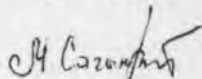


НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Межведомственный диссертационный совет Д. 01.07.342

на правах рукописи
УДК 628.9.037+537.311.33(575.2)(04)



Сексенбаев Максат Сагынлович

**МЕХАНИЗМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГАШЕНИЯ
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ГЕРМАНИЯ,
СФОРМИРОВАННЫХ В МАТРИЦЕ КРЕМНИЯ**

Специальность 01.04.07- физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек-2008

Работа выполнена в Институте
физики полупроводников СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Шамирзаев Тимур Сезгирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Макаров Владимир Петрович
кандидат физико-математических наук, доцент
Кадышев Сагынтай Кадышевич

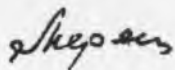
Ведущая организация: Институт геохимии СО РАН им.
А.П.Виноградова, г. Иркутск, Россия

Защита состоится 11 апреля 2008 г. в 14-00 на заседании Межведомственного диссертационного Совета Д.01.07.342 при Институте физики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Иссык-Кульском государственном университете им. К.Тыныстанова и Ошском государственном университете по адресу: 720071, г. Бишкек, просп. Чуй, 265а.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Национальной академии наук Кыргызской Республики.

Автореферат разослан « 10 » марта 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета к.ф.-м.н.
Л.К.



Меренкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На сегодняшний день исследование квантовых точек (КТ) представляет большой интерес из-за возможности создания на их основе эффективных полупроводниковых лазеров, фотоприемников и логических элементов для волоконно-оптических линий связи. Интерес к КТ возник еще в 80-х годах, однако, трудности изготовления массивов КТ, например, путем селективного травления структур с квантовыми ямами или создания диэлектрических матриц с кластерами полупроводников, не позволили существенно продвинуться в этой области. Успех был достигнут при использовании эффекта самоорганизации наноструктур в гетероэпитаксиальных полупроводниковых системах.

Одной из перспективных систем КТ является Ge в матрице Si. На основе КТ Ge/Si по технологии, совместимой с современным производством полупроводниковых приборов на основе кремния можно создавать фотодиоды, работающих в ближней инфракрасной (ИК) области спектра (1,3 - 1,55 мкм). Формирование таких КТ происходит по механизму Странского-Крастанова: на поверхности кремния сначала формируется смачивающий слой германия толщиной около 4 монослоев, а затем на нем происходит рост островков германия. К настоящему времени, изучение КТ, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в системе Ge-Si, показало, что в процессе формирования КТ происходит перемешивание германия и кремния, т.е. КТ состоят из твердого раствора GeSi. Размер и состав КТ GeSi зависят от температуры их роста. Варьируя условия эпитаксии можно создавать массивы КТ различной плотности (10^{11} - 10^{12} см⁻²) с различными размерами квантовых точек (10 - 200 нм). Точки, выращенные при низких температурах эпитаксии (300 - 400 °С), напряжены и имеют небольшие размеры. По мере повышения температуры размер точек и содержание в них кремния увеличивается, а напряжение уменьшается из-за введения дислокаций несоответствия и/или увеличению доли кремния в КТ.

На первых стадиях изучения структур с КТ GeSi/Si была обнаружено, что в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) таких структур появляется полоса, с энергий в максимуме ($h\nu_{PL}$) примерно 0.8 эВ. Эту линию связали с рекомбинацией экситонов, локализованных в квантовых точках. Поскольку гетеропереход GeSi/Si имеет энергетическую

структуру второго рода, разница между максимумом полосы ФЛ КТ и шириной запрещенной зоны кремния ($E_g = 1.17$ эВ) соответствует энергии локализации дырки в КТ. Характерные значения энергии локализации дырок, рассчитанные для КТ GeSi/Si, составляют $E_h = 300 - 400$ мэВ, что согласуется с энергетическим положением линии ФЛ КТ $h\nu_{PL} = E_g - E_h$. Можно было бы ожидать, что энергия активации температурного гашения ФЛ КТ (E_A) будет равна энергии локализации дырки. Между тем, по многочисленным литературным данным значение E_A , как правило, существенно меньше значения E_h . К моменту начала работы над диссертацией механизмы рекомбинации носителей заряда в структурах с КТ GeSi/Si, обеспечивающие наблюдаемое расхождение между E_A и $h\nu_{PL}$ оставались неизвестными.

Другая проблема, возникающая при исследовании ФЛ структур с КТ GeSi/Si, обусловлена наличием дислокаций несоответствия на гетерогранице КТ и кремниевой матрицы. Спектры ФЛ кристаллов Si с дислокациями содержат полосы ФЛ D1 и D2, энергетическое положение которых близко к положению полосы ФЛ, рекомбинации экситонов, локализованных в квантовых точках. Следовательно, ФЛ в системах с КТ, может быть связана не только с рекомбинацией экситонов в КТ, но и с рекомбинацией носителей заряда, через уровни в запрещенной зоне кремния, обусловленные дислокациями несоответствия на гетерограницах GeSi/Si. Природа свечения связанных с дислокациями линий D1 и D2, к моменту начала работы не установлена.

