования дислокаций несоответствия. Кроме требований максимального напряжения, вызванного несогласованием параметров решеток, и отсутствия дислокаций, существует несколько условий для качественного барьерного слоя. Недостатком всех алюминийсодержащих полупроводниковых лазеров является сродство алюминия к кислороду. Повышение концентрации кислорода провоцирует высокую скорость поверхностной рекомбинации, приводит к низкой мощности и структурному несовершенству, увеличению значения порогового тока. Основное предположение о влиянии кислорода состоит в том, что кислород, как атом примеси, приводит к сильному увеличению безызлучательной рекомбинации электронов и дырок. Это провоцирует большой ток неосновных носителей заряда, так называемый ток утечки, что дает в результате более высокое значение порогового тока.

Зададим значение ширины запрещенной зоны, равное 1.24 эВ , и соотнесем его с составом барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$. По результатам расчета, требуемым условиям отвечает состав $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$, имеющий степень несогласования решетки с подложкой $\text{InP } \Delta a = -0.8\%$.

Стоит отметить, что результаты, приведенные на рис. 1, получены для объемного материала. При росте упругонапряженных квантоворазмерных слоев под действием эффекта размерного квантования и энергетических сдвигов зоны проводимости и валентной зоны происходит увеличение величины оптического перехода, что следует из уравнений (8) и (9). Высказанное предположение подтверждается при подстановке полученных результатов в формулы (8)–(14). Результат представлен в табл. 3.

Таблица 3. Рассчитанные значения энергии оптического перехода и соответствующей длины волны при различных степенях несогласования параметра решетки КЯ с подложкой InP

Δa БС, %	Δa КЯ, %	ΔE , эВ	λ , мкм
-0.8	0.5	0.962	1.289
-0.8	1.0	0.969	1.280
-0.8	1.5	0.976	1.271

Из расчета величины оптического перехода выявлено, что при уменьшении мольной доли AlAs и увеличении мольной доли GaAs происходит уменьшение величины оптического перехода и, соответственно, увеличение длины волны излучения. С учетом данной тенденции проведена корректировка расчетов состава квантовой ямы $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ для искомой длины волны излучения. На рис. 2 показаны составы, отвечающие $\Delta E = 0.81 \text{ эВ}$, с учетом вышеуказанных эффектов. Видно, что необходимым значениям энергии оптического перехода отвечают составы эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, у которых степень несогласования параметра решетки с подложкой InP составляет $1.3\text{--}1.5\%$.

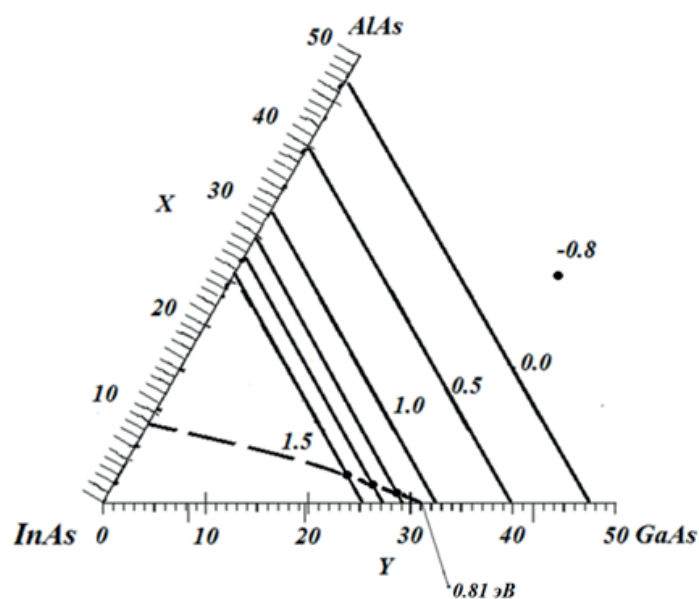


Рис. 2. Составы эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, отвечающие $\Delta E = 0.81$ эВ (штриховая линия), скорректированные с учетом влияния упругих напряжений и квантоворазмерных эффектов.

