

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Наталии Алексеевны Байдаковой
*«Процессы поглощения и излучения света в структурах с Ge(Si)
самоформирующимися nanoостровками, выращенными на различных
подложках»*,

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

Объектами диссертационного исследования Н.А. Байдаковой являются полупроводниковые структуры на основе кремний-германиевых nanoостровков. Их оптические свойства составили предмет детального экспериментального изучения, выполненного автором. На протяжении последних десятилетий nanoструктурирование полупроводниковых материалов показало себя действенным методом получения принципиально новых электронных, оптических и транспортных свойств этих систем, отличных от свойств объемных полупроводников. Нульмерные nanoструктуры на базе кремния, германия или их сплавов представляют несомненный практический интерес в силу их совместимости с кремниевой технологией и относительной дешевизны получения. Задача встраивания низкоразмерных структур на основе кремния или германия в элементную базу оптоэлектроники по-прежнему остается вызовом для современной физики и технологии. Поэтому исследования оптических свойств таких структур, начавшись около трех десятилетий назад, довольно активно ведутся и в настоящее время. В научной печати регулярно появляются публикации, посвященные исследованиям электронных и оптических свойств различных квантовых кремний-германиевых структур, что свидетельствует об **актуальности** темы диссертации.

Структуры, подобные изучаемым, находят все более широкое применение в различных приборных приложениях. Длина волны излучения в таких структурах составляет величины порядка 1.4 – 1.5 мкм, что является оптимальным для оптоволоконных линий связи. Перспективным видится и встраивание структур с кремний-германиевыми островками в микрорезонаторы, что может дать реальное увеличение их излучательной способности. Несомненно, исследование и понимание физических процессов,

происходящих в кремний-германиевых наноструктурах в целом, и в рассматриваемых в работе кремний-германиевых наноструктурах в частности, является необходимым для успешного продвижения этих систем в оптоэлектронику. Этим определяется **практическая значимость** диссертационного исследования.

Диссертация посвящена исследованию фотолюминесценции наноструктур на основе Ge-Si сплава, формирующихся на кремниевых подложках типа кремний (001) и «кремний на изоляторе» (Глава 3); а также наноструктур, выращенных между напряженными кремниевыми слоями на кремний-германиевом буфере и на подложке «напряженный кремний на изоляторе» (Глава 4). Использование напряженных слоев кремния и напряженной подложки позволяет увеличить степень локализации носителей в зоне проводимости и перекрыть каналы безызлучательной релаксации экситонов через дефекты структуры самой подложки. В главе 2 обсуждаются методы выращивания и характеристики структур с наноструктурами Ge(Si), а также методика исследования их оптических свойств. Первая глава содержит литературный обзор.

Во всех рассматриваемых в работе случаях получающиеся гетероструктуры принадлежат к так называемому II-му типу, т.е. такие островки локализуют дырки внутри себя, создавая для них потенциальную яму, а для электронов проводимости, напротив, создают потенциальный барьер, выталкивая их в околосбарьерную область. В такой структуре электронно-дырочные излучательные переходы могут быть как пространственно-прямыми, так и пространственно-непрямыми. Автором детально анализируются обе эти возможности с использованием широкого набора методик спектроскопии люминесценции (спектроскопия фотолюминесценции при непрерывном возбуждении, при импульсном возбуждении, спектроскопия возбуждения фотолюминесценции), что позволяет выявить и разделить вклады в фотолюминесценцию от пространственно-прямых и непрямых переходов и понять – при каких условиях тот или другой тип межзонной рекомбинации будет доминирующим. Вариативность экспериментальных методик и сопоставление экспериментальных данных с результатами компьютерных расчетов зонной структуры и энергий переходов подтверждает **достоверность** предложенной автором интерпретации происходящих в системе процессов и **обоснованность** сделанных выводов.

Выполненное Н.А. Байдаковой исследование обладает **новизной**. Автором была предложена модификация метода спектроскопии возбуждения фотолюминесценции, позволяющая разделять вклады в излучение от электронно-дырочной рекомбинации в самих наноструктурах и от комбинационного рассеяния света в кремниевой подложке (001). В этих же структурах (наноструктуры на кремниевой подложке) был также обнаружен эффект роста интенсивности люминесценции за счет диффузии носителей из подложки в островки при увеличении температуры. Было показано, что можно управлять шириной пика люминесценции наноструктур, варьируя ширину напряженных слоев кремния, их покрывающих, и были получены рекордно узкие, с шириной порядка двух-трех десятков мэВ, пики люминесценции. Для наноструктур, сформированных на кремний-германиевом буфере между напряженными кремниевыми слоями, были выполнены измерения сигнала электролюминесценции, который смещался в область больших длин волн (до 2 мкм) по сравнению с другими наноструктурными структурами, рассмотренными в диссертации.

Поставленные задачи диссертационного исследования были решены полностью и с использованием оригинальных подходов. Работа прошла хорошую апробацию. Полученные автором результаты известны научной общественности – они докладывались на многочисленных научных конференциях и публиковались в научных журналах (7 статей в журналах из списка ВАК). Все это свидетельствует о высокой компетентности автора в области нано- и оптоэлектроники квантовых полупроводников структур.

В целом, диссертация производит хорошее впечатление. Вместе с тем в некоторых, немногочисленных, случаях возникают вопросы по используемой в работе модели структуры и по интерпретации результатов экспериментов, на этой модели основанной, которые, как представляется, было бы уместно пояснить.

1. Для расчета зонной структуры в диссертации используется модель, в которой минимум зоны проводимости в Ge(Si)-островке предполагается расположенным в Δ -долине, как в объемном кремнии, хотя доля германия в составе сплава близка к половине (или, в каких-то случаях, даже больше), а в самом германии, как известно, минимум зоны проводимости находится в L-точке. Кроме того, введение в германий кремния и наличие напряжений в системе, вообще говоря, иногда может привести даже к выпрямлению зонной

структуры (см., например, работу M. d'Avezac, et al., PRL **108**, 027401 (2012)). В связи с этим возникает вопрос: есть ли какие-либо экспериментальные или расчетные подтверждения того, что минимум энергии в зоне проводимости в островке расположен в Δ -долине, или, все-таки, это лишь предположение?

2. В самом начале главы 3 (стр. 74), посвященной исследованию фотолюминесценции в наноструктурах, сформированных на кремниевых подложках и на подложке «кремний на изоляторе», говорится, что «основной вклад в люминесценцию островков дает не прямая в реальном пространстве излучательная рекомбинация пространственно разделенных электронов, находящихся в слое Si на гетерогранице с островком, и дырок, локализованных в Ge(Si) островке». Несколькими строчками ниже, на той же странице (и впоследствии этот тезис неоднократно повторяется), делается утверждение о том, что пространственно прямой переход в такой системе имеет бóльшую вероятность вследствие увеличивающегося перекрытия волновых функций электрона и дырки. Однако перекрытие, которое действительно возрастает, определяется, фактически, огибающими функциями, которые и рассчитываются в работе в рамках упомянутой выше модели. Вместе с тем, вероятность межзонного перехода задается не только интегралом перекрытия огибающих, но и межзонным матричным элементом оператора импульса (или радиус-вектора, в зависимости от калибровки), вычисляемым относительно блоховских функций зон проводимости и валентной. При этом, если блоховская функция валентной зоны будет как в случае пространственно прямого, так и в случае пространственно непрямого перехода одна и та же, то функция зоны проводимости будет меняться при смене типа перехода. Для непрямого перехода – это будет функция Δ -долины кремния, в то время как для прямого перехода – это будет уже какая-то другая функция (см. предыдущее замечание), в том числе даже и в том случае, если минимум зоны проводимости островка соответствует, как предполагает в работе автор, Δ -долине (поскольку наличие большой доли германия в составе, несомненно, модифицирует блоховскую функцию по сравнению с той, которая была в чистом кремнии). Есть ли у автора какие-то числовые оценки матричных элементов пространственно прямых и не прямых переходов, или вывод о бóльших скоростях прямых переходов следует также воспринимать как предположение, не противоречащее эксперименту?

3. Наконец, есть еще один вопрос, касающийся пространственно прямого перехода непосредственно в островке. Для объяснения роста интенсивности

прямых переходов с увеличением интенсивности возбуждения (раздел 3.2) автор высказывает идею о наличии большого количества незанятых состояний (судя по всему – состояний дискретного спектра) в зоне проводимости в островке – гораздо большего, чем количество состояний на гетерогранице. Но ведь дно зоны проводимости в островке – это верхняя граница потенциального барьера! Откуда связанные состояния над барьером? Если имеется в виду изменение профиля барьера за счет перераспределения заряда самих возбужденных электронов, ведущего к образованию некоторого углубления на барьере, как изображено на рис. 3.2, то вновь хотелось бы понять – есть ли какие-то подтверждающие эту картинку расчеты, и если так, то каковы параметры этого углубления – действительно ли оно способно локализовать достаточно большое количество электронов, и есть ли там, соответственно, дискретные уровни энергии, как это предполагает автор. На рисунке 3.7, например, показаны рассчитанные уровни энергии в системе, но в надбарьерной области никаких уровней не видно, хотя в тексте (например, на страницах 88, 90) приводятся значения энергий прямых переходов. Надо, однако, заметить, что даже если подобные потенциальные углубления действительно образуются, то они способны сформировать только *квазистационарные* состояния, но не истинно стационарные. В этом случае имело бы смысл оценить характерные туннельные времена для этих состояний (исходя из параметров углубления на барьере) и сопоставить их с радиационными временами. Очевидно, чтобы модель «работала», последние должны быть гораздо меньше.

Сделанные замечания, однако, не ставят под сомнение справедливость полученных автором результатов и обоснованность защищаемых научных положений. Несмотря на замечания, высокая оценка уровня диссертационной работы полностью сохраняется. Автором была избрана актуальная тема диссертации, полученные результаты обладают практической ценностью и научной новизной. Работа представляет собой законченное научное исследование. Структура и содержание диссертации соответствуют целям и задачам исследования. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Полагаю, таким образом, что диссертационная работа Н.А. Байдаковой “Процессы поглощения и излучения света в структурах с Ge(Si) самоформирующимися nanoостровками, выращенными на различных подложках” в полной мере отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям II-го раздела Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Байдакова Наталия Алексеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент
заведующий кафедрой теоретической физики
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

д.ф.-м.н.,
доцент

Бурдов Владимир Анатольевич.

11 ноября 2019 г.

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Тел. (831) 4623304, e-mail: burdov@phys.unn.ru

603950, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина 23.

