

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего
профессионального образования и науки
Санкт-Петербургский Академический университет –
научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук

на правах рукописи



ТИМОФЕЕВА Мария Алексеевна

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РОСТА И ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ОДНОМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР

Специальность:

01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего профессионального образования и науки Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий Российской академии наук (СПб АУ НОЦНТ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Дубровский Владимир Германович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Андрей Викторович Осипов
доктор физико-математических наук Юрий Юрьевич Эрвье

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

Защита состоится «8» ноября 2013 г. в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 002.269.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования и науки Санкт-Петербургского Академического университета – научно-образовательного центра нанотехнологий Российской академии наук (СПб АУ НОЦНТ РАН) по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина д. 8, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПб АУ НОЦНТ РАН
Автореферат разослан «26» сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



А. А. Богданов

Актуальность темы

Одной из наиболее актуальных задач современной физики полупроводников является создание функциональных наноматериалов с контролируемыми свойствами, в частности, АШВВ нитевидных нанокристаллов и углеродных нанотрубок. Первые научные результаты, посвященные росту нитевидных кристаллов, появились еще в 1950-1970-х годах в работах Р. Вагнера и В. Эллиса по выращиванию Si нитевидных кристаллов методом «пар-жидкость-кристалл» [1]. В последующие годы, в результате исследований, проводимых различными научными группами, были получены нитевидные кристаллы из более чем 140 соединений и элементов. Совершенствование технологий роста и измерительного оборудования привело к развитию методов синтеза данного типа структур и способов исследований их физических свойств. В начале 2000-х годов метод «пар-жидкость-кристалл» был использован для создания нитевидных кристаллов нанометрового диапазона [2-10]. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК), как правило, выращиваются методами молекулярно-пучковой эпитаксии, газофазной эпитаксии и химической пучковой эпитаксии. Уникальные физические свойства ННК, такие как релаксация упругих напряжений, отсутствие протяженных дефектов, возможность создания гетеропереходов различной геометрии (аксиальные и радиальные гетеропереходы) и синтеза регулярных ансамблей наноструктур идентичного размера и формы, определяют широкий спектр применения ННК [2-10]. На их основе можно создавать полевые и гетеробиполярные транзисторы [2, 9], светоизлучающие устройства со сверхнизким энергопотреблением [5, 10], различные типы сенсоров [7], зонды для атомно-силовых микроскопов [8] и т.д. Основной задачей теоретического моделирования является установление связи между технологически

контролируемыми параметрами роста и физическими свойствами образующихся ННК.

Вопросам развития теоретических моделей роста ННК посвящено большое количество научных работ [11-15]. Вместе с тем, существует ряд вопросов, не рассмотренных в данных работах. К ним можно отнести нелинейные эффекты при росте ННК, влияние эффекта Гиббса-Томсона на формирование ННК, температурные режимы роста ННК, особенности формирования ННК в сильно рассогласованных системах материалов, коллективные эффекты при росте ННК. Кроме того, недостаточно развиты теоретические модели роста ННК в отсутствие катализатора. В работе также представлены результаты исследования термических свойств другого типа одномерных наноструктур - углеродных нанотрубок, представляющих интерес для создания на их основе зондов для термической микроскопии высокого разрешения. Исследованию данных вопросов посвящена настоящая диссертационная работа, что определяет ее актуальность для развития физики полупроводниковых низкоразмерных структур.

Основной целью настоящей работы является развитие теоретических моделей роста ННК и исследование термических свойств одномерных наноструктур - ННК и углеродных нанотрубок.

Задачами работы являются

- Развитие теоретической модели роста ННК с учетом нелинейной зависимости скорости роста от длины, позволяющей классифицировать различные режимы роста ННК в зависимости от условий роста и радиуса.
- Развитие теоретической модели роста InSb/InAs структур методом химической пучковой эпитаксии, позволяющей объяснить немонотонную зависимость длины ННК от радиуса.
- Учет коллективного эффекта затенения при формировании плотных массивов ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

- Построение теории роста нитридных ННК в отсутствие катализатора.
- Аналитическое и численное моделирование процессов распространения тепла в системах на основе ННК и углеродных нанотрубок для сканирующей термической микроскопии.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложено нелинейное уравнение роста ННК в стационарном режиме с учетом поверхностной диффузии и эффекта Гиббса-Томсона в капле.
- Предложена обобщенная теоретическая модель роста InSb/InAs ННК.
- Впервые описано влияние эффекта затенения на скорость роста и форму ННК при формировании массивов высокой плотности.
- Обобщение скейлинговой модели роста нитридных ННК. Показано, что длина ННК (L) и радиус (R) связаны соотношением $L \sim cR^\gamma$.
- Развита аналитическая и численная модель, позволяющая описать термическое сопротивление зонда, модифицированного углеродной нанотрубкой или ННК.
- Показано, что зонд, модифицированный углеродной нанотрубкой позволяет улучшить чувствительность и разрешение системы для термической микроскопии, а модифицирование зонда ННК не приводит к увеличению чувствительности системы.

