

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию**

**Байдаковой Наталии Алексеевны**

**«Процессы поглощения и излучения света в структурах с Ge(Si) самоформирующимися nanoостровками, выращенными на различных подложках»,**

**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.**

Рецензируемая диссертация посвящена изучению закономерностей возбуждения фотолюминесценции и излучения света в низкоразмерных структурах в гетеросистеме Ge-Si с nanoостровками, на различных кремниевых подложках. Несмотря на то, что изучение механизмов формирования слоев и nanoостровков GeSi, а также их оптических свойств вот уже 30 лет является предметом интенсивных исследований теоретиков и экспериментаторов во всем мире, интерес к ним продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение низкоразмерных структур в гетеросистеме Ge-Si позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для совершенствования уже имеющихся и создания новых типов приборов, таких как: высокочувствительные фотоприемники видимого и инфракрасного диапазонов, излучатели и модуляторы излучения, а так же стимулирует развитие новых технологий.

Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно, является **актуальной**, а поскольку, несмотря на прогресс в области формирования гетероструктур с GeSi nanoостровками, механизмы,

определяющие эффективность излучения этих объектов, изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований.

В **первой главе** автор приводит обзор литературы, посвященной исследованию формирования структур с GeSi наноструктурами, а также исследованию их оптических свойств различными спектроскопическими методами. В целом, обзор литературных данных производит впечатление строгого и последовательного изложения и свидетельствует о достаточно высоком уровне теоретической подготовки диссертанта.

Во **второй главе**, посвященной методическим вопросам проводимых исследований, описаны условия эпитаксиального роста гетероструктур с самоформирующимися GeSi наноструктурами. Приведены основные параметры и характеристики исследуемых в работе структур. Обсуждаются условия проведения оптических экспериментов, методы расчетов зонных диаграмм GeSi гетероструктур и обработки полученных результатов измерения. Дано подробное описание методики спектроскопии возбуждения фотолюминесценции (ФЛ), модифицированной автором для изучения излучательных свойств структур с GeSi наноструктурами. Использование этой методики позволило адекватно учесть различные компоненты в спектрах ФЛ исследуемых структур, соответствующие, различным излучательным процессам в наноструктурах, а также выделить и исключить из последующего анализа сигналы, не связанные с излучательной рекомбинацией в GeSi наноструктурах.

В оригинальной части диссертации, **Главы 3 и 4**, рассматриваются три основные задачи. Первая из них — выявление механизмов возбуждения ФЛ в исследованных гетероструктурах с GeSi наноструктурами. Для решения этой задачи использовались методы стационарной и время-разрешенной ФЛ,

а также модифицированный автором метод спектроскопии возбуждения ФЛ. Были выделены сигналы ФЛ, соответствующие процессам рекомбинации (1) носителей заряда, локализованных в островках и (2) пространственно разделенных электронов и дырок. Показано, что характерные времена жизни прямых в реальном пространстве оптических переходов не превышают 1 мкс и могут быть снижены до 100 нс. Установлены условия фотовозбуждения носителей заряда в кремниевой матрице и непосредственно в окрестности наноструктур. Вторая задача диссертации заключалась в изучении влияния условий формирования гетероструктур на эффективность и спектрально-кинетические характеристики ФЛ наноструктур GeSi. В рамках решения этой задачи: (1) Отработана технология формирования гетероструктур на подложках “напряженный кремний на изоляторе” с тонким напряженным слоем Si и тонким захороненным слоем SiO<sub>2</sub>; (2) Впервые продемонстрирована возможность уменьшения ширины линии ФЛ наноструктур Ge(Si) при введении слоев напряженного кремния под и над островками; (3) Установлено влияние температуры эпитаксии на фотолюминесценцию наноструктур Ge(Si). Показано, что основной вклад в ФЛ наноструктур, сформированных при температурах ниже 650 °С, вносят пространственно непрямые излучательные переходы, в то время как, для наноструктур, сформированных при температурах выше 650 °С, интенсивность и положение линии ФЛ определяются пространственно прямыми оптическими переходами. И, наконец, третья из упомянутых задач, заключалась в изучении электролюминесцентных характеристик излучателей, построенных на основе выращенных гетероструктур. При решении этой задачи было показано, что электролюминесценция наноструктур в диапазоне длин волн 1.6 - 2.0 мкм наблюдается вплоть до комнатной температуры. Следовательно, полученные в работе гетероструктуры перспективны для создания источников излучения с  $\lambda > 1.55$  мкм, совместимых с существующими технологиями производства приборов на кремнии.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследованных явлений, а с другой стороны, инициируют проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что совокупность полученных в работе результатов и сделанные на их основе выводы значительно расширяют существующие представления о получении, оптических свойствах и механизмах возбуждения люминесценции в гетероструктурах с GeSi наноструктурами.

