

№ 2022

# **Элионная технология в микро- и наноиндустрии**

Неразрушающие методы контроля процессов  
осаждения и травления наноразмерных  
пленочных гетерокомпозиций

Учебное пособие

**№ 2022**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

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

Кафедра технологии материалов электроники

# **Элионная технология в микро- и наноиндустрии**

Неразрушающие методы контроля процессов  
осаждения и травления наноразмерных  
пленочных гетерокомпозиций

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета



**ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ**

Москва 2012

УДК 621.315  
Э46

Рецензент  
д-р техн. наук, проф. *В.Н. Мурашев*

Авторы: Г.Д. Кузнецов, А.А. Сергиенко, С.Б. Симакин,  
С.П. Курочка, А.С. Курочка

**Элионная технология в микро- и наноиндустрии : неразрушающие методы контроля процессов осаждения и травления наноразмерных пленочных гетерокомпозиций : учеб. пособие / Г.Д. Кузнецов, А.А. Сергиенко, С.Б. Симакин [и др.]. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2012. – 122 с.**  
ISBN 978-5-87623-547-3

В учебном пособии рассматриваются неразрушающие методы контроля технологических процессов нанесения и травления наноразмерных пленочных гетерокомпозиций при использовании ионно-плазменного воздействия на материалы. Анализируются как традиционные способы контроля процессов ионно-плазменной обработки материалов электронной техники, так и специфические, связанные с применением возникающих факторов при взаимодействии ускоренных ионов с твердым телом. Особое внимание уделено использованию возникающего ионно-индуцированного тока в многослойных наноразмерных гетероструктурах и вторичной ионно-электронной эмиссии при ионном воздействии на материалы.

По каждой теме приводится перечень контрольных вопросов для проверки усвоения материала и выдаются домашние задания с примером выполнения.

Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлениям «Электроника и нанoeлектроника», «Нанотехнология и микросистемная техника» и может быть полезно обучающимся по направлениям «Наноматериалы» и «Физика».

УДК 621.315

ISBN 978-5-87623-547-3

© Коллектив авторов, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень сокращений .....	5
Введение .....	6
1. Традиционные методы и способы контроля процессов ионно-плазменной обработки материалов электронной техники .....	8
1.1. Физические основы и характеристика методов ионно- плазменной обработки .....	8
1.2. Вторичные эффекты ионно-плазменной обработки .....	14
1.3. Применение эффектов ионной бомбардировки для контроля технологических процессов ионно-плазменной обработки .....	21
1.4. Использование оптических эффектов для управления процессами ионно-плазменной обработки .....	23
1.5. Масс-спектрометрия ионно-плазменных процессов .....	32
1.6. Использование электрических сигналов для контроля процессов ионно-плазменной обработки .....	35
Контрольные вопросы .....	38
Домашние задания .....	39
2. Ионно-индуцированный ток в многослойных наноразмерных пленочных гетероструктурах в процессах ионно-лучевого нанесения и травления .....	41
2.1. Методика определения закономерностей возникновения ионно-индуцированного тока .....	41
2.2. Особенности изменения ионно-индуцированного тока при ионной очистке поверхности .....	57
2.3. Закономерности изменения ионно-индуцированного тока при ионно-лучевом травлении гетероструктур .....	59
2.4. Закономерности изменения ионно-индуцированного тока при нанесении пленок ионным распылением .....	65
2.5. Феноменологическая модель возникновения ионно- индуцированного тока .....	67
Контрольные вопросы .....	80
Домашние задания .....	81
3. Вторичная ионно-электронная эмиссия в процессе ионно-лучевого травления наноразмерных гетерокомпозиций .....	82
3.1. Методика определения вторичной ионно-электронной эмиссии .....	82

3.2. Закономерности изменения тока вторичных электронов при ионном травлении металлических пленок .....	89
3.3. Закономерности изменения тока вторичных электронов при ионном травлении полупроводников .....	93
3.4. Закономерности изменения тока вторичных электронов при ионном травлении диэлектриков .....	97
3.5. Феноменологическая модель возникновения ионно-электронной эмиссии.....	106
Контрольные вопросы.....	115
Домашние задания.....	116
Заключение.....	119
Библиографический список.....	120

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АИИ	– автономный ионный источник
ВИМС	– вторичная ионная масс-спектрометрия
ВИЭЭ	– вторичная ионно-электронная эмиссия
ИИТ	– ионно-индуцированный ток
ИК	– инфракрасный
ИЛН	– ионно-лучевое нанесение
ИЛР	– ионно-лучевое распыление
ИЛТ	– ионно-лучевое травление
ИПН	– ионно-плазменное нанесение
ИС	– интегральная схема
ИЭЭ	– ионно-электронная эмиссия
КИЭЭ	– кинетическая ионно-электронная эмиссия
ЛШШ	– модель Линхарда, Шарфа и Шиотта
МДМ-структура	– структура металл–диэлектрик–металл
МДП–структура	– структура металл–диэлектрик–полупроводник
ПХТ	– плазмохимическое травление
РИЛН	– реактивное ионно-лучевое нанесение
РИЛР	– реактивное ионно-лучевое распыление
РИЛТ	– реактивное ионно-лучевое травление
РИПН	– реактивное ионно-плазменное нанесение
РИПТ	– реактивное ионно-плазменное травление
УФ	– ультрафиолетовый
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие микроэлектроники, а в последние годы и наноэлектроники, потребовало разработки новых технологических процессов. Микроминиатюризация, высокая степень интеграции, возрастание числа и уменьшение размеров отдельных элементов электронных устройств неизбежно приводят к совершенствованию тонкопленочной технологии.

Важнейшими операциями в технологии производства интегральных схем (ИС) являются процессы формирования микро- и наноразмерных слоев и гетерокомпозиций, травление и создание топологического рисунка.

Для создания тонкопленочных устройств широкое применение находят ионно-плазменные методы обработки, в том числе ионно-лучевое травление (ИЛТ), а также нанесение пленок материалов ионно-лучевым распылением (ИЛР).

Актуальной является проблема автоматизации ионно-плазменных процессов, которая не может быть решена без создания достаточно простых, точных и надежных методов контроля и управления. Проводимые в настоящее время исследования направлены на поиск и изучение физических явлений, на основе использования которых могут быть разработаны методики контроля состояния поверхности объектов обработки, устройства и оборудование для управления технологическими процессами формирования и травления тонких, сверхтонких и многослойных гетероструктур.

В процессе ионно-плазменной обработки необходимо иметь информацию о начальных стадиях зарождения пленки, образовании сплошного слоя, о составе растущего слоя, а в случае травления – о переходе от одного слоя к другому и об окончании процесса.

Анализ физических явлений, возникающих в твердом теле при ионном и электронном воздействии на поверхность, позволяет заключить, что наиболее предпочтительным для отмеченных целей является использование эффектов, свойственных самим процессам. К числу таких эффектов относятся ионно-электронная, электрон-электронная эмиссия и ионно-индуцированный ток, возникающий в пленочных структурах при воздействии на них низкоэнергетических заряженных частиц.

Методы контроля ионно-плазменных процессов, основанные на анализе ионно-индуцированных и эмиссионных токов в процессе

обработки, представляют научный и практический интерес. Они наиболее адаптивны к изменяющимся условиям обработки и составу материалов структур.

Практическое применение этих методов представляется перспективным вследствие использования ионных и электронных пучков в качестве инструмента как для обработки поверхности, так и для контроля состояния поверхности в процессе обработки. Применение отмеченных эффектов дает возможность разработать оперативные (*in situ*) неразрушающие методы контроля. Кроме того, это позволит разработать адаптивно-управляемую технологию создания тонкопленочных электронных устройств.



# 1. ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

## 1.1. Физические основы и характеристика методов ионно-плазменной обработки

Использование ионно-плазменной обработки в вакууме для травления и нанесения тонкопленочных структур с разнообразными электрофизическими характеристиками обеспечивает качественно новый уровень решения многих технологических задач при производстве изделий электронной техники [1–6]. В основе ионно-плазменных процессов лежит использование частиц газовой плазмы в качестве инструмента воздействия на материалы в вакууме с целью изменения состояния и свойств их поверхности. Перевод вещества в состояние плазмы открывает большие возможности использования его в технологических целях [7]. Плазма является источником ионных, атомных и молекулярных частиц, служащих для удаления, переноса и осаждения материалов.

Такая плазма создается, как правило, в самостоятельном тлеющем разряде в электрическом поле и представляет собой слабо ионизированный газ, состоящий из смеси стабильных и возбужденных атомов и молекул, продуктов диссоциации молекул (радикалов), электронов и положительно заряженных ионов. Степень ионизации газа, определяемая как отношение плотности заряженных  $n_i$  к суммарной плотности нейтральных и заряженных частиц  $n_n$ , колеблется в широких пределах значений от  $10^{-7}$  до  $10^{-2}$  и зависит от способа и устройств создания плазмы, а также условий ее сохранения. Плазма – электрически квазинейтральная система, отрицательно заряженными частицами которой являются в основном электроны, положительно заряженными – ионы газа.

Из-за значительного различия масс электронов и ионов их скорости движения и, следовательно, кинетические энергии существенно отличаются. Поэтому плазма характеризуется двумя различными температурами: электронной  $T_e$  и ионной  $T_i$ . Значение электронной температуры определяет деление плазмы на низко- и высокотемпературную. Средняя энергия электронов плазмы, используемой в ионно-

плазменных процессах, составляет  $E = 2 \cdot 10^{-19} \dots 2 \cdot 10^{-18}$  Дж (1...12 эВ), что соответствует температуре  $T_e \approx 10^4 \dots 10^5$  К. Такая плазма считается низкотемпературной в отличие от высокотемпературной, где  $T_e \approx 10^6 \dots 10^8$  К. Атомные и молекулярные ионизированные частицы плазмы имеют значительно более низкие энергии, соответствующие энергиям теплового движения, и не превышают 600 К. При объемной плотности атомных частиц  $10^{12} \dots 10^{16}$  см<sup>-3</sup> объемная плотность как электронов, так и ионов составляет  $10^9 \dots 10^{12}$  см<sup>-3</sup> при давлениях, характерных для плазмы, используемой в рассматриваемых процессах.

Плазма создается при внешнем энергетическом воздействии на среду с помощью различного рода газовых разрядов в сильных постоянных и переменных электрических и постоянных магнитных полях. Характерная частота переменного электрического поля, применяемого для образования плазмы, колеблется в широких пределах: от нескольких килогерц до нескольких гигагерц. В дополнение к электрическому на область горения разряда, как правило, может накладываться магнитное поле, которое обеспечивает удержание электронов плазмы в заданном пространстве и, увеличивая длину пути их движения, повышает степень ионизации газа.

При создании плазмы энергия электрического поля передается свободным электронам, образовавшимся в электрическом разряде при ионизации части атомов и молекул. Они, в свою очередь, передают ее более тяжелым атомам и молекулам. В упругих и неупругих столкновениях с электронами атомы и молекулы приобретают дополнительную энергию. Из-за большого различия масс только не более 1 % энергии передается атомам и молекулам газа в упругих столкновениях с электронами. Основную роль в процессах передачи энергии играют неупругие столкновения, приводящие к возбуждению атомов и молекул, их ионизации и диссоциации. Основным процессом создания активных частиц плазмы одноатомных инертных газов является их ионизация. При образовании плазмы многоатомного газа основными являются процессы возбуждения, диссоциации и ионизации молекул и их фрагментов. Понятие «активных» подразумевает увеличение кинетической или потенциальной энергии частиц плазмы, в результате чего они становятся способными активировать процессы.

Основу ионно-плазменной обработки составляет воздействие на материалы энергетически активных и неактивных частиц плазмы. Понятие «энергетические» подразумевает высокую кинетическую или потенциальную энергию частиц. При высокой кинетической

энергии частиц (ионов), которая может превышать тепловую на несколько порядков, они приобретают способность при соударении с поверхностью материала передать энергию, достаточную для физического удаления (распыления) атомов материала с поверхности, внедрения ионов и дефектообразования. Высокая потенциальная энергия частиц (химически активных ионов и радикалов), определяемая наличием у них свободных (ненасыщенных) электронных химических связей, обуславливает их способность вступать во взаимодействие с обрабатываемым материалом с образованием летучих химических соединений.

Рассматриваемые процессы ионно-плазменной обработки представляют собой процессы, в которых воздействию подвергается поверхность и приповерхностные слои материалов, поскольку энергия частиц (ионов) относительно невелика. При кинетических энергиях, не превышающих  $10^{-16} \dots 10^{-15}$  Дж (нескольких килоэлектронвольт), глубина внедрения энергетических ионов в материалы не превышает нескольких нанометров, т.е. толщина поверхностного слоя, в котором осуществляется взаимодействие, ограничена несколькими десятками атомных слоев от поверхности.

В число задач, решаемых с использованием ионно-плазменных процессов, входят:

- подготовка (финишная очистка) в вакууме поверхности подложек перед нанесением на них пленок материалов;
- удаление и перенос материала на какие-либо объекты (подложки) с целью получения на них пленочных покрытий;
- локальное удаление (травление через фоторезистивную маску) пленок с целью создания в них топологии рисунка ИС;
- осаждение на поверхности материалов пленочных покрытий, включающих в свой состав в качестве компонентов частицы газовой плазмы.

Использование при создании плазмы различных так называемых реактивных газов ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  и др.) позволяет получать на подложках пленки химических соединений, состоящих из атомов распыленного материала и атомов газа. Регулировкой потока распыленного материала и давления реактивного газа достигается получение пленок необходимого стехиометрического состава компонентов. Такими пленками являются, например, пленки оксидов, нитридов, оксинитридов, карбидов металлов и т.п.

Представление об основных особенностях различных ионно-плазменных процессов дает их классификация. В основу ее могут быть

положены различные принципы. Вся совокупность физико-химических процессов, составляющих технологический цикл изготовления изделий микроэлектроники, классифицируется на основе использования геометрического, структурного и физико-химического критериев. В соответствии с данной классификацией все основные процессы ионно-плазменной обработки можно систематизировать по двум основным признакам: природе взаимодействия энергетических частиц плазмы с материалами (физическое или химическое взаимодействие) и способу осуществления взаимодействия (ионному или плазменному). Классификация процессов ионно-плазменной обработки по природе и способу приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Классификация процессов ионно-плазменной обработки**

Метод обработки	Природа взаимодействия	
	физическая	химическая
Плазменный	Травление распылением в плазме. Ионно-плазменное нанесение. Реактивное ионно-плазменное нанесение	Плазмохимическое травление. Реактивное ионно-плазменное травление
Ионный	Ионно-лучевое травление. Нанесение ионно-лучевым распылением. Реактивное ионно-лучевое нанесение	Ионно-химическое травление

Механизм процессов взаимодействия энергетических частиц плазмы с материалами определяет различие по первому признаку. Физическое взаимодействие характеризуется обменом энергией и импульсом в упругих столкновениях атомных частиц (ионов и атомов материала) и приводит, в частности, к распылению материала с поверхности. Химическое взаимодействие определяется неупругими столкновениями с обменом электронами между атомами и ионами и приводит к химическим превращениям обрабатываемого материала. Физическое распыление ионами характеризуется энергетическим воздействием непосредственно на отдельные атомы. Все энергетические связи атома с другими атомами разрываются, и он может быть удален с поверхности. В процессах с химической природой взаимодействия энергетическое воздействие направлено в основном на электронные связи атома в материале. Ослабление, разрыв и установление новых связей может приводить к удалению материала с поверхности в виде его летучих соединений с атомами энергетических частиц плазмы [8].