Исследования проводились в соответствии в рамках плановой темы Института физики полупроводников СО РАН по программе СО РАН № 9.1 «Физика полупроводников и диэлектриков, полупроводниковые, композитные нанокристаллические и фотоннокристаллические материалы и структуры, твердотельные системы пониженной размерности, атомные и молекулярные кластеры».

Цель диссертационной работы состояла в исследовании механизмов рекомбинации неравновесных носителей заряда в структурах с квантовыми точками германия, сформированных в матрице кремния. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Определение природы фотолюминесценции дислокаций в Si, светящихся в области спектра вблизи энергии 0.8 эВ.
2. Выбор критериев, позволяющих разделять фотолюминесценцию, обусловленную рекомбинацией неравновесных носителей заряда в квантовых точках GeSi/Si и на дислокациях в кремнии.
3. Выяснение причин, приводящих к различию между значениями энергии активации температурного гашения фотолюминесценции квантовых точек и энергии локализации дырки в КТ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Появление линии D2 в спектрах ФЛ, кремния с дислокациями, обусловлено образованием кластеров междоузельных атомов кремния около ядра дислокации.
2. Различные зависимости положения максимума линии ФЛ от мощности оптической накачки и температуры позволяют достоверно разделить ФЛ, обусловленную рекомбинацией экситонов в КТ GeSi/Si и ФЛ, связанную с рекомбинацией носителей заряда через уровни дислокаций в кремниевой матрице.
3. Температурное гашение ФЛ КТ GeSi/Si описывается двумя энергиями активации, одна из которых E_{A2} зависит, а другая E_{A1} не зависит от энергии возбуждения ФЛ. E_{A2} определяется рекомбинацией неравновесных носителей заряда в кремниевой матрице до захвата в КТ, а E_{A1} обусловлена выбросом дырок из КТ на уровни дефектов, локализованных в окрестности КТ.

Новизна полученных результатов. Все основные результаты и выводы работы получены впервые.

1. Впервые показано, что линия D2 в спектрах ФЛ кремния с дислокациями, связана с образованием кластеров междоузельных атомов вблизи ядра дислокации.
2. Показано, что отличие энергии активации температурного гашения ФЛ КТ GeSi/Si от энергии локализации дырок в КТ, обусловлено двумя причинами: выбросом дырки из КТ на уровни локализованных вблизи КТ дефектов и процессами безызлучательной рекомбинации в матрице.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

Предложена методика, позволяющая однозначно определять принадлежность линии ФЛ с энергией в максимуме 0,8 эВ в гетероструктурах с КТ GeSi/Si, к рекомбинации носителей заряда через уровни размерного квантования в КТ или через уровни, образованные дислокациями в кремниевой матрице.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на: Всероссийском совещании по нанофотонике-2004, (Нижегород, Россия, 2004), Совещание по росту кристаллов, пленок и дефектам структуры кремния («Кремний-2004»). (Иркутск, Россия, 2004), SUMMER SCHOOL on Radiation Physics SCORPh-2004. (Бишкек, Кыргызстан, 2004), 7-й международная конференция Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и

микросистемы. (Ульяновск-Владимир, Россия, 2005), 4-th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (Chamonix Mont-Blanc, France, 2006) 2-м Международном конгрессе по радиационной физике, сильноточной электронике и модификации материалов (Томск, Россия, 2006), Международной школы-семинара по люминесценции и лазерной физике, (Иркутск, Россия, 2006) 11-й конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, (Владивосток, Россия, 2007) а также докладывалось, и обсуждалось на семинарах сектора люминесцентного анализа структуры Института физики полупроводников СО РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации 124 страниц, включая 30 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 105 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, сформулированы основные цели и приведены защищаемые положения.

В главе 1 приведен обзор работ, представлен обзор литературных данных посвященных исследованию гетероструктур с КТ Ge/Si. Рассматриваются особенности электронной структуры таких гетероструктур. Поскольку полосы фотолюминесценции (ФЛ) структур с КТ Ge/Si лежат в одном спектральном диапазоне с полосами ФЛ, обусловленными рекомбинацией неравновесных носителей заряда через уровни примесей и дефектов кремниевой матрицы проведен обзор работ, посвященных собственной и несобственной фотолюминесценции кремния.

