

№ 2592

Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологий

Учебно-методическое пособие

№ 2592

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

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

Кафедра технологии материалов электроники

Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологий

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2015

УДК 621.382
Ф50

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, доц. *С.И. Диденко*

Авторы: О.И. Рабинович, Д.Г. Крутогин, С.В. Подгорная, С.Ф. Маренкин

**Физико-химические основы процессов микро- и нано-
Ф50 технологий** : учеб.-метод. пособие / О.И. Рабинович [и др.]. –
М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 88 с.

В пособии излагаются теоретические основы технологических процессов роста полупроводниковых материалов и методы контроля в рамках курса «Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологий».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» в качестве бакалавров, магистров и инженеров, при выполнении лабораторных работ, подготовке магистерских диссертаций и дипломных работ.

УДК 621.382

© Коллектив авторов, 2015
© НИТУ МИСиС, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Процессы молекулярно-лучевой эпитаксии.....	6
1.1. Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок	12
1.2. Моделирование процесса.....	17
Рекомендуемая литература	22
Глава 2. Методы контроля в установках молекулярно-лучевой эпитаксии.....	23
2.1. Аппаратурное оформление процесса.....	24
2.2. Физические процессы.....	27
Рекомендуемая литература	32
Глава 3. Исследование релаксации напряжений при гетероэпитаксии.....	33
Рекомендуемая литература	36
Глава 4. Моделирование процесса получения пленок поликристаллического кремния осаждением из газовой фазы	37
4.1. Химические методы получения пленок. Восстановление тетраоксида кремния водородом	38
4.2. Восстановление трихлорсилана водородом.....	41
4.3. Конструкция реактора	42
4.4. Определение скорости осаждения пленки поликремния.....	45
Рекомендуемая литература	49
Глава 5. Моделирование процесса оптимизации размера зерна и удельного сопротивления пленки поликристаллического кремния.....	51
5.1. Структура пленок поликремния	51
5.2. Диффузионная теория роста зерна поликремния при термообработке.....	58
5.3. Расчет концентраций вакансий	61
5.4. Эффекты высокого уровня легирования	62
Рекомендуемая литература	63
Глава 6. Подготовка подложек (эвтектическая композиция InSb+MnSb) для жидкофазной эпитаксии гетероструктуры ферромагнетик – полупроводник (InSb).....	65
6.1. Теоретическое введение.....	65
6.1.1. Выращивание кристаллов из расплава	65
6.1.2. Методы нормальной направленной кристаллизации	66
6.1.3. Система InSb-MnSb	68

6.2. Подготовка ампул и подложек для ЖФЭ гетероструктуры ферромагнетик (эвтектическая композиция InSb+MnSb).....	70
Приложение для выполнения лабораторных работ	72
Тема 1. Изучение процессов молекулярно-лучевой эпитаксии	72
Тема 2. Методы контроля в установках молекулярно-лучевой эпитаксии.....	73
Тема 3. Релаксация напряжения при гетероэпитаксии	76
Тема 4. Моделирование процесса получения пленок поликристаллического кремния осаждением из газовой фазы	79
Тема 5. Моделирование процесса оптимизации размера зерна и удельного сопротивления пленки поликристаллического кремния	82
Тема 6. Подготовка подложек (эвтектическая композиция InSb+MnSb) для жидкофазной эпитаксии гетероструктуры ферромагнетик-полупроводник (InSb)	87

ВВЕДЕНИЕ

Современное технологическое оборудование электронной промышленности, которая характеризуется комплексом сочетающихся функциональных и контрольных процессов, требует высокопрофессионального обслуживания и длительной предпусковой подготовки. Ввиду этих обстоятельств изучение процессов эпитаксии с трудом вписывается в учебный процесс.

Физическое и математическое моделирование процессов формирования многослойных гетерокомпозиций, подкрепленное мультимедийными средствами иллюстрации физических явлений, обеспечивает возможность освоения ключевых процессов электронной технологии при значительной экономии времени и дорогих расходных материалов.

В данном практикуме объединены несколько лабораторных работ, связанных с технологией молекулярно-лучевой эпитаксии, газофазного осаждения тонких полупроводниковых слоев и постэпитаксиального формирования структур требуемого качества. Объединяющим признаком служит именно компьютерное моделирование технологических процессов на персональных ЭВМ.

Лабораторные работы соответствуют программе курса «Основы технологии электронной компонентной базы» для направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». В работах предусмотрен достаточно широкий выбор параметров технологических процессов (исходных веществ, легирующих примесей, рабочих концентраций, конструктивных параметров оборудования), допускающий индивидуализацию заданий по выполнению виртуального эксперимента.

ГЛАВА 1

ПРОЦЕССЫ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

С появлением микроэлектронной технологии изготовления электронных приборов и схем возникла необходимость на монокристаллической подложке получать монокристаллические автоэпитаксиальные или гетероэпитаксиальные тонкие слои. При недостаточно глубоком вакууме в реакторе наращиваемый слой загрязняется за счет остаточных газов в атмосфере реактора при одновременном осаждении напыляемого слоя. Концентрация примеси в наращиваемом слое C_B определяется соотношением плотностей потоков на подложку примеси В (j_B) и осаждаемого материала А (j_A), которые пропорциональны их парциальным давлениям в реакторе (P_B и P_A):

$$C_B \approx \frac{j_B}{j_A} = \frac{P_B}{P_A}. \quad (1.1)$$

Снижение содержания примеси можно получить:

- увеличением P_A , но при этом увеличивается скорость роста слоя и число структурных дефектов в нем за счет трехмерного механизма роста, вплоть до роста поликристаллического слоя;
- снижением остаточного давления газов в реакторе и достижением такого их минимального уровня, который определяется возможностями вакуумной аппаратуры.

