

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ И КИНЕТИКА АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ
В СМЕСИ $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ © 2020 г. А. М. Ефремов^а, * Д. Б. Мури^а, К.-Н. Кwon^б^аФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», кафедра технологии приборов и материалов электронной техники, Шереметевский проспект, 7, г. Иваново, Россия^бKorea University, Department of Control and Instrumentation Engineering, Sejong, 339-700 South Korea

*E-mail: efremov@isuct.ru

Поступила в редакцию 01.11.2019 г.

После доработки 01.11.2019 г.

Принята к публикации 02.12.2019 г.

Изучено влияние соотношения компонентов O_2/Ar в смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ на электрофизические параметры плазмы, кинетику активных и их стационарные концентрации в условиях индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда. При совместном использовании методов диагностики и моделирования плазмы: 1) выявлены особенности состава плазмы в бескислородной системе $\text{CHF}_3 + \text{Ar}$; 2) установлены механизмы влияния кислорода на стационарные концентрации активных частиц через кинетику процессов при электронном ударе и реакции атомно-молекулярного взаимодействия; и 3) проведен модельный анализ кинетики гетерогенных процессов (травление, полимеризация, деструкция полимерной пленки), определяющих режим травления и его выходные характеристики.

DOI: 10.31857/S0544126920030035

1. ВВЕДЕНИЕ

Фторуглеродные газы вида $\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$ активно используются в технологии интегральной микро- и нанoeлектроники, электроники при проведении процессов реактивно-ионного травления кремния и его соединений [1–3]. Выходные характеристики процесса травления в плазме таких газов в значительной степени зависят от соотношения числа атомов фтора к числу атомов углерода в исходной молекуле, которое определяет соотношение концентраций F/CF_x в газовой фазе и, как следствие, баланс скоростей процессов травления и поверхностной полимеризации. Широкое применение, в частности, получили плазмообразующие смеси на основе CF_4 , который в силу высокого значения $\text{F}/\text{C} = 4$ обеспечивает доминирование травления над полимеризацией [3, 4]. Это позволяет высокие скорости травления и чистоту обрабатываемой поверхности. Тем не менее, в работах [5–7] было показано, что трифторметан (CHF_3) существенно превосходит CF_4 по селективности травления в системе SiO_2/Si . Это обуславливает высокий интерес к практическому использованию и, как следствие, к изучению физико-химических свойств плазменных систем на основе CHF_3 .

На протяжении последних лет было опубликовано несколько работ, посвященных исследова-

нию электрофизических параметров и состава плазмы CHF_3 [8–12]. По их результатам: 1) определены механизмы процессов, формирующих стационарный состав плазмы; 2) выявлены зависимости концентраций нейтральных и заряженных частиц от условий возбуждения разряда; и 3) скомпонованы кинетические схемы (наборы процессов и соответствующих констант скоростей), обеспечивающие адекватное описание кинетики плазмохимических реакций. К сожалению, все эти данные относятся либо к плазме чистого CHF_3 , либо к смесям $\text{CHF}_3 + \text{Ar}$ фиксированного или переменного состава. В то же время, хорошо известно, что добавка кислорода к фторуглеродному газу является эффективным инструментом регулирования кинетики травления и полимеризации за счет увеличения скорости генерации атомов фтора, связывания фторуглеродных радикалов в соединения вида CF_xO_y , и травление пленки атомами кислорода [4]. Так, например, в работе [13] было показано, что варьирование соотношений различных компонентов в смеси $\text{CF}_4 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ позволяет получать комбинации параметров плазмы и концентраций активных частиц, не доступные в соответствующих бинарных смесях. Этот факт и определил направление исследований в данной работе.

Целью данной работы являлось исследование электрофизических параметров и состава плазмы индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда в смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$. Основное внимание было направлено на 1) выявление механизмов влияния соотношения компонентов O_2/Ar на кинетику и концентрации активных частиц; и 2) установление взаимосвязей между параметрами газовой фазы и гетерогенными характеристиками процесса травления.

2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Оборудование и методики эксперимента

Эксперименты проводились при возбуждении индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда в смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ в реакторе планарного типа цилиндрической ($r = 13$ см, $l = 16$ см) рабочей камерой из анодированного алюминия [14]. В качестве неизменных параметров процесса выступали общее давление и расход плазмообразующего газа ($p = 10$ мторр, $q = 40$ станд. см³/мин), вкладываемая мощность ($W = 700$ Вт) и мощность смещения ($W_{dc} = 200$ Вт). В качестве варьируемого параметра использовалось соотношение начальных концентраций Ar/O_2 , которое устанавливалось изменением индивидуальных расходов этих компонентов при постоянном $q_{\text{CHF}_3} = 20$ станд. см³/мин. Таким образом, содержание CHF_3 в смеси всегда составляло 50%, при этом изменение $q_{\text{O}_2} = 0-40$ станд. см³/мин ($y_{\text{O}_2} = q_{\text{O}_2}/q = 0-0.5$, или 0-50%) соответствовало полному замещению аргона на кислород.

