

На правах рукописи

ДРАКА ОКСАНА ЕВГЕНЬЕВНА

**ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ И $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ:
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА**

**Специальность 05.27.06 - Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новочеркасск - 2003

Работа выполнена на кафедре физики Волгодонского института Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института)

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор **ЛУНИН ЛЕОНИД СЕРГЕЕВИЧ**

Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор
ВАЛЮХОВ ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ
кандидат технических наук, доцент
СМОЛИН АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

Ведущая организация: Физико-технический институт РАН им. А. Ф. Иоффе, РАН,
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «3» июля 2003 г. в «10» часов на заседании диссертационного Совета К 212.304.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук при Южно-Российском государственном техническом университете по адресу: 346428, г. Новочеркасск Ростовской области, ул. Просвещения, 132, ЮРГТУ (НПИ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Южно-Российского государственного технического университета
(Новочеркасского политехнического института)

Автореферат разослан: «29» июля 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доцент



С.А. Горшков

2003-A
11199

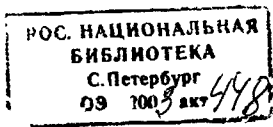
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Инфракрасная техника в последние годы стала мощным инструментом научных исследований и получила широкое распространение во многих практических приложениях. Своим прогрессом она обязана появлению новых материалов, чувствительных в ИК-области спектра, и технологий их изготовления. В первую очередь это относится к многослойным полупроводниковым структурам. Достойное место в ряду узкозонных полупроводников занимают висмутсодержащие гетероструктуры [1], поскольку изменением содержания висмута можно эффективно управлять оптическими свойствами приборов на их основе. Интерес к висмутсодержащим гетероструктурам связан также с возможностью получения полупроводниковых наноструктур с характерными размерами 1-100 нм, вследствие того, что фермиевская длина волны электронов у висмута велика (40 нм). Это дает возможность получать висмутсодержащие сверхрешетки методом градиентной жидкофазной кристаллизации (ГЖК) [2], важнейшее преимущество которого по сравнению с другими методами получения гетероструктур заключается в существенно меньшей стоимости технологии, меньшей сложности технологического процесса и менее жестким требованиям к чистоте исходных материалов.

Технологические трудности выращивания висмутсодержащих твердых растворов до последнего времени замедляли их широкое практическое внедрение. Однако недавние достижения в данной области [1] открывают новые перспективы его получения и применения. Вследствие этого возрастает интерес к фундаментальным свойствам - таким как электронная зонная структура, а следовательно, оптическим и фотоэлектрическим характеристикам указанных материалов [3]. В связи с этим в настоящее время происходит как интенсивное развитие теории явлений в многослойных структурах (структурах с квантовыми ямами), так и разработка новых методов их получения.

Существует целый набор методик расчета электронных состояний в квантово-размерных системах [4]. Для практических целей требуются экспрессные методы расчета, дающие достаточную точность и содержащие по возможности



меньшее количество параметров. С этой точки зрения безусловным лидером является так называемый метод огибающей волновой функции (иногда его называют еще методом эффективной массы). Это приближенный метод, содержащий ряд эмпирических параметров. Как показывают многочисленные сопоставления с экспериментом, он позволяет не только качественно, но и количественно с высокой точностью описать многообразие явлений в гетероструктурах. Приближенность метода в значительной мере компенсируется его гибкостью, простотой и малым количеством фигурирующих эмпирических параметров. Указанные особенности Bi -содержащих гетеросистем делают задачи моделирования их электронного спектра весьма привлекательными. Ряд возможностей получения гетероструктур с заданными свойствами, которые открывает метод ГЖК сулит вполне определенные перспективы в технологии новых приборов ИК оптоэлектроники. Все это делает настоящую работу актуальной и своевременной.

Цель и задачи исследования

Целью работы является расчет энергетического спектра многослойных структур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ и разработка технологии их получения. Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- Расчет энергетических уровней, электронного спектра, распределение огибающей волновой функции по толщине гетероструктур, распределение вероятностей обнаружения электрона в различных квантовых ямах многослойных гетероструктур

$InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.

- Моделирование фазовых равновесий в упругонапряженных гетеросистемах $In-Sb - Bi$ и $Ga-Sb - Bi$.

