

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

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Часть 3

**Кинетика процессов реактивного ионно-плазменного
травления полупроводников в галогенсодержащей плазме**

Учебно-методическое пособие для вузов

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретическая часть: характеристика низкотемпературной газоразрядной плазмы.....	5
1.1. Механизмы элементарных процессов в низкотемпературной газоразрядной плазме	5
1.2. Классификация процессов плазменного травления	7
1.3. Процесс реактивного ионно-плазменного травления и роль ионной бомбардировки в таких процессах	10
2. Экспериментальная часть.....	16
2.1. Экспериментальная установка	16
2.2. Методика выполнения работы	17
Контрольные вопросы	20
Литература	20

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 слабоионизованный 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 $^{-3}$), а средняя энергия тяжелых частиц (атомов, молекул и ионов) в среднем на два порядка ниже.

Взаимодействия и обмен энергией в плазме осуществляются путем столкновения частиц и их взаимодействия с излучением. Все столкновительные процессы в плазме подразделяются на упругие и неупругие.

К **упругим** относят такие столкновения, которые не сопровождаются глубоким изменением в состоянии частиц, взаимодействующих путем столкновения, т.е. частицы, обменявшись энергией, разлетаются лишь с изменением траектории первоначального движения. Но именно в процессе упругих столкновений происходят накопление и обмен энергией, получаемой заряженными частицами от электрического поля, что в конечном итоге приводит к появлению неупругих столкновений.

Неупругие столкновения – это такие столкновения, которые приводят к глубокому изменению внутреннего энергетического состояния частиц. К неупругим столкновениям в первую очередь относятся процессы ионизации и диссоциации. Следует заметить, что частица после ряда упругих столкновений может накопить энергию, соответствующую ее возбужденному, т.е. энергетически пересыщенному, состоянию. Таким образом, **возбуждение** – это процесс, в результате которого образуется метастабильная, т.е. неустойчивая, частица. Такая метастабильная частица может быть передатчиком энергии от поля частицам рабочего газа, а по существу – служить энергетическим катализатором.

Тем не менее, среди процессов неупругих столкновений первостепенное значение имеют процессы ионизации, поскольку без ионизации не существует и самой плазмы. **Ионизация**, т.е. образование заряженных частиц из нейтральных, в плазме осуществляется через электронный удар, т.е. через столкновение тяжелой нейтральной частицы с легкой частицей – электроном, скорость движения которого (T_e) существенно выше. Схему такого взаимодействия для рабочего газа CF $_4$ можно представить следующим уравнением:



Процесс ионизации количественно характеризуется **степенью ионизации**, представляющей собой отношение числа образовавшихся ионов к начальному числу нейтральных газообразных частиц:

$$\alpha_{\text{ион.}} = n_i / n_{\text{г.}}$$

Наряду с процессами ионизации, определяющими образование плазменной среды, в ней параллельно протекают процессы **диссоциации**. Схему взаимодействия тяжелой частицы с электроном по диссоциативному пути для того же тетрафторида углерода можно представить в следующем виде:



Продуктами такого процесса являются радикалы и свободные атомы, отличительной особенностью которых служит наличие неспаренного электрона, придающего частице высокую химическую активность. Количественной характеристикой этого процесса служит **степень диссоциации**, т.е. отношение количества радикалов и свободных атомов к общему числу нейтральных газообразных частиц:

$$\alpha_{\text{дисс.}} = n_{\text{рад}} / n_{\text{г.}}$$

Изложенными процессами не исчерпывается все многообразие элементарных процессов в плазме. Основные из наиболее распространенных актов элементарных взаимодействий можно представить в следующем виде:

Элементарные процессы в низкотемпературной плазме

Типы процесса	№ процесса	Схема типичного процесса
Ионизация	1	$e + \text{N}_2(\text{X}^1\Sigma_g^+) \rightarrow 2e + \text{N}_2^+$
	2	$e + \text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+) \rightarrow 2e + \text{N}_2^+$
	3	$2\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+) \rightarrow \text{N}_4^+ + e$
	4	$\text{O} + h\omega \rightarrow \text{O}^+ + e$
Рекомбинация	5	$e + \text{N}_2^+ \rightarrow \text{N} + \text{N}$
	6	$e + \text{N}_4^+ \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2$
	7	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$
	8	$e + \text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$
	9	$e + \text{O}^+ \rightarrow \text{O} + h\omega$
Прилипание	10	$e + \text{O}_2 \text{ N}_2(\text{O}_2) \rightarrow \text{O}_2^- + \text{N}_2(\text{O}_2)$
	11	$e + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^- + \text{O}$
	12	$e + \text{O} \rightarrow \text{O}^- + h\omega$
Возбуждение	13	$e + \text{N}_2(\text{X}^1\Sigma_g^+) \rightarrow e + \text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$
	14	$e + \text{N}_2(\text{X}^1\Sigma_g^+) \rightarrow e + \text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$
	15	$e + \text{N}_2(v=0) \rightarrow e + \text{N}_2(v \neq 0)$
Перезарядка	16	$\text{N}_2 + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}_2$
	17	$\text{N}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2^+$

1.2. Классификация процессов плазменного травления

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 полного заряда нулю), 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.

1. 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. у поверхности обрабатываемого материала нет контакта 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 слишком мало, пренебрежимо мало в сравнении с действием высокоэнергетичных ионов. При ИЛТ имеет место направленное движение ионов по отношению к поверхности.

2. 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 (ХАЧ), генерируемыми в плазме, сопровождающееся образованием летучих продуктов реакции, их десорбцией и удалением из зоны процесса. В этом случае плазма играет роль генератора ХАЧ. 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 бомбардирующих поверхность электронов, излучения, частиц, непосредственно не участвующих в процессе травления.