Диагностика плазмы осуществлялась двойным зондом Лангмюра DLP2000 (Plasmat Inc., Korea). Для минимизации погрешности измерений зондовых вольт-амперных характеристик (ВАХ) из-за полимеробразования на зондах применялась система импульсной очистки зондов ионной бомбардировкой. Предварительные эксперименты показали отсутствие значимых искажений ВАХ, последовательно измеряемых в системах 50% $\text{CHF}_3 + 50\%$ Ar и 50% $\text{CHF}_3 + 50\%$ O_2 в течение ~5 мин после зажигания разряда. Обработка зондовых ВАХ базировалась на известных положениях теории двойного зонда [15-17] с использованием максвелловской функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Результатом обработки выступали данные по температуре электронов (T_e) и плотности ионного тока (J_+). Суммарная концентрация положительных ионов (n_+) определялась из соотношения $J_+ \approx 0.61en_+v_B$ [16, 17], где $v_B \approx \sqrt{eT_e/m_i}$ – скорость ионов на внешней границе двойного электрического слоя у поверхности зонда без учета отрицательных ионов. Допустимость такого подхода показана в на-

ших работах [18, 19]. Эффективная масса ионов (m_i) оценивалась по соотношению $m_i = (\sum y_{X_i^+}/m_{X_i^+})^{-1}$, где $y_{X_i^+}$ и $m_{X_i^+}$ – парциальные мольные доли и массы ионов. Для каждого типа положительного иона полагалось, что $y_{X^+} \sim k_{iz}y_X/\sqrt{1/m_{X^+}}$, где k_{iz} и y_X – константа скорости ионизации и мольная доля соответствующей нейтральной частицы.

Величина отрицательного смещения на нижнем электроде $-U_{dc}$ при $W_{dc} = \text{const}$ измерялась высоковольтным зондом AMN-CTR (Youngsin Eng, Korea). В предварительных экспериментах было установлено, что варьирование W_{dc} в пределах 0-200 Вт не оказывает влияния на вид зондовых ВАХ и, следовательно, на параметры газовой фазы разряда.

2.2. Моделирование плазмы

Для получения данных по стационарному составу плазмы использовалась кинетическая 0-мерная модель, оперирующая усредненными по объему реактора величинами [18, 19]. Кинетическая схема (набор реакций и соответствующих констант скоростей) для нейтральных частиц, представленная в табл. 1, была сформирована по результатам предшествующих исследований систем $\text{CHF}_3 + \text{Ar}$ [8, 11], $\text{O}_2 + \text{Ar}$ [20, 21] и $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ [22]. В последней работе было отмечено, что стационарные концентрации нейтральных частиц при комбинировании CHF_3 и O_2 в одной смеси в значительной степени определяются процессами ступенчатой диссоциации вида $\text{CHF}_x + \text{O} \rightarrow \text{COF}_x + \text{H}$ и $\text{CF}_x + \text{O} \rightarrow \text{COF}_{x-1} + \text{F}$. На основании этого кинетическая схема была дополнена реакциями образования и гибели атомов O и $\text{O}(^1\text{D})$ с участием метастабильных молекул $\text{O}_2(a^1\Delta)$ и $\text{O}_2(b^1\Sigma)$. Алгоритм моделирования базировался на совместном решении уравнений химической кинетики нейтральных и заряженных частиц с учетом следующих допущений:

1) Энергетическое распределение электронов в условиях высоких степеней ионизации газа ($n_+/N \sim 10^{-4}$, где $N = p/k_B T_{\text{gas}}$ – общая концентрация частиц при температуре T_{gas}) формируется при существенном вкладе равновесных электрон-электронных соударений. Таким образом, константы скоростей процессов R1-R34 могут быть найдены по соотношениям вида $k = AT_e^B \exp(-C/T_e)$ [8, 9, 20], полученным при интегрировании сечений соответствующих процессов с Максвелловской ФРЭЭ.

2) Варьирование начального состава смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ в условиях $p, W = \text{const}$ не сопровождается существенными изменениями темпе-

Таблица 1. Реакции с участием нейтральных частиц в плазме смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$