Подтверждение достоверности результатов

- Использование апробированных теоретических методик.
- Совпадение с ранее полученными результатами в предельных случаях.
- Соответствие экспериментальным данным.

Научная и практическая значимость работы состоит в следующем:

- Предложенное в работе нелинейное уравнение для скорости роста ННК впервые позволило показать, что в зависимости от условий процесса осаждения полупроводникового материала, радиуса кристалла, его

начальной длины и температуры роста возможны шесть принципиально различных режимов роста.

- Предложенная обобщенная теоретическая модель роста InSb ННК на сильно рассогласованных подложках (таких как Si или GaAs), позволяет описать влияние потока Sb на процесс роста ННК, увеличение которого приводит к подавлению диффузионной составляющей роста ННК.
- Разработанная теоретическая модель роста ННК с учетом эффекта затенения от соседних кристаллов позволяет прогнозировать влияние плотности ННК и угла падения молекулярного пучка (при росте методом молекулярно-пучковой эпитаксии) на скорость роста кристалла и его морфологию.
- Развита в работе теоретическая модель роста бескаталитических ННК на основе нитридов позволяет описать изменение длины и радиуса ННК в процессе роста.
- Развита в работе аналитические и численные модели для термических сопротивлений основных составляющих системы для сканирующей термической микроскопии позволяют оценить влияние параметров системы на чувствительность измерений и определить оптимальную геометрию рабочей области зонда при использовании ННК и углеродных нанотрубок.
- В целом, развитые теоретические модели и подходы позволяют создавать одномерные наноструктуры с контролируемыми свойствами для различных приложений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложено обобщенное нелинейное уравнение для скорости роста нитевидного нанокристалла в стационарном режиме с учетом эффекта Гиббса-Томсона в капле и диффузии адатомов на вершину. Определены

шесть принципиально различных режимов роста, зависящих от условий эпитаксиального процесса, радиуса кристалла и его начальной длины.

2. Предложена обобщенная теоретическая модель, позволяющая описать немонотонную зависимость скорости роста InSb/InAs нитевидных нанокристаллов от радиуса. Объяснен экспериментально наблюдаемый эффект: верхний InSb сегмент имеет больший радиус и кубическую кристаллическую структуру, а InAs сегмент имеет меньший радиус и гексагональную структуру.

3. Развита теоретическая модель роста нитевидных нанокристаллов с учетом эффекта затенения в плотных массивах. Показано, что увеличение плотности кристаллов на подложке приводит к подавлению радиального роста. Проведены расчеты формы InAs нитевидных нанокристаллов и показано их хорошее соответствие экспериментальным данным.

4. Предложена теоретическая модель роста нитридных нитевидных нанокристаллов в отсутствие катализатора. С помощью данной модели определены зависимости длины и радиуса нитевидных нанокристаллов от времени. Получена скейлиновая зависимость между длиной и радиусом.

5. Предложены модели расчета термических сопротивлений модифицированных зондов для сканирующей термической микроскопии. Исследовано влияние контактного термического сопротивления на процесс передачи тепла. Показано, что модифицирование рабочей области зонда углеродными нанотрубками позволяет улучшить чувствительность системы.

Личный вклад автора

В диссертации изложены результаты, полученные автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор лично выдвигал идеи, предлагал пути решения поставленных задач.

Апробация работы

Основные результаты докладывались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

- IX Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 28 сентября - 3 октября 2009 г.
- Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада, Санкт-Петербург, 29—30 октября 2009 г.
- XIV и XV Международный Симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 15-19 марта 2010 г. и 14-18 марта 2011 г.
- XXXVIII неделя науки СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, 30 ноября – 5 декабря 2009 г.
- 18th, 19th, 20th and 21th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology», 21-26 June 2010, St. Petersburg, 20-25 June 2011, Ekaterinburg, 24-30 June 2012, Niznii Novgorod, 24-28 June 2013, St. Petersburg
- 2011 INOW, 2013 INOW, 24 July - 6 August 2011, St. Petersburg, Russia, Wurtzburg, Germany, 19 – 30 August, 2013 Corsica, France
- 5th, 6th, 7th Nanowire Growth Workshop, 4-5 November 2010, Rome, Italy, 4-6 June 4-6, 2012, St. Peterburg, Russia, 10-12 June Lausanne, Swaziland
- International Conference Nanomeeting, 28-31 May 2013, Minsk Belarus

Публикации. Основные результаты изложены в 24 печатных работах, в том числе, в 8 научных статьях в журналах, входящих в перечень ВАК и 16 материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, 4 главы и заключение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана ее научная новизна, сформулированы цели и задачи работы, изложены выносимые на защиту положения.