Во второй главе, посвященной методическим вопросам исследования, приведены условия получения исследованных в работе слоев и структур. Описана экспериментальная установка для измерения фотолюминесценции (ФЛ) и выбор режима работы германиевые фотоприемника. Описаны нормировка спектров ФЛ на пропускание оптической системы и спектральную чувствительность фотоприемника. Рассмотрены факторы, определяющие чувствительность методики ФЛ.

Эксперименты проводились на установке, созданной на основе монохроматора СДЛ-1. Сигнал ФЛ регистрировался германиевым р-и-п диодом типа EI-L фирмы Edinburgh Instruments, который охлаждался жидким азотом, в режиме синхронного детектирования. В качестве синхронного детектора использовались фазочувствительные

нановольтметры типа 232В фирмы INIPAN и SR830 фирмы Stanford research system.. ФЛ возбуждалась излучением Ar^+ ($h\nu=2,54$ эВ), YAG:Nd ($h\nu=1,17$ эВ) и He-Ne ($h\nu=1,08$ эВ) лазеров. Для фильтрации лазерного излучения на щель монохроматора надевались стандартные полосовые фильтры 1.0-1.5 мкм и 1.5-2.5 мкм. Управление разверткой монохроматора по длинам волн, измерение интенсивности ФЛ с заданной точностью, учет флуктуаций интенсивности лазера и калибровка шумового тока осуществлялись ЭВМ IBM PC. Измерения ФЛ проводилось в широком диапазоне температур (4.2-300 К) и интенсивностей возбуждения. Для измерения спектров ФЛ при различных температурах образца использовались терморегулируемая криостатная система УТРЕКС, которая позволяла устанавливать и поддерживать температуру образца с точностью ± 0.1 К.

В работе исследовались образцы кремния с дислокациями, выращенного методами Чохральского и безтигельной зонной плавки, а также эпитаксиальные структуры с квантовыми точками германия в матрице кремния, выращенные методами МЛЭ и мосгидридной эпитаксии (МСГЭ) при различных температурах роста. Была также исследована структура с КТ GeSi, выращенная методом МЛЭ на субмонослое SiO_2 , формирование которого на кремниевой подложке осуществлялось посредством напуска в ростовую камеру кислорода при давлении $P=10^{-4}$ Па.

Глава 3 посвящена определению природы свечения дислокаций в Si и сравнительному анализу ФЛ гетероструктур с КТ SiGe/Si и ФЛ, связанной с дислокациями в кремнии.

В первом параграфе главы изучается атомная структура и ФЛ кремния содержащего дислокации.

Анализ изображения поперечного сечения (110) кремниевой слитки, обработанного в селективном травителе для выявления сетки дислокаций позволил нам определить, что плотность 60° – дислокаций в образцах изменяется пределах 10^6 и 10^8 см⁻². В приведенном на рис.1 спектре

низкотемпературной ФЛ образца с 60° – дислокациями видны все 4 линии D1-D4. Облучение образца при температуре 400°C электронным пучком с



Рис.1 Спектры ФЛ кремния с 60° дислокациями до(1) и после(2) облучения пучком электронов с энергией 300 кэВ. Температура измерения 5 К.

энергией электронов 300 кэВ и дозой $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, приводит к возрастанию интенсивности линии D2. Электронная микроскопия¹ облученного образца показывает, что 60° – дислокации сильно взаимодействуют с точечными дефектами, образовавшимися в результате облучения. In situ облучение образца в электронном микроскопе показывает, что образование кластеров междоузельных атомов вокруг ядра дислокации происходит при температуре 300°C за времена порядка 1-2 минут.

Возрастание интенсивности пика D2 после импульсного облучения электронной пушкой большой площади образцов FZ-Si, содержащих 60° -ные дислокации, и появление дефектных конфигураций междоузельных атомов типа I_4 в ядре 60° -ной дислокации при in situ ВРЭМ облучении электронами однозначно доказывают связь пика D2 с кластерами междоузельных атомов. Таким образом, возрастание интенсивности линии D2 при возрастании концентрации кластеров I_4 , свидетельствует о том, что встроенные в ядро дислокации кластеры I_4 являются центрами излучательной рекомбинации, ответственными за появление линии D2.

Во втором параграфе главы 3 представлены результаты сравнительного анализа зависимости спектров ФЛ от КТ и дислокаций от мощности оптической накачки и температуры измерения. Показан различный характер полученных зависимостей.