Повторная оценка критических толщин эпитаксиальных слоев для скорректированных составов $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ дала результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4. Расчетные значения критических толщин эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ для различных степеней рассогласования с подложкой InP

Δa БС, %	Δa КЯ, %	h_c , Å
-0.8	1.3	62.3
-0.8	1.4	60.7
-0.8	1.5	53.8

По результатам расчета видно, что для скорректированного состава слоев с $\Delta a = 1.5\%$ критическая толщина уменьшилась до 53.8 \AA , что меньше ранее принятой толщины слоя КЯ (55 \AA). Исходя из этого, в качестве материала КЯ выбран состав $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$, отвечающий условию $\Delta E = 0.81$ эВ и характеризующийся величиной $\Delta a = 1.4\%$.

Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что предъявляемым требованиям отвечает ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с БС $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ и КЯ состава $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ с толщинами слоев 110 и 55 \AA , соответственно.

Заключение

С учетом эффектов размерного квантования энергии свободных носителей заряда в разрешенных зонах и влияния упругих напряжений на смещение краев энергетических зон выполнен расчет составов эпитаксиальных слоев квантоворазмерной гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для лазерных диодов с длиной волны излучения 1.55 мкм . Расчет составов проводили для степеней рассогласования параметров кристаллической решетки эпитаксиальных слоев с подложкой InP в интервале от -1.5% до $+1.5\%$ при температуре роста с целью нахождения параметров, обеспечивающих максимальную высоту энерги-

ческих барьеров для КЯ. По результатам расчетов предложена структура, включающая барьерный слой $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ (степень рассогласования -0.8%) толщиной 110 \AA и КЯ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ (степень рассогласования $+1.4\%$) в слое толщиной 55 \AA . Оценка критических толщин образования дислокаций в слоях рассчитанного состава, произведенная по модели Мэтьюса-Блэкли, показала, что для барьерного слоя и КЯ они составляют 125 \AA и 61 \AA , соответственно. Толщины соответствующих эпитаксиальных слоев в предложенной структуре не превышают полученных значений.

Литература / References:

1. Qing K., Shaoyang T., Dan L., Ruikang Z., Wei W., Chen J. High power 1550 nm InGaAsP/InP lasers with optimized carrier injection efficiency // Proceed. of the 14th Int. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOON). Nanjing, China. July 3, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2015. P. 1–3.
2. Kuo Y.K., Yen S.H., Yao M.W., Chen M.L., Liou B.T. Numerical study on gain and optical properties of AlGaInAs, InGaAs, and InGaAsP material systems for 1.3- μm semiconductor lasers // Optic Commun. 2007. V. 275. P. 156–164.
3. Gladyshev A.G., Novikov I.I., Karachinsky L.Y., Denisov D.V., Egorov A.Y., Kurochkin A.S., Blokhin S.A., Blokhin A.A., Nadtochiy A.M. Optical properties of InGaAs/InGaAlAs quantum wells for the 1520–1580 nm spectral range // Semiconductors. 2016. V. 50. № 9. P. 1186–1190.
4. Veselov D.A., Shashkin I.S., Bakhalov K.V., Lyutetskiy A.V., Pikhtin N.A., Rastegaeva M.G., Slipchenko S.O., Bechvay E.A., Strelets V.A., Shamakhov V.V., Tarasov I.S. On the problem of internal optical loss and current leakage in laser heterostructures based on AlGaInAs/InP solid solution // Semiconductors. 2016. V. 50. № 9. P. 1225–1230.
5. Liou B.T., Yen S.H., Yao M.W., Chen M.L., Kuo Y., Chang S.H. Numerical study for 1.55- μm AlGaInAs/InP semiconductor lasers // Proceed. of SPIE. 2006. V. 6368. 636814. doi: 10.1117/12.685959
6. Hou L., Avrutin E.A., Haji M., Dylewicz R., Bryce A.C., Mars J.H. 160 GHz passively mode-locked AlGaInAs 1.55 μm strained quantum-well lasers with deeply etched intracavity mirrors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2013. V. 19. № 4.
7. Takemasa K., Munakata T., Kobayashi M., Wada H., Kamijoh T. 1.3- μm AlGaInAs–AlGaInAs strained multiple-quantum-well lasers with a p-AlInAs electron stopper layer // IEEE Photonics Technology Lett. 1998. V. 10. № 4. P. 495–497.
8. Springer Handbook of Electronic and Photonic materials / Eds. S. Kasap, P. Capper. Springer Science+Business Media, Inc., 2006. 1438 p.
9. Jia H., Yin J., Zhu T., Rao L. Study of strain-compensated for 1310 nm AlGaInAs/InP multi-quantum-well laser // Proceed. of the 15th Int. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOON 2016). Hangzhou, China. September 24–27, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2016. P. 760–763.
10. Vurgaftman I., Meyer J.R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. № 11. P. 5916–5875.
11. Яковлева Н.И., Болтарь К.О., Седнев М.В. Исследование фотодиодных лавинных элементов матричных фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 374–382.