Первая глава носит обзорный характер. Рассматриваются основные методы формирования ННК (молекулярно-пучковая эпитаксия, газофазная эпитаксия, химическая пучковая эпитаксия), рост с участием металлического катализатора (золота), а также бескаталитический рост. Представлен обзор основных теоретических моделей роста, морфологии и структуры ННК.

Обсуждаются основные физические свойства ННК и перспективы их применения в качестве функциональных элементов различных полупроводниковых приборов.

Отдельный раздел первой главы посвящен вопросам синтеза, свойств и применения углеродных нанотрубок. Особое внимание уделяется термическим свойствам данного типа структур и их использованию в сканирующей термической микроскопии.

Вторая глава посвящена развитию теории формирования полупроводниковых ННК. В разделе 2.1 развита кинетическая модель роста ННК и исследованы вопросы о максимальной длине ННК с учетом различных нелинейных эффектов. Получено нелинейное уравнение для скорости роста ННК, которое позволяет классифицировать режимы роста в зависимости от условий осаждения, радиуса капли и температуры. Развита теоретическая модель позволила выделить 6 принципиально различных

режимов роста. На рис. 1 представлена классификация указанных режимов, определяемая знаком скорости роста ННК dL/dH , где L есть длина ННК и H есть эффективная толщина осажденного материала.

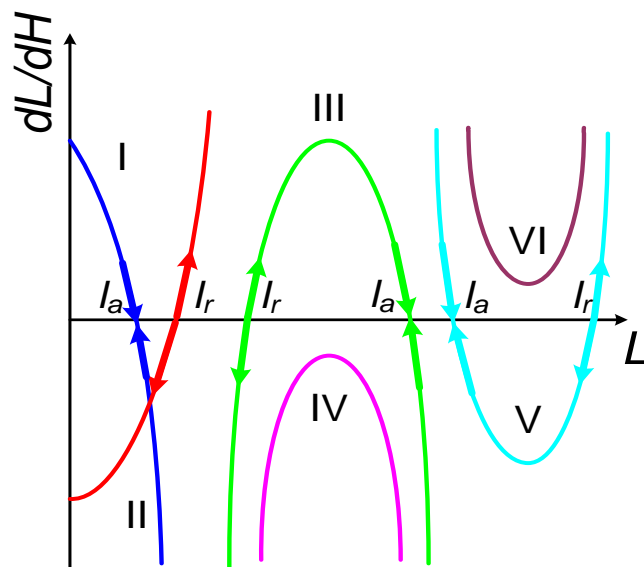


Рис. 1 Режимы роста ННК, определяемые знаком dL/dH , l_a – притягивающая критическая точка, l_r – отталкивающая критическая точка

В соответствии с рис. 1, возможны следующие режимы роста:

- I. режим ограниченного роста;
- II. режим продолжающегося роста;
- III. режим усредняющего роста;
- IV. отрицательный рост;
- V. режим полуограниченного роста;
- VI. режим неограниченного роста ННК;

Переход между различными режимами роста может осуществляться при изменении температуры подложки. Раздел 2.2 диссертационной работы посвящен исследованию влияния температуры на режимы роста ННК. На рис. 2 представлена фазовая диаграмма для радиуса и температуры для различных режимов. Параметры моделирования соответствуют росту GaAs ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии с Au катализатором.

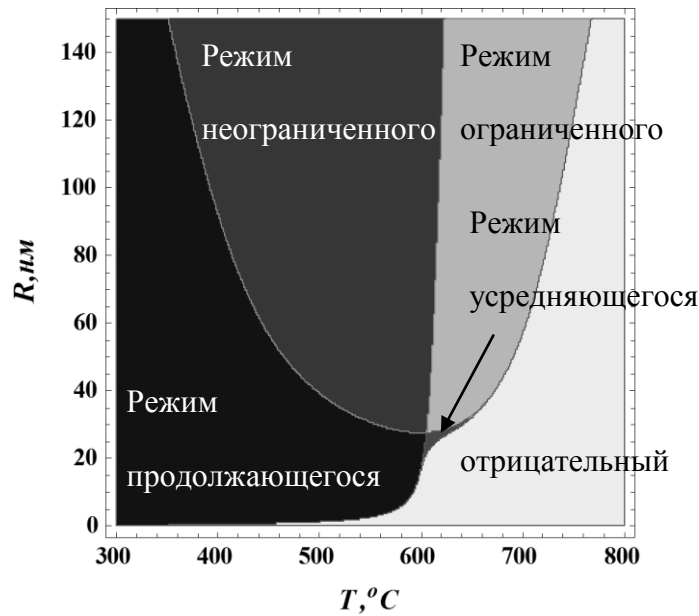


Рис. 2 Фазовая диаграмма режимов роста ННК при различных радиусах ($R, \text{нм}$) и температурах (T, C°)

В разделе 2.3 представлена обобщенная теоретическая модель, позволяющая описать рост ННК в сильно рассогласованных системах, в частности, формирование InSb ННК на сегментах из InAs. Основная проблема синтеза InSb заключается в больших значениях рассогласования решетки с наиболее распространенными полупроводниковыми подложками, например, 18% с GaAs и 19% с Si. В работе [16] была показана возможность формирования InSb ННК на выращенных сегментах InAs. В диссертационной работе представлена теоретическая модель формирования таких структур, объясняющая наблюдаемую кристаллическую структуру InAs/InSb ННК, выращенных методом химической-пучковой эпитаксии. Данная модель описывает немонотонный характер роста ННК в зависимости от радиуса, связанный с конкуренцией эффектов Гиббса-Томсона и диффузионных процессов. В рамках данной модели также исследовано влияние Sb как сурфактанта на рост ННК, приводящее к подавлению диффузии адатомов при росте ННК и, соответственно, к снижению скорости роста ННК. На рис. 3 представлено сопоставление результатов теоретического моделирования и экспериментальных результатов.

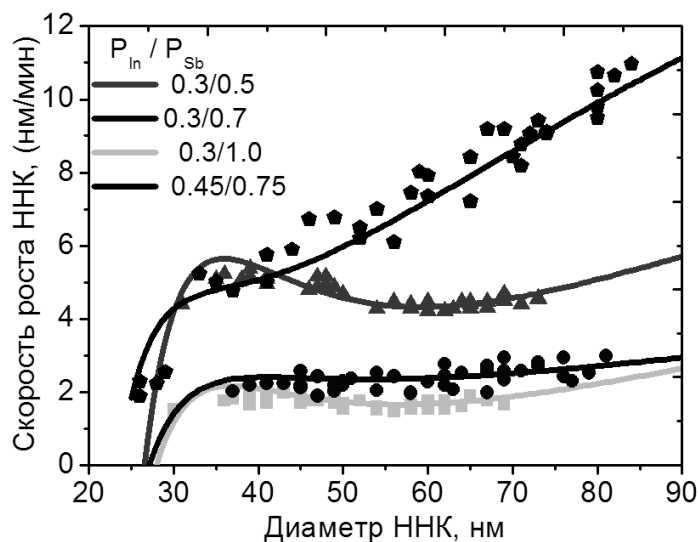


Рис. 3 Зависимость скорости роста InSb ННК от диаметра при различных соотношениях потоков In и Sb, точки - экспериментальные результаты, линии - результаты теоретического моделирования.

В разделе 2.4 представлена теоретическая модель роста массивов ННК, учитывающая влияние соседних ННК на рост друг друга (эффект затенения). Развитая модель позволяет прогнозировать влияние поверхностной плотности ННК на подложке и угла падения молекулярного пучка на процесс роста и морфологию ННК.

Третья глава диссертационной работы посвящена теоретическому моделированию роста самоиндуцированных бескаталитических GaN ННК. В отличие от каталитических ННК, образующихся по механизму «пар-жидкость-кристалл», GaN ННК растут из трехмерных островков, формирующихся на поверхности по механизму Фольмера-Вебера на начальном этапе осаждения.

В разделе 3.1 рассматриваются основные этапы формирования GaN ННК, исследуются вклады в рост ННК за счет прямого попадания и диффузии. Основные процессы, рассматриваемые в рамках модели, таковы:

- адсорбция атомов на боковой поверхности и на вершине ННК;
- десорбция адатомов с вершины ННК;

- диффузия адатомов с боковой поверхности ННК и встраивание на вершину

Вертикальная скорость роста ННК определяется из уравнения материального баланса по Ga:

$$\frac{\pi R^2}{\Omega} \frac{dL}{dt} = \left(\frac{\chi_f J \sin \varphi}{\pi} - J_{top} \right) 2\pi R \lambda + (\chi_{top} J \cos \varphi - J_{des}) \pi R^2 \quad (1)$$