Реакция		$k, \text{см}^3/\text{с}$	Реакция		$k, \text{см}^3/\text{с}$
1.	$\text{CHF}_3 + e \rightarrow \text{F} + \text{CHF}_2 + e$	$f(T_e)$	60.	$\text{CF}_2 + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{CO} + 2\text{F}$	3.98×10^{-12}
2.	$\text{CHF}_3 + e \rightarrow \text{H} + \text{CF}_3 + e$	$f(T_e)$	61.	$\text{CF} + \text{F} \rightarrow \text{CF}_2$	5.01×10^{-15}
3.	$\text{CHF}_3 + e \rightarrow \text{HF} + \text{CF}_2 + e$	$f(T_e)$	62.	$\text{CF} + \text{H} \rightarrow \text{C} + \text{HF}$	1.20×10^{-11}
4.	$\text{CHF}_2 + e \rightarrow \text{CHF} + \text{F} + e$	$f(T_e)$	63.	$\text{CF} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{F}$	6.31×10^{-11}
5.	$\text{CHF}_2 + e \rightarrow \text{H} + \text{CF}_2 + e$	$f(T_e)$	64.	$\text{CF} + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{CO} + \text{F}$	2.00×10^{-11}
6.	$\text{CHF} + e \rightarrow \text{H} + \text{CF} + e$	$f(T_e)$	65.	$\text{CF} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CFO} + \text{O}$	3.16×10^{-11}
7.	$\text{CF}_4 + e \rightarrow \text{CF}_3 + \text{F} + e$	$f(T_e)$	66.	$\text{CH} + \text{HF} \rightarrow \text{CF} + \text{H}_2$	3.23×10^{-11}
8.	$\text{CF}_4 + e \rightarrow \text{CF}_2 + 2\text{F} + e$	$f(T_e)$	67.	$\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}$	1.06×10^{-10}
9.	$\text{CF}_4 + e \rightarrow \text{CF}_3^+ + \text{F} + 2e$	$f(T_e)$	68.	$\text{CH} + \text{F} \rightarrow \text{C} + \text{HF}$	1.02×10^{-12}
10.	$\text{CF}_3 + e \rightarrow \text{CF}_2 + \text{F} + e$	$f(T_e)$	69.	$\text{H}_2 + \text{F} \rightarrow \text{HF} + \text{H}$	1.60×10^{-11}
11.	$\text{CF}_2 + e \rightarrow \text{CF} + \text{F} + e$	$f(T_e)$	70.	$\text{FO} + \text{O} \rightarrow \text{F} + \text{O}_2$	2.51×10^{-11}
12.	$\text{CF}_2 + e \rightarrow \text{C} + 2\text{F} + e$	$f(T_e)$	71.	$\text{FO} + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{F} + \text{O}_2$	5.01×10^{-11}
13.	$\text{CF} + e \rightarrow \text{C} + \text{F} + e$	$f(T_e)$	72.	$\text{FO} + \text{FO} \rightarrow 2\text{F} + \text{O}_2$	2.51×10^{-12}
14.	$\text{HF} + e \rightarrow \text{H} + \text{F} + e$	$f(T_e)$	73.	$2\text{FO} \rightarrow \text{F}_2 + \text{O}_2$	2.51×10^{-16}
15.	$\text{F}_2 + e \rightarrow 2\text{F} + e$	$f(T_e)$	74.	$\text{CFO} + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_4 + \text{CO}$	1.00×10^{-11}
16.	$\text{H}_2 + e \rightarrow 2\text{H} + e$	$f(T_e)$	75.	$\text{CFO} + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{CF}_2$	1.00×10^{-11}
17.	$\text{CH} + e \rightarrow \text{C} + \text{H} + e$	$f(T_e)$	76.	$\text{CFO} + \text{CF}_2 \rightarrow \text{CF}_3 + \text{CO}$	3.16×10^{-13}
18.	$\text{O}_2 + e \rightarrow 2\text{O} + e$	$f(T_e)$	77.	$\text{CFO} + \text{CF}_2 \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{CF}$	3.16×10^{-13}
19.	$\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + e$	$f(T_e)$	78.	$\text{CFO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{F}$	1.00×10^{-10}
20.	$\text{O} + e \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + e$	$f(T_e)$	79.	$\text{CFO} + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{CO}_2 + \text{F}$	1.00×10^{-10}
21.	$\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O}_2(\text{a}) + e$	$f(T_e)$	80.	$2\text{CFO} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{CO}$	1.00×10^{-11}
22.	$\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O}_2(\text{b}) + e$	$f(T_e)$	81.	$\text{CFO} + \text{F} \rightarrow \text{CF}_2\text{O}$	7.94×10^{-11}
23.	$\text{O}_2(\text{a}) + e \rightarrow \text{O}_2 + e$	$f(T_e)$	82.	$\text{CF}_2\text{O} + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{F}_2 + \text{CO}_2$	2.00×10^{-11}
24.	$\text{O}_2(\text{a}) + e \rightarrow 2\text{O} + e$	$f(T_e)$	83.	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$	1.58×10^{-11}
25.	$\text{O}_2(\text{a}) + e \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + e$	$f(T_e)$	84.	$\text{CO} + \text{F} \rightarrow \text{CFO}$	1.29×10^{-11}
26.	$\text{O}_2(\text{a}) + e \rightarrow \text{O}_2(\text{b}) + e$	$f(T_e)$	85.	$\text{F} \rightarrow \text{F}_{\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 0.02$
27.	$\text{O}_2(\text{b}) + e \rightarrow \text{O}_2 + e$	$f(T_e)$		$\text{F}_{\text{ads}} + \text{CHF}_x \rightarrow \text{CHF}_{x+1}$	
28.	$\text{O}_2(\text{b}) + e \rightarrow 2\text{O} + e$	$f(T_e)$		$\text{F}_{\text{ads}} + \text{CF}_x \rightarrow \text{CF}_{x+1}$	
29.	$\text{O}_2(\text{b}) + e \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + e$	$f(T_e)$		$\text{F}_{\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{F}_2$	
30.	$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO} + \text{O} + e$	$f(T_e)$		$\text{F}_{\text{ads}} + \text{C} \rightarrow \text{CF}$	
31.	$\text{CO} + e \rightarrow \text{C} + \text{O} + e$	$f(T_e)$		$\text{F}_{\text{ads}} + \text{O} \rightarrow \text{FO}$	
32.	$\text{FO} + e \rightarrow \text{F} + \text{O} + e$	$f(T_e)$	$\text{F}_{\text{ads}} + \text{H} \rightarrow \text{HF}$		
33.	$\text{CFO} + e \rightarrow \text{CO} + \text{F} + e$	$f(T_e)$	86.	$\text{H} \rightarrow \text{H}_{\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 0.05$
34.	$\text{CF}_2\text{O} + e \rightarrow \text{CFO} + \text{F} + e$	$f(T_e)$		$\text{H}_{\text{ads}} + \text{CF}_x \rightarrow \text{CHF}_x$	

Таблица 1. Окончание

Реакция		k , см ³ /с	Реакция		k , см ³ /с
35.	$\text{CHF}_3 + \text{F} \rightarrow \text{HF} + \text{CF}_3$	1.58×10^{-13}		$\text{H}_{\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{HF}$	
36.	$\text{CHF}_3 + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CF}_3$	1.60×10^{-19}		$\text{H}_{\text{ads}} + \text{C} \rightarrow \text{CH}$	
37.	$\text{CHF}_2 + \text{F} \rightarrow \text{HF} + \text{CF}_2$	3.16×10^{-11}		$\text{H}_{\text{ads}} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$	
38.	$\text{CHF}_2 + \text{H} \rightarrow \text{HF} + \text{CHF}$	3.22×10^{-10}	87.	$\text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_{3\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 0.05$
39.	$\text{CHF}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CF}_2 + \text{H}_2$	3.20×10^{-14}		$\text{CF}_{3\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{CF}_4$	
40.	$\text{CHF}_2 + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CHF}_3 + \text{CF}_2$	1.58×10^{-12}		$\text{CF}_{3\text{ads}} + \text{H} \rightarrow \text{CHF}_3$	
41.	$\text{CHF}_2 + \text{O} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{H}$	1.05×10^{-11}	88.	$\text{CF}_2 \rightarrow \text{CF}_{2\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 0.1$
42.	$\text{CHF} + \text{F} \rightarrow \text{HF} + \text{CF}$	3.25×10^{-11}		$\text{CF}_{2\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{CF}_3$	
43.	$\text{CHF} + \text{H} \rightarrow \text{HF} + \text{CH}$	3.10×10^{-10}		$\text{CF}_{2\text{ads}} + \text{H} \rightarrow \text{CHF}_2$	
44.	$\text{CHF} + \text{O} \rightarrow \text{HF} + \text{CO}$	3.25×10^{-11}		$\text{CF}_{2\text{ads}} + \text{O} \rightarrow \text{CF}_2\text{O}$	
45.	$\text{F}_2 + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_4 + \text{F}$	6.31×10^{-14}	89.	$\text{CF} \rightarrow \text{CF}_{\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 0.1$
46.	$\text{F}_2 + \text{CF}_2 \rightarrow \text{CF}_3 + \text{F}$	7.94×10^{-14}		$\text{CF}_{\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{CF}_2$	
47.	$\text{F}_2 + \text{CF} \rightarrow \text{CF}_2 + \text{F}$	3.98×10^{-12}		$\text{CF}_{\text{ads}} + \text{H} \rightarrow \text{CHF}$	
48.	$\text{F}_2 + \text{H} \rightarrow \text{HF} + \text{F}$	8.20×10^{-12}		$\text{CF}_{\text{ads}} + \text{O} \rightarrow \text{CFO}$	
49.	$\text{F}_2 + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{FO} + \text{F}$	7.94×10^{-12}	90.	$\text{C} \rightarrow \text{C}_{\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 1$
50.	$\text{F}_2 + \text{CFO} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{F}$	5.01×10^{-14}		$\text{C}_{\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{CF}$	
51.	$\text{CF}_3 + \text{F} \rightarrow \text{CF}_4$	1.00×10^{-12}		$\text{C}_{\text{ads}} + \text{H} \rightarrow \text{CH}$	
52.	$\text{CF}_3 + \text{H} \rightarrow \text{CF}_2 + \text{HF}$	7.94×10^{-11}		$\text{C}_{\text{ads}} + \text{O} \rightarrow \text{CO}$	
53.	$\text{CF}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{F}$	3.16×10^{-11}	91.	$\text{O} \rightarrow \text{O}_{\text{ads}}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 0.1$
54.	$\text{CF}_3 + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{CF}_2\text{O} + \text{F}$	3.16×10^{-11}		$\text{O}_{\text{ads}} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2$	
55.	$\text{CF}_2 + \text{F} \rightarrow \text{CF}_3$	4.17×10^{-13}		$\text{O}_{\text{ads}} + \text{F} \rightarrow \text{FO}$	
56.	$\text{CF}_2 + \text{H} \rightarrow \text{HF} + \text{CF}$	3.20×10^{-11}		$\text{O}_{\text{ads}} + \text{C} \rightarrow \text{CO}$	
57.	$\text{CF}_2 + \text{O} \rightarrow \text{CFO} + \text{F}$	3.16×10^{-11}		$\text{O}_{\text{ads}} + \text{CF}_x \rightarrow \text{CF}_x\text{O}$	
58.	$\text{CF}_2 + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{CFO} + \text{F}$	3.16×10^{-11}	92.	$\text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O}$	$f(\gamma)$ $\gamma = 1$
59.	$\text{CF}_2 + \text{O} \rightarrow \text{CO} + 2\text{F}$	3.98×10^{-12}			

Примечание: $\text{O}_2(\text{a}) = \text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$, $\text{O}_2(\text{b}) = \text{O}_2(\text{b}^1\Sigma)$.

ратуры газа. Это позволяет пренебречь влиянием соотношения Ar/O_2 на константы скоростей объемных атомно-молекулярных процессов R35–R84. Значения последних брали из открытой базы данных [23] для $T_{\text{gas}} = 600$ К.

3) Гетерогенная рекомбинация атомов и радикалов подчиняется механизму Или-Ридила. Соответственно, константы скоростей процессов R85–R92 могут быть определены как $k \approx \gamma v_T / 2r$, где r – радиус рабочей камеры реактора, $v_T = (8k_B T_{\text{gas}} / \pi m)^{1/2}$ и γ вероятность рекомбинации [8, 9, 22].