Глубокий вакуум позволяет осуществлять предэпитаксиальную обработку поверхности подложек с использованием ионно-лучевого, ионно-плазменного и лазерного их травления.

Тонкие пленки металлов или полупроводников, получаемые вакуумным испарением, обычно имеют поликристаллическую или аморфную структуру, в них не возможна определенная кристаллографическая ориентация поверхности.

Технология многослойных структур должна обеспечивать высокое качество слоистых структур и совершенство границ раздела между этими материалами. Только в этом случае могут быть реализованы потенциальные возможности, заложенные в полупроводниковых сверхрешетках и многослойных магнитных структурах. (Сверхрешетка – твердотельная периодическая структура, в которой на носители заряда (электроны), помимо обычного потенциала кристаллической решетки, действует дополнительный потенциал. Как правило, это од-

номерный потенциал $V(r)$ с периодом d , который меньше длины свободного пробега электронов, но значительно больше периода оси решетки – от нескольких до десятков нм. Наиболее интенсивно исследуются полупроводниковые структуры, но наряду с ними возможны металлические. Потенциал $V(r)$ обычно создается искусственно путем чередования тонких полупроводниковых слоев, отличающихся по типу легирования и (или) химическому составу. В последнем случае сверхрешетки можно рассматривать как периодическую систему квантово-размерных ям, разделенных сравнительно узкими барьерными слоями с заметной туннельной прозрачностью для носителей заряда (волновые функции электронов перекрываются).

Для получения высококачественных тонких пленок и многослойных структур используют чаще всего механизмы эпитаксиального роста материала пленки на соответствующей монокристаллической подложке. Широкое распространение получил метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющий формировать совершенные слои различных материалов в условиях сверхвысокого вакуума. Этот метод успешно применяется для выращивания тонких пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, высокотемпературных сверхпроводников и многих других веществ.

Использование МЛЭ – достаточно дорогостоящий и трудоемкий процесс. В последние годы все большее распространение для выращивания полупроводниковых сверхрешеток приобретает технология роста из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (РГФ МОС). В этом методе используется процесс эпитаксиального роста материалов на нагретой подложке при термическом разложении металлорганических соединений. Методом РГФ МОС успешно выращивают большинство полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$.

Из методов эпитаксиального роста для получения полупроводниковых сверхрешеток может быть использована и жидкофазная эпитаксия, в которой монокристаллические слои получают из контактирующих с подложкой пересыщенных растворов. С понижением температуры избыточное количество полупроводника осаждается из раствора на подложку, что связано с уменьшением растворимости полупроводникового материала. Наилучшие результаты дает жидкофазная эпитаксия для полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и их твердых растворов. Многослойные полупроводниковые структуры получают в многокамерных реакторах для жидкофазной эпитаксии последовательным созданием контакта структуры с разными расплавами.

Молекулярно-лучевая эпитаксия, по существу, является развитием до совершенства технологии вакуумного напыления тонких пленок. Ее отличие от классической технологии вакуумного напыления связано с более высоким уровнем контроля технологического процесса. В методе МЛЭ тонкие монокристаллические слои формируются на нагретой монокристаллической подложке за счет реакций между молекулярными или атомными пучками и поверхностью подложки. Высокая температура подложки способствует миграции атомов по поверхности, в результате которой атомы занимают строго определенные положения. Этим определяется ориентированный рост кристалла формируемой пленки на монокристаллической подложке. Успех процесса эпитаксии зависит от соотношения между параметрами решетки пленки и подложки, правильно выбранных соотношений между интенсивностями падающих пучков и температуры подложки. Когда монокристаллическая пленка растет на подложке, отличающейся от материала пленки, и не вступает с ним в химическое взаимодействие, то такой процесс называется гетероэпитаксией. Когда подложка и пленка по химическому составу не отличаются или незначительно отличаются друг от друга, то процесс называется гомоэпитаксией, или автоэпитаксией. Ориентированное наращивание слоев пленки, которая вступает в химическое взаимодействие с веществом подложки, называют хемоэпитаксией. Граница раздела между пленкой и подложкой имеет ту же кристаллическую структуру, что и подложка, но отличается по составу как от материала пленки, так и от материала подложки. При МЛЭ происходит не объемное широкоугольное, а направленное напыление материала, самоочищающийся процесс от автолегирования (узкий высокоплотный поток атомов выходит из ячейки Кнудсена в остаточном вакууме).

По сравнению с другими технологиями, используемыми для выращивания тонких пленок и многослойных структур, МЛЭ характеризуется прежде всего малой скоростью и относительно низкой температурой роста. К достоинствам этого метода следует отнести возможность резкого прерывания и последующего возобновления поступления на поверхность подложки молекулярных пучков различных материалов, что наиболее важно для формирования многослойных структур с резкими границами между слоями.

Упрощенная схема ростовой камеры МЛЭ показана на рис. 1.1. Испарение материалов, осаждаемых в сверхвысоком вакууме на подложку, закрепленную на манипуляторе с нагревательным устройством, осуществляется с помощью эффузионных ячеек (эффузия – медленное истечение газов через малые отверстия).