Здесь L и R – длина и радиус ННК в текущий момент времени t , λ – диффузионная длина адатомов Ga на боковой поверхности. Правая часть уравнения описывает расход материала за счет вклада в удлинение ННК при встраивании GaN, где Ω – объем GaN в твердой фазе. Первое слагаемое в правой части уравнения (1) описывает вклад в рост ННК диффузионного потока на вершину ННК, с площади $2\pi R\lambda$, где J – поток из молекулярного пучка, падающего под углом φ , χ_f – коэффициент адсорбции на боковых гранях. Параметр J_{top} описывает обратный поток с вершины ННК на боковые грани. Второе слагаемое в соотношении (1) учитывает вклад в рост за счет прямого попадания вещества на вершину ННК, где χ_{top} – коэффициент встраивания (пиролиза) на вершине ННК и J_{des} – десорбция адатомов с вершины ННК. Количество атомов Ga, остающихся на боковой поверхности и дающих вклад в латеральный рост, определяется выражением $2\pi R(L-\lambda) \cong 2\pi RL$. Обозначая ψ процент атомов Ga, которые могут встроиться на боковой грани ННК, соотношение для латерального роста может быть представлено в виде:

$$\frac{2\pi RL}{\Omega} \frac{dR}{dt} = \left(\frac{\chi_f J \sin \varphi}{\pi} - J_{sw} \right) 2\pi RL \psi \quad , \quad (2)$$

где J_{sw} – десорбционный поток адатомов с боковых стенок ННК.

В разделе 3.2 представлено совместное решение уравнений (1) и (2) с граничными условиями $L(t_0) = L_0$, $R(t_0) = R_0$, которое приводит к зависимости L от R в виде:

$$L(t) = L_0 \left(\frac{R(t)}{R_0} \right)^{\frac{a}{b}} \exp \left(\frac{c}{b} (R(t) - R_0) \right), \quad (3)$$

где a, b и c – константы, определяющиеся условиями роста ННК. Соотношение (3) дает степенную зависимость длины ННК L от радиуса R (скейлинг-эффект). Таким образом, временные зависимости длины и радиуса определяются скейлинговыми соотношениями $L \sim t^\alpha$ и $L \sim t^\beta$, а зависимость длины ННК от радиуса имеет степенной характер $L \sim cR^\gamma$ без учета адсорбции на верхней грани. В общем случае кинетические уравнения роста имеют более сложную форму, подробно исследованную в главе 3.

В Четвертой главе представлены результаты исследования термических свойств ННК и углеродных нанотрубок, применяемых в качестве модифицированных зондов для сканирующей термической микроскопии. На рис. 4 представлено полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изображение рабочей области зонда Si_3N_4 , модифицированного углеродной нанотрубкой на конце:

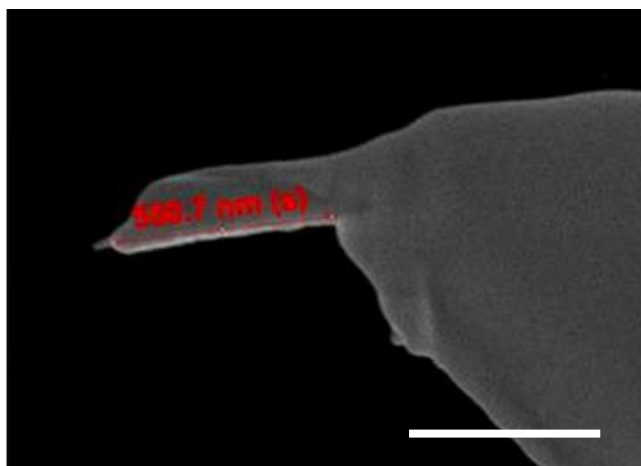


Рис. 4 СЭМ изображение рабочей области Si_3N_4 зонда термического микроскопа, модифицированного углеродной нанотрубкой; шкала 500 нм.

В разделе 4.1 представлена аналитическая модель зонда для сканирующей термической микроскопии, позволяющая оценить вклады в общее термическое сопротивление системы и оценить чувствительность к материалам с различными теплопроводящими свойствами.

В разделе 4.2 представлена численная модель для расчета распределения тепла в модифицированных зондах. На ее основе проведено численное моделирование процессов распространения тепла при использовании углеродных нанотрубок и GaAs ННК в качестве зондов. В результате, определены оптимальные параметры структуры и зависимость разрешения от геометрии системы. Важно, что данная модель позволяет рассчитать вклады от всех термических сопротивлений в системе.

Проведенный в работе теоретический и численный анализ показал, что основным фактором, ограничивающим чувствительность системы к теплопроводящим материалам, является контактное сопротивление (сопротивление Капицы), обусловленное скачком температуры на границе раздела двух сред [17, 18]. При исследовании материалов с низким коэффициентом теплопроводности одним из основных факторов уменьшающих чувствительность и разрешение системы является среда, в которой проводятся измерения, увеличивающая эффективную площадь нагрева образца.

В разделе 4.3 приведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными по исследованию интерфейса Al/BCB (бензоциклобутен) различными зондами: без углеродных нанотрубок и при наличии углеродной трубки на конце зонда. На рис. 5 представлено сравнение данных экспериментальных измерений (заштрихованные полосы) термических сопротивлений R_{Al-m} и R_{BCB-m} с результатами численного моделирования. При проведении численных расчетов учитывалось термическое сопротивление интерфейса между зондом и исследуемым

образом (ρ_{t-s}). По оси у отложено отношение ($1-R_{Al-m}/R_{BCB-m}$), характеризующее чувствительность системы к материалам с различными теплопроводящими свойствами. На рис. 5 представлены результаты моделирования термических сопротивлений системы Al/BCB для различных значений контактных термосопротивлений интерфейсов. Расчетные значения контактных термосопротивлений взяты из работы [19].

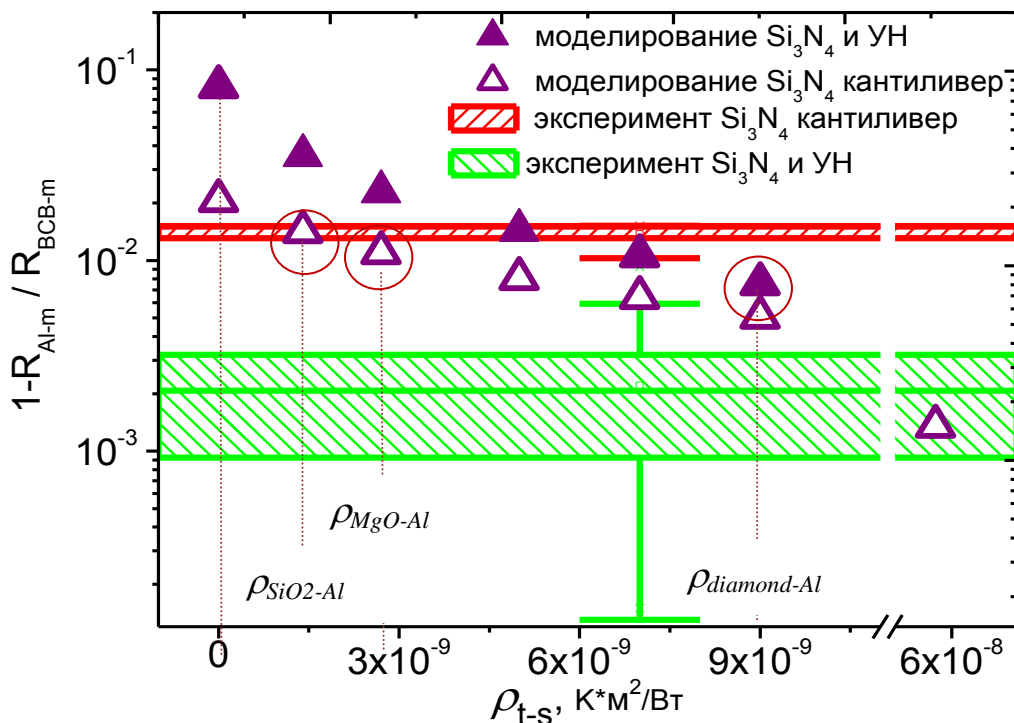


Рис. 5 Сопоставление экспериментальных результатов сканирующей термической микроскопии интерфейса Al/BCB Si_3N_4 зондом (полоса экспериментальных данных со штриховкой налево), и зондом, модифицированным углеродной нанотрубкой (УН) (полоса экспериментальных данных со штриховкой направо) с результатами численного моделирования для зонда без углеродной нанотрубки (незакрашенные треугольники) и с нанотрубкой (закрашенные треугольники).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что зонд, модифицированный углеродной нанотрубкой, позволяет улучшить чувствительность системы сканирующей термической микроскопии при исследовании материалов с различными термическими свойствами.

