

Квантовые ямы AlGaInAs для спектрального диапазона 1300–1550 нмР.В. Дибольский^{1,*}, А.Н. Туркин^{1,†}, А.А. Мармалюк^{2,‡}¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2²Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф.Стельмаха
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1
(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 06.07.2023)

Создание высокоэффективных полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1300–1550 нм является одной из важных практических задач современной квантовой электроники. Ведущим направлением использования таких лазеров является передача информации по оптическому волокну. Совершенствование указанных приборов требует повышения выходной мощности, уровень которой для лазеров рассматриваемого спектрального диапазона во многом определяется конструкцией квантово-размерной активной области. В частности, введение упругих напряжений в квантовые ямы активной области способствует снижению интенсивности протекания процессов Оже-рекомбинации и благоприятствует повышению выходной мощности и температурной стабильности. Настоящая работа направлена на поиск путей создания квантовых ям с повышенным уровнем упругих напряжений, излучающих в районе 1300–1550 нм. В статье учтено влияние упругих напряжений на длину волны излучения, выполнен расчёт геометрии квантовых ям, обеспечивающих получение длины волны излучения 1300–1550 нм, определена критическая толщина таких квантовых ям, при превышении которой начинается процесс генерации дислокаций несоответствия. Также изучены подходы по компенсации упругих напряжений в квантовых ямах, показано, что использование барьерных слоёв с упругими напряжениями противоположного знака позволяет отодвинуть порог генерации дислокаций несоответствия и улучшить излучательную эффективность.

PACS: 78.67.-n

УДК: 535.1

Ключевые слова: квантовая яма, упругие напряжения, лазер, волоконно-оптическая линия связи.

ВВЕДЕНИЕ

Спектральный диапазон 1300–1550 нм представляет собой телекоммуникационный диапазон. Инжекционные полупроводниковые лазеры долгое время совершенствовались, прежде чем смогли в достаточной мере удовлетворить требованиям широкого класса телекоммуникационных систем. Цифровым наземным и подводным линиям дальней связи требуются надёжные и быстродействующие лазеры с малым чирпом [1]. При передаче на короткие расстояния требуются дешёвые решения, так как малое число пользователей в расчёте на один передатчик делает более значимым его стоимость. Аналоговым системам требуются лазеры с хорошей линейностью ватт/амперной характеристики и с большой оптической мощностью. В современных волоконно-оптических системах связи (ВОЛС) активно используются лазеры указанного спектрального диапазона. Усовершенствование данных источников излучения позволяет улучшать характеристики ВОЛС.

Основной целью работы является изучение квантовых ям AlGaInAs для увеличения квантового выхода излучательного процесса и снижения плотности порогового тока.

Для этого необходимо было построить линии постоянного уровня 1300 нм и 1550 нм в случаях, когда материал ямы AlGaInAs согласован с подложкой InP и когда в квантовую яму вносится упругое напряжение. Основой построения является решение уравнения Шредингера в прямоугольной квантовой яме.

Будем рассматривать область полупроводникового материала, накачанную настолько сильно, что в ней достигнута инверсия заселенности, называемую активной областью или активной средой. Термин инжекционный применительно к данному рассмотрению означает, что инверсия заселенности достигается за счет накачки током (инъекции в активную область электронов из прилегающего эмиттера n -типа и дырок из эмиттера p -типа) [2].

1. ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Рассматриваемые нами лазеры изготавливают на основе двойных гетероструктур. Такие структуры состоят из двух пассивных барьерных слоёв и одного активного слоя. Ширина запрещённой зоны активного слоя всегда меньше ширины запрещённой зоны барьерных слоёв [3].

