

# Оптимизация оптических свойств длинноволнового лазерного диода на квантовой яме GaInNAs

М.С.Альяс, А.Н.Аль-Омари, Ф.Маскурий, Ф.Файз, С.М.Митани

*Исследованы вопросы оптимизации оптических свойств лазера на основе напряженной квантовой ямы GaInNAs/GaAs, включающие теорию многочастичных эффектов и параметр изгиба. Расчетные значения энергий перехода и параметр изгиба GaInNAs подгоняются к данным, полученным из спектра фотолюминесценции квантовой ямы GaInNAs. Теоретические результаты для спектра фотолюминесценции и характеристики лазера (свет, ток, напряжение) демонстрируют высокую степень согласия с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** GaInNAs, лазер с выводом излучения вдоль структуры, лазерный диод.

## 1. Введение

Длинноволновые лазерные диоды, в том числе излучающие на 1.3 мкм, привлекают исследователей, поскольку эта длина волны широко используется в качестве длины волны встречной передачи в оптоволоконных сетях, таких как Fiber-to-the-Home (FTTH), Radio-over-Fiber (RoF), и в оптических соединениях. Обычно длинноволновые лазерные диоды выращиваются на материале, основанном на InP, например в материальной системе InGaAsP/InP с квантовыми ямами (КЯ). Однако лазер на КЯ InGaAsP/InP требует термического охлаждения из-за его низкой (около 60 К) характеристической температуры [1], что приводит к потребности в более дорогостоящих компонентах для системы оптической сети. Низкая характеристическая температура таких лазеров вызвана плохим ограничением электронов в зоне проводимости из-за смещения ее края ( $\Delta E_c = 0.4 \Delta E_g$ ) [2]. Для сравнения, лазерный диод на основе GaAs имеет более высокую характеристическую температуру, однако он обычно используется на более коротких длинах волн (от 0.85 до 1 мкм). Для того чтобы преодолеть ограничения, присущие КЯ InGaAsP/InP, в последние годы проводились исследования длинноволнового лазерного диода на основе GaAs в системе новых материальных систем, таких как высоконапряженная КЯ InGaAs/GaAs КЯ, квантовая точка InAs/GaAs, КЯ GaInNAs/GaAs и КЯ GaInNAsSb/GaAs [3]. В материале КЯ GaInNAs/GaAs было продемонстрировано наличие существенной зоны проводимости ( $\Delta E_c = 0.79 \Delta E_g$ ) [4], что обеспечивает значительное ограничение электронов и повышает характеристическую температуру лазерного диода GaInNAs до

138 К [5]. Это позволит создать неохлаждаемый лазерный диод – недорогой и термически стабильный компонент оптической сети.

В настоящей работе со ссылкой на производимые реальные лазерные устройства теоретически исследованы оптимизированные оптические свойства лазера на основе КЯ GaInNAs/GaAs, причем при его детальном исследовании учитываются теория многочастичных эффектов и подогнанное значение параметра изгиба. Насколько нам известно, до сих пор опубликовано только несколько работ по теоретическим исследованиям лазерного диода GaInNAs. Однако они посвящены в основном лазерам на основе VCSEL технологии [6, 7], а не лазеру с выводом излучения вдоль структуры (EEL), рассмотренному в настоящей статье.

## 2. Эксперимент и модель устройства

### 2.1. Структура устройства и его изготовление

Исследуемые образцы GaInNAs выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) в реакторе Riber 32P с использованием твердотельных источников Ga, As и In и радиочастотного плазменного источника N. После роста образцы подвергались пост-отжигу при 700 °C в течение 80 мин при избыточном давлении As. По данным фотолюминесценции (ФЛ) образец содержит КЯ  $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.014}\text{As}_{0.986}$  толщиной  $d_{\text{QW}} = 7$  нм, встроенную между барьерами из GaAs толщиной 85 (верхний барьер) и 170 нм (нижний барьер). Все слои являются легированными и выращенными на подложке n-GaAs (001) (рис.1).



Рис.1. Схема поперечного сечения образца КЯ GaInNAs.

\* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

M.S.Alias, F.Maskuriy, F.Faiz, S.M.Mitani. Advanced Physical Technologies Laboratory, Telekom Malaysia Research & Development, Lingkaran Teknokrat Timur, 63000 Cyberjaya, Selangor, Malaysia; e-mail: sharizal@tmrnd.com.my  
A.N.Al-Omari. Electronic Engineering Department, Hijawi Faculty for Engineering Technology, Yarmouk University, Irbid 21163, Jordan

Верхний слой GaAs
Покровный слой AlGaAs
Спейсер AlGaAs
Барьер GaAs
КЯ GaInNAs
Барьер GaAs
Спейсер AlGaAs
Покровный слой AlGaAs
Буфер GaAs
Подложка GaAs

Рис.2. Схема поперечного сечения структуры лазерного диода GaInNAs.

Лазерный диод состоит из намеренно нелегированной КЯ  $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{N}_{0.01}\text{As}_{0.99}$  толщиной 8.8 нм, встроенной между барьерами из GaAs толщиной 150 нм каждый. Верхний и нижний разделительные слои (спейсеры) образованы нелегированным  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  толщиной 200 нм, покровный слой n-типа толщиной 1.3 мкм состоит из  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ , градиентно легированного Si с концентрацией от  $3.4$  до  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (снизу вверх); покровный слой p-типа толщиной 1.3 мкм состоит из  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ , градиентно легированного Be с концентрацией от  $1$  до  $3.4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (снизу вверх). Эпитаксиальная многослойная структура покрыта верхним слоем (150 нм) из сильно легированного бериллием ( $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) GaAs (рис.2). Изготовление лазерного диода GaInNAs начиналось с истончения подложки и последующей металлизации нижнего (n) и верхнего (p) омических контактов путем напыления AuGe/Au и Au/AuZn/Au соответственно. Нижний n-контакт формировался прямым осаждением, а для получения верхнего p-контакта использовались фотолитографическое формирование рисунка, мокрое химическое травление, пассивация и процесс отрыва. После завершения обработки с помощью скола формировались зеркальные грани. Измерения проводились при комнатной температуре в импульсном режиме (длительность импульса 1 мкс, скважность 0.1 %). Ватт-амперные (ВтАХ) и вольт-амперные (ВАХ) характеристики измерялись при прецизионном изменении входного тока (с использованием анализатора параметров полупроводников). Световой выход регистрировался Ge-фотоприемником, который также соединялся с анализатором параметров полупроводников. Для измерения спектра лазерный пучок вводился в оптическое волокно, соединенное с оптическим анализатором спектра. Фотолуминесценция наблюдалась при охлаждении образца, возбуждаемого излучением Ar-лазера (514.5 нм), до 17 К и регистрировалась Ge-детектором, охлаждаемым жидким азотом.

## 2.2. Модель устройства

Численное моделирование осуществлялось с помощью программного пакета Photonics Integrated Circuit Simulator 3D (PICS3D), который представляет собой физически обоснованный самосогласованный симулятор полупроводникового лазера. Коэффициент оптического усиления КЯ GaInNAs рассчитывался с использованием увеличенной за счет кулоновского взаимодействия спектральной функции усиления с целью, как показано ниже [8], включения многочастичного эффекта в модель лазера:

$$g(\hbar\omega) = \text{Re} \left\{ \int_{E_{g0}}^{\infty} \frac{g_0(E_{cv})}{1 - q_1(E_{cv}, \hbar\omega)} \left[ 1 - i \frac{E_{cv} - \hbar\omega}{\Gamma_{cv}} \right] \times L(\hbar\omega - E_{cv}) dE_{cv} \right\}, \quad (1)$$

где

$$q_1(E_{cv}, \hbar\omega) = -i \frac{a_0 E_0 E_{cv}}{\pi \kappa |M_{ji}(E_{cv})|} \int_0^{\infty} dk' k' \frac{|M_{ji}(E_{cv})|}{E_{cv}'} \times \frac{f_c(E_{cjk'}) + f_h(E_{vjk'}) - 1}{\Gamma_{cv} + i(E_{cv} - \hbar\omega)} \Theta(k, k'); \quad (2)$$

$$\Theta(k, k') = \int_0^{2\pi} \frac{1 + C_{pl} \kappa a_0 q^2 (32\pi N_{2D})^{-1}}{1 + q\kappa + C_{pl} \kappa a_0 q k^3 (32\pi N_{2D})^{-1}} d\theta; \quad (3)$$

$$q^2 = k^2 + k'^2 - 2kk' \cos \theta; \quad (4)$$

$\theta$  – угол между векторами  $k$  и  $k'$  в плоскости слоев; фактор  $1(1 - q_1)^{-1}$  отображает кулоновское усиление в аппроксимации Паде [8, 9];  $a_0 = 4\pi \hbar^2 \epsilon_b \epsilon_0 / (e^2 m_{rj})$  – боровский радиус экситона;  $E_0 = \hbar^2 / (2m_{rj} a_0^2)$  – соответствующая ридберговская энергия;  $E_{cv}(k) = E_g + \Delta E_g + E_{cjk} + E_{vik}$ ;  $C_{pl}$  – безразмерная константа, обычно составляющая 1–4;  $\kappa$  – обратная длина экранирования для электронов и дырок, локализованных в квантовой яме;  $\epsilon_b$  – статическая фоновая диэлектрическая постоянная в области КЯ;  $N_{2D} = n_c d_{QW}$  – двумерная плотность носителей в КЯ.

При получении материальных параметров для системы  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}_{1-y}\text{As}_y$  рассчитывается линейная интерполяция между параметрами (за исключением запрещенной зоны) соответствующих бинарных полупроводников. Физический параметр  $P$  интерполяционного выражения задается как

$$P_{\text{GaInNAs}} = xyP_{\text{GaAs}} + x(1-y)P_{\text{GaN}} + (1-x)yP_{\text{InAs}} + (1-x)(1-y)P_{\text{InN}}, \quad (5)$$

где  $x$  и  $y$  – содержание Ga и As соответственно. Зависящая от температуры ширина запрещенной энергетической зоны GaInNAs с учетом изгиба запрещенных зон GaNAs и InGaAs выражается как [10]

$$E_{g\text{GaInNAs}} = xyE_{g\text{GaAs}} + x(1-y)E_{g\text{GaN}} + (1-x)yE_{g\text{InAs}} + (1-x)(1-y)E_{g\text{InN}} + xy(1-y)b_{\text{GaNAs}} + xy(1-x)b_{\text{InGaAs}} - 5.5 \times 10^{-4} \left[ \frac{T^2}{T + 225} - \frac{300^2}{300 + 225} \right], \quad (6)$$

где  $b_{\text{GaNAs}}$  и  $b_{\text{InGaAs}}$  – параметры изгиба GaNAs и InGaAs;  $T$  – абсолютная температура.

Материальные параметры бинарных полупроводников, используемые в этом исследовании, такие как параметры Латтинжера, коэффициенты упругой деформации, потенциал гидростатической деформации, потенциал сдвиговой деформации, эффективные массы электронов и дырок и постоянная решетки, приведены в табл.1.

Табл. 1. Материальные параметры бинарных полупроводников.

Параметр	GaAs	InAs	GaN	InN	
Постоянная решетки $a_0$ (Å)	5.65325	6.0584	4.5	4.98	
Потенциал гидростатической деформации для зоны проводимости $a_c$ (эВ)	-9.77	-6.0	-7.4	-3.35	
Потенциал гидростатической деформации для валентной зоны $a_v$ (эВ)	1.16	1.00	-	-	
Потенциал сдвиговой деформации $b$ (эВ)	-1.7	-1.8	-2.2	-1.2	
Коэффициенты упругой деформации: $C_{11}$ ( $10^{11}$ дин/см <sup>2</sup> )	11.9	8.33	2.93	1.87	
	$C_{12}$ ( $10^{11}$ дин/см <sup>2</sup> )	5.38	4.53	1.59	1.25
Параметры Латтинжера: $\gamma_1$	6.85	20.4	2.67	3.72	
	$\gamma_2$	2.1	8.3	0.75	1.26
	$\gamma_3$	2.9	9.1	1.10	1.63
Эффективная масса электрона $m_e/m_0$	0.064	0.023	0.15	0.12	
Эффективная масса тяжелой дырки $m_{hh}/m_0$	0.50	0.40	0.80	0.80	
Эффективная масса легкой дырки $m_{lh}/m_0$	0.091	0.208	0.21	0.19	
Энергия спин-орбитального расщепления $\Delta$ (В)	0.34	0.43	0.017	0.006	
Ширина запрещенной зоны $E_g$ (эВ)	1.424	0.417	3.299	0.735	

### 3. Результаты и их обсуждение

Расчетные спектры ФЛ для КЯ GaInNAs при различных значениях параметра изгиба GaAsN (от -16.5 до -18.5 эВ) и постоянном параметре изгиба InGaAs (-4.77 эВ) [11] показаны на рис.3. С увеличением  $b_{GaAsN}$  пиковая интенсивность ФЛ растет с  $2.6 \times 10^{27}$  до  $3.0 \times 10^{27}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>·эВ<sup>-1</sup>, а максимум спектра смещается в красную сторону с 1.285 до 1.315 мкм соответственно. Кроме того, полуширина (FWHM) спектра ФЛ уменьшается с примерно 29 нм до 23 нм. Уширение спектра ФЛ обусловлено вхождением азота, ухудшающего кристалличность КЯ GaInNAs, в которой азот мог бы диффундировать наружу и вызывать расслоение фаз в процессе роста кристалла.

На рис.4 представлены результаты теоретического анализа материального коэффициента усиления КЯ GaInNAs как функции длины волны при различных параметрах изгиба GaNAs и плотности инжекции носителей  $1.5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Интересующая рабочая длина волны (1.3 мкм) достигается, когда  $b_{GaNAs}$  составляет от -17.0 до -17.5 эВ. Хотя параметр изгиба GaNAs варьируется, пик материального усиления КЯ GaInNAs примерно одинаков (около 2500 см<sup>-1</sup>) для всех  $b_{GaNAs}$  в диапазоне от -16.5 до -18.5 эВ. Это проверяется путем вычисления пика материального усиления для различных параметров изгиба GaNAs как функции плотности инжекции носителей для КЯ GaInNAs (рис.5). Видно, что поведение пиков усиления при всех значениях  $b_{GaNAs}$  и заданной плотности инжектируемых носителей одинаково, т.к. состав КЯ GaInNAs неизменен (66% Ga, 34% In, 1.4% N и 98.6% As).

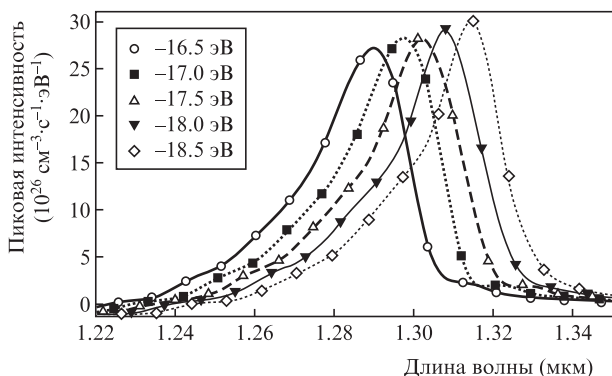


Рис.3. Расчетные спектры ФЛ КЯ GaInNAs при различных значениях  $b_{GaAsN}$ .

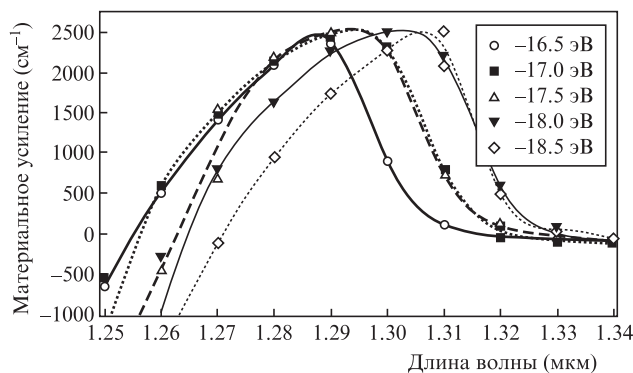


Рис.4. Спектры материального усиления КЯ GaInNAs при различных значениях  $b_{GaNAs}$ .

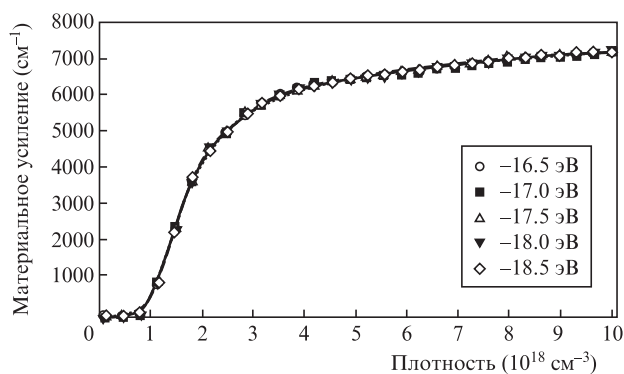


Рис.5. Пиковое материальное усиление как функция плотности инжектируемых носителей для КЯ GaInNAs при различных значениях  $b_{GaNAs}$ .

Для того чтобы аналитически определить точное значение  $b_{GaNAs}$  для выращенных КЯ GaInNAs упомянутого выше состава, строятся зависимости пиковой длины волны и пиковой интенсивности расчетного спектра ФЛ как функций  $b_{GaNAs}$  (рис.6). Из экспериментальных измерений ФЛ следует, что длина волны излучения выращенных КЯ GaInNAs составляет около 1.2985 мкм. Отложив это значение на рис.6, видим, что параметр изгиба GaNAs составляет примерно -17.3 эВ. Полученное значение находится в диапазоне сообщавшихся значений  $b_{GaNAs}$ , которые в зависимости от состава материала GaInNAs равны от -16.9 до 25 эВ [11, 12].

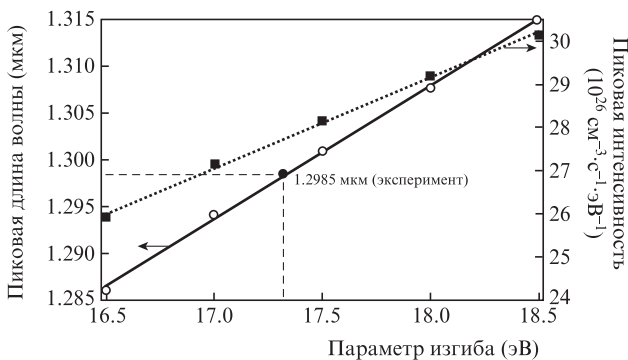


Рис.6. Пиковая длина волны и пиковая интенсивность ФЛ как функции модуля параметра изгиба GaNAs.

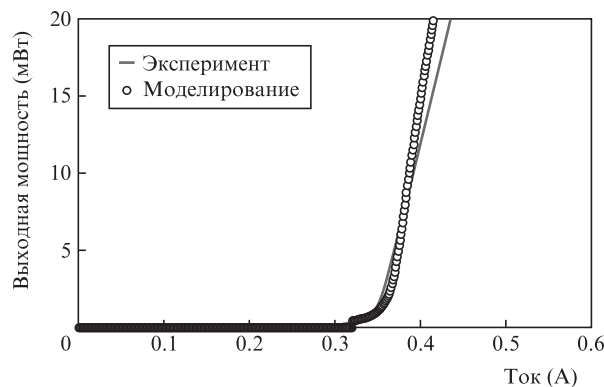


Рис.8. Ватт-амперные характеристики лазерного диода GaInNAs.

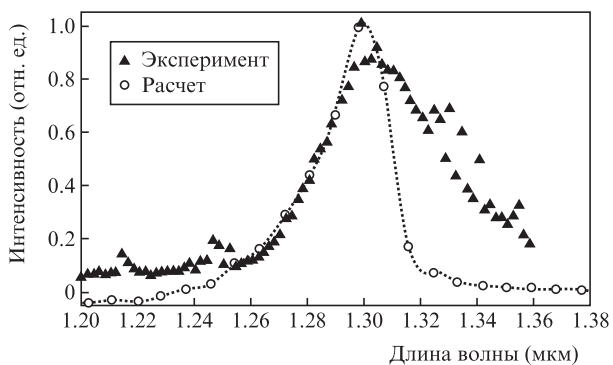


Рис.7. Расчетный и экспериментальный спектры ФЛ КЯ GaInNAs.

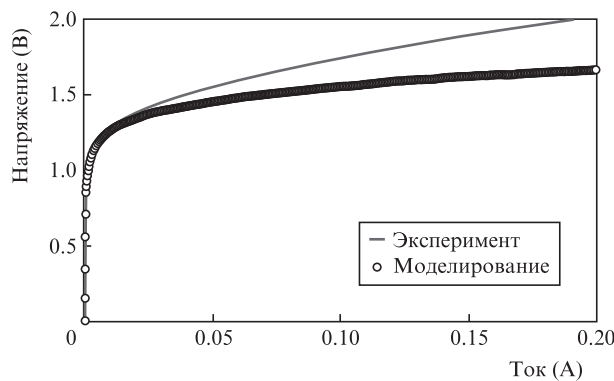


Рис.9. Вольт-амперные характеристики лазерного диода GaInNAs.

Полученные теоретические значения параметров изгиба GaNAs и InGaAs затем включаются в расчет спектра ФЛ с использованием реального спектра ФЛ образца. На рис.7 сравниваются расчетный и измеренный спектры ФЛ выращенного образца КЯ GaInNAs. Налицо высокая степень соответствия между теоретическим и экспериментальным спектрами ФЛ. Длина волны излучения КЯ GaInNAs составляет 1.2985 мкм. Однако уширение спектров разное: полуширина измеренного спектра ФЛ значительно больше, чем у расчетного. Это ожидаемо, т. к. теоретическое исследование не учитывает влияния ростового качества, которое является одной из трудностей при выращивании материала GaInNAs методом МПЭ или металл-органического химического осаждения из газовой фазы (МОСVD). Тем не менее спектры ФЛ демонстрируют схожее поведение в области коротких длин волн. В длинноволновой области спектры различаются, т. к. увеличение содержания азота в материальной системе GaInNAs будет ухудшать ростовое качество из-за малого атомного радиуса и высокой электроотрицательности атомов азота [13].

После того как оптические характеристики КЯ GaInNAs были оптимизированы и результаты компьютерного анализа подогнаны к данным экспериментальных измерений, был проведен анализ характеристик изготовленного лазерного диода GaInNAs. На рис.8 представлены ВtАХ модельного и изготовленного лазерных диодов с полосковым контактом шириной 50 мкм и длиной резонатора 740 мкм. ВtАХ подогнанной теоретической модели GaInNAs-лазера очень хорошо согласуется с характеристикой реально изготовленного прибора. При температуре 300 К полученный пороговый ток составляет около 0.33 А. С учетом геометрии активной области лазерного диода GaInNAs пороговая плотность тока равна пример-

но 0.88 кА/см<sup>2</sup>. Низкие значения порогового тока и пороговой плотности носителей указывают на отличное качество сконструированной и выращенной КЯ GaInNAs.

На рис.9 показаны расчетная и экспериментальная ВАХ лазерного диода GaInNAs. Напряжение включения составляет примерно 0.97 В, что соответствует ширине запрещенной зоны КЯ GaInNAs на 1.2985 мкм. Наклон кривой  $V(I)$ , который определяется последовательным сопротивлением устройства, составляет для расчетной модели около 2.82 Ом. Это меньше, чем последовательное сопротивление у изготовленного лазера, равное примерно 3.67 Ом. Несовпадение обусловлено влиянием фактического ростового качества лазерной структуры (возникновение дефектов в растущем материале КЯ GaInNAs) и изготовлением металлизированных контактов. Хотя последовательные сопротивления модельного и изготовленного лазеров несколько различаются, более важным является хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений напряжения включения, поскольку они определяют энергию запрещенной зоны КЯ GaInNAs.

