

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.07, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 20 октября 2016 года публичной защиты диссертации Лозового Кирилла Александровича «Кинетика формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии для приборов оптоэлектроники» по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

На заседании диссертационного совета присутствовали 17 из 24 членов диссертационного совета, из них 4 доктора наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников:

1. Багров В.Г., председатель диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
2. Ивонин И.В., заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
3. Киреева И.В., ученый секретарь диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
4. Бордовицын В.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
5. Брудный В.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
6. Войцеховский А.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
7. Гермогенов В.П.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
8. Дударев Е.Ф.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
9. Коротаев А.Д.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
10. Лавров П.М.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
11. Ляхович С.Л.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
12. Мельникова Н.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
13. Потекаев А.И.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
14. Трифонов А.Ю.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
15. Тюменцев А.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
16. Шаповалов А.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
17. Шарапов А.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02

Заседание провел председатель диссертационного совета, доктор физико-математических наук, профессор Багров Владислав Гаврилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить К.А. Лозовому ученую степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.07
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Министерства образования и науки Российской Федерации

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20.10.2016 г., № 56

О присуждении **Лозовому Кириллу Александровичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Кинетика формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии для приборов оптоэлектроники»** по специальности **01.04.10 – Физика полупроводников**, принята к защите 28.06.2016 г., протокол № 51, диссертационным советом **Д 212.267.07** на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 798-745/68 от 13.04.2007 г.).

Соискатель **Лозовой Кирилл Александрович**, 1989 года рождения.

В 2013 году соискатель окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2016 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности инженера-исследователя учебно-научной лаборатории оптической обработки информации в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре квантовой электроники и фотоники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Коханенко Андрей Павлович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра квантовой электроники и фотоники, профессор.

Официальные оппоненты:

Поплавной Анатолий Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», кафедра теоретической физики, заведующий кафедрой

Мынбаев Карим Джафарович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, лаборатория фотоэлектрических явлений в полупроводниках, заведующий лабораторией

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своём положительном заключении, подписанном **Пчеляковым Олегом Петровичем** (доктор физико-математических наук, профессор, отдел роста и структуры полупроводниковых материалов, заведующий отделом) и **Тимофеевым Вячеславом Алексеевичем** (кандидат физико-математических наук, лаборатория молекулярно-лучевой эпитаксии элементарных полупроводников и соединений A_3B_5 , научный сотрудник), указала, что 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. В литературе практически отсутствуют работы, посвященные теоретическому описанию процессов роста слоев твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на Si, особенно в присутствии олова. В диссертационной работе Лозового К.А. построена теория, описывающая процессы роста двумерных слоев и квантовых точек в материальных системах $\text{Ge}/\text{Si}(100)$, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$ и $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Sn}/\text{Si}(100)$ и учитывающая зависимость поверхностной энергии грани островка от толщины смачивающего слоя и вклад в изменение свободной энергии при формировании островка за счет образования дополнительных ребер. Проводится моделирование процессов формирования квантовых точек в этих системах. Результаты расчетов демонстрируют хорошее совпадение с экспериментом. Результаты диссертационной работы вносят вклад в понимание процессов роста квантовых точек по механизму Странского-Крастанова в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Полученные аналитические формулы позволяют 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.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 18 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 9 (из них 5 статей в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science, 1 статья в российском журнале, переводная версия которого индексируется Scopus), в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-технических конференций, конгресса, симпозиума, прошедшего за рубежом – 9. Общий объем публикаций – 5,12 п.л., авторский вклад – 1,4 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и индексируемых Web of Science:

1. **Lozovoy K. A.** Comparative analysis of pyramidal and wedge-like quantum dots formation kinetics in Ge/Si(001) system / K. A. Lozovoy, A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, V. G. Satdarov // Surface Science. – 2014. – Vol. 619. – P. 1–4. – 0,25 / 0,07 п.л. – DOI: 10.1016/j.susc.2013.10.007

2. **Lozovoy K. A.** Heterostructures with self-organized quantum dots of Ge on Si for optoelectronic devices / K. A. Lozovoy, A. V. Voitsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, V. G. Satdarov, O. P. Pchelyakov, A. I. Nikiforov // Opto-Electronics Review. – 2014. – Vol. 22, № 3. – P. 171–177. – 0,44 / 0,08 п.л. – DOI: 10.2478/s11772-014-0189-8

3. **Lozovoy K. A.** Photodetectors and solar cells with Ge/Si quantum dots parameters dependence on growth conditions / K. A. Lozovoy, A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, V. G. Satdarov // International Journal of Nanotechnology. – 2015. – Vol. 12, № 3/4. – P. 209–217. – 0,56 / 0,14 п.л. – DOI: 10.1504/IJNT.2015.067206