¹ Данные электронной микроскопии получены к.ф.м.н Л.И.Федтой

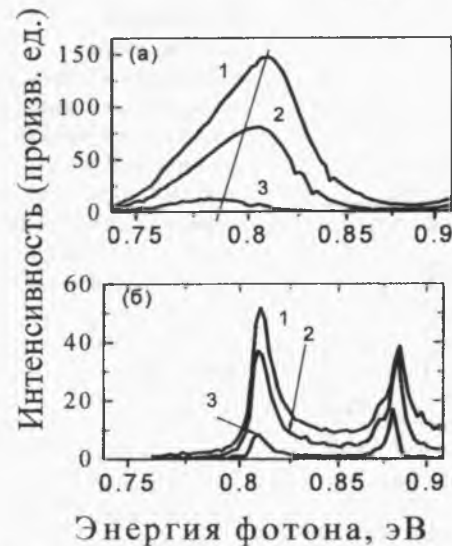


Рис.2 Зависимость ФЛ от мощности оптической накачки (а) для структур с КТ GeSi/Si, и (б) кремния с дислокациями. Спектры измерены при 5 К. Мощность излучения лазера, мВт: 1–68; 2–23; 3–2.

и электронами, локализованными в квантовой яме, образующийся в матрице Si на гетерогранице с КТ GeSi. Высокоэнергетический сдвиг полосы ФЛ с повышением плотности мощности возбуждения появляется из-за заполнения электронами квантовой ямы при повышении темпа генерации фотовозбужденных носителей заряда.

Положение линий ФЛ дислокаций при увеличении мощности оптической накачки остаётся неизменным, как это видно на рис.2б, поскольку сигнал ФЛ дислокаций связан с рекомбинацией носителей с глубоких уровней в запрещённой зоне, положение которых не зависит от мощности оптической накачки.

При увеличении температуры образца с 5 К до 140 К линии ФЛ, связанные с рекомбинацией на дислокациях смещаются как это видно на рис.3б в область меньших энергий. Данное смещение вызвано температурным уменьшением ширины запрещенной зоны Si. В то же время положение линии ФЛ от КТ слабо зависит от температуры и смещается с ее повышением в высокоэнергетическую область спектра, как это показано на рис.3а. Этот сдвиг обусловлен заполнением возбужденных дырочных состояний в КТ. Рекомбинация дырок, на

Как видно из рис. 2а. для структур с КТ GeSi/Si с увеличением мощности накачки происходит увеличение ширины линии сигнала ФЛ и сдвиг его максимума в область больших энергий. Высокоэнергетический сдвиг линии ФЛ при изменении плотности мощности возбуждения в спектрах структур с КТ обусловлен энергетической структурой гетерограницы GeSi/Si, образующей структуру второго рода. В таких структурах ФЛ связана с непрямым в реальном пространстве оптическим переходам между дырками, локализованными в КТ,

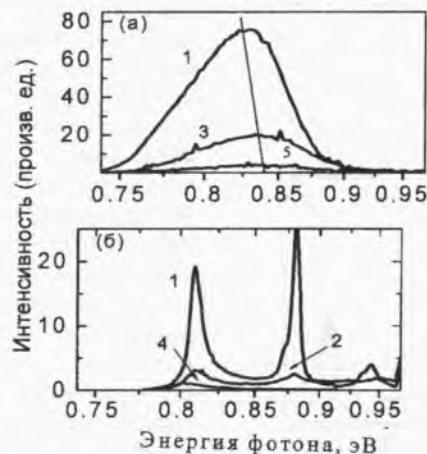


Рис.3 Спектры ФЛ при различных температурах (а) для структур с КТ GeSi/Si, (б) кремния с дислокациями. Температура измерения, К: 1-5; 2-60; 3-130; 4-140; 5-300.

использованы для однозначного разделения ФЛ КТ и дислокаций.

Глава 4 посвящена исследованию механизма рекомбинации неравновесных носителей заряда в гетероструктурах с КТ SiGe/Si.

Поскольку GeSi/Si является гетеропереходом 2-го рода, разница между максимумом полосы ФЛ КТ и шириной запрещенной зоны кремния ($E_g=1.17$ eV) соответствует энергии локализации дырки в КТ. Следовательно, можно было бы ожидать, что энергия активации температурного гашения ФЛ КТ будет равна энергии локализации дырки. Тем не менее, экспериментально определенные значения E_A , представленные в литературе, как правило, ниже, чем E_b за исключением нескольких публикаций, в которые сообщается о значениях E_A близких к E_b . В данной главе для выяснения причин приводящих к различию между значениями E_A и E_b изучалась температурная зависимость ФЛ большого набора структур с GeSi/Si КТ, полученных МЛЭ и МСГЭ эпитаксии.

В первом параграфе главы представлены результаты исследований энергии активации температурного гашения, E_A ФЛ структур с КТ SiGe/Si, выращенных различными методами при различных температурах роста.

попавших в возбужденные состояния КТ приводит к увеличению энергии оптического перехода. Это повышение энергии оптического перехода компенсирует уменьшение ширины запрещенной зоны при увеличении температуры измерения.