Концентрация электронов оценивалась по измеренному значению n_+ с использованием соотношения

$$n_e \approx \frac{k_{ii} n_+^2}{v_{da} + k_{ii} n_+}$$

полученного при совместном решении кинетического уравнения для отрицательных ионов и уравнения квазинейтральности плазмы [11]. Константы скоростей ион-ионной рекомбинации k_{ii} принимались равными для всех типов положительных ионов [11, 13]. При расчете суммарной частоты диссоциативного прилипания $v_{da} = N \sum y k_{da}$ (где

Таблица 2. Константы скоростей ионизации (k_{iz} , 10^{-10} см³/с) основных нейтральных частиц в плазме смеси CHF₃ + O₂ + Ar

y_{O_2}	CHF ₃	CF ₄	CF ₃	CF ₂	F ₂	HF	F	Ar	O ₂	CF ₂ O	CO ₂
0%	5.64	13.4	21.8	20.1	1.84	3.96	4.18	25.2	10.4	6.30	16.9
50%	0.51	1.15	5.0	4.70	0.15	0.46	0.58	2.66	1.82	1.45	2.39

y – мольная доля частицы, характеризующейся константой скорости диссоциативного прилипания k_{da} принимались во внимание HF, CHF _{x} ($x = 1-3$), CF _{x} ($x = 1-3$), O₂, CO₂ и CF₂O.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из данных рис. 1а можно видеть, что замещение Ar на O₂ в смеси CHF₃ + O₂ + Ar при $y_{CHF_3} = \text{const}$ вызывает монотонное снижение средней энергии (температуры) электронов в диапазоне 4.8–3.0 эВ при 0–50% O₂. Причиной данного эффекта является увеличение потерь энергии электронами в процессах низкорогового (колебательного, электронного) возбуждения O₂ и молекулярных продуктов плазмохимических реакций. Действительно, первый потенциал возбуждения атомов Ar составляет ~11.6 эВ, в то время как кислород, например, характеризуется непрерывным спектром не упругого рассеяния электронов, начиная с ~0.2 эВ [24]. Последнее обеспечивается колебательным возбуждением молекул O₂ ($\epsilon_{th} = 0.16$ эВ, где ϵ_{th} – пороговая энергия возбуждения), а также образованием метастабильных электронно-возбужденных состояний O₂(a¹Δ) с $\epsilon_{th} = 0.98$ эВ и O₂(b¹Σ) с $\epsilon_{th} = 1.64$ эВ [24]. Результаты диагностики плазмы показали также, что замещение аргона на кислород приводит к снижению суммарной концентрации положительных ионов ($n_+ = 6.2 \times 10^{10} - 3.0 \times 10^{10}$ см⁻³ при 0–50% O₂, см. рис. 1а) и плотности ионного тока ($J_+ = 1.94 - 0.86$ мА/см² при 0–50% O₂, см. рис. 1б). Расчетное значение n_e следует поведению n_+ и изменяется в диапазоне $6.2 \times 10^{10} - 2.5 \times 10^{10}$ см⁻³ при 0–50% O₂. Такое изменение концентраций заряженных частиц обусловлено уменьшением скоростей их генерации из-за снижения эффективной частоты ионизации $\nu_{iz} = N \sum y k_{iz}$ ($1.6 \times 10^5 - 1.2 \times 10^4$ с⁻¹, или в ~1.3 раза при 0–50% O₂) и скорости ионизации $\nu_{iz} n_e$ ($9.6 \times 10^{15} - 2.9 \times 10^{14}$ см⁻³ с⁻¹, или в ~3.3 раза при 0–50% O₂). Причинами здесь являются 1) снижение констант скоростей ионизации нейтральных частиц, k_{iz} , из-за снижения T_e (табл. 2); и 2) увеличение доли нейтральных частиц с низкими k_{iz} (рис. 2 и табл. 2). Было найдено

также, что замещение аргона на кислород сопровождается увеличением абсолютной ($n_- = 2.3 \times 10^8 - 5.2 \times 10^9$ при 0–50% O₂) и относительной ($n_-/n_e = 0.04 - 0.21$ при 0–50% O₂) концентрации отрицательных ионов. Оба эффекта связаны с ростом суммарной частоты и скорости диссоциативного прилипания из-за увеличения концентраций электроотрицательных кислородсодержащих частиц. Отметим, что выполнение условия $n_-/n_e \ll 1$ подтверждает применимость допущения $n_e \approx n_+$, использованного в работе [12] при моделировании плазмы в смеси CHF₃ + Ar.

Расчеты показали, что основными компонентами газовой фазы в плазме 50% CHF₃ + 50% Ar являются HF, CHF _{x} ($x = 1, 3$) и CF _{x} ($x = 1-4$) (рис. 2). Доминирование HF над другими типами частиц (что не противоречит экспериментальным данным [25, 26]) обеспечивается 1) прямым образованием HF из исходных молекул CHF₃ по R3; и 2) высокими скоростями объемных процессов CHF _{x} + F → CF _{x} + HF (R35, R37, R42), CHF _{x} + H → CHF _{$x-1$} + HF (R38, R43) и CF _{x} + H → CF _{$x-1$} + HF (R52, R56). Отметим также, что эффективная генерация радикалов CF _{x} ($x = 1-3$) по реакциям R35, R37 и R42 в сочетании с гетерогенными процессами вида CF _{x} + F → CF _{$x+1$} (R85, R88 и 89) обуславливает выполнение условия $n_{CF_x} > n_{CHF_x}$ для суммарных концентраций этих частиц. Основными каналами образования атомов фтора являются процессы электронного удара с участием CF _{x} (R9–R11) и HF (R14) при определяющей (~50% от общей скорости, в силу $n_{HF} > n_{CF_x}$) роли R14 (рис. 3а). Пренебрежимо малый (менее 1% от общей скорости) вклад молекул CHF₃ через R1 обусловлен низким значением константы скорости данного процесса (3.4×10^{-11} см³/с vs. 4.9×10^{-10} см³/с для R10 и 1.4×10^{-9} см³/с для R14) из-за высокой пороговой энергии (~13.0 эВ vs. ~3.8 эВ для R10 и ~5.9 эВ для R14). Характерной особенностью кинетики гибели атомов фтора в исследованном диапазоне условий является заметный (~25% от общей скорости) вклад объемных процессов R35, R37, R42 (рис. 3б). Последний эффект является основной причиной значительно более низких концентраций атомов фтора

