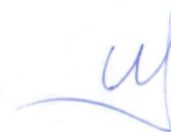


*На правах рукописи*



**Илькив Игорь Владимирович**

**СИНТЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НИТЕВИДНЫХ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ И СОЗДАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЛОИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ**

Специальность: 01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

**Научный руководитель:**

**Буравлев Алексей Дмитриевич**

доктор физико-математических наук, заведующей лабораторией наноэлектроники федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук».

**Официальные оппоненты:**

**Егоров Антон Юрьевич**

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной фотоники и оптоэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

**Комаров Владимир Алексеевич**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики в Российском государственном педагогическом университете имени А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится "19" марта 2020 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru). Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «17» января 2020 г.

Ученый секретарь совета Д 212.238.04  
доктор физико-математических наук



В.А. Мошников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

За последние несколько десятилетий, прошедших со времени создания первых полупроводниковых приборов, область их применения охватила практически все направления человеческой деятельности. При этом постоянно возрастающие требования к увеличению производительности привели к тому, что характерный размер активных элементов значительно уменьшился с сотен микрометров до десятков нанометров. В связи с этим в настоящее время все более актуальными становятся исследования, связанные с синтезом и исследованием низкоразмерных структур, которые могли бы в ближайшем будущем стать основой для электроники нового поколения.

Одними из подобных объектов являются нитевидные нанокристаллы (ННК), представляющие собой кристаллические твердые тела, длина которых много больше их поперечных размеров, которые, в свою очередь, обычно не превышает несколько десятков нанометров. Высокое отношение поверхность\объем характерное для ННК, а также эффективная релаксация упругих напряжений позволяют, с одной стороны, получать ННК высокого кристаллического качества и формировать бездефектные гетероструктуры на их основе, а с другой — осуществлять их синтез на самых различных поверхностях, в том числе, на подложках с большим рассогласованием параметров кристаллической решетки [1]. Особый интерес в этой связи представляет получение ННК на основе полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  непосредственно на кремниевых подложках. На основе таких комбинированных структур уже были представлены прототипы разных устройств, обладающих широкими перспективами применения в области наноэлектроники [2], оптоэлектроники [3], наноэлектромеханики [4].

Еще с 60-х годов XX века наиболее распространенным методом получения полупроводниковых ННК остается эпитаксиальный синтез по механизму «пар-жидкость-кристалл» (ПЖК) с использованием металлических частиц [5]. В качестве катализаторов роста обычно используется золото, но в то же время могут быть использованы и другие металлы [6]. Хорошо известно, что форма, диаметр и

некоторые другие параметры синтезируемых в рамках ПЖК механизма ННК коррелирует с размерами частиц-катализаторов, а их месторасположение на подложке соответствует месторасположению частиц [2].

Для создания на основе ННК приборных структур с воспроизводимыми функциональными характеристиками, как правило, требуется большое количество однородных, обладающих минимальным разбросом размеров ННК. Получение таких ННК основано на использовании наночастиц-катализаторов с одинаковым размером, которые обычно предварительно формируют на поверхности ростовых подложек с помощью методов высокоразрешающей литографии, как например: электронно-лучевая, наноимпринт, литография с помощью наносфер и т.д. [7]. С их помощью могут быть сформированы массивы наночастиц с минимальным разбросом размеров, при этом с заданным расположением по поверхности подложки. В свою очередь, для синтеза большого числа обладающих минимальным разбросом параметров ННК, в том числе, на подложках большой площади, вследствие больших временных затрат и относительной сложности технологических процессов использование данных методов является нецелесообразным. Поэтому использование в качестве катализаторов роста ННК предварительно синтезированных наночастиц [8], которые на сегодняшний день широко доступны в виде коллоидных растворов [9], представляет повышенный интерес. Наряду с этим, интерес к таким наночастицам в последнее время обусловлен перспективами возможного применения для создания новых композитных тонких пленок с нелинейными оптическими свойствами [10], сенсоров на основе эффекта поверхностного плазмонного резонанса [11] и других конструкционных материалов [12].

С другой стороны, малые размеры полупроводниковых ННК позволяют рассматривать их в качестве активных элементов для создания потенциальных устройств, принцип действия которых основан на использовании квантово-размерных эффектов [13]. Хорошо известно, что эффекты размерного квантования при повышенных температурах могут быть обнаружены только в ННК,

обладающих достаточно малыми диаметрами [14]. Например, для ННК на основе GaAs необходимо, чтобы их диаметры составляли значение порядка 10 нм и менее [15]. Однако, синтез таких ультратонких GaAs ННК до сих пор остается довольно сложной задачей. В этой связи особое внимание уделяется методам пост-ростового утонения. Одним из перспективных методов, позволяющих осуществить утонение ННК, [16], является термическое испарение. Однако, несмотря на то, что данный подход уже показал свою эффективность [17], процессы термического испарения GaAs ННК, на сегодняшний день до сих пор остаются малоизученными.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

### **Цель и задачи работы**

Основной **целью работы** являлось изучение возможностей использования коллоидных наночастиц металлов для синтеза массивов однородных, в том числе обладающих суб-10 нм диаметрами, полупроводниковых GaAs нитевидных нанокристаллов с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии.

**Поставленные задачи** включали в себя:

1. Разработка и исследование методов осаждения коллоидных наночастиц из растворов на поверхность полупроводниковых Si подложек без использования вспомогательных полимерных соединений.
2. Исследование процессов синтеза массивов однородных GaAs нитевидных нанокристаллов с применением в качестве катализаторов роста коллоидных наночастиц металлов с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии.
3. Изучение структурных свойств GaAs нитевидных нанокристаллов.
4. Исследование возможностей использования коллоидных наночастиц для создания композитных материалов.
5. Исследование процессов термического испарения GaAs нитевидных кристаллов.

Для решения поставленных задач в процессе проведения исследований использовались следующие основные **методы**:

- Распыление коллоидных растворов осуществлялось с помощью электроспрея.
- Подготовка поверхности кремниевых пластин осуществлялась с помощью ионно-плазменной обработки в аргоне.
- Синтез нитевидных нанокристаллов осуществлялся методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).
- Для исследования морфологических особенностей полученных образцов применялись растровая электронная (РЭМ), атомно-силовая (АСМ) и сканирующая туннельная микроскопия (СТМ).
- Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) была использована для изучения структурных свойств нитевидных нанокристаллов.
- Исследование оптических свойств полученных структур осуществлялось с помощью метода фотолюминесценции (ФЛ).

**Научная новизна** настоящей диссертационной работы состоит в том, что:

1. Была продемонстрирована принципиальная возможность осаждения коллоидных наночастиц металлов с помощью электроспрея.
2. Был разработан новый способ осаждения коллоидных наночастиц металлов на поверхность кремниевых подложек без использования вспомогательных полимерных соединений.
3. Впервые была продемонстрирована возможность использования коллоидных наночастиц для получения массивов однородных GaAs нитевидных нанокристаллов с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии.
4. Впервые предложен и реализован подход, позволяющий осуществлять синтез массивов однородных GaAs нитевидных нанокристаллов с использованием разных, осажденных на поверхность одной и той же полупроводниковой подложки, коллоидных наночастиц.
5. Продемонстрировано, что геометрические размеры нитевидных нанокристаллов могут контролироваться температурой и длительностью предварительного отжига,

скоростью охлаждения после его завершения, а также соотношением потоков атомов элементов III и V групп.

6. Было показано, что проведение операций по термическому отжигу в присутствии кислорода позволяет осуществлять внедрение золотых наночастиц в слой  $\text{SiO}_2$ , на основе чего могут быть получены нанокompозитные материалы с нелинейными оптическими свойствами.
7. Разработан и исследован метод получения ультратонких суб-10 нм в диаметре GaAs нитевидных нанокристаллов, в том числе, обладающих модифицированной диаметр-модулированной формой.
8. Было продемонстрировано, что термическое испарение GaAs нитевидных нанокристаллов в условиях вакуума происходит анизотропно из-за наличия в их структуре двойников и дефектов упаковки.

**Практическая значимость** заключается в том, что:

1. Разработан новый способ осаждения коллоидных наночастиц металлов, позволяющий осуществлять с их помощью синтез методом молекулярно-пучковой эпитаксии массивов однородных полупроводниковых нитевидных нанокристаллов, которые могут быть использованы для создания различных приборных структур.
2. Предложен новый способ внедрения коллоидных наночастиц золота в  $\text{SiO}_2$  матрицы путем их термического отжига в присутствии кислорода.
3. Разработан и исследован эффективный метод модификации формы, а также утонения и получения суб-10 нм полупроводниковых GaAs нитевидных нанокристаллов, которые могут быть использованы для создания новых устройств, принцип работы которых основан на использовании квантово-размерных эффектов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Кратковременная обработка поверхности кремниевых подложек в аргоновой плазме приводит к улучшению её смачивающих свойств и позволяет

осуществлять осаждение коллоидных наночастиц металлов за счет образования положительно заряженных дефектов в приповерхностной области.

2. Коллоидные наночастицы металлов могут быть использованы для молекулярно-пучковой эпитаксии массивов однородных нитевидных нанокристаллов. Геометрические размеры синтезируемых данным способом GaAs нитевидных нанокристаллов зависят от параметров процедуры предварительного отжига наночастиц, таких как температура и длительность отжига, скорость охлаждения после его завершения, а также от соотношения потоков атомов галлия и мышьяка.
3. Глубина внедрения золотых наночастиц, осажденных на поверхность диоксида кремния, зависит от длительности термического отжига в присутствии кислорода.
4. Эффективное уменьшение диаметров вплоть до суб-10 нм и изменение формы GaAs нитевидных нанокристаллов, включая диаметр-модулированную, достигается за счет проведения операций по термическому отжигу, приводящих к испарению входящих в состав нитевидных кристаллов атомов.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, изложенные в диссертации и сформулированные в выносимых на защиту положениях, получены автором лично или при его непосредственном участии.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2015); Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2018); Международная молодежная конференция «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 2016); Международная школа-конференция по физике полупроводников «Jaszowiec» (Szczyrk, 2017, 2019); Российская конференция по физике



полупроводников (Екатеринбург, 2017); Международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN» (Санкт-Петербург, 2017, 2018, 2019).

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ в рецензируемых журналах, а также получен 1 патент на изобретение.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, списка сокращений, шести глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и цитированной литературы. Объем диссертации составляет 158 страниц печатного текста и содержит 61 рисунок, 4 таблицы и списка литературы из 287 источников, включая 12 авторских работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и научная новизна темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи, а также выносимые на защиту положения.

**В первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертационной работы.

В первом параграфе рассмотрены основные закономерности формирования полупроводниковых ННК по механизму пар-жидкость-кристалл с использованием различных металлов-катализаторов роста. Показано, что получение массивов однородных ННК представляет значительный интерес для создания приборных структур с воспроизводимыми функциональными характеристиками. Перечислены различные технологические подходы, позволяющие осуществлять формирование на поверхности ростовой подложки массивы наночастиц-катализаторов роста ННК одинакового размера и осуществлять синтез однородных ННК. При этом особое внимание уделено изучению возможностей использования коллоидных наночастиц металлов в качестве катализаторов роста ННК. Продемонстрировано, что такие наночастицы также представляют значительный интерес и для создания новых композитных материалов.

Второй параграф посвящен вопросам, связанным с получением ультратонких (с диаметрами порядка 10 нм) GaAs ННК. Несмотря на то, что подобные полупроводниковые ННК представляют значительный интерес для создания новых устройств, принцип работы которых основан на использовании квантовых эффектов, их прямой синтез до сих пор остается сложной задачей. Одним из перспективных методов, позволяющим осуществлять утонение ННК и которому уделено особое внимание в данном параграфе, является термическое испарение ННК. Несмотря на то, что данный способ уже показал свою эффективность, детального изучения процессов термического испарения GaAs ННК до сих пор не проводилось.

В конце первой главы кратко изложены основные проблемы и сформулированы основные задачи, которые решались в ходе выполнения представленной диссертационной работы.

**Во-второй главе** подробно рассмотрены методики, которые были использованы в ходе экспериментальных работ.

Особое внимание уделено описанию общих физических принципов и основ метода МПЭ, а также приведены характерные особенности установки Comrast 21TM фирмы Riber, используемой для синтеза полупроводниковых ННК. Кроме того, во второй главе кратко рассмотрены установки, используемые для исследования свойств полученных образцов, в том числе, РЭМ, ПЭМ, АСМ, СТМ, ФЛ.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований новых способов осаждения коллоидных наночастиц металлов на поверхность полупроводниковых Si подложек без использования вспомогательных полимеров.

В ходе выполнения работ впервые была продемонстрирована возможность осаждения наночастиц металлов на полупроводниковые Si подложки путем распыления коллоидных растворов с помощью электроспрея. При выполнении исследований было установлено, что реализация режима устойчивого и непрерывного распыления возможна только при разбавлении коллоидного

раствора полярным растворителям. Тем не менее, было обнаружено, что это приводило к нарушению агрегативной устойчивости растворов и к неконтролируемому формированию на поверхности подложки полимерных агломератов.

Результаты экспериментов по прямому нанесению коллоидных растворов с золотыми наночастицами на Si подложки показали, что исходная поверхность подложек является гидрофобной по отношению к коллоидному раствору, так как осаждаемый раствор собирался в капли сферической формы с углом смачивания порядка  $75^\circ$ . При этом было обнаружено, что непосредственное осаждения самих Au наночастиц не происходит. Было установлено, что предварительная химическая обработка поверхности кремниевых пластин в различных кислотных травителях, в том числе, в плавиковой и соляной кислотах, а также в растворе царской водки, приводит лишь к незначительному улучшению смачивающих свойств поверхности Si подложек. В свою очередь, было показано, что существенное улучшение смачиваемости, формирование гидрофильной поверхности Si подложек и осаждение коллоидных наночастиц может происходить после кратковременной ионно-плазменной обработке в аргоне. При этом поверхностная плотность осаждаемых наночастиц может быть контролируемым образом изменена за счет установления времени, в течении которого осуществляется осаждение растворов. Исследование морфологии поверхности до и после ионно-плазменной обработки продемонстрировало, что в результате обработки происходит формирование более гладкой поверхности. Тем не менее, было установлено, что значительное улучшение смачиваемости поверхности подложек вероятнее всего взаимосвязано с формированием электрически активных дефектов таких, как  $P_b$  и  $E''$  центры.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментов по синтезу GaAs нитевидных нанокристаллов методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

В первом параграфе подробно описаны технологические этапы синтеза GaAs ННК с использованием в качестве катализаторов роста коллоидных наночастиц золота, представлена специфика методики осаждения разных коллоидных

наночастиц на поверхность одной и той же Si(111) подложки, а также обсуждаются результаты исследования влияния основных параметров эпитаксиального процесса. В ходе проведения экспериментов было обнаружено, что из-за наличия слоя естественного окисла на Si(111) подложках требуется проведение дополнительных технологических операций по предварительному высокотемпературному отжигу подложек с целью увеличения числа вертикальных ННК (см. рис. 1). При этом установлено, что их количество зависит не только от температуры предварительного отжига, но и от размеров коллоидных наночастиц золота. Была обнаружена нелинейная зависимость диаметров синтезированных GaAs ННК от диаметров используемых наночастиц. При использовании в качестве катализаторов роста наночастиц золота с диаметрами 2 нм, диаметры формируемых ННК увеличивались в 40 раз. Данный эффект может быть обусловлен высокой каталитической активностью золотых наночастиц, обладающих суб-10 нм размерами.

Детальное изучение процессов формирования GaAs ННК при использовании 2 нм наночастиц золота в качестве катализаторов роста позволило определить технологические параметры и физические процессы, которые могут быть

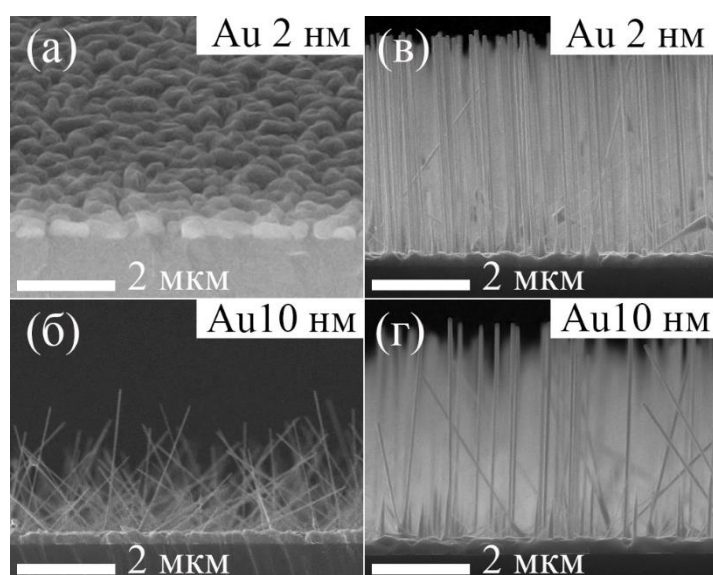
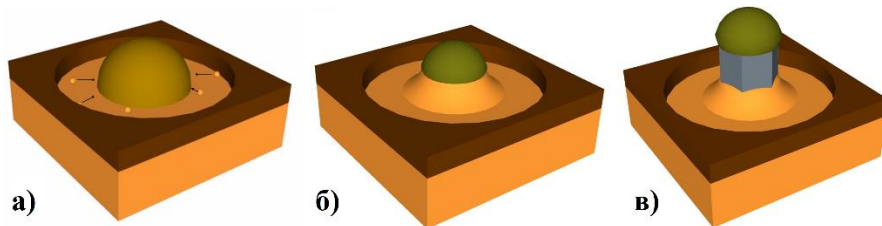


Рисунок 1. РЭМ изображения GaAs ННК, синтезированных после проведения предварительного термического отжига при 800°C (а,б) и 850°C (в,г) с помощью Au наночастиц с диаметрами 2 нм (а,в) и 10 нм (б,г).

использованы для контроля геометрических размеров формируемых ННК. Было продемонстрировано, что более длительный предварительный отжиг может приводить к увеличению диаметров формируемых GaAs ННК. Было установлено, что

данный процесс обусловлен увеличением объема капли катализатора вследствие адсорбции



атомов Si (рис. 2а). Более того, было обнаружено,

Рисунок 2. Схематическое изображение процессов термического разложения слоя окисла кремния под золотой каплей и адсорбции Si атомов (а), формирования Si пьедесталов под каплей (б), рост GaAs ННК.

что в процессе охлаждения образцов после проведения предварительного отжига может происходить кристаллизация Si атомов, накопленных каталитической каплей, а также формирование Si пьедесталов под ней (рис. 2б). При этом было продемонстрировано, что увеличение длительности охлаждения позволяет уменьшить диаметр синтезируемых ННК вследствие указанных выше процессов. Кроме того, было показано, что более тонкие GaAs ННК могут быть сформированы при изменении соотношения потоков элементов III и V группы. Было продемонстрировано, что при более низких потоках атомов Ga происходит уменьшение объема капли катализатора и, вследствие этого, формируются GaAs ННК с меньшими диаметрами. При этом особое внимание было также уделено изучению с помощью ПЭМ структурных свойств синтезированных GaAs ННК.

Во втором параграфе представлены результаты исследований GaAs ННК, синтезированных с использованием серебряных и золотых наночастиц. Было обнаружено, что сформированные с помощью Ag наночастиц GaAs ННК обладают большими диаметрами и длинами по сравнению с ННК, синтезированными с помощью Au наночастиц такого же размера. В результате моделирования было продемонстрировано, что различия диаметров, а также длин, синтезированных GaAs ННК при использовании Au и Ag наночастиц могут быть обусловлены разной концентрацией атомов Si в каплях и, как следствие, разными объемами капель и различной скоростью роста ННК из-за отличия химических потенциалов элементов.

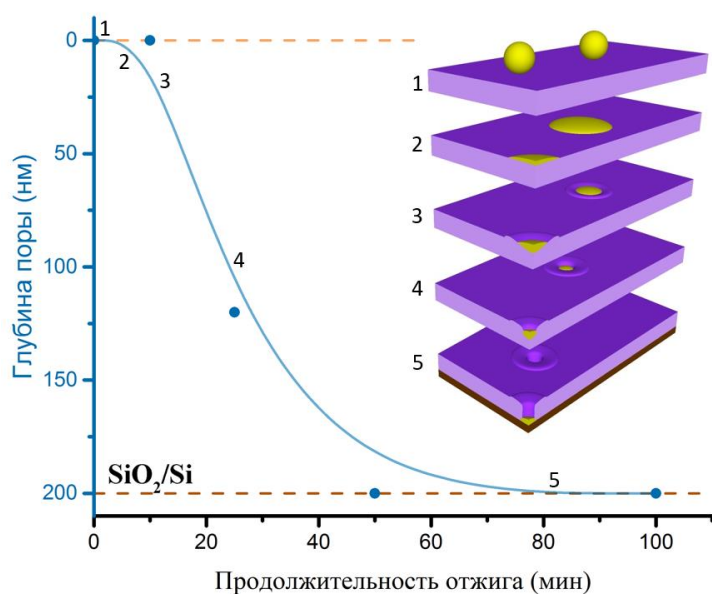


Рисунок 3. График зависимости глубины внедрения наночастиц от времени отжига и схематическое изображение процесса внедрения.

Пятая глава содержит описание результатов, полученных при разработке новых композиционных материалов с использованием коллоидных наночастиц золота.

В первом параграфе приведены результаты экспериментов по термическому отжигу 40 нм золотых наночастиц,

осажденных на поверхность Si подложек со сформированным 200 нм слоем SiO<sub>2</sub>. Было обнаружено, что в процессе термического отжига в условиях атмосферного воздуха при температуре порядка 1000°С золотые наночастицы могут проникать в слой SiO<sub>2</sub>, образуя при этом нанопоры (см. рис. 3). Было показано, что глубина проникновения золотых наночастиц может контролируемым образом быть изменена за счет изменения соответствующей длительности термического отжига. При этом отжиг образцов в потоке азота показал, что данных эффектов не наблюдается. Результаты этих экспериментов содержатся во втором параграфе пятой главы.

В третьем параграфе представлены результаты изучения оптических свойств композитных SiO<sub>2</sub> пленок с внедренными золотыми наночастицами. Было продемонстрировано, что такие композитные структуры обладают нелинейными оптическими характеристиками. Более того, с помощью моделирования была продемонстрирована возможность управления положением и интенсивностью пика, связанного с поверхностным плазмонным резонансом от наночастиц внедренных в слой SiO<sub>2</sub>.

**Шестая глава** посвящена исследованию процессов термического испарения GaAs ННК с целью их утонения.

В первом параграфе представлены результаты экспериментов по термическому отжигу массивов однородных GaAs ННК в потоке As, которые

доказывают, что данный подход может быть использован для эффективного уменьшения диаметров ННК вплоть до суб-10 нм. Более того, было установлено, что в процессе термического отжига в потоке атомов As может происходить увеличение длины GaAs ННК, а также модификация их формы. Было продемонстрировано, что это может быть обусловлено различными процессами, в том числе, диффузией, десорбцией и рекристаллизацией атомов Ga на поверхности GaAs ННК (см. рис. 4).

Результаты экспериментов по термическому отжигу GaAs ННК в условиях сверхвысокого вакуума отражены во втором параграфе. Было установлено, что интенсивность процесса испарения GaAs ННК в этом случае была более высокой, так как в условиях сверхвысокого вакуума вертикальных отсутствует возможность повторной кристаллизации атомов Ga. Кроме того, отжиг GaAs ННК с политипной кристаллической структурой в условиях сверхвысокого вакуума приводил к изменению формы ННК. На основании результатов исследований методом ПЭМ подобных ННК с диаметр-модулированной формой, было показано, что их формирование может быть обусловлено процессами анизотропной десорбции атомов, что тем самым открывает пути к контролируемому получению ННК, обладающих уникальной формой.

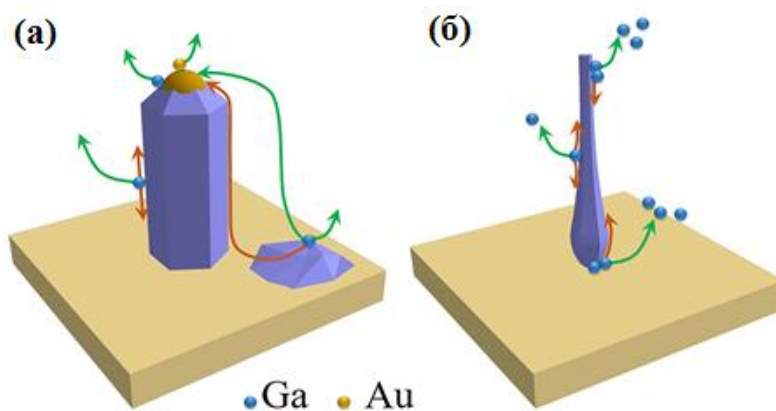


Рисунок 4. Схематическое изображение термического испарения GaAs ННК в потоке As: начальная стадия (а), частично разложившийся ННК (б).

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

- 1) Было показано, что кратковременная ионно-плазменная обработка поверхности кремниевых пластин приводит к улучшению их смачивающих свойств, а также способствует осаждению коллоидных наночастиц. Установлено, что улучшение смачивающих и адгезионных свойств поверхности в результате плазменной обработки скорее всего с формированием в приповерхностной области электрически-активных дефектов, а не с изменением ее морфологии.
- 2) Впервые было показано, что коллоидные наночастицы золота и серебра могут быть использованы в качестве катализаторов для роста массивов однородных GaAs ННК с помощью метода МПЭ. Было установлено, что из-за наличия слоя естественного окисла на Si(111) подложках требуется проведение дополнительных технологических операций по предварительному высокотемпературному отжигу подложек с целью увеличения числа вертикальных ННК. При этом было обнаружено, что диаметры синтезированных GaAs ННК намного больше диаметров используемых для их роста наночастиц.
- 3) Установлено, что во время проведения предварительного отжига, осажденных на подложки Si(111) коллоидных наночастиц золота и серебра, может происходить адсорбция атомов кремния. Показано, что этот процесс может приводить как к изменению объема капель катализаторов и, вследствие этого, изменению диаметров формируемых GaAs ННК, так и к уменьшению скоростей роста ННК.
- 4) Было продемонстрировано, что уменьшение потока атомов Ga, а также снижение скорости охлаждения после проведения предварительного отжига образцов, могут приводить к уменьшению диаметра формируемых GaAs ННК.
- 5) В процессе термического отжига при температурах порядка 1000°C в условиях атмосферного воздуха золотые наночастицы могут проникать в слой SiO<sub>2</sub> с образованием нанопор. Глубина проникновения наночастиц коррелирует с длительностью термического отжига. Показано, что процессы, приводящие к проникновению наночастиц и формированию пор, могут протекать вследствие наличия в атмосферном воздухе атомов кислорода.



- 6) Внедрение коллоидных наночастиц в  $\text{SiO}_2$  слои может быть использовано для создания композитных материалов с нелинейными оптическими характеристиками.
- 7) Было показано, что термический отжиг GaAs ННК позволяет контролируемым образом уменьшить их диаметр.
- 8) Термический отжиг GaAs ННК в потоке атомов мышьяка может приводить к увеличению длины ННК, а также способствует изменению их формы. Модификация формы ННК может быть связана с различными, происходящими в процессе термического отжига в потоке атомов мышьяка процессами, в том числе с диффузией, десорбцией и рекристаллизацией атомов Ga на поверхности ННК.
- 9) Установлено, что термический отжиг в условиях сверхвысокого вакуума приводит к формированию диаметр-модулированных GaAs ННК.

#### НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. **Икив И.** Thermal penetration of gold nanoparticles into silicon dioxide /Икив И., Kotlyar K., Amel'chuk D., Lebedev S., Cirlin G., Bouravleuv A. // Acta Physica Polonica A. – 2017. – Т. 132. – №. 2. – С. 366-369. (0.32 п.л./0.2 п.л.)
2. **Икив И.** Thermal decomposition of GaAs nanowires /Икив И., Kirilenko D., Kotlyar K., Bouravleuv A. // Nanotechnology. – 2020. – Т. 31. – №. 5. – С. 055701. (0.8 п.л./0.7 п.л.)
3. Bouravleuv A. New method for MBE growth of GaAs nanowires on silicon using colloidal Au nanoparticles /Bouravleuv A., **Икив И.**, Reznik R., Kotlyar K., Soshnikov I., Cirlin G., Brunkov C., Kirilenko D., Bondarenko L., Nepomnyaschiy A., Gruznev D., Zotov A., Saranin A., Dhaka V., Lipsanen H. // Nanotechnology. – 2017. – Т. 29. – №. 4. – С. 045602. (1.1 п.л./0.26 п.л.)
4. **Икив И.В.** MBE growth of GaAs and InAs nanowires using colloidal Ag nanoparticles /Икив И.В., Reznik R.R., Kotlyar K.C., Bouravleuv A.D., Cirlin G.E. // Journal of Physics Conference Series. – 2017. – Т. 917. – №. 3. (0.27 п.л./0.2 п.л.)
5. Bouravleuv A.D. MBE growth of nanowires using colloidal Ag nanoparticles /Bouravleuv A.D., **Икив И.В.**, Reznik R.R., Shtrom I.V., Khrebtov A.I., Samsonenko Y.B., Soshnikov I.C., Cirlin G.E., Lipsanen H. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 864. – №. 1. – С. 012010. (0.26 п.л./0.05 п.л.)
6. Alekseev P.A. Control of Conductivity of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  Nanowires by Applied Tension and Surface States /Alekseev P.A., Sharov V.A., Dunaevskiy M.S., Kirilenko D.A., **Икив И.В.**, Reznik R.R., Cirlin G.E., Berkovits V.L. // Nano letters. – 2019. – Т. 19. – №. 7. – С. 4463-4469. (0.88 п.л./0.02 п.л.)
7. Alekseev P.A. Electrical Properties of GaAs Nanowires Grown on Graphene SiC Hybrid Substrates /Alekseev P.A., Dunaevskiy M.S., Mikhailov A.O., Lebedev S.P., Lebedev A.A., **Икив И.В.**, Khrebtov A.I., Bouravleuv A.D., Cirlin G.E // Semiconductors.

– 2018. – Т. 52. – №. 12. – С. 1611-1615. (0.5 п.л./0.01 п.л.)

8. **Ilkiv I.V.** MBE growth of GaAs nanowires with modulated crystal structure /Ilkiv I.V., Kotlyar K.P., Kirilenko D.A., Lebedev S.P., Lebedev A.A., Alekseev P.A., Bouravlev A.D. Cirlin G.E. // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1124. – №. 2. – С. 022043. (0.22 п.л./0.13 п.л.)

9. Cirlin G.E. Phosphorus-Based Nanowires Grown by Molecular-Beam Epitaxy on Silicon /Cirlin G.E., Reznik R.R., Samsonenko Y.B., Khrebtov A.I., Kotlyar K.P., **Ilkiv I.V.**, Soshnikov I., Kirilenko D.A., Kryzhanovskaya N.V. // *Semiconductors*. – 2018. – Т. 52. – №. 11. – С. 1416-1419. (0.33 п.л./0.01 п.л.)

10. Reznik R.R. MBE Growth and Optical Properties of GaN, InN, and A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> Nanowires on SiC/Si (111) Hybrid Substrate /Reznik R.R., Kotlyar K.P., **Ilkiv I.V.**, Khrebtov A.I., Soshnikov I.P., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Nikitina E.V., Cirlin G.E. // *Advances in Condensed Matter Physics*. – 2018. – Т. 2018. (0.43 п.л./0.04 п.л.)

11. Самсонова Н.С. Обнаружение нанозагрязнений в водных объектах /Самсонова Н.С., **Илькив И.В.**, Галль Н.Р., Буравлев А.Д. // *Сборник трудов Третьего съезда аналитиков России*. – 2017. – С. 372. (0.07 п.л./0.01 п.л.)

12. Буравлев А.Д., Сошников И.П., Цырлин Г.Э., **Илькив И.В.** Способ осаждения коллоидных наночастиц золота на поверхность кремниевых полупроводниковых пластин. Патент № RU2016149164А. – 2016.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Yang X. Ultrasmall single-crystal indium antimonide nanowires / Yang X., Wang G., Slattery C., Zhang J.Z., Li Y. // *Crystal Growth and Design*. – 2010. – Т. 10. – № 6. – С. 2479–2482.

[2] Dasgupta N.C 25th anniversary article: Semiconductor nanowires – Synthesis, characterization, and applications / Dasgupta N.C., Sun J., Liu C., Brittman S., Andrews S.C., Lim J., Gao H., Yan R., Yang C. // *Advanced Materials*. – 2014. – Т. 26. – № 14. – С. 2137–2183.

[3] Chen S. Dilute Nitride Nanowire Lasers Based on a GaAs/GaNAs Core/Shell Structure / Chen S., Jansson M., Stehr J.E., Huang Y., Ishikawa F., Chen W.M., Buyanova I.A. // *Nano Letters*. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 1775–1781.

[4] Calahorra Y. Highly sensitive piezotronic pressure sensors based on undoped GaAs nanowire ensembles / Calahorra Y., Husmann A., Bourdelain A., Kim W., Vukajlovic-Plestina J., Boughey C., Boughey C., Jing Q., Fontcuberta i Morral A., Kar-Narayan, S. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2019. – Т. 52. – №. 29. – С. 294002.

[5] Wagner R.S. Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth / Wagner R.S., Ellis W.C. // *Applied Physics Letters*. – 1964. – Т. 4. – № 5. – С. 89–90.

[6] Dick K.A. Metal-seeded growth of III–V semiconductor nanowires: towards gold-free synthesis / Dick K.A., Caroff C. // *Nanoscale*. – 2014. – Т. 6. – № 6. – С. 3006–3021.

[7] Fan H.J. Semiconductor nanowires: from self-organization to patterned growth / Fan H.J., Werner C., Zacharias M. // *Small*. – 2006. – Т. 2. – №. 6. – С. 700-717.

- [8] Koivusalo E.S. Sub-Poissonian Narrowing of Length Distributions Realized in Ga-Catalyzed GaAs Nanowires / Koivusalo E.S., Hakkarainen T. V., Guina M.D., Dubrovskii V.G. // *Nano Letters*. – 2017. – T. 17. – № 9. – C. 5350–5355.
- [9] Maguire C. Continuous In-Flight Synthesis for On-Demand Delivery of Ligand-Free Colloidal Gold Nanoparticles / Maguire C., Rutherford D., Macias-Montero M., Mahony C., Kelsey C., Tweedie M., Pérez-Martin F., McQuaid H., Diver D., Mariotti D. // *Nano Letters*. – 2017. – T. 17. – № 3. – C. 1336–1343.
- [10] Tan K. Self-Assembled Heteroepitaxial AuNPs/SrTiO<sub>3</sub>: Influence of Au NPs Size on SrTiO<sub>3</sub> Band Gap Tuning for Visible Light-Driven Photocatalyst / Tan K., Lee H., Chen J., Dee C., Majlis B., Soh A., Chang W. // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2017. – T. 121. – №. 25. – C. 13487-13495.
- [11] Cabrera F.C. Characterization of natural rubber/gold nanoparticles SERS-active substrate / Cabrera F.C., Agostini D.L.S., Dos Santos R.J., Teixeira S.R., Rodríguez-Pérez M.A., Job A.E. // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – T. 130. – № 1. – C. 186–192.
- [12] Wang Y. Fabrication of multiple nanopores in a SiN<sub>x</sub> membrane via controlled breakdown / Wang Y., Ying C., Zhou W., de Vreede L., Liu Z., Tian J. // *Scientific reports*. – 2018. – T. 8. – №. 1. – C. 1234.
- [13] Harrison C. Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures / Harrison C., Valavanis A. – John Wiley & Sons, 2016.
- [14] Mohammad N.S. Understanding quantum confinement in nanowires: basics, applications and possible laws // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2014. – T. 26. – №. 42. – C. 423202.
- [15] Wang F. Solution–liquid–solid synthesis, properties, and applications of one-dimensional colloidal semiconductor nanorods and nanowires / Wang F., Dong A., Buhro W.E. // *Chemical reviews*. – 2016. – T. 116. – №. 18. – C. 10888-10933.
- [16] Mattias Borg B. Diameter reduction of nanowire tunnel heterojunctions using in situ annealing / Mattias Borg B., Ek M., Dick K.A., Ganjipour B., Dey A.W., Thelander C., Wernersson L.E. // *Applied Physics Letters*. – 2011. – T. 99. – №. 20. – C. 203101.
- [17] Lewis R.B. Nanowires bending over backward from strain partitioning in asymmetric core–shell heterostructures / Lewis R.B., Corfdir C., Küpers H., Flissikowski T., Brandt O., Geelhaar L. // *Nano letters*. – 2018. – T. 18. – №. 4. – C. 2343-2350.