«Синее» смещение линии ФЛ GeSi/Si при повышении мощности накачки и температуры и «красное» смещение линии ФЛ дислокаций при повышении температуры в кремнии может быть

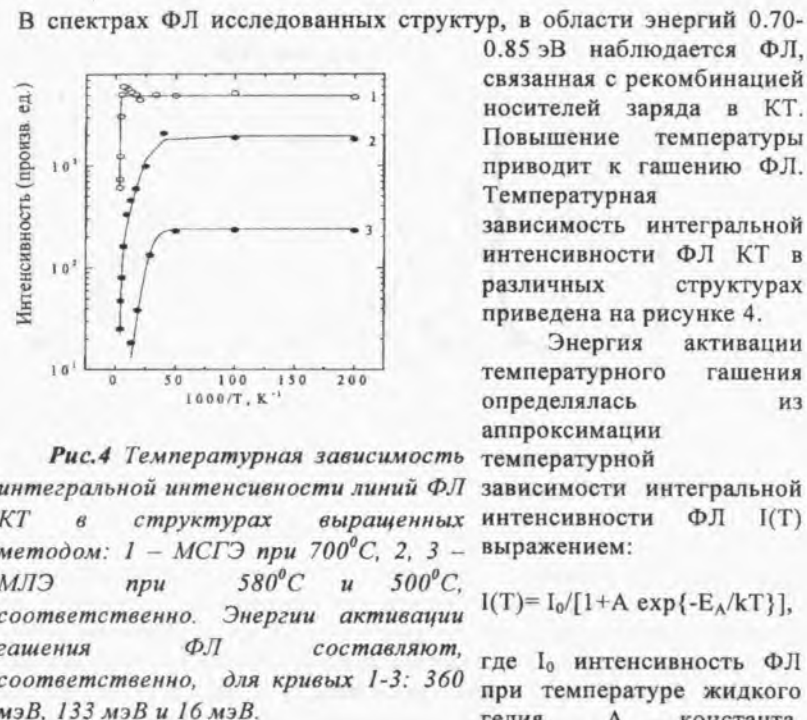


Рис.4 Температурная зависимость интегральной интенсивности линий ФЛ КТ в структурах выращенных методом: 1 – МСГЭ при 700°C, 2, 3 – МЛЭ при 580°C и 500°C, соответственно. Энергии активации гашения ФЛ составляют, соответственно, для кривых 1-3: 360 мэВ, 133 мэВ и 16 мэВ.

В спектрах ФЛ исследованных структур, в области энергий 0.70-0.85 эВ наблюдается ФЛ, связанная с рекомбинацией носителей заряда в КТ. Повышение температуры приводит к гашению ФЛ. Температурная зависимость интегральной интенсивности ФЛ КТ в различных структурах приведена на рисунке 4.

Энергия активации температурного гашения определялась из аппроксимации температурной зависимости интегральной интенсивности ФЛ $I(T)$ выражением:

$$I(T) = I_0 [1 + A \exp\{-E_A/kT\}],$$

где I_0 интенсивность ФЛ при температуре жидкого гелия, A константа, значение которой

определяется отношением не зависящих от температуры вероятностей безызлучательной и излучательной рекомбинации. Значение E_b во всех изученных образцах, определялось как разница между шириной запрещенной зоны кремния и положением максимума полосы ФЛ и лежало в диапазоне 290-380 meV. В то же время значения E_A изменялись в пределах от 16 до 360 meV.

Таблица

Образцы	$T_R, ^\circ\text{C}$	$E_A, \text{мэВ}$	$E_b, \text{мэВ}$
МЛЭ	350	16	380
МЛЭ	400	23	370
МЛЭ	580	130	390
МЛЭ	650	197	410
МСГЭ	700	360	380

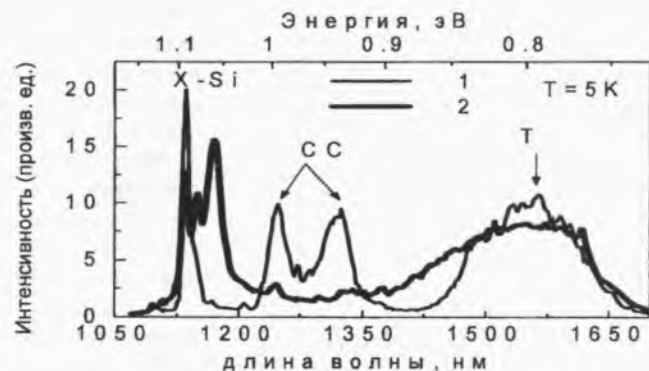


Рис.5 Спектры ФЛ КТ GeSi, выращенных на неокисленной (1) и окисленной (2) поверхности кремния при температуре эпитаксии 550 °C.