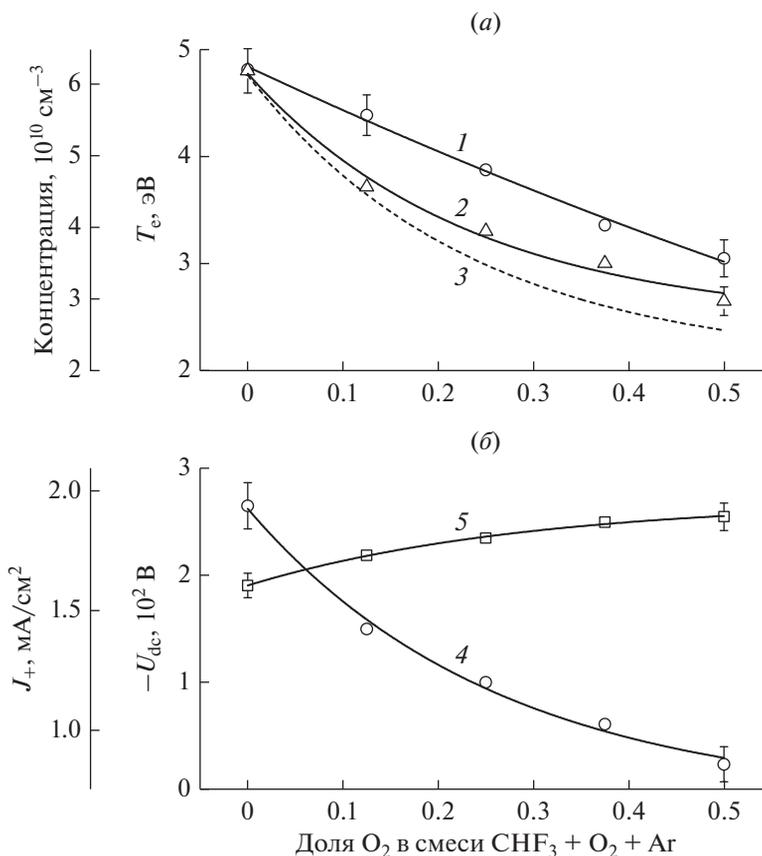


Рис. 1. Экспериментальные (точки + сплошные линии) и расчетные (пунктир) параметры плазмы в смеси CHF₃ + O₂ + Ar: 1 – температура электронов; 2 – суммарная концентрация положительных ионов; 3 – концентрация электронов; 4 – плотность ионного тока; 5 – отрицательное смещение на нижнем электроде в условиях $W_{dc} = \text{const}$.

по сравнению с плазмой CF₄ в аналогичном диапазоне условий [11].

Замещение Ar на O₂ в смеси CHF₃ + O₂ + Ar сопровождается существенными изменениями концентраций (рис. 2) и кинетики (рис. 3) нейтральных частиц, наиболее значимыми из которых являются снижение эффективности процессов при электронном ударе, резкое падение концентраций компонентов вида CF_x и CHF_x, а также увеличение концентрации атомов фтора. Резкое падение n_{CF_3} (6.3×10^{12} – 7.0×10^9 см⁻³, или в ~900 раз при 0–50% O₂) и n_{CF_2} (7.3×10^{12} – 5.3×10^9 см⁻³, или в ~1400 раз при 0–50% O₂) обусловлено сочетанием двух факторов, а именно: 1) ростом скоростей гибели этих частиц за счет процессов вида CF_x + O → CF_{x-1}O + F (R53, R57) и CF_x + O(¹D) → CF_{x-1}O + F (R54, R58); и 2) снижением скоростей их образования по механизмам R35, R37 и R42 из-за аналогичного изменения концентраций CHF_x. Причиной последнего эффекта также являются объемные процессы с участием атомов кислорода R41 и R44. Поэтому, принимая во внимание снижение частот диссоциирующих столк-

новений электронов (например, $k_{11}n_e = 148$ – 17 с⁻¹ при 0–50% O₂), увеличение y_{O_2} эффективно подавляет образование атомов фтора по механизмам R9–R11 (рис. 3a). Отметим, что высокая скорость генерации молекул HF по R44 вызывает незначительный рост концентрации этих частиц (2.4×10^{13} – 4.0×10^{13} см⁻³, или в ~1.7 раз при 0–50% O₂, см. рис. 2) и обуславливает более медленное снижение R14 сравнению с R9–R11. Тем не менее, суммарная скорость генерации атомов фтора в процессах R9–R11 и R14 монотонно снижается (4.2×10^{15} – 3.3×10^{14} см⁻³ с⁻¹, или в ~13 раз при 0–50% O₂), при этом величина снижения не компенсируется появлением дополнительных механизмов генерации атомов с участием молекул F₂ (R15) и кислородсодержащих частиц (R32, R34, R70). Причиной резкого роста скорости R15 является аналогичное изменение n_{F_2} (8.2×10^{10} – 9.3×10^{12} см⁻³, или в ~115 раз при 0–50% O₂, см. рис. 2) обусловленное эффективным образованием этих молекул по R82 с участием CF₂O. Поэтому скорости R15 и R34 в кислородсодержащей плазме фактически лимитируются скоростью об-