По результатам проводимых исследований созданы предпосылки для создания светоизлучающих приборов, на основе эпитаксиальных SiGe гетероструктур, выращенных на подложках “напряженный кремний на изоляторе” с тонким напряженным слоем Si и тонким захороненным слоем SiO<sub>2</sub>, что, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. При обсуждении длительности времен рекомбинации в гетероструктурах второго рода (каковыми и являются наноструктуры GeSi) рассматриваются только два фактора – пространственное разделение носителей заряда и неопределенность квазиимпульса электрона при его локализации. Между тем, очень важную роль в определении силы осциллятора для непрямых, в пространстве квазиимпульсов, оптических переходов играет междолинное смешивание электронных состояний, которое определяется как резкостью гетерограницы, так и направлением квазиимпульса электрона, относительно нормали к гетерогранице. В зависимости от соотношения параметров гетероструктуры возможны ситуации, когда вероятность непрямого в реальном пространстве перехода будет выше, чем прямого. Более того, поскольку резкость гетерограниц Ge/Si зависит от температуры роста, ее влияние на время жизни непрямых экситонов

очень существенно изменятся с условиями роста. К сожалению, влияние этих факторов на времена жизни экситонов в работе не обсуждается и не учитывается.

2. В качестве одного из результатов работы заявляется - «При высоких мощностях возбуждения для пространственно непрямо́й излучательной рекомбинации характерно также наличие «быстрого» канала (времена спада интенсивности ФЛ до 50 мкс), существование которого обусловлено увеличением перекрытия волновых функций пространственно разделенных носителей заряда при увеличении уровня оптической накачки». Однако при высоких уровнях возбуждения возможны и другие процессы, приводящие к «ускорению» затухания интенсивности ФЛ на начальном участке кинетической кривой. Например, возможно включение дополнительного канала рекомбинации, обусловленного мультиэкситонным взаимодействием, типичным в непрямозонных гетероструктурах как первого, так и второго рода с большим временем жизни экситонов. Влияние этого канала рекомбинации на динамику ФЛ в работе никак не обсуждается.
3. При сравнении спектров электролюминесценции (ЭЛ) структур с  $\text{Ge}(\text{Si})/\text{sSi}$  и  $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}$  наноструктурами, приведенных на рис.4.22(б), изменение сигнала в  $\sim 2$  раза при различии количества периодов наноструктур в  $\sim 7$  раз объясняется более высокой эффективностью излучательной рекомбинации в структурах с меньшим количеством наноструктур. Между тем, даже при одинаковой эффективности излучательной рекомбинации в обеих гетероструктурах ровно такое же изменение сигнала ЭЛ будет наблюдаться в случае более эффективной безизлучательной рекомбинации носителей заряда в матрице структур  $\text{Ge}(\text{Si})/\text{sSi}$  с большим количеством наноструктур. К сожалению, автор не рассматривает эту интерпретацию экспериментальных данных, хотя измеренные им же температурные зависимости ЭЛ указывают на более высокую концентрацию дефектов в структурах  $\text{Ge}(\text{Si})/\text{sSi}$ .

В целом, текст диссертации и автореферата написан ясным языком, рисунки хорошо оформлены, однако, местами автор злоупотребляет неудачными формулировками. Например, на странице 5 автореферата написано «...установление основных механизмов возбуждения и девозбуждения сигналов люминесценции...». Непонятно, зачем использовать специфическое высказывание «девозбуждении люминесценции», не являющееся типичным термином, используемым спектроскопистами. По тексту диссертации механические напряжения в кристалле называются «упругими напряжениями».

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация Н.А. Байдаковой представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для получения светоизлучающих SiGe гетероструктур и изучения их оптических свойств, что, безусловно, будет способствовать созданию перспективных элементов кремниевой оптоэлектроники.

Достоверность и обоснованность результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях. Автореферат правильно передает содержание диссертации. По содержанию, объему, новизне, научной и практической значимости результатов, полученных в работе, диссертация отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Название и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности, а её

автор, Н.А. Байдакова, безусловно, **заслуживает присуждения** искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник

лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии соединений  $A_3B_5$

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения

РАН

д.ф.-м.н.,

доцент по специальности физика полупроводников

 Тимур Сезгирович Шамирзаев

« 01 » ноября 2019 г.

01.04.10 – физика полупроводников

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.


Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН

Т.С. Шамирзаева удостоверяю

Заместитель директора ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



 А.В. Каламейцев