Анализируя результаты эксперимента, приведенные в таблице, мы обнаружили корреляцию между значением E_A и интегральной интенсивностью низкотемпературной ФЛ КТ (I_{PL}). Энергия активации температурного гашения возрастала при увеличении I_{PL} и сравнивалась с E_A в структурах с наибольшей эффективностью ФЛ. В свою очередь, I_{PL} увеличивалась при увеличении температуры роста структуры. Поскольку известно, что концентрация точечных дефектов в кристаллах, выращенных методом МЛЭ и МСГЭ уменьшаться при увеличении температуры роста очевидно, что уменьшение E_A в структурах, выращенных при низких температурах эпитаксии обусловлена повышением концентрации точечных дефектов. Наблюдаемая зависимость E_A от концентрации дефектов в структурах позволила нам предложить модель рекомбинации неравновесных носителей заряда в КТ. В рамках этой модели низкое значение E_A имеет место, когда дырки имеют большую вероятность выброса из КТ не валентную зону матрицы, а на уровни дефектов, локализованных в окрестности КТ. Вероятность такого выброса возрастает с повышением концентрации точечных дефектов. Для проверки этого предположения, был выращен ряд структур с высокой концентрацией дефектов в окрестности Ge КТ сформированных на субмонослое SiO_2 .

Результаты исследования спектров ФЛ структур с КТ Ge/SiO₂/Si приведены во втором параграфе главы 4. Обнаружено резкое уменьшение значения E_A по сравнению с E_A в структурах, выращенных при тех же температурах эпитаксии на неокисленной поверхности кремния с меньшей концентрацией дефектов. В спектрах ФЛ структур с

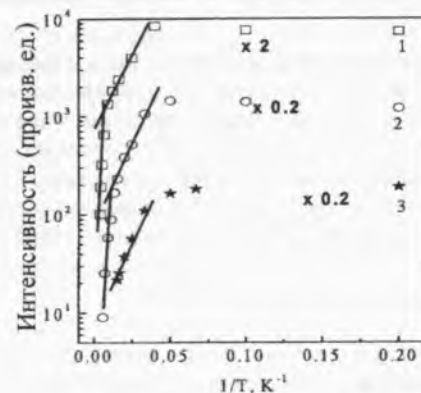


Рис.6 Температурная зависимость интегральной интенсивности ФЛ, при различных энергиях возбуждения 1 – 2,54 эВ, 2 – 1,17 эВ и 3 – 1,08 эВ.

для формирования КТ GeSi/Si. Наличие дефектов в кремниевой матрице может проявляться не только в захвате этими дефектами дырок, выбрасываемых из КТ, но в появлении конкурирующих с КТ каналов рекомбинации неравновесных носителей заряда. Для изучения влияния этих каналов на рекомбинацию неравновесных носителей заряда в КТ, в третьем параграфе главы 4 изучалась температурная зависимость ФЛ КТ GeSi/Si при различных энергиях возбуждения ФЛ. Полученные зависимости интегральной интенсивности ФЛ от температуры измерения приведены на рис.6. Видно, что температурное гашение ФЛ КТ GeSi/Si при возбуждении неравновесных носителей заряда в кремниевой матрице описывается двумя энергиями активации E_{A1} и E_{A2} , а при возбуждении электронов и дырок внутри КТ одной энергией активации E_{A1} . Значение E_{A1} не зависит от энергии возбуждения, а значение E_{A2} уменьшается при уменьшении энергии фотонов возбуждающего лазерного излучения. Показано, что E_{A1} обусловлена рекомбинацией неравновесных носителей заряда захваченных в КТ, а E_{A2} их рекомбинацией в матрице до захвата в КТ.

КТ, сформированных на окисленной поверхности Si была обнаружена интересная особенность – отсутствие линий ФЛ с энергиями максимума $h\nu = 0.94$ и 1.02 эВ, связанных рекомбинацией в смачивающем слое (CC), характерных для КТ GeSi/Si (см. рис.5).

Отсутствие слоя смачивающего свидетельствует о том, что КТ Ge/SiO₂/Si формируются по механизму, отличающимся от механизма Странского-Крастанова, характерного

В заключении приводятся основные результаты и выводы настоящей работы. Оговорен личный вклад автора.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю за постоянное руководство и помощь при выполнении работы, А.И.Никифорову А.В.Новикову за предоставление образцов Si/Ge, выращенного методом МЛЭ и МСГЭ, Л.И.Фединой за помощь при написании статей, М.М.Кидибаеву за ценные замечания по диссертационной работе и коллегам по Сектору люминесцентных методов контроля параметров полупроводниковых структур ИФП СО РАН – К.С.Журавлеву и А.М.Гилинскому – за повседневную помощь и поддержку.