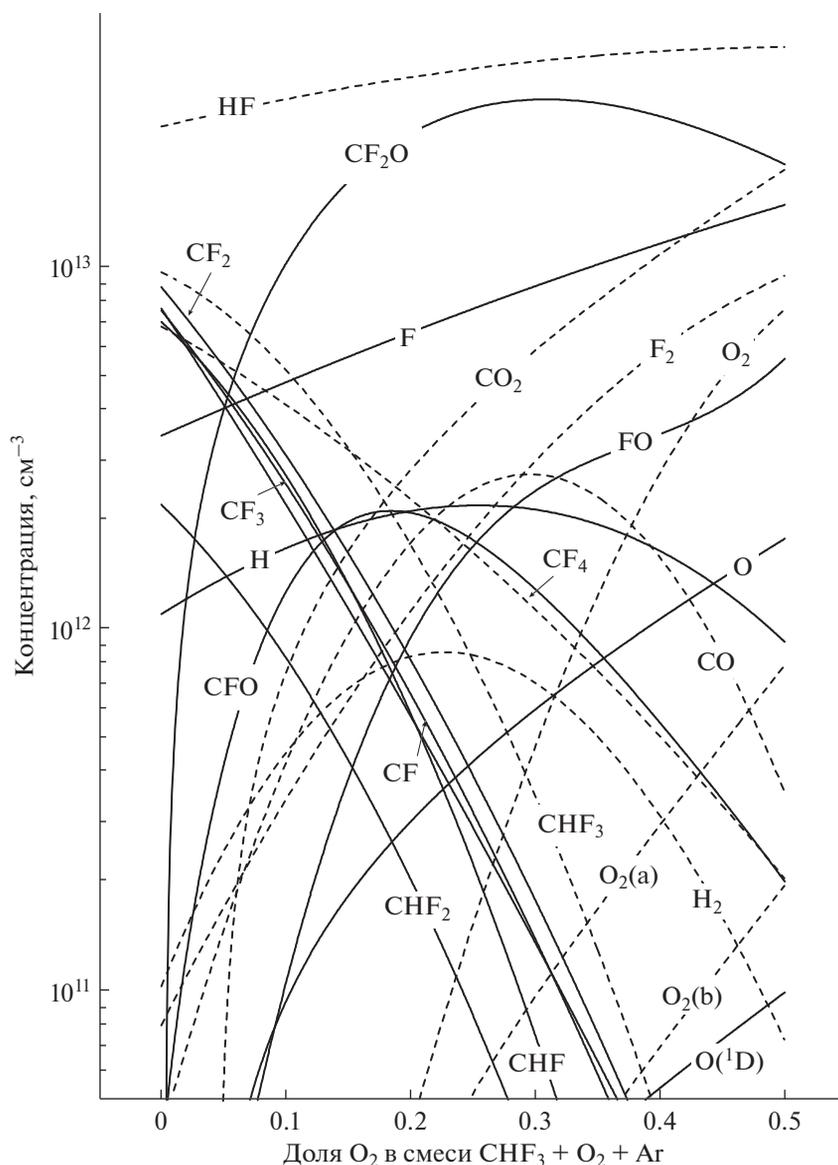


Рис. 2. Стационарные концентрации нейтральных компонентов газовой фазы в плазме смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$.

разования CF_2O в объемных (R81) и гетерогенных (R89, R90 и R91) процессах. Расчеты показали, что суммарная скорость образования и концентрация CF_2O имеют максимальные значения в области 20–30% O_2 из-за противоположного изменения концентраций обеспечивающих частиц — CF_x и CHF_x с одной стороны и O и $\text{O}(^1\text{D})$ с другой. Аналогично, невысокая эффективность генерации атомов фтора по R32 и R70 является следствием лимитирования образования FO скоростями гетерогенных процессов R85 и R91. Последние, в свою очередь, ограничиваются низкими концентрациями атомов кислорода, которые активно гибнут в объеме плазмы при взаимодействии с CHF_x (R41, R44) и CF_x (R53, R57, R59). Таким об-

разом, замещение Ar на O_2 в условиях $u_{\text{CHF}_3} = \text{const}$ приводит к уменьшению суммарной скорости генерации атомов фтора ($4.5 \times 10^{15} - 2.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, или в ~ 2.3 раза при 0–50% O_2 , см. рис. 3а). В то же время, снижение концентраций CHF_x и CF_x обуславливает еще более резкое падение частот гибели атомов фтора в объемных (R35, R37, R42) и гетерогенных (R87–R90) процессах (рис. 3б). Данный эффект и является причиной роста концентрации атомов F , отмеченного на рис. 2. Аналогичным образом изменяется и плотность потока атомов на обрабатываемую поверхность Γ_{F} (рис. 4).