Особый вид гетероструктур представляют квантово-размерные структуры. Квантово-размерной структурой называется полупроводниковая структура, в которой размер, по крайней мере одной из областей, хотя бы в одном измерении сравним с длиной волны де Бройля

* dibolskii.rv@physics.msu.ru

† andrey@turkin.su

‡ almarm@mail.ru

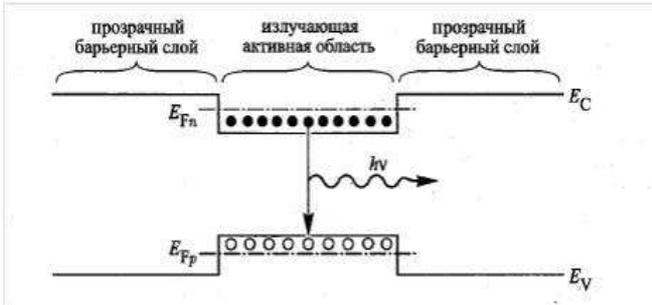


Рис. 1. Двойная гетероструктура с оптически прозрачными барьерными слоями [3]

электрона в полупроводнике:

$$\lambda_B = \frac{h}{m_n \cdot v},$$

где v — скорость электрона [4].

Гетеропереход — это контакт между двумя различными веществами, при котором кристаллическая решётка одного материала без нарушения периодичности переходит в кристаллическую решётку другого материала [5].

2. ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИЯ

Оже-рекомбинация является основной причиной уменьшения квантового выхода прибора. В механизме безызлучательной Оже-рекомбинации участвуют три частицы, и в ходе их взаимодействия появляются высокоэнергетические носители в КЯ. Его принципиальные особенности представляют собой:

1. Переход Оже-электрона из начального в конечное состояние. Он происходит с энергией, передаваемой из рекомбинирующей пары электрон-дырка, однако импульс не передается сильно возбужденному электрону, поскольку закон сохранения для квазиимпульсной компоненты отсутствует.
2. Возбужденный Оже-электрон получает необходимый импульс от взаимодействия с гетерограницей.
3. Отсутствие закона сохранения для поперечной квазиимпульсной компоненты показывает, что процесс Оже-рекомбинации является беспороговым, а скорость Оже-рекомбинации является степенной функцией от температуры, а не экспоненциальной, что типично для объемного полупроводника [6, 7].

Увеличение напряжения сжатия в квантовой яме это основной способ ослабления влияния Оже-рекомбинации на полупроводниковую структуру.

С ростом ширины квантовой ямы скорость Оже-рекомбинации сильно падает. Например, при изменении ширины квантовой ямы от 40 до 120 Å, скорость G падает более чем на 2 порядка [8].

3. ИЗЛУЧЕНИЕ 1300–1550 НМ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Одной из проблем распространения сигнала по оптическому волокну является затухание сигнала в волноводе. В прямом волокне потери возникают в основном из-за рэлеевского рассеяния ($\sim \frac{1}{\lambda^4}$). Потери в кварцевых волокнах минимальны на $\lambda = 1550$ нм (0.18...0.2 дБ/км в SSMF).



Рис. 2. Спектр потерь в одномодовом волокне [1]

При изгибе волокон возникают дополнительные потери α [дБ/м] из-за нарушения полного внутреннего отражения на границе между сердцевиной и оболочкой. Зависимость этих потерь от радиуса изгиба экспоненциальная:

$$\alpha = Ae^{-UR}.$$

Для SSMF-волокон:

$$A = \frac{7.5\lambda_0^{3/2}}{R^{1/2}\lambda^2},$$

$$U = \frac{1.65 \times 10^{-4}}{\lambda} \left(2.75 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^3,$$

где λ_0 — длина волны отсечки (~ 1.3 мкм). В логарифмических единицах потери в витке волокна зависят от радиуса изгиба примерно линейно. Изгибные потери тем больше, чем меньше скачок показателя преломления сердцевина/оболочка и чем дальше рабочая длина волны отстоит от длины волны отсечки. При увеличении рабочей длины волны потери при изгибе волокон увеличиваются. Например, в витке SSMF-волокна диаметром 20 мм вносимые потери на $\lambda = 1310$ нм малы

(~ 0.1 дБ), а на $\lambda = 1550$ нм увеличиваются до 3 дБ. Этот факт используется в рефлектометрии для поиска мест изгиба волокон, например при заломе кабеля или плохой укладке волокна в муфту.

3.1. Линии постоянного уровня 1300 и 1550 нм при согласовании материала ямы и подложки

Рассмотрим случай совпадения постоянных решеток эпитаксиального слоя a и подложки a_0 . Требуется получить зависимость ширины квантовой ямы от химического состава с условием излучения определённой длины волны. Математическая модель, позволяющая выполнить построение, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{2m_e E E_1}{\hbar^2}} L = \pi n - 2 \arcsin\left(\sqrt{\frac{E E_1}{U_e}}\right), \\ \sqrt{\frac{2m_h H H_1}{\hbar^2}} L = \pi n - 2 \arcsin\left(\sqrt{\frac{H H_1}{U_h}}\right), \\ \frac{\hbar c}{\lambda} = E_g + E E_1 + H H_1, \end{cases}$$

где $E E_1$ — энергия первого уровня размерного квантования электронов, $H H_1$ — энергия первого уровня размерного квантования дырок, m_e — эффективная масса электронов, m_h — эффективная масса дырок, U_e — величина потенциального барьера для электронов, U_h — величина потенциального барьера для дырок, E_g — ширина запрещённой зоны материала ямы, λ — длина волны излучения [2].

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

$$\begin{aligned} \text{par}_{\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}} &= \\ &= x \cdot \text{par}_{\text{AlAs}} + y \cdot \text{par}_{\text{GaAs}} + (1 - x - y) \cdot \text{par}_{\text{InAs}}. \end{aligned}$$

При расчете изменения ширины запрещенной зоны от состава, правило Вегарда не используется. Как правило, данная зависимость отклоняется от линейной, по этой причине вводится параметр прогиба Γ_{bowing} . В работе использовалась зависимость $E_g(w, v) = 1.424 + 1.455v + 0.191v^2 - 1.614w + 0.55w^2 + 0.043wv$ [9]. В наших обозначениях: $x = v$, $y = 1 - w - v$, $1 - x - y = w$.

Решение системы даёт следующие результаты, представленные на рис. 3, 4.

Из полученных графиков можно сделать вывод, что с увеличением молярной доли Al ширина квантовой ямы должна увеличиваться для заданной длины волны излучения, причём для излучения на 1550 нм эта зависимость имеет куда более быстрый рост, чем для 1300 нм.

3.2. Линии постоянного уровня 1300 и 1550 нм без требования согласования материала ямы и подложки

Внесение в квантовую яму напряжений путём рассогласования материала ямы и подложки приводит к из-

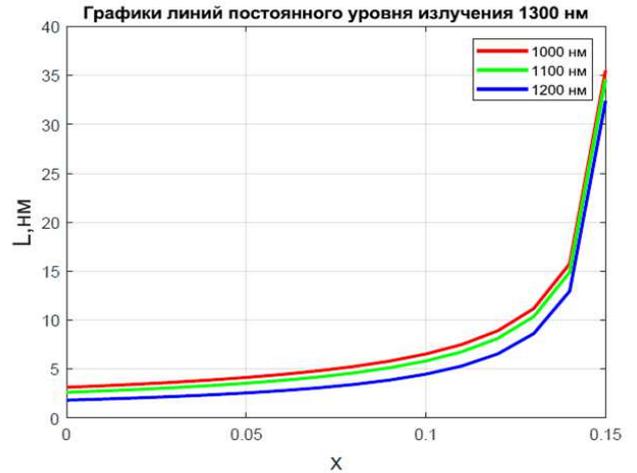


Рис. 3. Графики линий постоянного уровня излучения 1300 нм

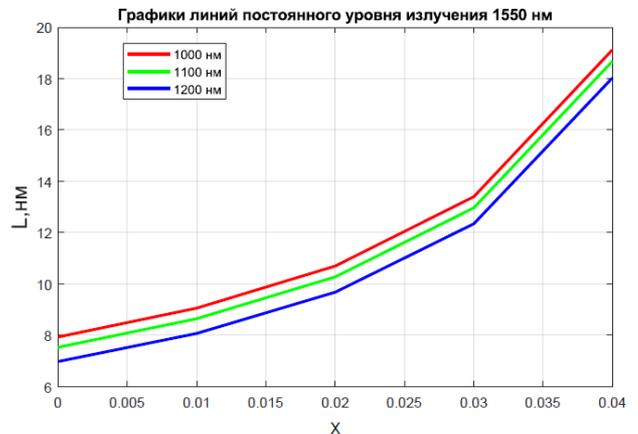


Рис. 4. Графики линий постоянного уровня излучения 1550 нм

менению исследуемой системы уравнений. Упругие напряжения приводят к изменению ширины запрещенной зоны, а, следовательно, и к изменению потенциального барьера. Тогда система уравнений приобретает вид:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{2m_e E E_1}{\hbar^2}} L = \pi n - 2 \arcsin\left(\sqrt{\frac{E E_1}{U_e^*}}\right), \\ \sqrt{\frac{2m_h H H_1}{\hbar^2}} L = \pi n - 2 \arcsin\left(\sqrt{\frac{H H_1}{U_h^*}}\right), \\ \frac{\hbar c}{\lambda} = E_g + \Delta E + E E_1 + H H_1 \end{cases}$$

где ΔE — вклад гидростатических и сдвиговых напряжений в величину ширины запрещённой зоны, U_e^* — величина изменённого потенциального барьера для электронов, U_h^* — величина изменённого потенциального барьера для дырок.

Для построения линий постоянного уровня необходимо знать, как связаны величины x и y между собой в случае отсутствия согласования материала и подложки:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{a(x, y) - a_0}{a_0}$$

где ε — степень рассогласования, $a(x, y)$ и a_0 — постоянные решетки слоя и подложки соответственно. Построим линии постоянного уровня с степенью рассогласования материала ямы и подложки +1% и +1.5%:

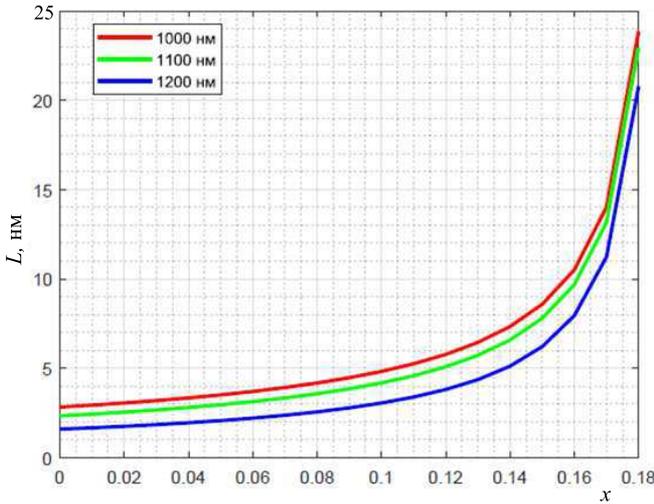


Рис. 5. Графики линий постоянного уровня излучения 1300 нм и рассогласованием +1.5%.

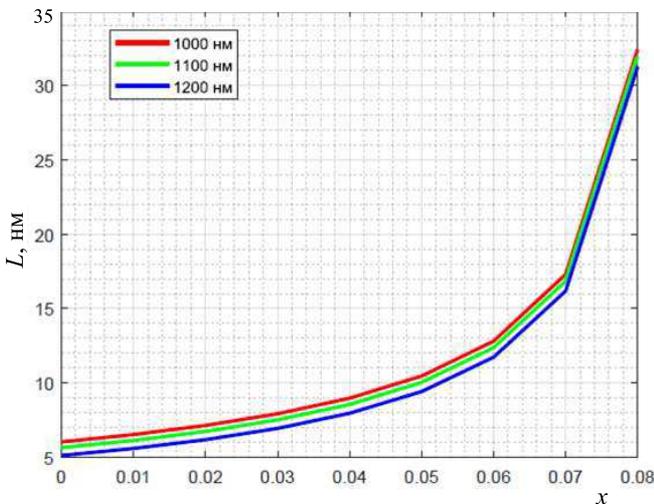


Рис. 6. Графики линий постоянного уровня излучения 1550 нм и рассогласованием +1.5%

3.2.1. Критическая толщина и метаморфный рост

Упругие напряжения приводят к изменению ширины запрещенной зоны деформированного материала,

а следовательно, и к изменению потенциального барьера в КЯ. В случае псевдоморфного роста, т.е. в случае, когда параметр решетки КЯ «наследуется» от матрицы, деформацию можно представить в виде суперпозиции гидростатической деформации и деформации сдвига. Гидростатическое напряжение, обусловленное гидростатической деформацией, приводит к изменению разницы центров тяжести валентной зоны и зоны проводимости на энергию

$$\Delta E_{hy} = 2a \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \left(\frac{a_0}{a_0^b} - 1 \right)$$

где a_0 и a^b — параметры решеток ненапряженного материала ямы и матрицы, C_{11} и C_{12} — коэффициенты упругости материала ямы, a — гидростатический деформационный потенциал для запрещенной зоны. В отличие от гидростатического напряжения напряжение сдвига действует только на валентную зону, при этом изменение энергетического положения зон тяжелых и легких дырок различно, вследствие различия их симметричных свойств. Этот эффект приводит к дополнительному расщеплению уровней тяжелой и легкой дырок по сравнению с эффектом размерного квантования [9].

Сдвиговой вклад напряжений не затрагивает зону проводимости, его влияние основано только на валентной зоне, приводящее к её расщеплению. По отношению к положению зон в ненапряженном материале изменения энергетического положения валентной зоны тяжелых дырок ΔE^{hh} и валентной зоны легких дырок ΔE^{lh} в точке $k = 0$ рассчитываются по формуле [6]:

$$\Delta E^{hh} = -s \left(1 + 2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \left(\frac{a_0}{a_0^b} - 1 \right)$$

– для подзоны тяжёлых дырок,

$$\Delta E^{lh} = \frac{\Delta SO - \frac{1}{2} \Delta E^{lh} - \sqrt{(\Delta SO + \Delta E^{hh})^2 + 8(\Delta E^{hh})^2}}{2}$$

– для подзоны лёгких дырок где ΔSO — спин-орбитальное расщепление в отсутствие напряжения; S — сдвиговой деформационный потенциал.

Таким образом, в общем случае каждому упругому напряжению соответствует конкретный знак сдвигов краев зон:

В случае напряжения упругого сжатия [6]:

- $\Delta Ec(hy) > 0$; $\Delta Ev(hy) < 0$;
- $\Delta Ehh(sh) > 0$; $\Delta Elh(sh) < 0$.

В случае напряжения упругого растяжения [6]:

- $\Delta Ec(hy) < 0$; $\Delta Ev(hy) > 0$;
- $\Delta Ehh(sh) < 0$; $\Delta Elh(sh) > 0$.

Обобщенный результат показан на рис. 7.

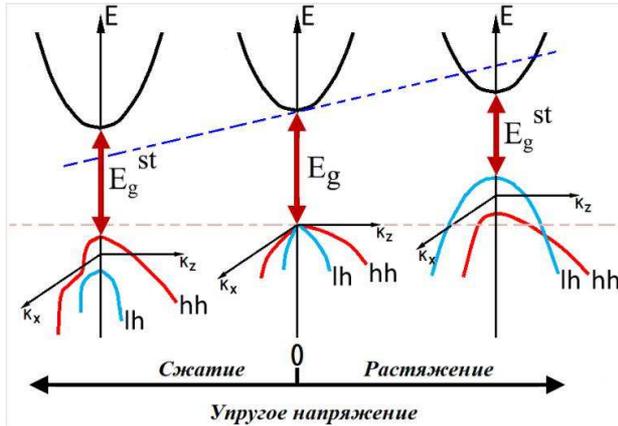


Рис. 7. Изменение краев зоны проводимости, подзон тяжелых и легких дырок под влиянием напряжения [6]

4. КОМПЕНСАЦИЯ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ

4.1. Метод среднего параметра решётки

Создание многослойных квантово-размерных гетероструктур, в которых квантовая яма заключена в барьерный слой с противоположным знаком упругого напряжения, позволяет осуществить частичную взаимную компенсацию, и общее напряжение в гетероструктуре снижается, что позволяет отодвинуть границу дислокаций несоответствия. Такой метод называется методом взаимной компенсации и определяется критерием сбалансированного напряжения.

Каждый напряжённый слой увеличивает общее напряжение своего знака, это приводит к релаксации напряжения в гетероструктуре.

Одной из моделей расчёта является метод среднего параметра решётки. Структура, сбалансированная по деформациям, может быть получена на основе среднего значения толщины параметров решетки при сжатии и растяжении в предположении идентичности упругих свойств при растяжении и сжатии [10]. Структура с взаимной компенсацией может быть определена из отношения суммы произведений степеней рассогласования на толщину к общей толщине всей гетероструктуры:

$$a_{ALM} = \frac{\sum_n a_n h_n}{\sum_n h_n},$$

где n — количество слоёв в структуре, h_n — толщина слоя; a_n — параметр решётки.

