



данное при анализе пиролиза дисилана, выбору двухкомпонентной схемы распада молекул на поверхности роста пленки?

9. Какими способами можно наиболее оптимальным образом осуществить активацию поверхностного распада молекул без дополнительного нагрева пластины?

10. Каким образом состав и ориентация приповерхностного слоя подложки влияет на процесс пиролиза моногидридов?

В обсуждении работы приняли участие: д.т.н., проф. Воротынцева И.В., д.т.н., проф. Михаленко М.Г., д.х.н., проф. Бодриков И.В., д.т.н. Кириллов Ю.П., д.ф.-м.н. Орлов Л.К., д.х.н., проф. Карташов В.Р., д.х.н., проф. Воротынцева В.М., д.т.н., проф. Плохов С.В., д.т.н., проф. Дроздов П.Н., к.ф.-м.н. доц. Водзинский В.Ю.

**Постановили:** на основании доклада Ивина С.В. и прошедшего обсуждения принять следующее заключение:

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Диссертационная работа «Физико-химические процессы на поверхности растущего  $Si_{1-x}Ge_x$  слоя при гидридной эпитаксии» выполнена на кафедре «Нанотехнологии и биотехнологии».

В период подготовки диссертации соискатель Ивин Сергей Викторович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики микроструктур Российской Академии Наук в должности инженера, в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» на кафедре «Нанотехнологии и биотехнологии» в должности ведущего инженера (по совместительству), с 2015 г. по настоящее время работает в ООО «Аурига» в должности программиста.

В 1998 г. окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы».

В 2004 г. окончил очную аспирантуру государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2016 г. федеральным

государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Научный руководитель – доктор химических наук, профессор Фомин Владимир Михайлович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» кафедра физической химии, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной соискателем работы.** Диссертационная работа посвящена разработке методики определения в диапазоне ростовых температур скоростей распада фрагментов молекул гидридов Si и Ge, адсорбируемых поверхностью выращиваемого  $Si_{1-x}Ge_x$  слоя. Развитие высоковакуумного химического метода эпитаксии и применительно к нему методов контроля эпитаксиальной поверхности требуют тщательной проработки всей совокупности физико-химических процессов, реализуемых на поверхности роста. Полностью решить данную задачу невозможно без детального понимания специфики распада и особенностей взаимодействия радикалов молекул на горячей поверхности. Знание кинетических коэффициентов необходимо также для определения поверхностных концентраций продуктов пиролиза и для оценки влияния кинетики поверхностного распада молекул на формирование композиционного профиля выращиваемых многослойных гетерокомпозиций.

**Личное участие соискателя в получении результатов** заключается в непосредственном участии в решении основных задач проводимой работы, включая постановку задач, анализ литературы, подготовку оборудования и проведении ростовых экспериментов. Наиболее весомый вклад Ивин С.В. внес в анализ физико-химических процессов, протекающих на поверхности растущего SiGe слоя в ростовых установках с гидридными источниками. Вывод основных закономерностей, написание вычислительных программ и последующий теоретический анализ процессов пиролиза гидридов газов в рамках двухкомпонентной модели распада молекул гидридов был проведен им самостоятельно.

**Достоверность представленных в работе результатов и обоснованность выводов** подтверждаются совпадением выводов аналитических кинетических моделей с данными прямых численных расчетов и с результатами анализа, базирующегося на квантово-химических моделях. При определении искомых кинетических констант, ответственных за скорости поверхностного распада молекул, в моделях использованы данные не вызывающих сомнения

экспериментов, полученные наиболее продвинутыми в технологическом плане Российскими и зарубежными группами.

#### **Научная новизна работы.**

- Предложен и апробирован метод анализа физико-химических процессов, протекающих на поверхности растущего  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя, позволяющий обойти трудности стандартного кинетического подхода.
- Впервые для двухкомпонентной модели пиролиза, в том числе для смеси моногидридов кремния и германия, во всем диапазоне ростовых температур получены соотношения, связывающие скорости распада молекул гидридов на поверхности растущего слоя с определяемыми в технологическом эксперименте параметрами системы.
- Впервые доказана зависимость скорости роста слоя не только от коэффициента захвата молекул поверхностью и скорости десорбции с нее водорода, но и от скорости распада радикалов молекул, адсорбируемых ростовой поверхностью.
- Сопоставление результатов численных расчетов с зависимостями, полученными в гибридном Si-GeH<sub>4</sub> MBE методе эпитаксии, позволило впервые оценить частоту распада молекул GeH<sub>3</sub> на поверхности  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя в условиях воздействия на адсорбируемые молекулы атомарных пучков с источника Si.

#### **Практическая значимость работы.**

Установки вакуумной химической эпитаксии с источниками высокочистых гидридов, оснащенные различной диагностической техникой и методиками активации поверхностных физико-химических процессов, являются важнейшим инструментом для создания сложных эпитаксиальных гетеро- и наноструктур. Развитие эпитаксиальных методов, направленных на выращивание структур нужного качества, требует детального понимания протекающих на поверхности физико-химических процессов, что практически невозможно без разработки кинетических и квантово-химических моделей, адекватно описывающих ростовые эксперименты. Проводимые исследования выполнены в рамках проектов: по программам Минобрнауки «Университеты России» 2000-2001 г.г. и Российской академии наук «Физика твердотельных наноструктур» 1999-2001 г.г., МНТЦ 2003-2005 г. проект № 2372, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, № 2011-1.2.1-12-000-2013-095, грантов РФФИ: 01-02-16778, 08-02-00065, 14-03-00364.

Результаты диссертации могут быть использованы в учреждениях как учебного, так и специализированного профиля, связанных с микроэлектроникой и использующих в ростовых процессах источники высокочистых гидридов: ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО

РАН, ФГБУН Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, ФГБУН Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, ФГБУН ФИЦ Институт прикладной физики РАН, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН; ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», ФГУП ГНЦ «ГИРЕДМЕТ», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Научно-исследовательский физико-технический институт при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, и др.

Диссертационная работа Ивина С.В. «Физико-химические процессы на поверхности растущего  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя при гидридной эпитаксии» **соответствует паспорту специальности 02.00.04 – Физическая химия** в пунктах:

3. Определение термодинамических характеристик процессов на поверхности, установление закономерностей адсорбции на границе раздела фаз и формирования активных центров на таких поверхностях.
7. Макрокинетика, механизмы сложных химических процессов, физико-химическая гидродинамика, растворение и кристаллизация.
9. Элементарные реакции с участием активных частиц.
11. Физико-химические основы процессов химической технологии.

**Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

По теме диссертации опубликовано 13 работ в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ, и 16 тезисов докладов на международных и всероссийских научных конференциях.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. L.K. Orlov, A.V. Potapov, S.V. Ivin. The growth kinetics of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layers from  $\text{SiH}_4$  и  $\text{GeH}_4$ .// Thin Solid Films. 1999. Vol.336. P.191-195.
2. L.K. Orlov, A.V. Potapov, S.V. Ivin. The peculiarities of a non-stationary growth kinetics in GSMBE and their influence on Si/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  interfaces abruptness.// Solid State Phenomena. 1999. Vol.69. P.221-226.
3. Л.К. Орлов, А.В. Потапов, С.В. Ивин. Особенности кинетики роста слоев твердого раствора кремний-германий из силана и германа при наличии в вакуумной камере дополнительного нагретого элемента. // Журнал технической физики. 2000. Т.70. № 6. С.102-107.
4. Л.К. Орлов, А.В. Артемов, С.В. Ивин, В.М. Фомин. Кинетика переходных процессов при росте гетерокомпозиций на базе трехфазной системы Si-Ge-C методом МЛЭ. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 10. С.37-42.
5. Л.К. Орлов, Zs. Horvath, A.V. Potapov, M.L. Orlov, S.V. Ivin, V.I. Вдо-

вин, Э.А. Штейнман, В.М. Фомин. Зонная энергетическая диаграмма и электрические характеристики изотипного Si-SiGe гетероперехода в релаксированных структурах. // Физика твердого тела. 2004. Т.46. №11. С. 2069-2075.

6. Л.К. Орлов, С.В. Ивин. Особенности пиролиза молекул на эпитаксиальной поверхности при росте слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  из гидридов в вакууме. // Физика и техника полупроводников. 2007. Т.41. № 1. С.56-66.

7. Л.К. Орлов, С.В. Ивин. Вакуумная гидридная эпитаксия кремния: кинетика пиролиза моносилана на ростовой поверхности. // Физика и техника полупроводников. 2011. Т.45. № 4. С.566-575.

8. Л.К. Орлов, С.В. Ивин. Кинетика поверхностного пиролиза смеси газов: силан - герман в условиях эпитаксиального наращивания слоев твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . // Журнал общей химии. 2015. Т.85. № 12. С.1951-1965.

9. Л.К. Орлов, С.В. Ивин. Кинетика распада дисилана на ростовой поверхности кремния на два неидентичных радикала. // Химическая физика. 2016. Т.35. № 3. С.36-48.

Диссертация «Физико-химические процессы на поверхности растущего  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя при гидридной эпитаксии» Ивина Сергея Викторовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 02.00.04 – Физическая химия (технические науки).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Нанотехнологии и биотехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» .

Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 4 от 25 апреля 2016 г.



Воротынцев Владимир Михайлович,  
доктор химических наук, профессор,  
кафедра «Нанотехнологии и биотехнологии»,  
заведующий кафедрой