

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

# **ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

## **Часть 1**

### **Плазмохимическое травление материалов электронной техники**

Учебно-методическое пособие для вузов

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Низкотемпературная газоразрядная плазма: определения, термины.....	5
1.1.1. Классификация процессов плазменного травления.....	5
1.1.2. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме.....	9
1.1.3. Механизм генерации и роль химически активных частиц в плазмохимическом травлении.....	11
1.2. Кинетика химических процессов «твердое тело – газ».....	15
1.2.1. Зависимость скорости травления от температуры.....	17
1.2.2. Технологические факторы, влияющие на скорость травления материалов.....	18
2. Экспериментальная часть.....	23
2.1. Экспериментальная установка.....	23
2.2. Методика выполнения работы.....	24
Контрольные вопросы.....	26
Литература.....	27

по своей электропроводности плазма приближается к проводникам. Плазму нельзя представлять как механическую смесь компонентов – все частицы плазмы находятся в непрерывном взаимодействии друг с другом, и плазма в целом обладает рядом специфических свойств, которые вовсе не присущи отдельным ее составляющим. Различают изотермическую и неизотермическую плазму.

Изотермической плазме отвечает ионизированный газ при высокой температуре, когда энергии (температуры) всех составляющих плазму частиц равны ( $T_e \approx T_i \approx T_g$ ) и все процессы обмена являются равновесными.

Неизотермическая плазма характеризуется тем, что средняя энергия (температура) электронов во много раз превышает энергию ионов и нейтральных частиц ( $T_e \gg T_i \approx T_g$ ), такое состояние реализуется при относительно небольшом выделении джоулевой теплоты за счет высокой теплоемкости газа тяжелых частиц и быстрого уноса теплоты из зоны разряда.

Низкотемпературная неравновесная газоразрядная плазма (ННГП) представляет собой слабоионизированный газ при давлениях  $10^{-1}$ – $10^3$  Па со степенью ионизации  $10^{-5}$ – $10^{-3}$ . Средняя энергия электронов в нем составляет 1–10 эВ (концентрация электронов  $10^9$  –  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>), а средняя энергия тяжелых частиц (атомов, молекул и ионов) в среднем на два порядка ниже.

Использование ННГП в практических целях сосредоточено, в основном, в секторе производства изделий электронной техники, где плазменные технологии работают в трех основных направлениях:

**Плазменное травление и очистка поверхности.** Типичными представителями этой группы процессов являются травление фоторезиста в кислородной плазме и травление металлов и полупроводников в плазме галогенсодержащих газов. В качестве последних наиболее широко используются фтор- и хлорсодержащие соединения.

**Плазменная модификация поверхности.** Этот процесс позволяет вносить локальные изменения в свойства обрабатываемой поверхности (гидрофильность, адгезионные характеристики, химический состав и т.д.) при сохранении неизменными объемных свойств. Основными объектами здесь служат полимерные материалы (полиимид, полиэтилен), а в качестве плазмообразующих сред используются Ar, O<sub>2</sub>, NO, NH<sub>3</sub>, их смеси и воздух.

**Плазменное осаждение покрытий, включая плазменное напыление и стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы.** Тонкие пленки металлов, используемые в качестве функциональных слоев и межэлементных соединений в ИМС, получают в процессах распыления в среде инертных газов в диодных, триодных и магнетронных системах. При использовании в качестве плазмообразующего газа кремнийсодержащих соединений (например, SiCl<sub>4</sub> и SiH<sub>4</sub>) возможно осаждение поликристаллического кремния, а с добавками кислорода, оксида азота, аммиака и углеводородов (метан, этилен) – осаждение SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и SiC. Плазма в среде углеводородов

обеспечивает процессы плазменной полимеризации, позволяя получать кремний- и металлсодержащие полимеры с уникальными свойствами.

Вполне понятный интерес к процессам плазменного травления стимулировал исследования в этой области, причем было показано, что на плазмохимические процессы нельзя автоматически переносить общекинетические представления, в первую очередь – положения теории Аррениуса. Необходимо помнить, что мы имеем дело с неизотермической системой частиц, квазинейтральной (равенство нулю полного заряда), в которой активация химически активных компонентов осуществляется электронным ударом.

Низкотемпературная газоразрядная плазма может служить одновременно и источником участвующих в процессе частиц, и стимулятором процесса, и активатором поверхности, а может использоваться только для какой-то одной из этих целей.

По физико-химическому механизму взаимодействия поверхности твердого тела с частицами плазмы можно условно разделить все процессы «сухого» травления на три группы.

**Ионное травление (ИТ).** Удаление поверхностных слоев материала здесь осуществляется лишь физическим распылением. Распыление ведется с помощью энергетических ( $0,1 \div 2$  кэВ) ионов газа. При этом химическая природа газа не играет никакой роли. Обычно это газы, химически совершенно не реагирующие с поверхностью (например, аргон).

Если обрабатываемый материал находится в непосредственном контакте с плазмой (т.е. плазма – источник ионов и среда протекания процесса), то такое травление мы назовем ионно-плазменным (ИПТ).

Если зона протекания процесса отделена от зоны генерации ионов, т.е. поверхность обрабатываемого материала не контактирует с плазмой, то такое травление называется ионно-лучевым (ИЛТ). В этом случае мы имеем дело с потоком ионов, т.е. с ионным пучком, направленным к поверхности.

Ясно, что при ИПТ на поверхность материалов воздействуют электроны, нейтральные частицы, излучения плазмы, а при ИЛТ – лишь излучения плазмы. Тем не менее, в целом воздействие всех факторов ИПТ слишком мало, пренебрежимо мало в сравнении с действием высокоэнергетических ионов. При ИЛТ имеет место направленное движение ионов по отношению к поверхности.

**Плазменное (плазмохимическое) травление (ПТ – ПХТ).** Эта группа процессов по своему механизму воздействия на поверхность противоположна процессам сугубо ионного травления. Здесь мы имеем дело с процессами, в основе которых лежит чисто химическое взаимодействие поверхностных слоев материала с химически активными частицами, генерируемыми в плазме, сопровождающееся образованием летучих продуктов реакции, их десорбцией и удалением из зоны процесса. В этом случае плазма играет роль генератора химически активных частиц (ХАЧ). Химически активные

частицы – это свободные атомы и радикалы, т.е. это наиболее агрессивная (из-за наличия у ХАЧ неспаренного электрона) часть плазмы, ответственная за протекание химических реакций. Эти частицы образуются в результате низкоэнергетической электронной и ионной бомбардировки, а также воздействия излучения.

Отметим также два возможных случая осуществления ПТ, приводящих к наличию двух его разновидностей.

Если подвергаемая травлению поверхность находится в контакте с плазмой, то мы имеем дело непосредственно с плазмохимическим травлением (ПХТ). В этом случае нельзя сбрасывать со счета влияние бомбардирующей поверхность электронов, излучения, частиц, непосредственно не участвующих в процессе травления.

В случае разделения реакционного пространства и объема, в котором генерируются ХАЧ, мы имеем дело с радикальным травлением (РТ). При этом происходит сепарация, экстрагирование из разряда радикалов и свободных атомов, которые мы ранее объединили в понятие ХАЧ. Радикальное травление протекает интенсивно без стимуляции излучением или бомбардировкой электронами или ионами, этот процесс зачастую происходит спонтанно.

#### ***Реактивное ионное и ионно-химическое травление (РИТ и ИХТ).***

Это промежуточный случай между чисто физическим распылением и чисто химическим взаимодействием. В таких процессах атомные слои удаляются с поверхности вследствие суперпозиции физического и химического факторов воздействия.

Процесс травления здесь можно рассматривать как физическое распыление с одновременным протеканием химических реакций между ХАЧ и атомами поверхности.

Можно определить его и как процесс химического взаимодействия ХАЧ с поверхностными слоями при одновременном физическом распылении этих слоев.

Наиболее распространенной разновидностью данного типа травления является реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ) – сложный процесс, при котором материал подложки погружен в плазму, его поверхность подвергается воздействию энергетических ионов, свободных атомов и радикалов, электронов и излучения. В таком случае, варьируя те или иные технологические параметры, мы можем ускорять или замедлять процесс физического распыления, можем делать его вклад большим или меньшим.

Возможно ускорение или замедление самих химических реакций, которые, в частности, могут активироваться бомбардировкой ионами или излучением.

Отметим, что в случае отсутствия контакта поверхности образца с плазмой мы имеем реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ). Здесь на-