Однако, известно, что величина параметра решётки связана со степенью рассогласования формулой:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{a(x, y) - a_0}{a_0}$$

где ε — степень рассогласования, $a(x, y)$ и a_0 — постоянные решетки слоя и подложки соответственно.

Таким образом, мы можем использовать не среднюю величину параметра решётки, а усреднённое значение степени рассогласования всех слоёв:

$$\varepsilon_{ALM} = \frac{\sum_n \varepsilon_n h_n}{\sum_n h_n},$$

где ε_n — степень рассогласования параметра решетки отдельного слоя (для каждого слоя учитывается с соответствующим знаком); h_n — толщина слоя.

4.2. Расчёт компенсаций упругих напряжений

Построим графики зависимости критической толщины от напряжения в яме для различных значений ширины барьерного слоя и различных значений модуля напряжений барьерного слоя:

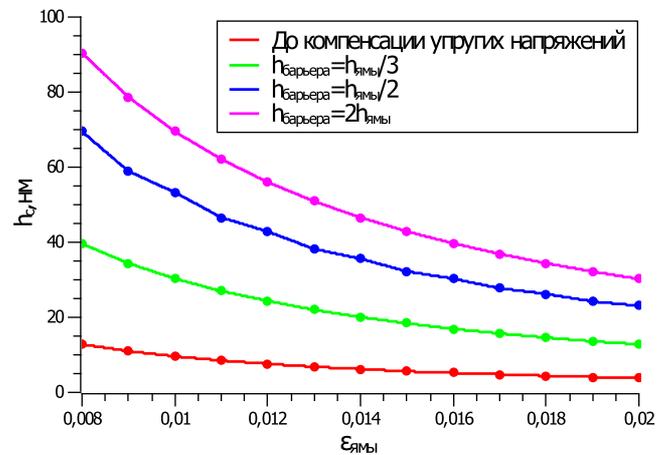


Рис. 8. Графики зависимости критической толщины квантовой ямы от напряжения сжатия в квантовой яме в случае, когда $|\varepsilon_{барьера}| = |\varepsilon_{ямы}|/2$

На первых двух графиках варьировалось значение ширины барьера при постоянном значении вносимого напряжения. На третьем графике варьировались значения напряжения в барьере при постоянстве толщины. Если зафиксировать параметр $\varepsilon_{барьера}$ наиболее выгодными оказываются широкие барьеры, а если зафиксировать $h_{барьера}$, то наиболее выгодны большие значения величины напряжения барьера.

Как и ожидалось, внесение отрицательного напряжения в барьерный слой позволяет увеличить значение критической толщины ямы, тем самым, отодвинуть порог генерации дислокаций несоответствия, что в свою очередь должно увеличить выходную мощность прибора.

Из экспериментального графика можно видеть, что при одном и том же токе накачки мощность лазера, на основе гетероструктуры с компенсацией напряжения выше, чем у напряжённой. Более того, по крутизне кривых можно сделать вывод, что при увеличении то-

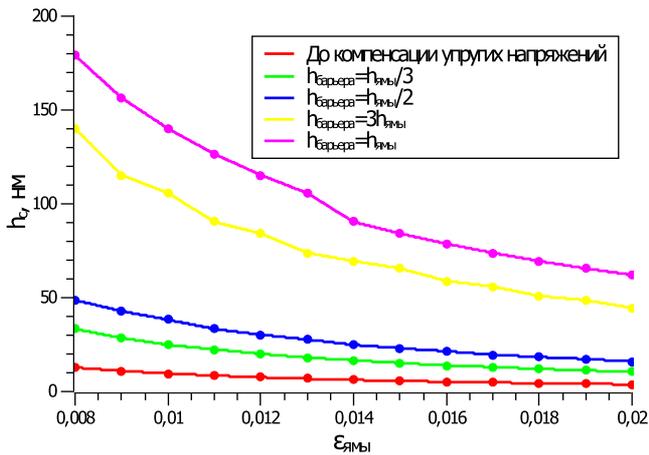


Рис. 9. Графики зависимости критической толщины квантовой ямы от напряжения сжатия в квантовой яме в случае, когда $|\epsilon_{\text{барьера}}| = |\epsilon_{\text{ямы}}|/3$

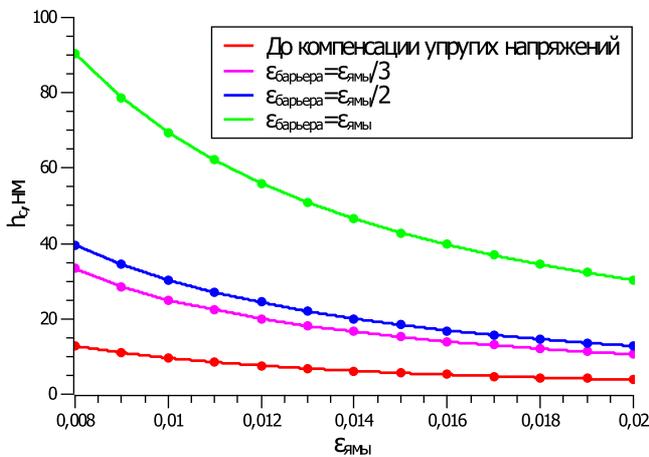


Рис. 10. Графики зависимости критической толщины квантовой ямы от напряжения сжатия в квантовой яме в случае, когда $h_{\text{барьера}} = h_{\text{ямы}}/3$

ка накачки мощность прибора растёт быстрее именно в первом случае.

Данные факты объясняются следующими обстоятельствами:

Внедрение в барьерный слой отрицательного напряжения ведет к увеличению энергетической глубины квантовой ямы. Параметр удержания в ней электронов Ψ растёт: внесение напряжения сжатия в яму приводит к уменьшению Оже-рекомбинации, и при этом благодаря релаксации генерация дислокаций несоответствия исчезает, также изменение глубины ямы приводит к изменению объёма, в котором сосредоточено возбуждение. А чем меньше объём, в котором сосредоточено возбуждение, тем больше плотность возбуждения, тем меньше пороговый ток.

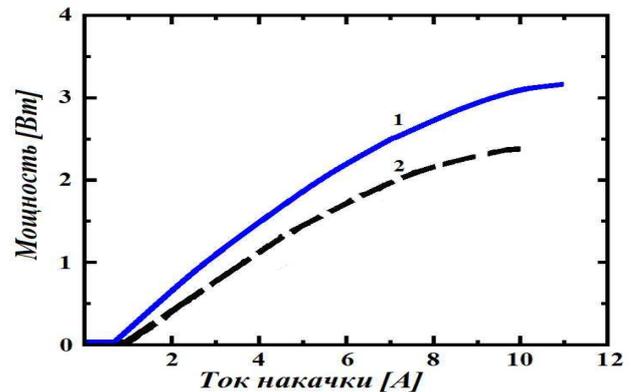


Рис. 11. Ватт-амперная характеристика полупроводниковых лазеров на основе гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ в непрерывном режиме при 25°C : 1 — напряженно компенсированная активная область, 2 — напряженная активная область [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе работы были построены спектры уровней размерного квантования. Был сделан вывод о том, что энергия электронов имеет обратную квадратичную зависимость от ширины ямы и что в квантовой яме по мере уменьшения ее ширины локализуется все меньшее число уровней размерного квантования.

Были построены линии постоянного уровня телекоммуникационного диапазона излучения 1300 и 1550 нм в случаях, когда материал ямы и подложки согласован и когда есть рассогласование, барьеры же оставались согласованными с подложкой. С ростом молярной доли алюминия в растворе ширина ямы должна также расти и для длины волны 1550 нм эта зависимость более резкая. Были изучены положительные и отрицательные эффекты, связанные с внесением напряжения в систему.

Была исследован метод компенсации упруго напряжённой системы. Для этого в барьер вносились напряжения отрицательного знака. Данные действия позволяли увеличить критическую толщину ямы, тем самым, отодвинуть порог генерации дислокаций несоответствия. Варьирую поочередно параметры величины напряжения и ширины барьера, оказалось, что зафиксировав значение напряжения, увеличение ширины барьера приводит к лучшей релаксации системы, а зафиксировав значение ширины, увеличение абсолютного значения напряжения приводит к лучшей релаксации.