- Разработка технологии получения многослойных гетерокомпозиций $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ с толщинами слоев порядка 0,1 мкм.

- Расчет спектров отражения и пропускания гетеросистем $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ с квантовыми ямами.

- Определение областей применения гетеросистем $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ и разработка соответствующих практических рекомендаций.

Научная новизна

1. Проведен расчет энергетических уровней, электронного спектра, распределение огибающей волновой функции по толщине гетеро структур, распределение вероятностей обнаружения электрона в различных слоях многослойных гетеро структур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.
2. Проведен учет влияния упругих напряжений на смещение гетерогенных равно весий систем $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.
3. Разработана технология получения гетеро структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ с квантовыми ямами заданной толщины.
4. Произведен расчет спектров отражения и пропускания многослойных гетеро систем $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.
5. Разработаны конструкция фотоприемного устройства на основе гетеро структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ с квантовыми ямами и конструкция квантового каскадного лазера на основе многослойной структуры $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Многослойная структура $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ при толщине слоев 0,1 мкм в диапазоне составов $x \leq 0,008$ имеет энергетический спектр с расщеплением уровней энергии на 2 разрешенные минизоны. При увеличении числа слоев происходит расширение электронного спектра за счет добавления новых энергетических уровней.
2. Многослойная структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ при толщине слоев 0,1 мкм в диапазоне составов $x \leq 0,03$ имеет энергетический спектр с расщеплением уровней энергии на 3 разрешенные минизоны. Установлено, что увеличение числа слоев для данной сверхрешетки ведет к смещению спектра в более длинноволновую область ИК-излучения.
3. Распределение огибающей волновой функции по толщине слоев и распределение вероятности обнаружения электрона для гетеро системы $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.
4. Многослойные структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ могут быть получены методом ГЖК с принудительной гидравлической сменой растворов в ростовом канале. Данная методика позволяет получать сверхтонкие слои порядка 100 нм.

5. Способ получения многослойных упругонапряженных гетероструктур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ основывается на идее уменьшения времени контакта переохлажденного раствора-расплава с подложкой за счет увеличения скорости перемещения подложки относительно раствора-расплава в ячейках уменьшенных размеров. Данная методика позволяет получать слои заданной толщины за счет изменения размеров ячеек, содержащих растворы-расплавы.
6. Варьируя число слоев многослойной $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ структуры, можно менять ее показатель пропускания (отражения).

Практическая значимость

- Получены многослойные структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ методом ГЖК с принудительной гидравлической сменой растворов-расплавов в ростовом канале.
- Разработана технология получения многослойных структур толщиной порядка 0,1 мкм и технология получения слоев заданной толщины.
- Разработаны конструкция фотоприемника на основе сверхрешетки $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ с длиной волны принимаемого излучения $\lambda = 7 + 11$ мкм.
- Разработана конструкция квантового каскадного лазера на основе многослойной структуры $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$, работающего на межуровневых переходах с длинами волн генерации $\lambda_1 = 4,5$ мкм и $\lambda_2 \cong 8,9 + 13,8$ мкм.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах в лаборатории физики полупроводников в ВИ(Ф) ЮРГТУ (НПИ), на семинарах проблемной лаборатории физики ЮРГТУ (НПИ), на восьмой международной научно-технической конференции (Таганрог, 2002 г.), на международной конференции (Ульяновск, 2002 г.), на международной научной конференции (Иваново, 2002).

Публикации и вклад автора

По результатам исследований опубликовано 8 печатных работ, в которых изложены основные положения диссертации. Основные результаты работы

получены автором самостоятельно.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 140 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключительных выводов и списка используемой литературы из 139 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована основная цель, представлена новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены актуальные проблемы исследования и получения структур с квантовыми ямами, рассмотрены методы расчета электронной структуры твердых тел, особенности энергетической структуры сверхрешеток, определена роль висмутосодержащих твердых растворов в оптоэлектронике. Возможность использования структур с квантовыми ямами связана с необходимостью моделирования их энергетического спектра. Все это требует разработки новых методов как теоретического анализа электронных свойств гетероструктур, так и новых методов их получения. В настоящее время существует целый набор методик расчета электронных состояний в квантово-размерных системах (метод сильной связи, метод псевдопотенциала, метод линейной комбинации атомных орбиталей, метод огибающей волновой функции). Из них был выбран метод огибающей волновой функции, обладающий наименьшим количеством входных параметров и достаточной точностью.

