

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

## **ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

### **Часть 2**

### **Особенности радикального травления полупроводниковых материалов в галогенсодержащей плазме**

Учебно-методическое пособие для вузов

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Элементарные процессы и реакции в плазме под действием электронного удара.....	5
1.1.1. Механизмы генерации химически активных частиц .....	5
1.1.2. Рекомбинация химически активных частиц .....	7
1.1.3. Уравнение непрерывности и его решение для химически активных частиц в разрядной зоне .....	11
1.2. Определение времени жизни, диффузионной длины и коэффициента диффузии химически активных частиц при радикальном травлении .....	13
2. Экспериментальная часть.....	16
2.1. Экспериментальная установка .....	16
2.2. Методика эксперимента .....	17
Контрольные вопросы .....	19
Литература .....	19
Приложение .....	20



Таблица 1.1

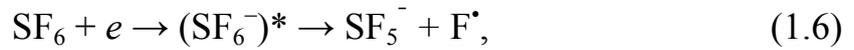
*Типы реакций, протекающих в плазме*

Тип реакции	Схема
Реакции под действием электронного удара ( $e$ )	
Возбуждение	$\text{AB} + e \rightarrow \text{AB}^* + e$
Диссоциативное прилипание	$\text{AB} + e \rightarrow \text{AB}^* \rightarrow \text{A}^* + \text{B}$ $\text{AB}^* \rightarrow \text{A}^* + \text{B}^* + e$
Диссоциация	$\text{AB} + e \rightarrow \text{AB}^* \rightarrow \text{A} + \text{B} + e$
Ионизация	$\text{AB} + e \rightarrow \text{AB}^+ + 2e$
Диссоциативная ионизация	$\text{AB} + e \rightarrow \text{A}^+ + \text{B} + 2e$
Реакции при неупругих столкновениях между тяжелыми частицами	
Диссоциация Пеннинга	$\text{M}^* + \text{A}_2 \rightarrow 2\text{A} + \text{M}$
Ионизация Пеннинга	$\text{M}^* + \text{A}_2 \rightarrow \text{A}_2^+ + \text{M} + e$
Перезарядка	$\text{M}^+ + \text{A}_2 \rightarrow \text{A} + \text{M}$ $\text{M}^- + \text{A}_2 \rightarrow \text{A}_2^- + \text{M}$
Ионизация при столкновении	$\text{M} + \text{A}_2 \rightarrow \text{A}_2^+ + \text{M} + e$
Ион-атомная рекомбинация	$\text{A}^- + \text{A} \rightarrow \text{A}_2 + e$
Ион-ионная рекомбинация	$\text{M}^- + \text{A}_2^+ \rightarrow \text{A}_2 + \text{M}$ $\text{M}^- + \text{A} \rightarrow 2\text{A} + \text{M}$
Электрон-ионная рекомбинация	$e + \text{A}_2^+ \rightarrow 2\text{A}$ $e + \text{A}_2^+ + \text{M} \rightarrow \text{A}_2 + \text{M}$
Атомная рекомбинация	$2\text{A} + \text{M} \rightarrow \text{A}_2 + \text{M}$
Атомный перехват	$\text{A} + \text{BC} \rightarrow \text{AB} + \text{C}$
Атомное дополнение	$\text{A} + \text{BC} + \text{M} \rightarrow \text{ABC} + \text{M}$
Гетерогенные реакции ( $\text{R}_n$ – поверхность твердого тела)	
Атомная рекомбинация	$\text{R}_n - \text{A} + \text{A} \rightarrow \text{S} + \text{A}_2$ $\text{R}_n - \text{B} + \text{A} \rightarrow \text{S} + \text{AB}$
Стабилизация частиц	$\text{R}_n + \text{A}^* \rightarrow \text{S} + \text{A}$ $\text{R}_n + \text{AB}^* \rightarrow \text{S} + \text{AB}$
Распыление	$\text{R}_n - \text{A} + \text{M}^+ \rightarrow \text{S} + \text{A} + \text{M}$
Реакции под действием излучения плазмы ( $h\nu$ )	
Диссоциация	$\text{AB} + h\nu \rightarrow \text{A} + \text{B}$
Ионизация	$\text{AB} + h\nu \rightarrow \text{A}^+ + \text{B}^-$
Возбуждение	$\text{AB} + h\nu \rightarrow \text{AB}^*$

Наличие в плазме ВЧ-разряда  $\text{F}^\bullet$ ,  $\text{CF}_3^\bullet$ ,  $\text{CF}_3^+$  и  $\text{F}^-$  подтверждает, что могут иметь место все указанные выше каналы диссоциации. Однако экспе-

риментальные данные показывают, что более 75 % диссоциирующих молекул распадаются на радикалы  $CF_3\cdot$  и  $F\cdot$  по схеме (1.3).

В газоразрядной плазме сильно электроотрицательных газов ( $SF_6$ ,  $CCl_4$  и др.) диссоциативное прилипание может стать основным каналом образования ХАЧ:



Диссоциативным прилипанием электрона к молекуле  $CF_4$  в плазме, которая обычно используется для РТ, можно пренебречь. Этот механизм вносит заметный вклад в диссоциацию молекулы  $CF_4$  лишь при очень малой мощности разрядов.

Малый вклад диссоциативной ионизации, приводящей к образованию положительных ионов и радикалов по схеме (1.4), связан с тем, что средняя энергия электронов в разряде  $E_9$  (3–6 эВ) значительно ниже пороговой энергии ионизации ( $E_{\text{пор}}^{\text{ион}}$ ) молекул рабочего газа. Для молекул  $CF_4$   $E_{\text{пор}}^{\text{ион}} = 16$  эВ, а максимум сечения процесса  $\sigma_{\text{max}}(E_9)$  наблюдается при значениях  $E_{9,\text{max}} = 70$  эВ. Поэтому можно считать, что в ВЧ-разрядах  $CF_4$  основным каналом генерации радикалов  $F\cdot$  является диссоциация молекул по схеме (1.3) и, следовательно,

$$G_{F\cdot} = G_{CF_3\cdot} = k_1 n_e n_{CF_4}, \quad (1.8)$$

Где  $G_{F\cdot}$ ,  $G_{CF_3\cdot}$  – скорости генерации радикалов  $F\cdot$  и  $CF_3\cdot$  в зоне разряда;  $n_e$ ,  $n_{CF_4}$  – концентрации электронов и молекул  $CF_4$  в плазменной зоне реактора;  $k_1$  – константа скорости реакции (1.3), определяемая выражением

$$k_1 = \left(\frac{2}{m_e}\right)^{1/2} \int_{E_{\text{дис}}^{\text{пор}}}^{\infty} \sigma_{\text{дис}}(E_9) f_9(E_9) E_9^{1/2} dE_9 \quad (1.9)$$

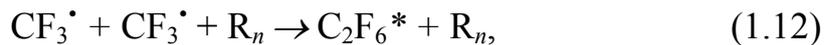
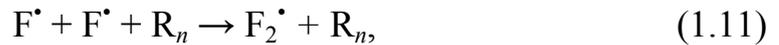
Здесь  $m_e$  – масса электрона;  $E_{\text{дис}}^{\text{пор}}$  – пороговая энергия диссоциации;  $\sigma_{\text{дис}}(E_9)$  – сечение диссоциации;  $f_9(E_9)$  – функция распределения электронов по энергиям.

### 1.1.2. Рекомбинация химически активных частиц

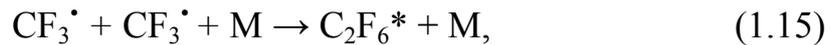
В результате столкновений радикалов с различными частицами плазмы происходит их дезактивация в процессах рекомбинации. Причем для

простейших радикалов эффективность рекомбинации близка к единице, т.е. почти каждое столкновение приводит к дезактивации. Для сложных радикалов эффективность рекомбинации падает из-за возможности перераспределения внутренней энергии по связям.

Рекомбинация радикалов осуществляется как в гетерогенных процессах



так и в гомогенных



где  $M$  – третья частица, роль которой обычно играет молекула плазмообразующего газа, в данном случае  $CF_4$ ;  $R_n$  – поверхность твердого тела (стенки реактора, электроды и т.п.).

В плазме  $CF_4$  без добавок  $O_2$  количество образующегося  $C_2F_6$  очень мало, поэтому реакциями (1.12) и (1.15) можно пренебречь.

Скорость гибели ХАЧ в единице объема реактора за счет процессов гомогенной рекомбинации ( $R_{гом.F^\bullet}$ ) можно записать в виде

$$R_{гом.F^\bullet} = (k_2 n_{CF_3^\bullet} + k_3 n_{F^\bullet}) n_{F^\bullet} n_M, \quad (1.16)$$

$$R_{гом.F^\bullet} = k_2 n_{CF_3^\bullet} n_M. \quad (1.17)$$

Скорость восстановления молекул  $CF_4$ :

$$G_{CF_4} = k_2 n_{F^\bullet} n_{CF_3^\bullet} n_M, \quad (1.18)$$

где  $k_2$  и  $k_3$  – константы скоростей реакций;  $n_{F^\bullet}$ ,  $n_{CF_3^\bullet}$ ,  $n_M$  – концентрация  $F^\bullet$ ,  $CF_3^\bullet$  и «тушащих» частиц  $M$ .

Рекомбинация фтора по механизмам (1.10) и (1.13) более вероятна, чем по механизму (1.11) и (1.14). Вероятность реакции (1.10) возрастает с понижением давления, а реакции (1.13) – с повышением.