

## ОТЗЫВ

официального оппонента Поплавного Анатолия Степановича 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

В диссертационной работе Лозового Кирилла Александровича построена физико-математическая модель формирования гетероструктур с квантовыми точками различной формы в материальных системах  $\text{Ge/Si}(100)$ ,  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$  и  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Sn/Si}(100)$ , учитывающая вклад различных энергетических факторов в изменение свободной энергии при образовании островков. Кроме того, с использованием полученной модели проводится оптимизация условий роста таких гетероструктур в методе молекулярно-лучевой эпитаксии для создания на их основе фотодетекторов с повышенной обнаружительной способностью и высокоэффективных солнечных элементов.

Квантовые точки получили в настоящее время широкое применение в производстве светоизлучающих приборов (лазеров и светодиодов) и фоточувствительных устройств (фотоприемников и солнечных элементов). Высок интерес к квантовым точкам как к базе для реализации элементов памяти и логических элементов квантовых компьютеров и других устройств нанoeлектроники и нанофотоники. При этом основным физическим методом выращивания квантовых точек является их самоорганизация в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако до сих пор основные особенности протекающих в ходе эпитаксии процессов требуют своего объяснения. В связи с этим, актуальность выбранной темы исследований не вызывает сомнений.

Диссертационная работа Лозового К.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии, содержащей 203 источника. По объему и структуре работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Во введении приводится общая характеристика диссертации.

В первой главе проведен обзор научно-технической литературы, касающейся методов выращивания гетероструктур с квантовыми точками и создания оптоэлектронных приборов на их основе. Подробно описан метод молекулярно-лучевой эпитаксии для создания массивов квантовых точек, отмечены основные способы управления параметрами ансамблей самоорганизующихся наноостровков. Выявлены основные особенности формирования квантовых точек по механизму Странского–Крастанова в эпитаксиальных системах. Проводится сравнительный анализ существующих теоретических моделей роста квантовых точек.

Во второй главе с учетом зависимости удельной поверхностной энергии граней от количества осажденного материала при расчете равновесной толщины смачивающего слоя в случае роста полупроводников по механизму Странского–Крастанова предложено новое обобщенное уравнение Мюллера–Керна, которое решено численно для системы германий на поверхности кремния (100). Кроме того, в этой главе оценивается степень влияния вклада энергии образования дополнительных ребер на изменение свободной энергии при формировании квантовой точки. Проводится уточнение известной кинетической модели образования и роста квантовых точек по механизму Странского–Крастанова.

В третьей главе построена кинетическая модель формирования квантовых точек германия на кремнии различной формы, учитывающая вклад дополнительных ребер в изменение свободной энергии при образовании островка. Также в данной главе построена теоретическая модель для определения зависимостей критической толщины перехода по Странскому–Крастанову от состава  $x$  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.

В последней главе теоретически определяются оптимальные с точки зрения дальнейшего приборного применения ростовые условия для создания фотоприемников с наиболее высокой обнаружительной способностью и солнечных элементов с максимальным коэффициентом полезного действия.

Основные результаты работы сформулированы в виде четырех защищаемых положений и пяти выводов, дополняющих эти положения. Защищаемые положения представляются новыми, достоверными и с достаточной полнотой освещены в журналах списка ВАК, включая высокорейтинговые зарубежные журналы.

Научная новизна исследования подтверждается тем, что основные результаты диссертационной работы получены впервые, в частности:

1. Разработана физико-математическая модель роста квантовых точек германия различной формы на поверхности кремния, в том числе в присутствии на ней олова в качестве сурфактанта, учитывающая вклад в изменение свободной энергии при образовании островка за счет образования дополнительных ребер и зависимость поверхностных энергий граней от толщины смачивающего слоя.

2. Предложено новое обобщенное уравнение для определения равновесной толщины двумерного слоя при росте по механизму Странского–Крастанова в различных материальных системах, учитывающее зависимость поверхностных энергий граней квантовой точки от толщины двумерного слоя.

3. Теоретически определены зависимости от состава критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту, 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.



4. Обоснована возможность повышения обнаружительной способности инфракрасных фотодетекторов на основе наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии за счет уменьшения темнового тока детектора путем выращивания указанных структур при повышенных температурах синтеза в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, так как это приводит к уменьшению относительного разброса островков по размерам.

Достоверность результатов исследования обеспечивается корректностью постановки задач, выбором методов исследования, использованием надежных теоретических моделей. Полученные результаты не противоречат существующим экспериментальным и расчетным данным.

По теме диссертации К. А. Лозовым опубликовано 18 работ, в том числе 9 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, (среди них 5 статей в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus), и 9 публикаций в сборниках материалов международных и российских научных и научно-технических конференций. При этом две статьи опубликованы в журналах, имеющих импакт-фактор более 4,5.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что получены выражения, позволяющие оценить влияние параметров ансамбля квантовых точек на величину темнового тока и обнаружительной способности фотодетекторов и коэффициента полезного действия солнечных элементов с квантовыми точками. Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении 8 научно-исследовательских работ.

В качестве замечаний и вопросов к работе можно выделить следующее:

1. В диссертационной работе рассматриваются только начальные стадии роста квантовых точек. Чем обосновано это ограничение? Можно ли распространить теорию на более поздние стадии роста, в частности, когда начинается морфологическая перестройка hut-кластеров с образованием более сложных dome-кластеров?

2. При выводе обобщенного уравнения Мюллера–Керна (2.32) для нахождения равновесной толщины смачивающего слоя автор работы пренебрегает в выражении (2.19) изменением свободной энергии за счет образования дополнительных ребер островка. В то же время в предыдущих параграфах использовалось выражение для изменения свободной энергии (2.5), которое учитывало этот вклад. Чем обосновано такое приближение?

3. Можно отметить также избыточность в количестве формул и расшифровок обозначений и символов. Для примера: совершенно идентичны выражения (2.1) и (3.3), (2.5) и (3.13), (2.15) и (3.23). Несколько раз по ходу текста расшифровываются обозначения для скорости роста, температуры подложки, постоянной Больцмана и т.д.

Тем не менее, высказанные замечания и пожелания не умаляют ценности и уровня работы соискателя.

Автореферат диссертации в полной мере отражает основные идеи и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа Лозового К.А. является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Считаю, что диссертационная работа «Кинетика формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии для приборов оптоэлектроники» по объему выполненных исследований, уровню решаемых задач, научной новизне и практической значимости полученных результатов полностью удовлетворяет требованиям ВАК (пунктам 9–14 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Лозовой Кирилл Александрович 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 кафедрой теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет», профессор

 Подпись Поплавной Анатолий Степанович  
Зав. канцелярией 

Адрес: 650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет»  
Тел: 8 (3842) 58-38-85  
E-mail: rector@kemsu.ru  
www.kemsu.ru

Подпись А.С. Поплавного заверяю

Дата: 20.09.16.