В заключении приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

- Развита в работе теоретическая модель роста ННК с учетом нелинейных эффектов позволила классифицировать различные режимы роста в зависимости от температуры, радиуса и начальной длины ННК.
- Теоретическая модель роста InSb ННК на сегментах InAs ННК объяснила экспериментально наблюдаемую немонотонную зависимость скорости роста сегмента InSb от радиуса ННК, а также смену кристаллической фазы при переходе от InAs к InSb.
- Развита теоретическая модель роста ННК с учетом коллективного эффекта затенения, проведены расчеты формы InAs ННК в зависимости от условий осаждения, угла падения потока и плотности массива. Теоретически показан и экспериментально подтвержден эффект подавления радиального роста в плотных массивах ННК.
- Предложена теоретическая модель роста GaN ННК в отсутствие катализатора. Данная модель позволила описать наблюдающуюся в эксперименте эволюцию длины и радиуса ННК при молекулярно-пучковой эпитаксии, а также продемонстрировала скейлинговую зависимость между длиной и радиусом.
- Проведено аналитическое и численное моделирование процессов распространения тепла при использовании ННК и углеродных нанотрубок в качестве зондов для термической микроскопии. Предложенные модели позволили оценить влияние параметров и геометрии на чувствительность системы при проведении измерений поверхностей с различными термическими свойствами.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- 1) В.Г. Дубровский, Н.В. Сибирёв, **М.А. Тимофеева**. Нелинейные эффекты при росте полупроводниковых нитевидных нанокристаллов, ФТП, т. 43, вып. 9, стр. 1226-1234, 2009.
- 2) Н.В. Сибирёв, **М.А. Тимофеева**, А.Д. Большаков, М.В. Назаренко, В.Г.Дубровский, Поверхностная энергия и кристаллическая структура нитевидных нанокристаллов полупроводниковых соединений III-V, ФТТ, т. 52, вып. 7, стр. 1428–1434, 2010.
- 3) L. Lugani, D. Ercolani, L. Sorba, N.V. Sibirev, **M. A. Timofeeva**, V.G. Dubrovskii, Modeling of InAs-InSb nanowires grown by Au-assisted chemical beam epitaxy, Nanotechnology 23, 9, 095602 (8p), 2012.
- 4) N. V. Sibirev, M. Tchernycheva, **M. A. Timofeeva**, J.-C. Harmand, G. E. Cirlin, V. G. Dubrovskii, Influence of shadow effect on the growth and shape of InAs nanowires, J. Appl. Phys. 111, 104317 (6 p), 2012.
- 5) M. Tchernycheva, L. Rigutti, G. Jacopin, A. de Luna Bugallo, P. Lavenus, F. H. Julien, **M. Timofeeva**, A. D. Bouravleuv, G. E. Cirlin, H. Lipsanen, Photovoltaic properties of GaAsP core-shell nanowires on Si (001) substrate, Nanotechnology 23, 26, 265402 (7 p), 2012.
- 6) В. Г. Дубровский, **М. А. Тимофеева**, М. Тchernycheva, А. Д. Большаков, Радиальный рост и форма полупроводниковых нитевидных нанокристаллов, ФТП, т 47 вып. 1, стр. 47-53, 2013.
- 7) В. Г. Дубровский, **М. А. Тимофеева**, Моделирование роста GaN нитевидных нанокристаллов на кремнии, ПЖТФ, т. 39, вып. 2, стр. 61-64, 2013.
- 8) А.Д. Буравлёв, Д.В. Безнасюк, Е.П. Гильштейн, М. Тchernycheva, A. De Luna Bugallo, L. Rigutti, L. Yu, Yu. Proskuryakov, И.В. Штром, **М.А. Тимофеева**, Ю.Б. Самсоненко, А.И. Хребтов, Г.Э. Цырлин, Исследование фотоэлектрических свойств массивов нитевидных нанокристаллов GaAs:Be, ФТП, т. 47, вып. 6, стр. 797-801, 2013.
- 9) Н.В.Сибирев, В.Г.Дубровский, Г.Э.Цырлин, Ю.Б.Самсоненко, **М.А.Тимофеева**, А.Г.Гладышев, М.В.Назаренко, IX Российская конференция по физике полупроводников Новосибирск - Томск 28 сентября - 3 октября 2009 г., с.153.
- 10) **М. А. Тимофеева**, Физика - конференция по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-запада, Санкт-Петербург, 29–30 октября 2009 г., с. 12-13.
- 11) Н.В. Сибирев, Г.Э. Цырлин, А.Д. Буравлев, М.В. Назаренко, Ю.Б. Самсоненко, **М.А. Тимофеева**, В.Г. Дубровский, XIV Международный Симпозиум «Нанопизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 15-19 марта 2010 г., т.2, стр. 527-528.