Во второй главе произведено численное моделирование электронных свойств квантово-размерных структур. Разработан метод огибающей волновой функции для расчета энергетического спектра и распределения огибающей волновой функции многослойных структур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$. Обоснован тот факт, что в уравнение движения входит эффективный потенциал, сопадающий со скачком зоны проводимости на гетерогранице:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{m^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V_s(z) \right] f_c(z) = \varepsilon \cdot f_c(z), \quad (1)$$

где $V_s(z)$ - скачок зоны проводимости на гетерогранице, $f_c(z)$ - огибающая волновая функция. Величина скачка зоны проводимости была определена как разность уровней Ферми контактирующих материалов [5]. В результате решения (1) было получено дисперсионное уравнение, определяющее дискретные уровни энергии

$$m_{11}\alpha + m_{12}\alpha^2 + m_{21} + m_{22}\alpha = 0, \quad (2)$$

где m_j - коэффициенты матрицы переноса M данной структуры. Матрица переноса M многослойной структуры определялась как произведение матриц переноса отдельных слоев структуры M_n . В случае ямы

$$M_n \equiv \begin{vmatrix} \cos \beta_n d_n & \beta_n^{-1} \sin \beta_n d_n \\ -\beta_n \sin \beta_n d_n & \cos \beta_n d_n \end{vmatrix}. \quad (3)$$

В случае барьера

$$M_n \equiv \begin{vmatrix} ch \alpha_n d_n & \alpha_n^{-1} sh \alpha_n d_n \\ \alpha_n sh \alpha_n d_n & ch \alpha_n d_n \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где d_n - толщина n -слоя, $\alpha_n^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(\varepsilon - U_n)$, $\beta_n^2 = \frac{2m}{\hbar^2}\varepsilon$, ε - дискретное значение энергии, U_n - величина барьера на гетерогранице.

Для расчета энергетических уровней использовалась программа, написанная на языке Си. Точность вычисления уровней энергии составляет 10^{-15} , что позволяет получать правильное распределение волновых функций при высоте барьера в несколько сотых эВ.

Для гетеросистемы $GaSb_{1-x}Bi_xGaSb$ с квантовыми ямами произведен расчет электронного спектра. Показано, что при увеличении числа слоев происходит расширение электронного спектра за счет добавления новых энергетических уровней. Энергетический спектр электронов в зоне проводимости в зависимости от толщины слоя $GaSb$ 13-слойной структуры $GaSb_{0,992}Bi_{0,008}GaSb$ представлен на рис. 1.

Энергетический спектр электронов в зоне проводимости в зависимости от толщины слоя $InSb$ 11-слойной структуры $InSb_{0,97}Bi_{0,03}InSb$ представлен на рис. 2. Установлено, что увеличение числа слоев для данной сверхрешетки ведет к

смещению спектра в более длинноволновую область ИК-излучения (с $\lambda = 9,1 \mu\text{м}$ до $\lambda = 11,8 \mu\text{м}$).

Таким образом, в многослойных гетеросистемах $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ и $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$ при толщине слоев порядка 1 мкм сказываются эффекты размерного квантования – зависимости энергетического спектра структуры от толщины слоя, югда последняя сравнима с длиной волны де Бройля. Указанное открывает возможность регулировать длину волны излучения, изменяя не состав полупроводника, а толщину слоев или их количество, что наглядно продемонстрировано на рис. 1-2.

Для многослойной системы $\text{GaSb}_{0,992}\text{Bi}_{0,008}/\text{GaSb}$ рассчитано распределение огибающей волновой функции по толщине гетероструктуры (рис. 3), а также распределение вероятности обнаружения электрона в различных слоях системы (рис. 4).

