

ОТЗЫВ

официального оппонента Мынбаева Карима Джафаровича
на диссертационную работу Лозового Кирилла Александровича «Кинетика
формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия
на кремнии для приборов оптоэлектроники», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.10 – Физика полупроводников

Диссертационная работа Лозового Кирилла Александровича посвящена развитию теоретических методов описания роста полупроводниковых наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, а также применению разработанных моделей роста к оптимизации условий синтеза таких структур для создания на их основе приборов фотоэлектроники с улучшенными характеристиками.

Молекулярно-лучевая эпитаксия является на сегодняшний день наиболее широко используемым методом создания полупроводниковых низкоразмерных структур, и, в том числе, квантовых точек. Однако, несмотря на всестороннее изучение процессов самопроизвольного формирования квантовых точек в системах материалов, рассогласованных по постоянной решетки, многие аспекты зарождения точек и их упорядочивания по форме, расположению и размерам, остаются изученными не полностью. Очевидно, что для более глубокого понимания процессов эпитаксиального формирования низкоразмерных структур были необходимы дальнейшие исследования. Кроме того, выбранная автором тема является актуальной с точки зрения развития технологии синтеза наноструктур с квантовыми точками, так как в настоящий момент именно такие структуры рассматриваются в качестве элементной базы для нового поколения приборов наноэлектроники и нанофотоники. Всё это обусловило актуальность диссертационной работы К.А. Лозового.

Диссертация К.А. Лозового состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 203 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведен аналитический обзор литературных источников, затрагивающих вопросы получения массивов когерентно-напряженных островков методом молекулярно-лучевой эпитаксии, а также возможности их применения при создании фотодетекторов и солнечных элементов.

Во второй главе описывается разработка модели роста квантовых точек пирамидальной формы, учитывающей вклад в изменение свободной энергии при формировании островка от образования дополнительных ребер и зависимость поверхностных энергий граней от толщины двумерного смачивающего слоя.

Третья глава посвящена развитию физико-математической модели роста квантовых точек с учетом наличия в системах Ge/Si, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ и $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Sn}/\text{Si}$ островков различной формы.

В четвертой главе определены оптимальные с точки зрения приборного применения условия выращивания гетероструктур с квантовыми точками для создания фотоприемников с высокой обнаружительной способностью и солнечных элементов с большим коэффициентом полезного действия.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе проведения исследований.

В диссертационной работе получен целый ряд новых научных результатов, среди которых можно выделить следующие:

1. Представлены выражения, позволяющие определять параметры массивов квантовых точек германия на кремнии различной формы и состава, выращенных при различных значениях температуры и скорости роста,

учитывающие вклад в изменение свободной энергии при образовании островка различных энергетических факторов.

2. Получено и решено для системы Ge/Si(100) обобщенное уравнение Мюллера–Керна для нахождения равновесной толщины смачивающего слоя при молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме Странски–Крастанова в различных материальных системах, учитывающее зависимость поверхностных энергий граней квантовой точки от толщины двумерного смачивающего слоя.

3. Теоретически определены зависимости критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту по Странски–Крастанову от состава x , поверхностной плотности и среднего размера островков в системах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Sn}/\text{Si}$ для различных температур. Полученные в этом разделе теоретические результаты представляют значительный интерес с практической точки зрения, так как автором показано, что для различных типов приборов фотоэлектроники, в зависимости от их назначения, требуются разные температурные режимы выращивания точек с целью получения их массивов с требуемыми плотностью и однородностью по размерам.

В целом практическая значимость диссертации как раз и состоит в оптимизации методик синтеза массивов квантовых точек германия на кремнии методом молекулярно-лучевой эпитаксии для создания на их основе различных фотопреобразователей.

Достоверность основных результатов диссертационной работы обуславливается применением общепринятых термодинамического и кинетического подходов к описанию процессов эпитаксиального роста наноструктур, а также использованием классических выражений для темнового тока и обнаружительной способности фотодетекторов при оптимизации условий синтеза приборно-ориентированных гетероструктур, согласием результатов расчетов с экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

Основные результаты проведенного исследования отражены в 18 публикациях, в том числе 9 статьях в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий (из них 5 статей в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus), и 9 в сборниках статей и трудов конференций.

Результаты научной работы Лозового К.А. широко представлены на международных и всероссийских научных конференциях, симпозиуме, конгрессах.

Все основные результаты и выводы диссертационной работы отражены в автореферате диссертации.

По работе Лозового К.А. можно сделать следующие замечания:

1. В работе описывается физико-математическая модель формирования квантовых точек в материальной системе германий-кремний, имеющих формы пирамид с квадратным и прямоугольным основанием. Автором не указано, возможно ли применение (или развитие) разработанной модели по отношению к другим материальным системам или геометрическим формам островков.

2. В работе имеется двусмысленность понятия hut-кластер. В одном случае под этим названием понимаются только пирамидальные островки с квадратным основанием, в другом – все островки, имеющие форму пирамид (так, например, на с. 82 говорится, что «есть несколько видов hut-кластеров, отличающихся геометрической формой и поведением в процессе образования массива как с квадратным, так и с прямоугольным основанием»).

3. Наблюдается некоторая неоднозначность обозначений физических величин и параметров. Например, изменение свободной энергии в первой главе обозначено как ΔE , а в последующих главах как ΔF . Во второй и третьей главах геометрический фактор, характеризующий форму островка, обозначен символом α , а в четвертой главе появляется дополнительный индекс – α_g .

4. На наш взгляд, текст диссертации мог бы быть несколько сокращен без ущерба для её содержания. Так, например, на с. 100, в начале раздела 3.3, автор зачем-то ещё раз, хотя и кратко, описывает модель роста по Странски-Крастанову и рассуждает о преимуществах метода молекулярно-лучевой эпитаксии, хотя все эти вопросы уже подробно обсуждались выше по тексту. Также несколько избыточным по объёму представляется раздел 4.1 с подробным описанием особенностей шумовых и сигнальных характеристик фотодетекторов с квантовыми точками, составленным на основе литературных данных.

Сделанные замечания, однако, нисколько не снижают общего высокого уровня диссертационной работы К.А. Лозового.

Работа очень аккуратно оформлена и практически не содержит орфографических ошибок и опечаток, что, к сожалению, не типично для многих современных диссертационных работ. В этом смысле диссертация К.А. Лозового оставляет самое положительное впечатление. Следует заметить, что текст диссертации достаточно полно проиллюстрирован рисунками и графиками.

В целом следует отметить, что диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне. В работе К.А. Лозового приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как новое решение задачи, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, — твердотельной фото- и оптоэлектроники, наноэлектроники и нанофотоники. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения уверенно обоснованы.

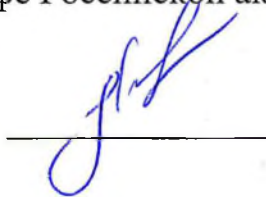
Работа базируется на достаточном числе исходных данных и расчетов. Диссертация написана языком, доступным широкому кругу специалистов в области физики полупроводников, содержит иллюстрирующие изложение рисунки и таблицы, доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена.

Считаю, что диссертационная работа К.А. Лозового «Кинетика формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия

на кремнии для приборов оптоэлектроники» удовлетворяет всем требованиям ВАК (пп. 9–14 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы, Лозовой Кирилл Александрович, является высококвалифицированным научным работником и заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (диссертация защищена по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников), заведующий лабораторией фотоэлектрических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук



Мынбаев Карим Джафарович

20.09.2016

Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Тел: 8 (812) 297-22-45

E-mail: post@mail.ioffe.ru

www.ioffe.ru

Подпись К.Д. Мынбаева заверяю

Учёный секретарь Отделения физики твердого тела

ФТИ им. А.Ф. Иоффе



 А.Н. Резницкий