- 12) **М. А. Тимофеева**, Материалы международной научно-практической конференции, XXXVIII неделя науки СПбГПУ, 30 ноября- 5 декабря 2009 г., Санкт-Петербург, стр. 9.
- 13) **М. А. Timofeeva**, N. V. Sibirev and V. G. Dubrovskii, 18th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology. St Petersburg», Russia, June 21 - 26, 2010, p.164-165.
- 14) **М. А. Тимофеева**, Н.В. Сибирёв, L. Lugani, D. Ercolani, L. Sorba, В. Г. Дубровский, XV Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», НижнийНовгород, 14-18 марта 2011 г., т.2, стр. 442-443.
- 15) **М. А. Timofeeva**, N. V. Sibirev, L. Lugani, D. Ercolani, M.V.Nazarenko, L. Sorba, V.G. Dubrovskii, 19th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology», Ekaterinburg, Russia, June 20-25, 2011, p. 217-218.
- 16) **М. А. Timofeeva**, N.V. Sibirev, L. Lugani, D. Ercolani, M.V. Nazarenko, L. Sorba, V.G. Dubrovskii, International Nano-Optoelectronics Workshop, July 24 - August 6 2011, St. Petersburg, Russia, Wurtzburg, Germany, p. 198-199.
- 17) **М. А. Timofeeva**, N. V. Sibirev, M. Tchernycheva, J. Harmand, V. G. Dubrovskii, 6th Nanowire Growth Workshop, St. Petersburg, June 4-6, 2012, p. 114.
- 18) **М. А. Timofeeva**, N. V. Sibirev, M. Tchernycheva, J. Harmand and V. G. Dubrovskii, 20th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology», Nizhny Novgorod, Russia, June 24-30, 2012, p. 102-103.
- 19) A. D. Bolshakov, **М. А. Timofeeva**, M. Tchernycheva, 28-31 May, Nanometing 2013, Minsk, p. 162-165.
- 20) **М. А. Timofeeva**, V. Dubrovskii, V. Consonni, H. Riechert, 28-31 May, Nanomeeting 2013, Minsk, p. 166-168.
- 21) A. D. Bolshakov, **М. А. Timofeeva**, M. Tchernycheva, V. G. Dubrovskii, 21th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology» St. Petersburg, 24-28 June, 2013, p. 216-217.
- 22) N.V. Sibirev, D. Ercolani, A.Li, L.Lugani, L.Sorba, **М.А. Timofeeva**, V.G. Dubrovskii, 21th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology», St. Petersburg, 24-28 June, 2013, p. 277-278.
- 23) **М. А. Timofeeva**, A. Bolshakov, P. Tovee, D. Zeze, V. Dubrovskii, V. Falko, O. Kolosov, International Nano-Optoelectronics Workshop, 19-30 August 2013, Corsica, p. B118-B119.
- 24) **М. А. Timofeeva**, A. Bolshakov, M. Tchernycheva, J. C. Harmand, V. Dubrovskii, Lateral growth and shape of semiconductor nanowires, 7th Nanowire Growth Workshop, 10-12 June 2013, Lausanne, p. 127.

Цитированная литература:

- [1] R. S. Wagner, W. C. Ellis. // *Appl. Phys. Lett.* 1964. Vol. 4, 5. P. 89.
- [2] A.B. Greytak, L.J. Lauhon, M.S. Gudiksen, C.M. Lieber. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84. P. 4176.
- [3] D. Li, Y. Wu, P. Kim, P. Yang, A. Majumdar. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, 15. P. 3186.
- [4] Y. Cui, C.M. Lieber. // *Science.* 2001. Vol. 91, 5505. P. 851.
- [5] S. Gradecak, F. Qian, Y. Li, H.G. Park, C.M. Lieber. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87. P. 173111.
- [6] B.J. Ohlsson, M.T. Bjork, M.H. Magnusson, K. Deppert, L. Samuelson. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 79, P. 3335.
- [7] F. Patolsky, G.F. Zheng, C.M. Lieber. // *Nature Protocols.* 2006. Vol. 78, P. 1711.
- [8] A. B. H. Tay and J. T. L. Thong. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. P. 5207.
- [9] G. Zheng, W. Lu, S. Jin, and C. M. Lieber. // *Advanced Materials.* 2004. Vol. 16, 21. P. 1890.
- [10] M.T. Bjork, B.J. Ohlsson, T. Sass, A.I. Persson, C. Thelander et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80. P. 1058.
- [11] L.E. Froberg, W. Seifert, J. Johansson. // *Phys. Rev. B.* 2007. Vol. 76. P. 153401.
- [12] V.G. Dubrovskii, N.V. Sibirev. // *Phys. Rev. E.* 2004. Vol. 70. P. 031604.
- [13] D. Kashchiev. // *Cryst. Growth and Design.* 2006. Vol. 6. P. 1154.
- [14] F. Glas, J.C. Harmand, J. Patriarche. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99, P. 146101.
- [15] V.G. Dubrovskii, N.V. Sibirev, G.E. Cirlin et al. // *Phys. Rev. B.* 2009. Vol. 79. P. 205316.
- [16] L. Lugani, D. Ercolani, F. Rossi, G. Salviati, F. Beltram and L. Sorba // *Cryst. Growth Des.* - 2010, vol. 10, 4038.
- [17] R.E. Peterson and A.C. Anderson // *Journal of Low Temperature Physics* - 1973, vol. 11, 639665.
- [18] J. Hirotsu, T. Ikuta, T. Nishiyama, K. Takahashi // *Nanotechnology.* 2011. Vol. 22. P. 315702.
- [19] H. X. Wang, Y. Shimono, M. Tanaka, M. Yamazaki // *Materials Transactions.* 2007. Vol. 48. P. 2349-2352.