Yakovleva N.I., Boltar K.O., Sednev M.V. Investigations of ADP FPA photodiodes formed in InGaAs heterostructures // *Uspekhi prikladnoi fiziki (Advances in Applied Physics)*. 2014. V. 2. № 4. P. 374–382. (in Russ.).

12. Soma T., Satoh J., Matsuo H. Thermal expansion coefficient of GaAs and InP // *Solid State Commun.* 1982. V. 42. № 12. P. 889–892.

13. Adhikari J., Kumar A. Study of structural and thermodynamic properties of GaAs and InAs using Monte Carlo simulations // *Molecular Simulation*. 2007. V. 33(8). P. 623–628.

14. Adachi S. GaAs, AlAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: Material parameters for use in research and device applications // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58(3). P. 1–29.

15. Liu Q., He Q. Elastic constants for various classes of solids at high temperature // *Acta Physica Polonica. Series A*. 2007. V. 112. № 1. P. 69–76. doi: 10.12693/APhysPolA.112.69

16. Ledbetter H.M., Reed R.P. Elastic properties of metals and alloys. Naval Research Laboratory, Colorado, 1973.

17. Zhang Y., Ning Y., Zhang L., Zhang J., Zhang J., Wang Z., Zhang J., Zeng Y., Wang L. Design and comparison of GaAs, GaAsP and InGaAlAs quantum-well active regions for 808-nm VCSELs. // *Optics Express*. 2011. V. 19. № 13. P. 12569–12581.

18. Максимов М.В., Крестников И.Л., Иванов С.В., Леденцов Н.Н., Сорокин С.В. Расчет уровней размерного квантования в напряженных ZnCdSe/ZnSe квантовых ямах // *Физика и техника полупроводников*. 1997. Т. 31. № 8. P. 939–943.

Maksimov M.V., Krestnikov I.L., Ivanov S.V., Ledentsov N.N., Sorokin S.V. Calculation of the size-quantization levels in strained ZnCdSe/ZnSe quantum wells // *Semiconductors*. 1997. V. 31. № 8. P. 800–803.

Об авторах:

Светогоров Владимир Николаевич, аспирант кафедры материаловедения и технологии функциональных материалов и структур Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119435, Россия, Москва, улица Малая Пироговская, д. 1).

Акчурин Рауф Хамзинович, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии функциональных материалов и структур Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119435, Россия, Москва, улица Малая Пироговская, д. 1).

Мармалюк Александр Анатольевич, доктор технических наук, заместитель директора по науке ООО «Сигм плюс» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Россия, Москва, улица Введенского, д. 3).

Ладугин Максим Анатольевич, кандидат технических наук, технический директор ООО «Сигм плюс» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Россия, Москва, улица Введенского, д. 3).

Яроцкая Ирина Валентиновна, кандидат технических наук, инженер-технолог ООО «Сигм плюс» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Россия, Москва, улица Введенского, д. 3).

About the authors:

Vladimir N. Svetogorov, Postgraduate Student, Chair of Material Science and Technology of Functional Materials and Structures, M. V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (1, Malaya Pirogovskaya St., Moscow 119435, Russia).

Rauf Kh. Akchurin, Dr. Sc. (Engineering), Professor of Chair of Material Science and Technology of Functional Materials and Structures, M. V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (1, Malaya Pirogovskaya St., Moscow 119435, Russia).

Alexander A. Marmalyuk, Dr. Sc. (Engineering), Deputy manager in science, JSC «Sigm Plyus» (3, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia).

Maxim A. Ladugin, Candidate of Engineering Sciences, Technical manager, JSC «Sigm Plyus» (3, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia).

Irina V. Yarotskaya, Candidate of Engineering Sciences, Manufacturing engineer, JSC «Sigm Plyus» (3, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia).