

УДК 621.315.592

Проектирование дизайна туннельно-связанных квантовых ям для создания модулятора по схеме Маха–Цендера

© А.И. Бобров¹, Н.В. Байдусь¹, С.В. Хазанова², А.П. Горшков², К.В. Сидоренко¹, А.Н. Шушунов¹, Н.В. Малехонова¹, А.В. Нежданов², А.В. Здорвейцев¹, В.Н. Трушин¹, Е.В. Убийвовк³, А.И. Охалкин⁴, Д.С. Клементьев², З.Ш. Гасайниев⁵, А.В. Харламов⁶

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, 603022 Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022 Нижний Новгород, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁵ АО Научно-производственное предприятие „Салют“, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁶ ООО „Т8“, 107076 Москва, Россия

E-mail: khazanova@phys.unn.ru

Поступила в Редакцию 18 июня 2022 г.

В окончательной редакции 25 июня 2022 г.

Принята к публикации 25 июня 2022 г.

Предложена методика прогнозирования вариации показателя преломления в InGaAlAs туннельно-связанных квантовых ямах под действием электрического поля. Продемонстрировано применение комплекса математических и экспериментальных исследований для оптимизации дизайна гетеросистем при проектировании полупроводникового модулятора по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера.

Ключевые слова: модулятор Маха–Цендера, наногетероструктура, квантово-механические расчеты, показатель преломления, просвечивающая электронная микроскопия, фотоэлектрическая спектроскопия.

DOI: 10.21883/FTP.2022.09.53400.35

1. Введение

Модуляторы по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера широко используются для передачи данных в современных оптоволоконных сетях. Они нашли применение в телекоммуникации [1], радиолокации [2] и оптических сигнальных микропроцессорах [3].

Принцип действия указанных приборов основывается на управлении условиями интерференции лазерного излучения, разделенного системой волноводов на два когерентных волновых фронта в рамках оптической микросхемы, представляющей собой планарный интерферометр по схеме Маха–Цендера. Эффект модуляции достигается за счет воздействия электрической компоненты электромагнитной волны СВЧ-диапазона на показатель преломления среды, в которой распространяется лазерное излучение [4].

Модуляторы по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера на основе ниобата лития получили широкое внедрение на магистральных оптоволоконных линиях связи. При этом они характеризуются сравнительно крупными размерами, достигающими 50 мм в длину.

Обусловлено это наличием ограничений на силу эффекта вариации показателя преломления под действием электрического поля в ниобате лития, определенных кристаллической структурой этого сегнетоэлектрического кристалла [5]. Указанные габариты определяют специализированное применение соответствующих приборов [6].

Уменьшить размеры модулятора возможно путем использования вместо ниобата лития периодов гетеронаструктур на основе полупроводников группы A^{III}B^V. В этом случае оказывается возможным снизить габариты прибора вплоть до 3 мм в длину [6,7].

Эффект достигается за счет того, что в напряженных туннельно-связанных квантовых ямах (ТСКЯ) реализуется вариация показателя преломления под действием электрического поля вследствие квантово-размерного эффекта Штарка [8–11].

В настоящее время рядом исследовательских групп ведутся работы, направленные на оптимизацию дизайна ТСКЯ, с целью улучшения характеристик полупроводниковых модуляторов по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера [2,12,13].

Следует отметить, что в одиночной квантовой яме эффект Штарка проявляется сравнительно слабо. Для повышения эффективности модуляции необходимо создание гетеронаноструктур, состоящих из нескольких туннельно-связанных КЯ [9].

Таким образом, ключевой задачей при проектировании полупроводникового модулятора по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера является определение оптимального дизайна ТСКЯ, обеспечивающего наибольшую вариацию показателя преломления для длин волн оптического излучения в рамках S -диапазона прозрачности кварцевого оптоволокна ($\lambda \sim 1530\text{--}1565$ нм). При этом необходимым условием создания быстродействующего модулятора является сохранение высоких частотных характеристик переключения его состояний, что также определяется параметрами гетероструктуры, положенной в его основу [9].

Учитывая сложность и трудоемкость изготовления квантово-размерных структур, принципиально важным является обеспечение возможности предварительного прогнозирования дизайна гетероструктур посредством математического моделирования.

При этом формирование достоверных прогнозов о характеристиках структур с напряженными туннельно-связанными квантовыми ямами невозможно без калибровки теоретических расчетов по экспериментальным данным, полученным с использованием методов объективного структурного контроля. Важное значение при этом играет информация о распределении компонентов твердого раствора в кристаллической решетке эпитаксиальных слоев [14]. Соответствующие данные приобретают практическую ценность в совокупности с результатами измерений оптических свойств исследуемой гетеросистемы — в результате становится возможным выявление взаимосвязей между структурными и энергетическими параметрами туннельно-связанных квантовых ям [15].

Для получения информации о структуре была использована совокупность методов просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ВР ПЭМ) на поперечном срезе и рентгеновский дифракционный анализ. Оптические свойства объектов исследования определялись посредством измерения фототока.

Ценность предлагаемой работы заключается в объединении методов объективного контроля с методами численного расчета энергетической зонной диаграммы, огибающих волновых функций и связанных с ними оптических характеристик.

Предлагаемый методологический аппарат позволит повысить прогностическую ценность математического моделирования систем с туннельно-связанными квантовыми ямами, что в свою очередь обеспечит возможность ускоренного развития конструкции полупроводникового модулятора по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера.

2. Исследуемые структуры

Для демонстрации предложенной методики была выбрана группа асимметричных ТСКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (рис. 1), созданная в зоне собственной проводимости $p-i-n$ -диода. В табл. 1 приведено подробное описание структуры. Формирование последней было осуществлено методом МОС-гидридной эпитаксии на установке AIX200RF (Aixtron, Германия).

Выбор типа гетеронаноструктуры был осуществлен на основании работ [16–20], в которых было показано, что вариация показателя преломления в системе асимметричных двойных туннельно-связанных КЯ (АД-ТСКЯ) в присутствии электрического поля значительно выше по сравнению с одиночными или двойными симметричными квантовыми ямами. Это явление обусловлено эффектами перераспределения электронной плотности в соседних ямах, изменения вероятности межзонных переходов с учетом экситонных вкладов, что в конечном счете приводит к усилению квантового эффекта Штарка.

Структура объекта была исследована на просвечивающем электронном микроскопе Libra 200FE (Zeiss, Германия). Профилирование элементного состава было выполнено посредством совокупности методов Z-контраста и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Исследования были осуществлены на оборудовании ресурсного центра „Нанотехнологии“ Научного парка СПбГУ.

Калибровка данных ВР ПЭМ была выполнена с применением рентгеновского дифрактометра высокого разрешения D8 DISCOVER (Bruker, Германия) и программного комплекса DIFFRAC plus LEPTOS 7, используемого для анализа рентгенограмм и расчета на их основе параметров гетеронаноструктур. Погрешность в определении концентрации индия в слоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составила $\leq 5\%$ (рис. 1, а).

Профиль элементного состава, измеренный с помощью совокупности методов просвечивающей электронной микроскопии, был сопоставлен с результатами

Таблица 1. Описание дизайна гетеронаноструктуры, исследуемой в работе

Толщина слоя, нм	Описание	
Подложка	GaAs	$n^+ = 10^{18} \text{ см}^{-3}$
	GaAs	$n^+ = 10^{18} \text{ см}^{-3}$
500	GaAs	$n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
200	GaAs	$n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
50	GaAs	$n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
9.5	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0.19$
4	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0.2$
4	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0.19$
50	GaAs	$p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
200	GaAs	$p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
300	GaAs	$p^+ = 10^{18} \text{ см}^{-3}$

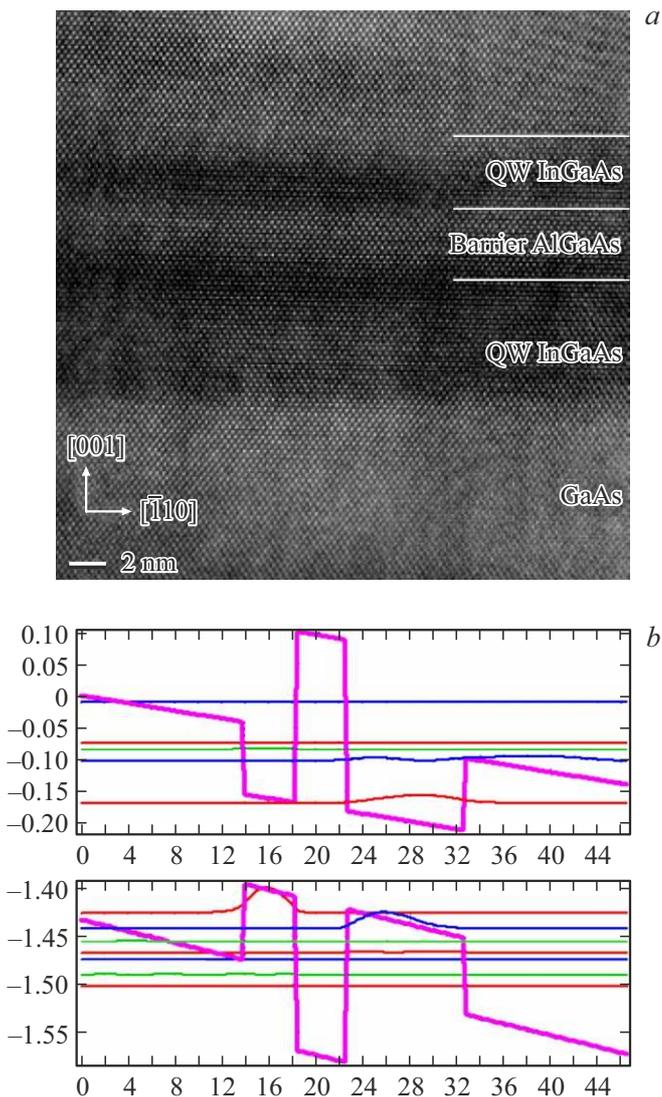


Рис. 1. *a* — ВР ПЭМ-снимок исследуемой структуры с ТСКЯ GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. *b* — рассчитанный профиль потенциала структуры GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и энергетический спектр. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

численного моделирования ростового процесса, выполненного с учетом сегрегации In по алгоритму, опубликованному в работе [21]. Установлено качественное и количественное согласие модели с экспериментом (рис. 2).

Уточненный с учетом экспериментальных данных профиль состава был использован для выполнения численного моделирования энергетических зон, расчета уровней размерного квантования, огибающих волновых функций, а также матричных элементов межзонных переходов исследуемой структуры.

Аналогичным образом были выполнены расчеты края фотопоглощения (рис. 3), их проверка осуществлена ме-

тодом спектроскопии фототока, возникающего в $p-i-n$ -диоде (рис. 4).

Исследования квантово-размерного эффекта Штарка проводились путем измерения спектральных зависимостей фототока при температуре 300 К. Источником монохроматического излучения служил монохроматор МДР-2 с галогеновой лампой мощностью 100 Вт. Измерения производились на переменном сигнале, для этого использовался механический оптический модулятор Stanford Research Systems SR540, работающий на частоте 130 Гц. Детектирование переменного электрического сигнала осуществлялось по стандартной „lock-in“ методике с применением селективного усилителя Stanford

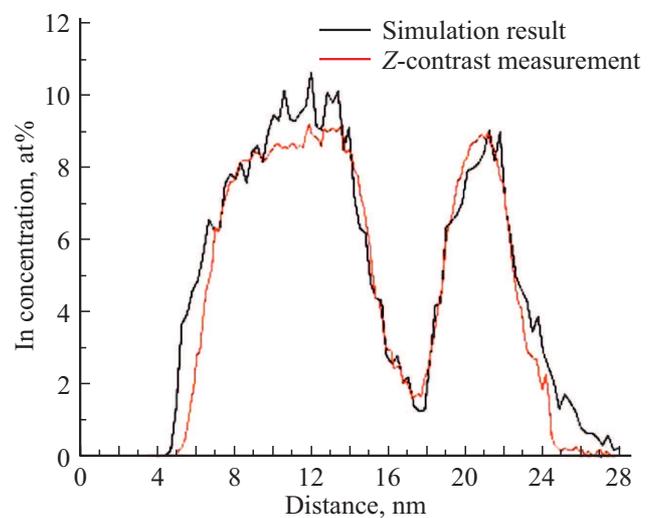


Рис. 2. Профиль концентрации индия в структуре, полученный совокупностью методов просвечивающей электронной микроскопии. Концентрация индия (в at%) связана с параметром x в химической формуле твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ соотношением 2:1.

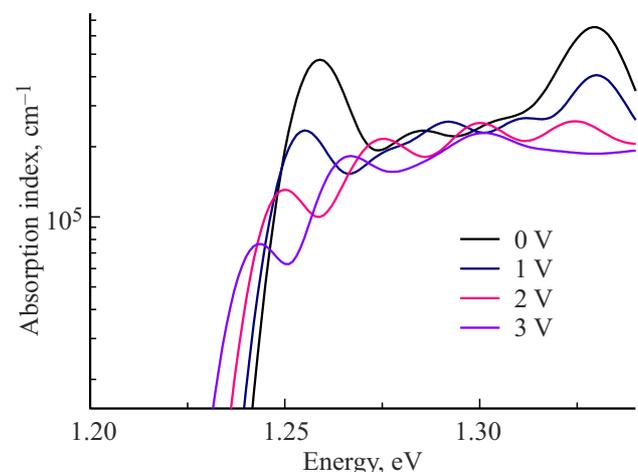


Рис. 3. Спектры поглощения исследуемой структуры, полученные средствами математического моделирования при различном напряжении, приложенном к квантовым ямам в поперечном направлении.

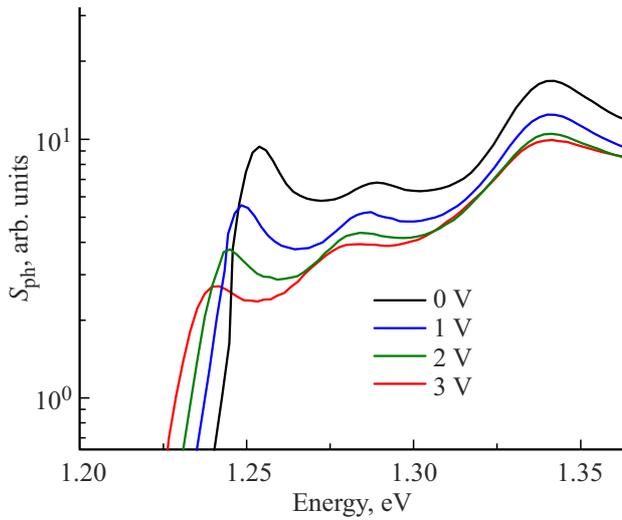


Рис. 4. Спектральные зависимости фототока в области межзонного поглощения двойной ТСКЯ, измеренные при различных значениях обратного смещения на $p-i-n$ -диоде.

Research Systems SR510. По результатам исследований фотоэлектрических спектров была построена спектральная зависимость относительной фоточувствительности:

$$S_{ph}(\hbar\omega) = I_{ph}(\hbar\omega)/L(\hbar\omega), \quad (1)$$

где $I_{ph}(\hbar\omega)$ — фототок, $L(\hbar\omega)$ — интенсивность освещения в произвольных единицах.

3. Методика моделирования и расчета

С помощью самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона в приближении эффективной массы был осуществлен расчет профилей энергетических зон, уровней размерного квантования и огибающих волновых функций в системе ТСКЯ в присутствии поперечного электрического поля. Для решения приведенных уравнений использовался численный подход на основе метода конечных разностей. Расчеты производились в программном пакете Lazarus.

Расчеты осуществлялись с учетом истинного профиля содержания индия в гетероструктуре, определенного посредством совокупности методов просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского дифракционного анализа. Методика расчетов приведена в работе [15]. Используя данные численного моделирования, рассчитаны матричные элементы межзонных переходов в туннельно-связанных квантовых ямах (ТСКЯ).

Пользуясь приведенным выше алгоритмом, было исследовано перераспределение электронной плотности в системах ТСКЯ, обусловленное явлением квантово-размерного эффекта Штарка. На основе модельных расчетов определены значения красного смещения спектров поглощения, вызванного перестройкой межзонных и экситонных переходов с увеличением напряженности

электрического поля, приложенного в направлении роста структуры.

Далее изложен теоретический подход к исследованию влияния приложенного поперечного электрического поля на изменение показателя преломления гетероструктуры.

Известно, что коэффициент оптического поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ связан с мнимой частью диэлектрической проницаемости соотношением

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{\omega}{cn} \varepsilon(\hbar\omega), \quad (2)$$

где c — скорость света, n — показатель преломления материала.

Межзонное поглощение определяется переходами между уровнями размерного квантования электронов и дырок (тяжелых). Вероятность соответствующего перехода рассчитывается из интеграла перекрытия волновых функций электрона и дырки. Кроме того, вследствие кулоновского взаимодействия электрона и дырки можно наблюдать наличие экситонного пика в спектре поглощения. Следовательно, спектр поглощения определяется суммой межзонного и экситонного вклада, и при этом зависит от энергии связи и радиуса экситона.

Мнимую часть диэлектрической проницаемости запишем как результат сложения межзонных и экситонных переходов:

$$\varepsilon(\hbar\omega) = \varepsilon^{\text{band}}(\hbar\omega) + \varepsilon^{\text{ex}}(\hbar\omega). \quad (3)$$

Вклад межзонных переходов в диэлектрическую проницаемость [8]:

$$\varepsilon^{\text{band}}(\hbar\omega) = \frac{e^2}{\varepsilon_0 m_0^2 \omega^2 L_z} \frac{m_{eh}}{\pi \hbar^2} \sum_{i,j} |M_b|^2 |M_{ij}|^2 \times \int_0^\infty G \cdot \Gamma(\Delta E_g + E_{ei} + E_{hj} - \hbar\omega) dE, \quad (4)$$

L_z — ширина квантовой ямы, m_{eh} — приведенная эффективная масса дырки и электрона, e — заряд электрона; E_{ei} , E_{hj} — уровни размерного квантования электрона и дырки соответственно, E_g — ширина запрещенной зоны, $|M_b|^2$ — матричный элемент блоховских состояний, который определяется выражением [22]

$$|M_b|^2 = \frac{m_0^2 E_g (E_g + \Delta)}{12 m_e (E_g + \frac{2}{3} \Delta)}, \quad (5)$$

где m_e — эффективная масса электрона, Δ — энергия спин-орбитального расщепления.

$$|M_{ij}|^2 = \left| \int \psi_{ei}(z) \psi_{hj}(z) dz \right|^2$$

— интеграл перекрытия огибающих волновых функций электрона и дырки, G — матричный элемент, зависящий

Таблица 2. Параметры структуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, использованные в расчетах

Ширина запрещенной зоны $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, E_g , эВ	$1.424 + 1.247x$
Эффективная масса электрона $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, m_e	$0.0665 + 0.0835x$
Эффективная масса тяжелой дырки $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, m_h	$0.34 + 0.42x$
Ширина запрещенной зоны $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, E_g , эВ	$1.424 - 1.615x + 0.555x^2$
Эффективная масса электрона $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, m_e	$0.0665 - 0.05x + 0.0065x^2$
Эффективная масса тяжелой дырки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, m_h	$0.34 + 0.794x$
Величина спин-орбитального расщепления, Δ , эВ	0.33
Полуширина на полувысоте профиля спектральной линии, δ , эВ	0.011

от поляризации падающего света. Для света, поляризованного параллельно плоскости гетероструктуры (ТЕ-мода), данный фактор будет равен $3/2$ для переходов тяжелая дырка–электрон и $1/2$ для переходов легкая дырка–электрон [8]. $\Gamma(x)$ — профиль спектральной линии, в нашем случае гауссова кривая

$$\Gamma(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{-x^2/(\sigma^2)}, \quad (6)$$

где σ — параметр, задающий полуширину линии на полувысоте.

Экситонный вклад в диэлектрическую проницаемость [8]:

$$\varepsilon^{\text{ex}}(\hbar\omega) = \frac{2\pi e^2}{\pi\varepsilon_0 m_0^2 \cdot L_z \omega^2} \times |M|^2 |M_{ij}|^2 |\varphi_{\text{ex}}(0)|^2 G\Gamma(E_{\text{ex}} - \hbar\omega), \quad (7)$$

E_{ex} — энергия экситона, $\varphi_{\text{ex}}(0) = \alpha\sqrt{2/\pi}$ — волновая функция двумерного экситона, α — вариационный параметр, соответствующий обратному боровскому радиусу экситона. Расчет энергии связи и боровского радиуса экситона проведен в рамках вариационной процедуры, описанной в работе [23].

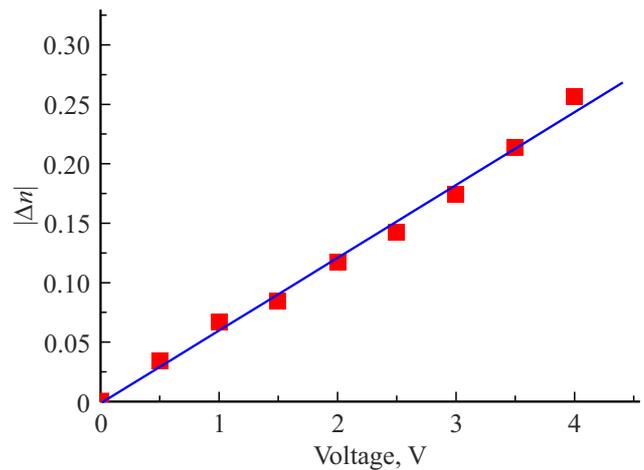
Зная изменение спектра поглощения достаточно широкой спектральной области, используя соотношения Крамерса–Кронига, можно получить изменение спектра показателя преломления под действием приложенного электрического поля [24]:

$$\Delta n(\hbar\omega) = \frac{c\hbar}{\pi} P \int_{\hbar\omega_1}^{\hbar\omega_2} \frac{\Delta\alpha(\hbar\omega')}{(\hbar\omega')^2 - (\hbar\omega)^2} d(\hbar\omega'), \quad (8)$$

где $(\hbar\omega_1, \hbar\omega_2)$ — диапазон энергий, а символ P означает, что интеграл берется в смысле главного значения. Значения параметров гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, использованные при расчетах ее оптических свойств, представлены в табл. 2.

4. Результаты и обсуждение

Были рассчитаны спектры оптического поглощения системы асимметричных двойных ТСКЯ с учетом экситонного вклада (рис. 3). Результаты показывают, что с

**Рис. 5.** Модуль изменения показателя преломления при различных управляющих напряжениях, приложенных к структуре.

увеличением напряженности электрического поля происходит заметное перераспределение электронной плотности в системе квантовых ям, что приводит к красному сдвигу оптического спектра вследствие квантово-размерного эффекта Штарка. Показано, что выбранная структура демонстрирует красное смещение экситонного пика поглощения на величину $\sim 10\text{--}15\text{ мэВ}$ при изменении электрического поля в диапазоне от 0 до 3 В, приложенного в направлении роста структуры. Данные по измерению фототока подтверждают этот результат (рис. 4).

На основании рассчитанных в широкой спектральной области показателей поглощения, используя соотношения Крамерса–Кронига, были получены спектры изменения показателя преломления $\Delta n(\hbar\omega)$ для различных напряжений смещения [24]. На рис. 5 показано изменение абсолютного значения показателя преломления исследуемой структуры под действием электрического поля на длине волны $\lambda = 1550\text{ нм}$.

5. Заключение

Таким образом, продемонстрирована возможность применения совокупности методов математического моделирования, ростового эксперимента и методики объ-

активного контроля физических характеристик гетеро-наноструктур для прогнозирования оптических свойств напряженных туннельно-связанных квантовых ям и оптимизации их дизайна с целью создания эффективных модуляторов по схеме планарного интерферометра Маха–Цендера. Дальнейшая работа будет направлена на экспериментальную проверку расчетных значений вариации показателя преломления под действием электрического поля.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства „Приоритет 2030“ № Н-423-99_2022-2022.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ke Liu, Chen Ran Ye, Sikandar Khan, Volker J. Sorger. *Laser Photon. Rev.*, **9** (2), 172 (2015).
- [2] Y. Miyazeki, T. Arakawa. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, SJJE05 (2019).
- [3] Chong Li, Xiang Zhang, Jingwei Li, Tao Fang, Xiaowen Dong. *Photonix*, **2**, 20 (2021).
- [4] R.G. Walker, *J. Lightw. Technol.*, **5** (10), 1444 (1987).
- [5] E.L. Wooten, Karl M. Kissa, Alfredo Yi-Yan, Edmond J. Murphy, Senior Member, Donald A. Lafaw, Peter F. Hallemeier, David Maack, Daniel V. Attanasio, Daniel J. Fritz, Gregory J. McBrien, Donald E. Bossi. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **6** (1), 69 (2000).
- [6] R.G. Walker, Yi Zhou. *Frontiers Phys.*, **9**, 636002 (2021).
- [7] K. Tsuzuki, T. Ishibashi, T. Ito, S. Oku, Y. Shibata, T. Ito, R. Iga, Y. Kondo, Y. Tohmori. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (1), 46 (2005).
- [8] Kenji Nakamura, Akira Shimizu, Kazuhito Fujii, Masanori Koshiba, Senior Member, Kazuya Hayata. *IEEE J. Quant. Electron.*, **28** (7), 1670 (1992).
- [9] Hao Feng, J.P. Pang, M. Sugiyama, Kunio Tada, Yoshiaki Nakano. *IEEE J. Quant. Electron.*, **34** (7), 1197 (1998).
- [10] Zhixin Xu. *Proc. SPIE*, **7135**, 71350Y-1 (2008).
- [11] V.V. Zolotarev, I.S. Shashkin, V.S. Golovin, O.S. Soboleva, V.V. Shamakhov, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin. *Semicond. Sci. Technol.*, **34**, 095005 (2019).
- [12] M. Stepanenko, I. Yunusov, V. Arykov, P. Troyan, Yu. Zhidik. *Symmetry*, **12** (11), 1920 (2020).
- [13] Guang Qian, Bin Niu, Wu Zhao, Qiang Kan, Xiaowen Gu, Fengjie Zhou, Yuechan Kong, Tangsheng Chen. *Chinese Optics Lett.*, **17** (6), 061301 (2019).
- [14] C. Kittel. *Quantum Theory of Solids* (N.Y., John Wiley and Sons, 1963).
- [15] S.V. Khazanova, V.E. Degtyarev, N.V. Malekhonova, D.A. Pavlov, N.V. Baidus. *Semiconductors*, **49** (1), 55 (2015).
- [16] M.K. Chin. *J. Appl. Phys.*, **76**, 518 (1994).
- [17] N. Susa. *J. Appl. Phys.*, **73**, 932 (1993).
- [18] Yasunori Tokuda, Kyoza Kanamoto, Yuji Abe, Noriaki Tsukada. *Phys. Rev. B*, **41**, 10280 (1990).
- [19] C. Thirstrup. *IEEE J. Quant. Electron.*, **31**, 988 (1995).
- [20] P. Steinmann, B. Borchert, B. Stegmüller. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 191 (1997).
- [21] S.V. Khazanova, M.I. Vasilevskiy. *Semicond. Sci. Technol.*, **25**, 085008 (2010).
- [22] H.C. Casey, M.B. Panish. *Heterostructure Lasers*, Part A (N.Y., Academic, 1978) chap. 3.6, p. 146.
- [23] D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.S. Damen, C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood, C.A. Burrus. *Phys. Rev. B*, **32** (2), 1043 (1985).
- [24] R. de L. Kronig. *J. Opt. Soc. Am.*, **12** (6), 547 (1926).

Редактор Г.А. Оганесян

Design of tunnel-coupled quantum wells for a Mach–Zehnder scheme modulator construction

A.I. Bobrov¹, N.V. Baidus¹, S.V. Khazanova², A.P. Gorshkov², K.V. Sidorenko¹, A.N. Shushunov¹, N.V. Malekhonova¹, A.V. Nezhdanov², A.V. Zdoroveyshchev¹, V.N. Trushin¹, E.V. Ubyivovk³, A.I. Okhapkin⁴, D.S. Klement'ev⁵, Z.Sh. Gasainiev⁶, AV. Kharlamov⁷

¹ Research Institute of Physics and Technology of the Lobachevsky State University, 603022 Nizhny Novgorod, Russia

² Lobachevsky State University, 603022 Nizhny Novgorod, Russia

³ St. Petersburg State University, 199034 St. Petersburg, Russia

⁴ Institute for Physics of Microstructures Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁵ Branch of the „Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics“,

„Yu.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems“, 603951 Nizhny Novgorod, Russia

⁶ NPP „Salyut“, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁷ „T8“ LLC, 107076 Moscow, Russia

Abstract We propose a method for predicting the refractive index variation in InGaAlAs tunnel-coupled quantum wells under the action of an electric field. Complex of mathematical and experimental studies to optimize the heterosystems design for the semiconductor modulator construction according to a planar Mach-Zehnder interferometer scheme is demonstrated.