4. **Lozovoy K. A.** Influence of edge energy on modeling the growth kinetics of quantum dots / K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, A. V. Voitsekhovskii // Crystal Growth & Design. – 2015. – Vol. 15, № 3. – P. 1055–1059. – 0,31 / 0,11 п.л. – DOI: 10.1021/cg501451b

5. **Lozovoy K. A.** Generalized Muller–Kern formula for equilibrium thickness of a wetting layer with respect to the dependence of the surface energy of island facets on the thickness of the 2D layer / K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, A. V. Voitsekhovskii // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2015. – Vol. 17, № 44. – P. 30052–30056. – 0,31 / 0,11 п.л. – DOI: 10.1039/C5CP05192D

На автореферат поступили 5 положительных отзывов. Отзывы представили:
1. **М.М. Михайлов**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией радиационного и космического материаловедения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, без замечаний.

2. **Г.Е. Ремнев**, д-р техн. наук, профессор кафедры экспериментальной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета, *без замечаний*.
3. **кафедра физики (и инженерной графики)** Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого Министерства обороны Российской Федерации, г. Балашиха (отзыв подписал **В.Г. Средин**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой), *с замечанием*: недостаточно полно описаны в автореферате методы оптимизации ростовых условий для повышения эффективности преобразования солнечного элемента с квантовыми точками.
4. **В.Я. Костюченко**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета, *с замечанием*: из текста автореферата остается непонятным, насколько учет вклада энергии образования новых ребер в изменение свободной энергии атомов позволяет улучшить модель, то есть нет сравнения с результатами расчетов других авторов.
5. **К.О. Болтарь**, д-р физ.-мат. наук, начальник научно-технического комплекса Государственного научного центра Российской Федерации АО «НПО «ОРИОН», г. Москва, профессор кафедры физической электроники Московского физико-технического института (государственный университет), *с замечанием*: использование как русских, так и английских символов при указании единиц измерений физических величин, а также надписи на английском языке на многих рисунках нарушают единообразие оформления автореферата.

В отзывах отмечено, что изучение процессов формирования структур пониженной размерности германия на кремнии в методе молекулярно-лучевой эпитаксии является современным и перспективным направлением исследований. Получаемые таким способом массивы наноразмерных островков успешно применяются для создания полупроводниковых светодиодов, солнечных батарей и фотодетекторов с квантовыми точками, где они уже продемонстрировали целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными материалами, используемыми в этих устройствах. В диссертации Лозового К.А. решена актуальная задача определения зависимостей параметров ансамбля наноостровков германия на поверхности кремния (100) от условий их получения в методе молекулярно-лучевой эпитаксии. В работе получен целый ряд новых научных результатов.

В частности, разработана физико-математическая модель роста квантовых точек в материальных системах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$, впервые учитывающая наличие в массиве островков различной формы, вклад энергии ребер в образование нанокластера и зависимости поверхностных энергий от толщины двумерного смачивающего слоя. Особо отмечается вывод обобщенного уравнения для нахождения равновесной толщины смачивающего слоя, справедливого не только для материальной системы германий-кремний. Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, будут использованы в дальнейших теоретических исследованиях по рассматриваемому вопросу. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при проектировании инфракрасных фотоприемников, солнечных элементов и светоизлучающих устройств на основе рассмотренной материальной системы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **А.С. Поплавной** является высококвалифицированным специалистом в области физики твердого тела, кристаллофизики, физики полупроводников и полупроводниковых наноструктур; **К.Д. Мынбаев** является известным специалистом в области материаловедения полупроводников (в частности, твёрдых растворов), используемых в устройствах фото- и оптоэлектроники, а также в области нанотехнологий и создания наноструктурированных материалов; в лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии элементарных полупроводников и соединений АЗВ5 **Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН** работают квалифицированные специалисты по направлению «Физика полупроводников», известные своими достижениями в области исследования низкоразмерных структур (в том числе с квантовыми точками германия на кремнии) и технологий их получения, а также оптоэлектронных приборов на их основе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана физико-математическая модель роста квантовых точек германия различной формы и состава на поверхности кремния, в том числе при наличии на ней олова в качестве сурфактанта, учитывающая вклад в изменение свободной энергии

при формировании островка за счет образования дополнительных ребер и зависимость поверхностных энергий граней от толщины смачивающего слоя;

предложено обобщенное уравнение Мюллера–Керна для нахождения равновесной толщины смачивающего слоя при молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме Странского–Крастанова в различных материальных системах, учитывающее зависимость поверхностных энергий граней квантовой точки от толщины двумерного смачивающего слоя;

доказана принципиальная возможность повышения обнаружительной способности инфракрасных фотодетекторов, работающих в диапазоне длин волн 3–5 мкм, на основе наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии путем выращивания указанных структур при температурах синтеза 500–600 °С в методе молекулярно-лучевой эпитаксии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что зависимость удельных поверхностных энергий граней островка от толщины слоя осаждаемого материала при молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме Странского–Крастанова ведет к изменению равновесной толщины смачивающего слоя; учет вклада дополнительной энергии образования новых ребер в изменение свободной энергии системы при переходе атомов из смачивающего слоя в островок уменьшает поверхностную плотность и увеличивает средний размер квантовых точек в ансамбле;

применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы кинетической теории формирования квантовых точек, основанной на термодинамической модели Мюллера–Керна и общей теории нуклеации Зельдовича;

изложены результаты численного моделирования зависимостей функции плотности распределения по размерам, поверхностной плотности и других параметров квантовых точек германия на кремнии от условий их синтеза методом молекулярно-лучевой эпитаксии;

раскрыто несоответствие моделей роста квантовых точек различной формы, не учитывающих энергию образования дополнительных ребер островка, экспериментально наблюдаемым фактам;

изучена кинетика формирования квантовых точек различной формы и состава в материальной системе $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$;

проведена модернизация существующей кинетической модели роста квантовых точек пирамидальной формы в системе $\text{Ge}/\text{Si}(100)$, обеспечивающая более реалистичные оценки параметров массива квантовых точек при численном моделировании.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

определены ростовые условия в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющие синтезировать массивы квантовых точек германия на кремнии, оптимальные для создания фотопреобразователей различного назначения;

представлены выражения, позволяющие оценить влияние условий синтеза и характеристик массива квантовых точек на величину темновых токов и обнаружительной способности инфракрасных фотодетекторов, а также коэффициента полезного действия солнечных элементов на основе таких массивов.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут быть использованы в научных и образовательных учреждениях, в которых ведутся исследования по сходной тематике: в Национальном исследовательском Томском государственном университете, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Новосибирском национальном исследовательском государственном университете, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва), Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете РАН, Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород) и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

идея базируется на использовании общепринятых термодинамического и кинетического подходов к описанию процессов формирования и роста наноструктур с квантовыми точками при гетероэпитаксии; на анализе

существующей модели темнового тока через фотоприемные структуры с квантовыми точками и использовании классических выражений для характеристик фотоприемников с квантовыми точками;

использовано сопоставление авторских результатов с полученными ранее экспериментальными и теоретическими результатами по рассматриваемой тематике;

установлено качественное, а во многих случаях и количественное согласие авторских результатов с экспериментальными результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые произведен учет различия геометрической формы островков, вклада в изменение свободной энергии системы при формировании островка за счет образования дополнительных ребер и зависимости поверхностных энергий граней от толщины смачивающего слоя, который позволил получить выражения, определяющие функцию распределения по размерам и поверхностную плотность квантовых точек германия на кремнии различной формы и состава, выращенных при различных значениях температуры и скорости роста. Учет зависимости поверхностных энергий граней квантовой точки от толщины осажденного материала позволил получить новое обобщенное уравнение Мюллера–Керна для определения равновесной толщины смачивающего слоя при гетероэпитаксии в режиме Странского–Крастанова. Благодаря учету зависимостей физических характеристик и энергетических параметров гетероэпитаксиальных систем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Sn}/\text{Si}$ от состава x , а также изменения поверхностных свойств подложки в присутствии олова определены зависимости критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту от состава, поверхностная плотность и средний размер островков в этих системах для различных температур синтеза.

Личный вклад соискателя состоит в: непосредственном участии в постановке цели и задач исследования, выборе методов их решения, обсуждении полученных результатов, подготовке основных публикаций по выполненной работе. Проведение теоретических исследований, построение моделей расчета, выполнение компьютерного моделирования, обработка полученных результатов осуществлялись лично автором.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные разработки для решения проблемы определения зависимостей параметров массивов квантовых точек германия на кремнии от условий их синтеза методом молекулярно-лучевой эпитаксии, имеющие существенное значение для проектирования различных оптоэлектронных приборов на их основе.

На заседании 20.10.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить **Лозовому К.А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета



Багров Владислав Гавриилович

Киреева Ирина Васильевна

20.10.2016 г.