Выходные спектры для модельного и изготовленного лазерных диодов GaInNAs показаны на рис.10. Длина волны генерации изготовленного лазера составляет около 1.261 мкм, тогда как у расчетного лазера она лежит вблизи 1.293 мкм. Коротковолновое смещение длины волны изготовленного устройства связано с пост-ростовым отжигом, которому подвергается реальный образец. Такое смещение спектра, индуцированное термическим отжигом, связано, в первую очередь, с перестройкой локальных конфигураций азотных связей и со взаимной диффузией между атомами галлия и индия через интерфейсы КЯ GaInNAs [14]. Большая длина волны излучения расчетного лазера обусловлена тем, что модель устройства осно-

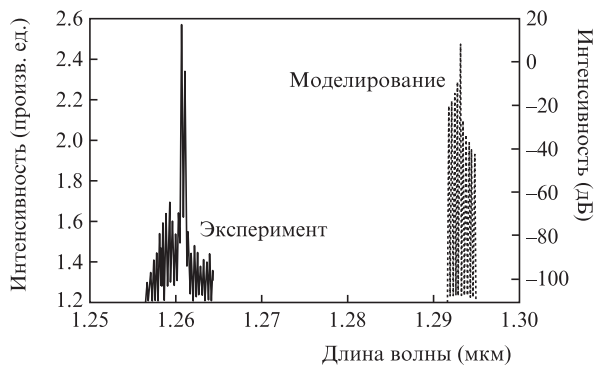


Рис.10. Спектры излучения лазерного диода GaInNAs.

вана на идеально выращенном лазерном диоде GaInNAs, который не имеет недостатков, обусловленных процессами роста кристалла.

#### 4. Выводы

Представлены результаты комплексного исследования теоретических оптических свойств лазерного диода GaInNAs, необходимых для функционирования длинноволнового полупроводникового лазера. Оптимизированный на основе подгонки параметра изгиба GaNAs и рассмотрения теории многочастичных эффектов спектр фотолюминесценции позволил найти материальные параметры, обеспечившие хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных для лазерного диода GaInNAs. Это

может быть полезным для дальнейшей разработки и исследования GaInNAs-устройств, т. к. физика материала GaInNAs все еще находится на начальной стадии развития.

Авторы благодарят Telekom Malaysia за финансирование научных исследований и CHREA-CNRS за научное сотрудничество в области эпитаксиальных многослойных структур.

1. Wei J., Xia F., Li C., Forrest S.R. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 597 (2002).
2. Zhang Y.G., Chen J.X., Chen Y.Q., Qi M., Li A.Z., Frojdh K., Stoltz B. *J. Crystal Growth*, **227**, 329 (2001).
3. Bank S.R., Bae H., Goddard L.L., Yuen H.B., Wistey M.A., Kudrawiec R., Harris J.S. Jr. *IEEE J. Quantum Electron.*, **43**, 773 (2007).
4. Hetterich M., Dawson M.D., Egorov A.Y., Bernklau D., Riechert H. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 1030 (2000).
5. Qu Y., Liu C.Y., Yuan S. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5149 (2004).
6. Sarzala R.P., Nakwaski W. *IEE Proc. Optoelectron.*, **151**, 417 (2004).
7. Sarzala R.P. *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 113 (2007).
8. Chow W.W., Koch S.W., Sargent M. *Semiconductor-Laser Physics* (Berlin: Springer, 1994).
9. Haug H., Koch S.W. *Phys. Rev. A*, **4**, 1887 (1989).
10. Suo Y.K., Yen S.H., Yao M.W., Chen M.L., Liou B.T. *Opt. Commun.*, **275**, 156 (2007).
11. Vurgaftman I., Meyer J.R., Mohan L.R.R. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
12. Kimura A., Paulson C.A., Tang H.F., Kuech T.F. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1489 (2004).
13. Yilmaz M., Sun Y., Balkan N., Ulug B., Ulug A., Sapanen M., Reentila O., Mattila M., Fontaine C., Arnoult A. *Microelectr. J.*, **40**, 406 (2009).
14. Liu H.F., Xiang N., Zhou H.L., Chua S.J., Yang P., Moser H.O. *J. Crystal Growth*, **301–302**, 548 (2007).