

№ 2589

С.П. Курочка  
А.А. Сергиенко

# **Молекулярно-пучковая и МОС-гидридная технологии**

Методы формирования наноструктурированных  
гетерокомпозиций

Учебное пособие

**№ 2589**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра технологии материалов электроники

С.П. Курочка

А.А. Сергиенко

# **Молекулярно-пучковая и МОС-гидридная технологии**

Методы формирования наноструктурированных  
гетерокомпозиций

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета



Москва 2015

УДК 621.38:620.3

К93

Рецензент

проф., д-р техн. наук *В.Н. Мурашев*

**Курочка С.П.**

К93 Молекулярно-пучковая и МОС-гидридная технологии : методы формирования наноструктурированных гетерокомпозиций : учеб. пособие / С.П. Курочка, А.А. Сергиенко. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 82 с.

ISBN 978-5-87623-940-2

В результате анализа условий проявления квантово-размерных эффектов, возникающих в многослойных тонкопленочных структурах, уточнены требования к технологическим процессам формирования наноструктурированных гетерокомпозиций. Анализируются как базовые традиционные методы формирования с применением нанолитографии – молекулярно-лучевая эпитаксия и газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, так и специфические – зондовая нанотехнология и самоорганизация упорядоченных наноструктур на полупроводниковых подложках. В качестве практического применения наноструктурированных гетерокомпозиций рассмотрены конструкция и принцип работы полевого транзистора с высокой подвижностью носителей и одноэлектронный транзистор.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлениям 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

**УДК 621.38:620.3**

ISBN 978-5-87623-940-2

© С.П. Курочка,  
А.А. Сергиенко, 2015  
© НИТУ «МИСиС», 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. История, состояние и перспективы развития нанотехнологии в электронике .....	7
2. Квантовые основы нанoeлектроники .....	11
2.1. Принципы размерного квантования .....	11
2.2. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов .....	12
2.3. Структуры с квантовыми ямами .....	14
2.4. Структуры с квантовыми нитями .....	20
2.5. Структуры с квантовыми точками .....	21
2.6. Баллистический транспорт электронов .....	23
2.7. Туннельный эффект .....	26
2.8. Интерференционные эффекты .....	27
3. Методы изготовления наноразмерных гетероструктур .....	29
3.1. Проблемы нанотехнологии гетероструктур .....	29
3.2. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии .....	31
3.2.1. Экспериментальное оборудование и основные принципы молекулярно-лучевой эпитаксии .....	31
3.2.2. Роль кинетики и термодинамика в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии .....	38
3.2.3. Получение твердых растворов соединений $A^{III}B^V$ .....	44
3.2.4. Эпитаксия кремния .....	46
3.2.5. Легирование в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии .....	48
3.2.6. Выращивание напряженных структур .....	53
3.3. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений .....	56
3.3.1. Механизм роста .....	57
3.3.2. Механизм внедрения примесей .....	58
3.4. Создание поверхностных наноструктур методом литографии .....	60
3.4.1. Традиционная литография и ее проблемы .....	60
3.4.2. Основные достижения традиционных методов фотолитографии .....	62
3.4.3. Импринт-литография .....	64
3.5. Методы зондовой нанотехнологии .....	66
3.6. Самоорганизация наноразмерных гетероструктур .....	70
4. Возможности методов МЛЭ и ГФЭ МОС в нанoeлектронике .....	76
4.1. Транзисторы с высокой подвижностью носителей .....	76
4.2. Одноэлектронный транзистор .....	78
Библиографический список .....	81

## Введение

Развитие электроники в течение последних трех десятилетий происходит по пути миниатюризации и усложнения изделий микроэлектроники и одновременного снижения их стоимости. С каждым новым поколением электронных приборов разрабатываются принципиально новые технологические методы их изготовления, отражающие последние достижения науки. В настоящее время осуществляется переход от микро- к нанoeлектронике с размерами отдельных элементов, исчисляемыми не в микронах, а десятками нанометров. Переход к наноразмерным структурам изделий электронной техники качественно меняет принципы функционирования транзисторных и других элементов схемы. Интерес к наноразмерным структурам обусловлен возможностью создания полупроводниковых приборов, работа которых основана на совершенно новых эффектах. В работе этих приборов проявляются волновые свойства электронов, вместо гальванических связей основными становятся полевые связи, преобладающими – процессы размерного квантования, туннелирования и другие квантовые эффекты. Наноразмерные структуры обладают целой совокупностью уникальных свойств, весьма далеких от того, что можно наблюдать в системе обычных трехмерных электронов и дырок.

Исследование полупроводниковых многослойных тонкопленочных структур с характерными размерами порядка длины свободного пробега электронов показали, что для кардинальной перестройки электронной системы и перехода ее наиболее функциональной характеристики (энергетического спектра) в дискретный, когда движение носителей ограничено в одном, двух или во всех трех направлениях, необходимо:

- для создания структур с двумерным электронным газом обеспечить равенство постоянных решетки у подобранной пары полупроводниковых материалов;
- при формировании квантовых гетероструктур обеспечить получение резких гетеропереходов с исходным слоем промежуточного состава, имеющим толщину в несколько постоянных решетки;
- обеспечить возможность получения сложных профилей состава и легирования, причем период изменения состава растущего слоя не должен превышать нескольких нанометров. Очевидно, что изготовление подобных кристаллических структур из сверхтонких слоев является сложной задачей, требующей перехода к новым методам формирования активных областей на полупроводниковой подложке.

Для создания тонких слоев и многослойных структур с точно заданными геометрическими размерами, электрическими и оптическими свойствами, а также для создания структур с гетеропереходами, в которых граница между областями была бы свободна от примесей, дефектов и напряжений, связанных с различием параметров двух кристаллических решеток, были разработаны технологические методы, удовлетворяющие этим требованиям. Это прежде всего – молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и газофазная эпитаксия слоев из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) при пониженном давлении в реакторе.

Молекулярно-лучевая эпитаксия обеспечивает:

1) получение монокристаллических слоев высокой чистоты, так как их рост осуществляется в сверхвысоком вакууме при высокой чистоте потоков веществ;

2) выращивание многослойных структур с резкими изменениями состава на границах слоев, благодаря относительно низкой температуре роста, препятствующей взаимной диффузии;

3) получение гладких бездефектных поверхностей при гетероэпитаксии, что обусловлено ступенчатым механизмом роста;

4) получение сверхтонких слоев с контролируемой толщиной за счет точности управления потоками и относительно малых скоростей роста;

5) создание структур со сложными составами или профилями легирования.

Метод ГФЭ МОС с пониженным давлением в реакторе, являясь по сравнению с молекулярно-лучевой эпитаксией более простым и более производительным, в последнее время успешно с ней конкурирует.

Эффективным нанотехнологическим способом создания квантовых нитей и квантовых точек является самоорганизация при гетероэпитаксиальном росте. Гетероэпитаксия широко используется как при проведении исследований, так и при промышленном изготовлении многих полупроводниковых устройств.

Процесс включает в себя доставку атомов или молекул к поверхности подложки, где они могут принимать участие в одном из трех процессов: а) адсорбции и поверхностной диффузии с образованием островка зародыша путем соединения с другими атомами; б) присоединении к существующему островку; в) десорбции с испарением в окружающее пространство. Маленькие островки могут продолжать расти, мигрировать на другое место или испаряться. Существует кри-

тический размер, при котором они становятся устойчивыми и существенно не испаряются.

В конечном итоге на подложке образуются островки, промежутки между которыми заполнены тонким смачивающим слоем. Затем может последовать добавление к этим островкам следующих слоев.

В настоящее время с использованием эффектов самоорганизации выращиваются несколько типов наноструктур.

Промышленным методом получения одно- и нульмерных структур является субмикронная фотолитография, при выполнении которой уменьшение размеров отдельных деталей происходит за счет уменьшения длины волны экспонирующего света. Электронная литография позволяет получать размер отдельных элементов 3...25 нм.

Методы МЛЭ и ГФЭ МОС с пониженным давлением в реакторе позволяют выращивать совершенные слои полупроводников толщиной 5...10 постоянных решетки, т.е. 2,5...5 нм. Такие сверхтонкие слои полупроводников позволяют не только еще дальше продвинуться по пути уменьшения размеров электронных устройств, но и обладают особыми, уникальными физическими свойствами.

В связи с этим возникла новая область твердотельной электроники – квантовая электроника сверхтонких слоев кристаллических веществ и многослойных гетероструктур, составленных из таких слоев. Новая технология привела к появлению новых направлений в области создания приборов, из которых доминируют два: лазеры на одно- и многоквантовых ямах (КЯ) и полевые транзисторы, основанные на двумерном электронном газе, локализованном на границе раздела легированного широкозонного полупроводника и нелегированного узкозонного, например на границе  $n$ -(AlGa)As–GaAs со стороны GaAs.

# 1. ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Известно, что еще во времена Римской империи опытным путем ученые установили, что достаточно мелкие частицы различных веществ обладают свойствами, зачастую совершенно не похожими на свойства этих веществ в объеме. Например, древние римляне добавляли сверхмалые частицы (они не могли видеть эти частицы и оценить их размер) золота и серебра в расплав стекла, чтобы придавать бокалам и другим стеклянным изделиям характерную окраску. Изменяя размер частиц, получали стекло различного цвета – от фиолетового до красного. Совсем недавно ученые раскрыли секрет дамасской стали. Оказывается, в ее структуре при ковке образуются наночастицы в виде углеродных нитей, напоминающих нанотрубки. Именно присутствием в составе дамасской стали наноструктур углерода объясняются необыкновенные прочностные характеристики дамасской стали. Следует заметить, что в 1857 г. М. Фарадей впервые получил устойчивые коллоидные растворы золота, имеющие красный цвет.

Основы нанотехнологий заложил знаменитый американский физик-теоретик и лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман, который достаточно подробно рассмотрел последствия безграничной миниатюризации с позиций теоретической физики в своей знаменитой лекции «Там внизу – много места», произнесенной им в декабре 1959 г. в Калифорнийском технологическом институте на заседании американского физического общества. Фейнман научно доказал, что с точки зрения фундаментальных законов физики нет никаких препятствий к тому, чтобы создавать вещи прямо из атомов. Идеи Фейнмана казались слушателям фантастическими, поскольку практическая реализация предлагаемых им механизмов считалась проблемой далекого будущего или вообще невозможной. Сегодня многие из них уже воплощены в технологии.

Сотрудники научного подразделения американской компании Bell Альфред Чо и Джон Артур в 1968 г. разработали теоретические основы нанообработки поверхностей.

Термин «нанотехнологии» был введен профессором токийского университета Норио Танигучи в 1974 г. в контексте сборки и изменения материалов путем воздействия на них одним атомом или одной молекулой. Термин быстро завоевал популярность в научных кругах.