В третьей главе проведено моделирование интерфазных взаимодействий в гетеросистемах In-Sb-Bi и Ga-Sb-Bi . Рассчитаны упругие константы соединений InBi и GaBi , входящие в уравнения фазовых равновесий гетеросистем $\text{InSbBi}/\text{InSb}$ и $\text{GaSbBi}/\text{GaSb}$; определены равновесные составы жидкой и твердой фаз соответствующих гетеросистем с учетом упругих напряжений на гетерогранице, найдены оптимальные условия для получения гетероструктур с заданным электронным спектром в поле градиента температуры.

В литературе отсутствуют кристаллохимические данные по бинарным компонентам InBi и GaBi . При этом полный анализ гетерофазных взаимодействий, необходимый для технологических процессов в получения гетероструктур на основе твердых растворов InSbBi и GaSbBi , не представляется возможным. Поэтому моделирование упругих свойств твердых растворов InSbBi и GaSbBi является необходимым этапом настоящей работы.

На основе теории ионных кристаллов [5] были найдена длина связи соединений InBi и GaBi , модуль всестороннего сжатия и упругие постоянные c_{11} , c_{12} c_{44} . Для соединения InBi были получены значения $c_{11}=104,8$ ГПа, $c_{12}=85,6$ ГПа, $c_{44}=77,7$ ГПа. Для соединения GaBi $c_{11}=162,4$ ГПа, $c_{12}=83,2$ ГПа, $c_{44}=98,3$ ГПа.

Получены фазовые диаграммы, отражающие влияние упругих напряжений на распределение молярных долей компонентов и на коэффициенты распределения компонентов. Установлено, что при увеличении молярной доли висмута в расплаве увеличивается влияние упругих напряжений на распределение компонентов в твердой фазе и соответственно на коэффициенты распределения компонентов. На основании расчета фазовых равновесий выбраны температуры процессов эпитаксии многослойных структур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ и начальные концентрации компонентов в растворе.

В четвертой главе описано технологическое оборудование, которое использовалось для получения многослойных гетеросистем методом ГЖК, разработана технология получения многослойных упругонапряженных структур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ с принудительной гидравлической сменой растворов в ростовом канале и технология получения слоев заданной толщины за счет изменения размеров ячеек, содержащих раствор-расплавы. Точность проведения технологического процесса обеспечивалась регулированием основных параметров с помощью ЭВМ.

Технология получения многослойных структур с принудительной гидравлической сменой растворов в ростовом канале позволяет получать сверхтонкие слои порядка 100 нм. В основе нее лежат идеи снижения температур эпитаксиального наращивания, уменьшения времен роста и ограничения объема используемой жидкой фазы [6]. Раствор помещается в тонком зазоре, между подложкой и источником (рис. 5), при этом замена растворов осуществляется путем их принудительной прокатки через капиллярный канал в релаксационном режиме (состоянии течения раствора).

Для исключения подрастворения предыдущих слоев, использовались предварительно переохлажденные раствор-расплавы. Для многослойной структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ величина переохлаждения составила 9,5 – 12,5 К, для многослойной структуры $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ – 13,5 – 17 К. Допустимое переохлаждение ограничивается сверху величиной 15 К для системы $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и 20 К для системы $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ в связи с повышением вероятности спонтанной кристаллизации а так же большими скоростями эпитаксиального роста.

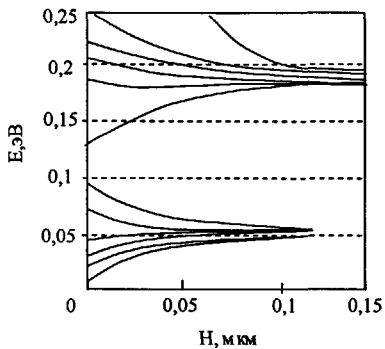


Рис. 1. Энергетический спектр электронов в зоне проводимости в зависимости от толщин барьеров 13-слойной гетероструктуры $\text{GaSb}_{0,992}\text{Bi}_{0,002}/\text{GaSb}$. Толщина слоев GaSbBi равна 0,1 мкм.

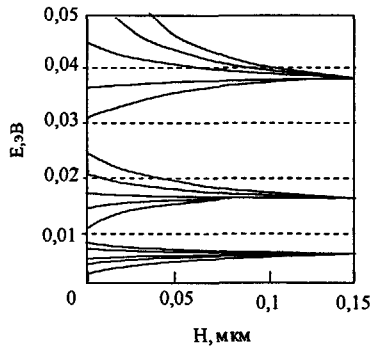


Рис. 2. Энергетический спектр электронов в зависимости от толщины слоев InSb 11-слойной гетероструктуры $\text{InSb}_{0,97}\text{Bi}_{0,03}/\text{InSb}$. Толщина слоев InSbBi равна 0,1 мкм.

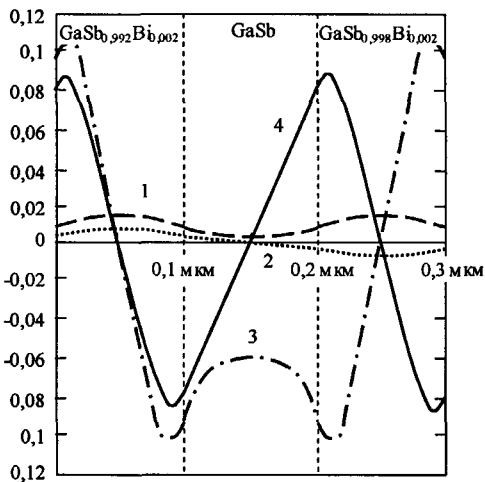


Рис. 3. Распределение волновой функции по слоям 3-слойной структуры $\text{GaSb}_{0,992}\text{Bi}_{0,002}/\text{GaSb}$ 1,2,3,4 – распределение волновых функций для 1,2,3,4 уровней пространственного квантования соответственно. Толщина слоев равна 0,1 мкм.

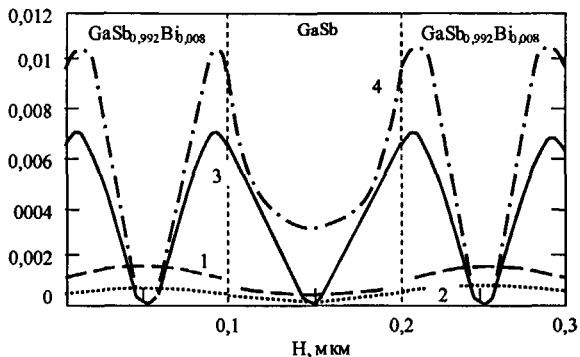


Рис. 4. Распределение вероятностей обнаружения электрона по толщине слоев для 3-х-слойной системы системы $GaSb_{0.992}Bi_{0.008}/GaSb$ для 1,2,3,4 уровней пространственного квантования.

Был выбран следующий температурный интервал проведения эпитаксии: для $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ – 623 – 633 К; для $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ – 896 – 906 К. Верхняя граница обусловлена сильным увеличением скорости роста основных и вспомогательных слоев, нижняя граница определялась началом процесса кристаллизации. Величина температурного градиента составила 25-35 К для системы $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и 15 – 30 К для системы $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$. Была выбрана толщина канала 100 – 500 мкм. С уменьшением толщины канала наблюдались трудности в обеспечении параллельности подложки и источника.

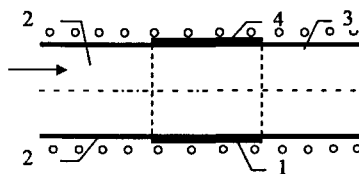


Рис. 5. Схема эпитаксии в ростовом канале: 1 – подложки, 2 – стенки канала, 3 - источник, нагреватели, 4 – источник.

Разработана технология получения многослойных упругонапряженных гетерокомпозиций в основе которой лежит идея уменьшения времени контакта переохлажденного раствора-расплава за счет увеличения скорости перемещения подложки относительно растворов-расплавов в ячейках уменьшенных размеров.

Суть предложенного технологического подхода заключается в формировании многослойной гетероструктуры за один процесс перемещения подложки относительно ячеек с растворами-расплавами, что обуславливает постоянную скорость перемещения подложки относительно всех ячеек и, как следствие, одинаковую толщину квантовых ям. Изменение толщин эпитаксиальных слоев различного состава достигается за счет изменения размеров ячеек, содержащих растворы-расплавы. Исходя из требований технологического процесса, была сконструирована кассета (рис. 6), позволяющая формировать многослойные структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$.