Основные результаты и выводы работы состоят в следующем:

1. Установлено, что линия D2 спектра ФЛ кремния с дислокациями, обусловлена рекомбинацией неравновесных носителей заряда через уровни комплекса междоузельных атомов кремния, локализованного вблизи ядра дислокации.
2. Установлен различный характер зависимости спектроскопических параметров линий ФЛ для КТ GeSi и дислокаций в кремнии при изменении мощности оптической накачки сигнала и температуры. Эти различия могут быть использованы для разделения вкладов дислокаций и КТ в ФЛ в области энергий 0,7 – 0,9 эВ.
3. Обнаружено, что температурное гашение ФЛ КТ GeSi/Si в общем случае описывается двумя энергиями активации E_{A1} и E_{A2} , значения которых при любой энергии возбуждения много меньше, чем энергии локализации дырки в КТ. Построена модель рекомбинации неравновесных носителей заряда в структурах с КТ GeSi/Si. В рамках предложенной модели E_{A1} определяется выбросом дырок из КТ на уровни дефектов, локализованных в окрестности КТ, а E_{A2} связано с уменьшением количества неравновесных носителей заряда, захваченных из матрицы в КТ при повышении температуры. Это уменьшение происходит из-за термоактивированного возрастания вероятности рекомбинации через центры безызлучательной рекомбинации в матрице.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С., Никифоров А.И., Ульянов В.В., Пчеляков О.П. Фотолюминесценция квантовых точек германия, выращенных в кремнии на субмонослое SiO₂ // Материалы Всероссийского совещания по нанопотонике, Нижний Новгород 2 - 6 мая 2004 г. - С.296-298.
2. Шамирзаев Т.С., Никифоров А.И., Сексенбаев М.С., Журавлев К.С., Лобанов Д.Н., Новиков А.В., Красильник З.Ф. Фотолюминесценция квантовых точек Ge, выращенных в матрице Si при различных температурах эпитаксии // Люминесценция и лазерная физика. Труды VIII Международной школы-семинара, Иркутск, 2004, - С.109.
3. Федина Л.И., Шамирзаев Т.С., Гутаковский А.К., Чувилин Л.А., Сексенбаев М.С., Яковлев В.Ю. Фотолюминесценция квантовых точек Ge, выращенных в матрице Si при различных температурах эпитаксии. // Люминесценция и лазерная физика Труды VIII Международной школы-семинара, Иркутск, 2004, - С.159.
4. Якимов А.И., Двуреченский А.В., Кириенко В.В., Степина Н.П., Никифоров А.И., Ульянов В.В., Чайковский С.В., Володин В.А., Ефремов М.Д., Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С. Волноводные Ge/Si- фотодиоды со встроенными слоями квантовых точек Ge для волоконно-оптических линий связи // Физика и техника полупроводников, 2004, т.38, - № 10, - С.1265-1269. (Издательство «Наука», СПб, Россия).
5. Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С., Никифоров А.И. Фотолюминесценция квантовых точек Ge, выращенных на под слое SiO₂ // В сборнике тезисов докладов II Летняя Школа по Радиационной физике SCORPh-2004, Бишкек, 2004, - С.54-56.
6. Шамирзаев Т.С., Сексенбаев М.С., Журавлев К.С., Никифоров А.И., Ульянов В.В., Пчеляков О.П. Фотолюминесценция квантовых точек германия, выращенных в кремнии на субмонослое SiO₂ // Физика твердого тела, 2005, Т.47, - № 1, - С.80-82. (Издательство «Наука», СПб, Россия).
7. Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С., Никифоров А.И., Новиков А.В., Красильник З.Ф. Температурная зависимость фотолюминесценции Ge/Si структур с квантовыми точками // В сборнике тезисов докладов VII международная конференция Опто-, нанoeлектроника, нанотехнологии и микросистемы, Ульяновск-Владимир, 2005, - С.177.
8. Shamirzaev T.S., Seksenbaev M.S. Nikiforov A.I., Zhuravlev K.S., Novikov A.V., Krasil'nik Z.F. Mechanism of temperature quenching of photoluminescence in GeSi/Si QDs. 4th International Conference on Quantum Dots, Chamonix-Mont Blanc, France, May 1-5, 2006, P.150.

9. Fedina L.I., Shamirzaev T.S., Song S.A., Gytakoskii A.K., Chuvilin A.L., Cherkov A.G., Zhuravlev K.S., Seksenbaev M.S., Yakovlev V.Yu., Latyshev A.V. The Structure and Photoluminescence of Dislocations in Silicon // Известия вузов. Серия Физическая 2006, Т49, 10. - С.70-73.

10. Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Никифоров А.И., Новиков А.В., Журавлев К.С. Механизмы температурного гашения фотолюминесценции в квантовых точках GeSi/Si // Люминесценция и лазерная физика. Труды X Международной школы-семинара, Иркутск, 2006, - С.164-168.

11. Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С., Кидибаев М.М., Чусовитин Е.А., Галкин Н.Г. Сравнительный анализ фотолюминесценции квантовых точек Ge/Si, β -FeSi₂ и дислокаций кремния // 11-й конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток, 2007, - С.75-77.

12. Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С., Кидибаев М.М. Гашение фотолюминесценции квантовых точек GeSi/Si при повышении температуры // 11-й конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток, 2007, - С.122-126.

13. Кидибаев М.М., Сексенбаев М.С., Шамирзаев Т.С., Журавлев К.С. Фотолюминесценция дислокации и КТ GeSi, в кремния // Известия НАН КР, 2007, - №3. - С.7-11.

14. Сексенбаев М.С. Рекомбинационные свойства квантовых точек GeSi/Si // Наука и новые технологии, 2007, №1-2. - С. 26-27.

РЕЗЮМЕ

Сексенбаев Максат Сагыннович

Кремний матрицасында калыптанган германий кванттык чекиттеринин фотолюминесценциясынын температуралык өчүү механизмдери

физика-математика илимдеринин кандидаты деген наамга ээ болу үчүн

01.04.07- конденсацияланган абалдын физикасы

Ачык сөздөр: кванттык чекит, гетероструктуралар, люминесценция, молекулярдык-нурдук эпитаксия.

Диссертациялык иш кремний матрицасында калыптанган кванттык чекиттердин түзүлүштөрүндөгү тең салмаксыз абалда алып жүрүүчү зарядтардын рекомбинациясынын механизмдерин изилдөөгө арналган. Жүргүзүлгөн изилдөөлөрдүн натыйжасында кванттык чекиттердин фотолюминесценциялык энергия активациялык температурасынын өчүшү менен кванттык чекиттердеги көзөнөктөрдүн локализациялык энергиясынын ортосундагы айырмачылыкты түшүндүрүүчү себептер аныкталган. Негизинен GeSi/Si кванттык чекиттеринин түзүлүшүндө дислокация көп кездешет, бул кванттык чекиттердин люминесценциясынын спектралдык аймагы менен дал келген спектралдык аймактагы люминесценцияга тиешелүү. Бул иште фотолюминесценцияны дискриминироват эте турган, GeSi/Si кванттык чекиттердеги тең салмаксыздыкты алып жүрүүчү заряддардын, ошондой эле кремнийдин дислокациясына жана кремнийдин дислокациясынын фотолюминесценциялык спектрлериндеги D2 сыяктуу сызыктардын пайда болушу сыяктанган дефектерди түшүндүргөн критерийлер бар.

РЕЗЮМЕ

Сексенбаев Максат Сагынovich

Механизмы температурного гашения фотолюминесценции квантовых точек германия, сформированных в матрице кремния
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07- физика конденсированного состояния

Ключевые слова: квантовая точка, гетероструктуры, люминесценция, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Диссертационная работа посвящена изучению механизмов рекомбинации неравновесных носителей заряда в структурах с квантовыми точками германия, сформированных в матрице кремния. В результате проведенных исследований установлены причины, приводящие к различию между значениями энергии активации температурного гашения фотолюминесценции квантовых точек и энергии локализации дырки в квантовой точке. Структуры с квантовыми точками GeSi/Si часто содержат дислокации, с которыми связана люминесценция в спектральной области, совпадающей со спектральной областью люминесценции квантовых точек. В работе установлены критерии, позволяющие дискриминировать фотолюминесценцию, обусловленную рекомбинацией неравновесных носителей заряда в GeSi/Si квантовых точках и на дислокациях в кремнии, а также выявлены дефекты, ответственные за появление линии D2 в спектрах фотолюминесценции дислокаций в кремнии.

RESUME

Seksenbaev Maksat Sagynovich

Mechanisms of temperature quenching of photoluminescence germanium quantum dots formed in a silicon matrix.

on competition of the candidate degree of physical and mathematical sciences on a speciality 01.04.07- solid state physic

Keywords: quantum dots, heterostructures, luminescence, molecular-beam epitaxy

The thesis is devoted to study of mechanisms of recombination of nonequilibrium charge carriers in heterostructures with germanium quantum dots formed in a silicon matrix. The reasons led to difference in energy of a hole localization in quantum dot and activation energy of the temperature quenching of photoluminescence of the quantum dots have been determined as a result of the investigation. Structures with the GeSi/Si quantum dots contain dislocation frequently. The criteria allowed to discriminate photoluminescence of the quantum dots from photoluminescence of the dislocation have been found. The defects responsible for appearance of the D2 band in luminescence spectra of silicon with dislocations have been revealed.

Сексенбаев Максат Сагынovich

**МЕХАНИЗМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГАШЕНИЯ
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ГЕРМАНИЯ,
СФОРМИРОВАННЫХ В МАТРИЦЕ КРЕМНИЯ**

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.
Подписано в печать 06.03.2008. Заказ № 17. Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Типография Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН