



«УТВЕРЖДАЮ»

И. О. Директора
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова Сибирского отделения
Российской академии наук,
член-корреспондент РАН

А.В. Двуреченский

"28" сентября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Система Ge/Si с квантовыми точками Ge представляет интерес как с точки зрения модельной системы для изучения влияния напряжений на формирование массива островков, так и с точки зрения применений в области нано- и оптоэлектроники. Одним из основных методов получения массива квантовых точек является самоорганизация квантовых точек в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Самоорганизация квантовых точек возможна в случае рассогласования по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой. В этом случае квантовые точки растут по механизму Странского–Крастанова, в котором формирование квантовых точек определяется конкурирующими кинетическими и термодинамическими процессами. В диссертационной работе К.А. Лозового выполнено моделирование процессов формирования квантовых точек в системах Ge/Si(100), Ge_xSi_{1-x}/Si(100) и Ge_xSi_{1-x}/Sn/Si(100), учитывая зависимость поверхностной энергии грани островка от толщины смачивающего слоя и вклад в изменение свободной энергии при формировании островка за счет образования дополнительных ребер. С учетом этого вклада рассчитываются скорость зарождения островков, поверхностная плотность и функция распределения квантовых точек по размерам. Показано, что принимая во внимание дополнительную энергию образования ребер, получаются более реалистичные оценки параметров массива квантовых точек при численном моделировании их роста. В литературе практически отсутствуют работы, посвященные теоретическому описанию процессов роста слоев твердого раствора Ge_xSi_{1-x} на Si, особенно в присутствии олова. В диссертации строится теория, описывающая процессы роста двумерных слоев и квантовых точек в системах Ge_xSi_{1-x}/Si(100) и Ge_xSi_{1-x}/Sn/Si(100). Для расчета критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту по Странскому–Крастанову используется теоретическая модель, основанная на общей теории нуклеации островков, учитывающая зависимости

модуля упругости, рассогласования решеток и удельной поверхностной энергии боковых граней от состава, а также изменение коэффициента диффузии адатомов в присутствии олова. Описанная модель также позволяет рассчитывать поверхностную плотность и функцию распределения по размерам трехмерных островков в этих системах. Несмотря на то, что в литературе имеется очень ограниченное количество экспериментальных данных по критической толщине перехода от двумерного к трехмерному росту в системах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$ и $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Sn}/\text{Si}(100)$ и по характеристикам массивов формируемых в этих системах трехмерных островков, результаты расчетов демонстрируют хорошее совпадение с экспериментом.

В связи с самопроизвольным характером возникновения ансамблей квантовых точек управлять параметрами формирующихся островков можно, контролируя условия роста: температуру подложки, скорость осаждения германия, количество осажденного материала. Поэтому важной задачей теоретических исследований является расчет оптимальных условий роста для создания приборно-ориентированных структур. В диссертационной работе сделана попытка рассчитать темновой ток и обнаружительную способность фотодетектора с квантовыми точками Ge с учетом таких параметров массива квантовых точек как разброс островков по размерам и их плотность. Из анализа выражения для темнового тока фотодетектора с квантовыми точками, работающего в режиме ограничения генерационно-рекомбинационными шумами, делается вывод о том, что также как и в случае работы фотодетектора в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения, удельная обнаружительная способность фотоприемника на квантовых точках увеличивается с ростом плотности квантовых точек и с уменьшением разброса наноостровков по размерам.

Основные научные результаты, полученные автором:

1. Получены аналитические формулы функции распределения по размерам и поверхностной плотности 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 за счет образования дополнительных ребер и зависимость поверхностных энергий граней от толщины смачивающего слоя. Функция распределения по размерам и поверхностная плотность островков находятся из кинетической теории Зельдовича и термодинамической модели Мюллера-Керна.

2. Получено обобщенное уравнение Мюллера-Керна для нахождения равновесной толщины смачивающего слоя при молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме Странского-Крастанова, учитывающее зависимость поверхностных энергий граней квантовой точки от толщины смачивающего слоя.

3. Построена теоретическая модель для определения зависимостей критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту по Странскому-Крастанову от состава, поверхностной плотности и среднего размера островков в системах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$ и $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Sn}/\text{Si}(100)$ для различных температур.

4. Установлены теоретические зависимости разброса островков по размерам δL , обнаружительной способности фотодетектора с квантовыми точками, работающего в

режиме ограничения флуктуациями фонового излучения, от температуры роста. С увеличением температуры роста наблюдается уменьшение разброса островков по размерам и увеличение обнаружительной способности.

Теоретическая и практическая значимость диссертации.

Результаты диссертационной работы вносят вклад в понимание процессов роста квантовых точек по механизму Странского–Крастанова в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Учет вклада энергии образования новых ребер в изменение свободной энергии атомов при их переходе из смачивающего слоя в островок, а также зависимости удельных поверхностных энергий граней островка от толщины слоя осаждаемого материала при молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме Странского–Крастанова позволяет более корректно оценить поверхностную плотность и средний размер квантовых точек и избежать завышения показателей однородности островков по размерам при численном моделировании процессов роста квантовых точек.

Получены аналитические формулы, позволяющие оценить влияние характеристик массива квантовых точек на величину темновых токов и обнаружительной способности инфракрасных фотодетекторов. Описанная методика определения параметров ансамблей квантовых точек германия на кремнии, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, может быть использована в дальнейших исследованиях, направленных на разработку полупроводниковых фотопреобразователей, светодиодов и лазеров на квантовых точках.

Несмотря на высокий уровень, диссертация Лозового К.А. не лишена ряда недостатков. К замечаниям по диссертационной работе можно отнести:

1. В работе рассматривается рост квантовых точек по механизму Странского–Крастанова из упруго-напряженного смачивающего слоя в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Известно, что при определенных условиях роста можно достичь очень высокой поверхностной плотности островков, когда они располагаются достаточно близко друг к другу. В этом случае необходимо учитывать взаимодействие островков. В работе рассматривается вклад в изменение энергии системы, вызванный образованием ребер островка при этом пренебрегается вкладом, связанным с взаимодействием между островками.

2. В аналитической формуле удельной поверхностной энергии слоя твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ представлена зависимость от состава при этом никак не рассматривается зависимость поверхностной энергии от деформации пленки.

3. Из текста работы не ясно каким образом получена функция распределения квантовых точек $f(L)$ по латеральным размерам L и плотность островков.

4. Утверждается, что переход между hut-островками, имеющими в основании квадрат и прямоугольник, невозможен. Из литературы известно, что при определенных условиях переход между такими островками всё-таки наблюдается. Это, например, работы Берта Вейтлэндера. При низких температурах эпитаксии могут образовываться островки с квадратным основанием, которым при дальнейшем росте выгодно расти в одном из двух направлений на плоскости (100).

5. Сравнивая теоретическую и экспериментальную зависимости критической толщины 2D-3D перехода от состава для слоя твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, можно видеть большое несоответствие теории и эксперимента для содержания Ge меньше 50 %. С чем может быть связана разница в несколько десятков монослоев в тексте диссертации не обсуждается.

6. В работе говорится, что для достижения высоких значений обнаружительной способности фотоприемников с квантовыми точками следует растить островки при высоких температурах роста в диапазоне 500–600 °С. Из рисунков, описывающих поведение обнаружительной способности от температуры роста это не ясно.

7. В диссертации встречаются термины, не используемые в литературе, например, прикритическая толщина, докритические квантовые точки, клиновидные островки.

8. Название диссертации включает фразу «для приборов оптоэлектроники». В тексте диссертации описан лишь фотоприемник с квантовыми точками, его обнаружительная способность и темновой ток.

Сделанные замечания не касаются научных положений, выносимых на защиту, основных результатов и выводов диссертационного исследования и не влияют на общую высокую оценку работы.

Диссертационная работа Лозового К.А. выполнена на высоком уровне, написана грамотным языком и хорошо оформлена. Результаты работы сформулированы четко и ясно, не вызывают сомнений достоверность и обоснованность научных положений, выносимых на защиту. Все основные результаты диссертационного исследования опубликованы в открытой печати.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию работы и отражает основные результаты исследования.

Заключение.

Диссертационная работа Лозового Кирилла Александровича «Кинетика формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии для приборов оптоэлектроники» соответствует специальности 01.04.10 – Физика полупроводников и является законченным квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Диссертация по актуальности выбранной темы, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует критериям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям в пунктах 9–14 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор – Лозовой Кирилл Александрович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Отзыв обсужден и одобрен на Институтском семинаре на базе лабораторий молекулярно-лучевой эпитаксии элементарных полупроводников и соединений АЗВ5 и лаборатории физических основ эпитаксии полупроводниковых гетероструктур Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, протокол № 5 от 15 сентября 2016 г.

Заключение утверждено на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Председатель семинара

Заведующий отделом роста и структуры полупроводниковых материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор



Пчеляков Олег Петрович

Отзыв составил:

Научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии элементарных полупроводников и соединений АЗВ5 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук

Адрес: 630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13.

Тел. +7(383)330-79-34. Факс: +7(383)330-77-45, E-mail: Vyacheslav.t@isp.nsc.ru.



Тимофеев Вячеслав Алексеевич.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН)

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13

Тел: 8 (383) 330-90-55, Факс: +7(383)333-27-71

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

www.isp.nsc.ru