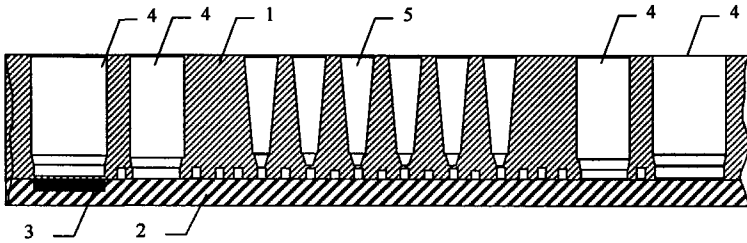


Рис. 6. Схема графитовой лодочки для жидкофазной эпитаксии многослойных гетероструктур 1 – неподвижный корпус кассеты; 2 – подвижный слайдер; 3 – подложка; 4 – ячейки для волноводных слоев; 5 – ячейки для растворов-расплавов квантово-размерных слоев



Рис. 7. Многослойная структура $GaSb_{0,992}Bi_{0,008}/GaSb$, Толщины слоев 0, 1 мкм, увеличение $\times 4 \cdot 10^4$.

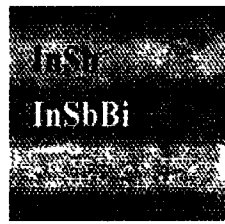


Рис. 8. Многослойная структура $InSb_{0,97}Bi_{0,03}/InSb$. Толщины слоев 0, 1 мкм, увеличение $\times 8 \cdot 10^4$.

Нарис. 7 – 8 представлены микрофотографии многослойных структур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ с толщинами слоев 0,1 мкм.

В пятой главе проведен расчет спектров отражения и пропускания многослойных гетероструктур $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ и $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ и освещены вопросы их практической реализации.

На языке программирования MathCAD написана программа, которая решает задачу распространения света через слоистую среду. Она производит расчет спектра отражения и пропускания эпитаксиальных структур с квантовыми ямами. Программа может быть полезна тем, кто занимается оптической спектроскопией многослойных эпитаксиальных структур и созданием элементов оптоэлектронных приборов (брэгговских зеркал, просветляющих покрытий и т.д.). Показано, что варьируя число слоев многослойной структуры, можно менять ее коэффициент отражения (и соответственно пропускания), и в зависимости от этого использовать ее как фотоприемное устройство или отражающее покрытие в волноводах (рис. 9). При числе слоев 10-15 многослойную структуру $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ с толщинами слоев 0,1 мкм можно использовать как отражающее покрытие для длины волны $\lambda = 7,7$ мкм. При увеличении содержания висмута в твердой фазе от $x=0,01$ до $x=0,03$ наблюдается уменьшение коэффициента отражения на 4-10%. Изменяя угол наклона падающего излучения, можно менять величину коэффициента пропускания (отражения) многослойной структуры, не производя изменений в геометрии самой многослойной структуры (рис. 10). При угле падения излучения, равном 0 многослойная структура $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ имеет наибольший коэффициент пропускания и может быть использована в фотоприемных устройствах с длиной волны $\lambda = 7-11$ мкм.

На межподзонных переходах носителей заряда в квантовых ямах уже создан ряд приборов, таких как квантовый каскадный лазер [7], работающий в дальнем ИК диапазоне. Однако до сих пор оптические межуровневые переходы остаются малоизученным явлением. На основе многослойной структуры $GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb$ при $x < 0,008$ может быть изготовлен квантовый каскадный лазер, работающий на межуровневых переходах с длинами волн излучения $\lambda_1 = 4,5$ мкм и $\lambda_2 \approx 8,9 + 13,8$ мкм. Предложено объяснение электронных переходов между разрешенными мини-зонами. При расстоянии между зеркалами резонатора примерно 800 мкм пороговая плотность тока j_{th} имела при $T=300$ К значение $\approx 2,5 \cdot 10^6$ А/м² (пороговый

ток $I_m \approx 230 \text{ мА}$). Стимулированное излучение ближнего ИК-диапазона регистрировалось с помощью фотодиода ФДВ-К.