Таким образом, с одной стороны, внесение напряжения сжатия в яму уменьшает вклад безызлучательной Оже-рекомбинации, с другой стороны, внесение напряжения растяжения в барьеры снижает общую напряжённость системы, что позволяет делать яму пошире, снижая пороговый ток. Данные действия увеличива-

ют выходную мощность лазера по сравнению с напряжённой системой, что и показал экспериментальный график.

Можно сделать вывод о том, что использование компенсации напряжений позволяет улучшать характеристики проведения сигнала по ВОЛС. Увеличен-

ная мощность излучения приводит к более рациональному использованию усилителей и регенераторов. А более низкий пороговый ток позволяет осуществлять накачку с более низкими энергетическими затратами, что положительно влияет на работоспособность приборов в линии.

-
- [1] *Трещиков В.Н., Листвин В.Н.* DWDM–системы IV. Издание 4-е, М.: Изд-во «Техносфера», 2021.
- [2] *Жуков. А.Е.* Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. СПб.: ООО «Техномедиа», Изд-во «Элмор», 2007.
- [3] *Шуберт Ф.* Светодиоды. / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- [4] *Гермогенов В.П.* Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015.
- [5] *Щука А.А.* Нанoeлектроника. М.: «Физматкнига», 2007.
- [6] *Светогоров В.Н.* Полупроводниковые гетероструктуры AlGaInAs/InP с компенсацией упругих напряжений для лазерных диодов спектрального диапазона 1400–2000 нм. 2022.
- [7] *Зегря Г.Г., Соловьев И.Ю.* // Физика и техника полупроводников. **39**, № 5. 636. (2005).
- [8] *Андреев А.Д., Зегря Г.Г.* // Физика и техника полупроводников. **31**, № 3. 7. (1997).
- [9] *Ekins–Daukes N.J., Kawaguchi K., Zhang J.* // Crystal growth & design. **2**, N 4. 287. (2002).
- [10] *Hirayama Y., Choi W.Y., Peng L.H., Fonstad C.G.* // J. Appl. Phys. **74**. 570. (1993).

AlGaInAs quantum wells for the 1300–1550 nm spectral range

R.V. Dibolskii^{1,a}, A.N. Turkin^{1,b}, A.A. Marmalyuk^{2,c}

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Joint Stock Company «Research Institute Polyus named after M.F. Stelmakh»
Moscow 117342, Russia*

E-mail: ^adibolskii.rv@physics.msu.ru, ^bandrey@turkin.su, ^calmarm@mail.ru

The creation of highly efficient semiconductor lasers in the spectral range 1300–1550 nm is one of the important practical problems of modern quantum electronics. The leading direction in the use of such lasers is the transmission of information over an optical fiber. The improvement of these devices requires an increase in the output power, the level of which for lasers in the considered spectral range is largely determined by the design of the quantum-well active region. In particular, the introduction of elastic stresses into quantum wells of the active region helps to reduce the intensity of the Auger recombination processes and favors an increase in the output power and temperature stability. This work is aimed at finding ways to create quantum wells with an increased level of elastic stresses emitting in the region of 1300–1550 nm. The article takes into account the effect of elastic stresses on the radiation wavelength, calculates the geometry of quantum wells that provide the emission wavelength of 1300–1550 nm, determines the critical thickness of such quantum wells, above which the generation of misfit dislocations begins. Approaches for compensating elastic stresses in quantum wells have also been studied, and it has been shown that the use of barrier layers with elastic stresses of the opposite sign makes it possible to push back the generation threshold of misfit dislocations and improve the radiative efficiency.

PACS: 78.67.-n

Keywords: quantum well, elastic stresses, laser, fiber-optic communication line

Received 30 May 2023.

Сведения об авторах

1. Дибольский Роман Владимирович — студент; e-mail: dibolskii.rv@physics.msu.ru.
2. Туркин Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: andrey@turkin.su.
3. Мармалюк Александр Анатольевич — доктор техн. наук, профессор, начальник отдела; e-mail: almarm@mail.ru.