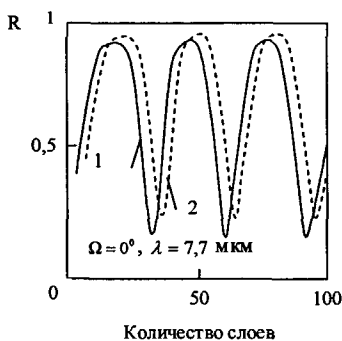


Рис. 9 Зависимость коэффициента отражения R многослойной структуры $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ от количества слоев. Угол падения света $\Omega = 0^\circ$, длина волны падающего излучения $\lambda = 7,7 \text{ мкм}$, толщина слоев $0,1 \text{ мкм}$. 1 – $x=0,03$; 2 – $x=0,01$.

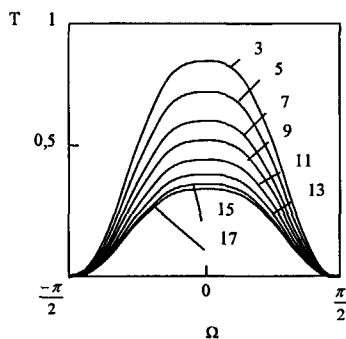


Рис. 10. Зависимость коэффициента пропускания T многослойной структуры $InSb_{0,97}Bi_{0,03}/InSb$ от угла падения излучения при различном числе слоев. Число слоев 3–17.

Дальнее ИК-излучение было обнаружено с помощью фотоприемников $Ge\langle Si \rangle$ и $Si\langle B \rangle$, имеющих при температурах вблизи температуры жидкого гелия область чувствительности приблизительно в диапазоне $\lambda = 5 - 29 \text{ мкм}$. Для отсечки коротковолнового излучения ($\lambda \approx 4,5 \text{ мкм}$) использовались фильтры из $NaCl$. Излучение наблюдалось в импульсном режиме, длительность импульсов тока составляла 300 нс .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для многослойной гетероструктуры $GaSb_{0,992}Bi_{0,008}/GaSb$ произведен расчет электронного спектра. Показано, что при увеличении числа слоев происходит расширение электронного спектра за счет добавления новых энергетических уровней. Для данной системы рассчитано распределение обгибающей волновой функции по толщине гетероструктуры, а также распределение вероятностей обнаружения электронов в различных слоях системы.

2. Для многослойной системы $InSb_{1-x}Bi_x/InSb$ также произведен расчет энергетического спектра. Установлено, что увеличение числа слоев для данной

сверхрешетки ведет к смещению спектра в более длинноволновую область ИК-излучения (с $\lambda = 9,1 \mu\text{мкм}$ до $\lambda = 11,8 \mu\text{мкм}$ при $x=0,03$).

3. Получены фазовые диаграммы, отражающие влияние упругих напряжений на смещение фазовых равновесий гетеросистем $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ и $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$. Установлено, что при уменьшении температуры эпитаксии уменьшается влияние упругих напряжений на распределение молярных долей компонентов и на коэффициенты распределения компонентов. При увеличении молярной доли висмута в расплаве увеличивается влияние упругих напряжений на распределение компонентов в твердой фазе.

4. Разработана технология получения многослойных структур $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ и $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$ методом ГЖК с принудительной гидравлической сменой растворов в растущем канале. Данная технология позволяет получать сверхтонкие слои порядка 100 нм.

5. Разработана методика получения многослойных упругонапряженных гетероструктур $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ и $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$, в основе которой лежит идея уменьшения времени контакта переохлажденного раствора-расплава с подложкой за счет увеличения скорости перемещения подложки относительно раствора-расплава в ячейках уменьшенных размеров. Данная технология позволяет получать слои заданной толщины за счет изменения размеров ячеек, содержащих раствор-расплавы.

6. Решена задача распространения света через структуру с квантовыми ямами $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ и $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$. Произведен расчет спектра отражения и пропускания данных структур. Показано, что варьируя число слоев многослойной структуры, можно менять ее показатель пропускания (отражения).

7. Многослойную структуру $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ можно применять в качестве отражателей (брегговских зеркал) при числе слоев 11 и более, толщине слоев 0,1 мкм. При нормальном падении многослойная структура структура $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$ имеет наибольший коэффициент пропускания, и может быть использована в фотоприемных устройствах с длиной волны $\lambda = 7,11 \mu\text{мкм}$.

8. На основе многослойной структуры $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaSb}$ с содержанием висмута в твердой фазе $x < 0,008$ может быть изготовлен квантовый каскадный лазер, работающий на межуровневых переходах с длинами волн излучения $\lambda_1 = 4,5$

мкм и $\lambda_2 \cong 8,9 \div 13,8$ мкм. При расстоянии между зеркалами резонатора примерно 800 мкм пороговая плотность тока j_{th} имела при $T=300$ К значение $\approx 2,5 \cdot 10^6$ А/м² (пороговый ток $I_{th} \cong 230$ мА).

Основные работы опубликованы в работах:

1. Лунин Л.С., Благин А.В., Драка О.Е. Исследование энергетического спектра в системе квантовых ям для гетеросистемы $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-InSb}$. // Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки.- 2002.- №1.- С. 84 – 87.
2. Л.С. Лунин, А.В. Благин, О.Е. Драка, М.А. Афиногорова. Влияние эффектов размерного квантования на спектр излучения многослойных гетероструктур InSbBi/InSb . // Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки.- 2002.- №3.- С. 45 – 47.
3. Благин А.В., Овчинников В.А., Драка О.Е. Гетероструктуры InSbBi/InSb на квантовых ямах: Тр. междунар. конф. Оптика, оптоэлектроника и технологии. – Ульяновск: УлГУ, 2002.- С. 75.
4. Драка О.Е. Поглощение излучения в δ -легированной сверхрешетке на основе InSbBi . Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки.- 2002.- Спецвып. – С. 90 – 92.
5. Овчинников В.А., Благин А.В., Драка О.Е. Влияние размерного квантования на свойства многокомпонентных висмутидов. Кристаллизация в наносистемах: Сб. тез. междунар. науч. конф. 10-12 сент. 2002 г. – Иваново, 2002.- С. 134.
6. Благин А.В., Баранник А.А., Драка О.Е., Овчинников В.А. Электронный спектр сверхрешеток $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{InSb}$. // Тр. VIII междунар. науч. техн. конф., (Дивноморское, Россия, 14-19 сент. 2002 г.). – Таганрог: ТГТУ, 2002.- Ч.1. С. 172-173.
7. Лунин Л.С., Благин А.В., Драка О.Е., Овчинников В.А. Размерное квантование в твердых растворах $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x$. // Кристаллизация и свойства кристаллов. – Межвуз. сб. науч. тр. – Новочеркасск: Набл, 2003. С. 3-7.
8. Благин А.В., Овчинников В.А., Драка О.Е. Длинноволновое излучение, обусловленное минизонными переходами в многослойной структуре $\text{GaSb}_{0,97}\text{Bi}_{0,03}/\text{GaSb}$. // Кристаллизация и свойства кристаллов. – Межвуз. сб. науч. тр. – Новочеркасск, Набл, 2003. С. 9-11.

Цитированная литература

1. Р.Х. Акчурин, Д.В. Комаров. – ЖТФ, 1997, т. 67, №7, с. 42.
2. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Благин А.В. Градиентная жидкофазная кристаллизация многокомпонентных полупроводниковых материалов. Изд-во РГУ, 2003. 286 с.
3. В.Г. Дейбук, Я.И. Виллюк, И.М. Раренко. ФТП, 33, 289 (1998).
4. Силин А.П. Полупроводниковые сверхрешетки. – Успехи физических наук, т.147, вып.3., ноябрь, 1985.
5. Харрисон У. Теория твердого тела. – М.: Мир, 1972.
6. Р.Х. Акчурин, Д.В. Комаров. – ЖТФ, 1997, т. 67, №7, с. 50.
7. Intersubband transitions in quantum wells / Ed. E. Rosencher, B. Levine // NATO ASI Series. Ser. B. Physics. V. 288. Plenum Press. N.-Y. and London, 1992.

2003-A
11199

№ 11199

Подписано в печать Объем 1,2 пл.

Печать оперативная. Тираж 100 экз.

Южно-российский государственный технический университет (НПИ).

346409, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132