Известно, что при проведении процессов травления в плазме галогенсодержащих газов, ха-

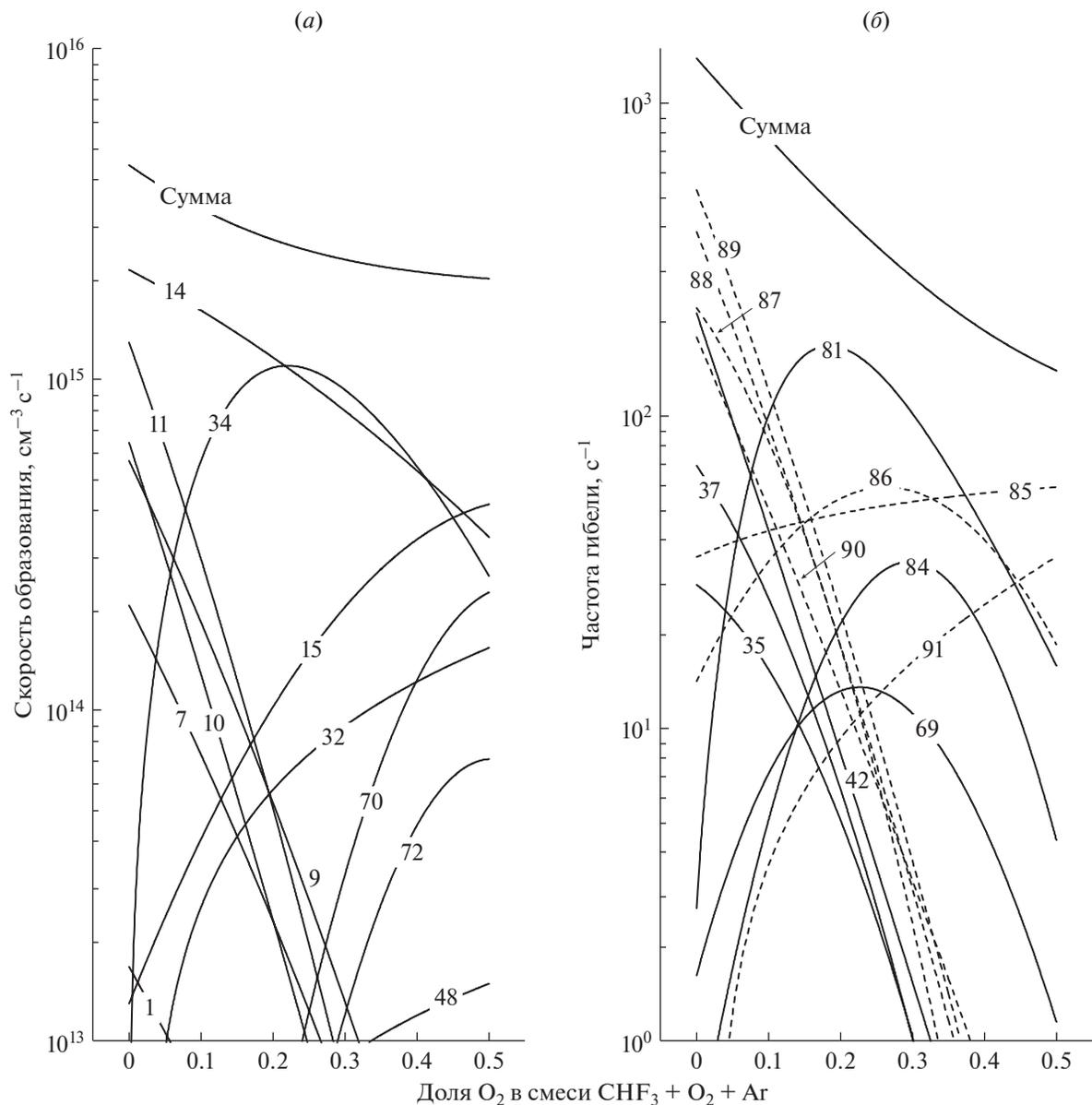


Рис. 3. Кинетика атомов фтора в плазме смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$: *a* – скорости процессов образования атомов фтора и суммарная скорость образования; *b* – частоты процессов гибели атомов фтора и суммарная частота гибели. Цифры на кривых соответствуют номерам реакций в табл. 1. Пунктиром показаны гетерогенные процессы.

рактически характер зависимости скорости травления от условий обработки определяется не только плотностью потока атомов галогенов, но зависит от ряда факторов, влияющих на эффективную вероятность взаимодействия атомов с обрабатываемой поверхностью [4]. Кроме температуры поверхности, во фторуглеродной плазме к таким факторам относят процессы, затрудняющие доступ атомов фтора к поверхностным активным центрам: образование труднолетучих продуктов взаимодействия и маскирование поверхности фторуглеродной полимерной пленкой. Предшествующие исследования механизмов ионно-стимулированной

химической реакции в полимеробразующей фторсодержащей плазме (например – [27–32]) могут быть обобщены в виде следующих положений:

1) Процессы взаимодействия ионов с поверхностью характеризуется скоростью $Y_S \Gamma_+$ [31, 32], где Y_S – выход процесса (атом/ион) и Γ_+ – плотность потока ионов. В диапазоне $\epsilon_i < 500$ эВ можно полагать, что $Y_S \sim \sqrt{m_i \epsilon_i}$ или $\sqrt{M_i \epsilon_i}$ [11–13], где $\epsilon_i = e| -U_f - U_{dc} |$ – энергия бомбардирующих ионов, $-U_f \approx 0.5 T_e \ln(m_e/2.3 m_i)$ – плавающий потенциал, $-U_{dc}$ – отрицательное смещение на под-

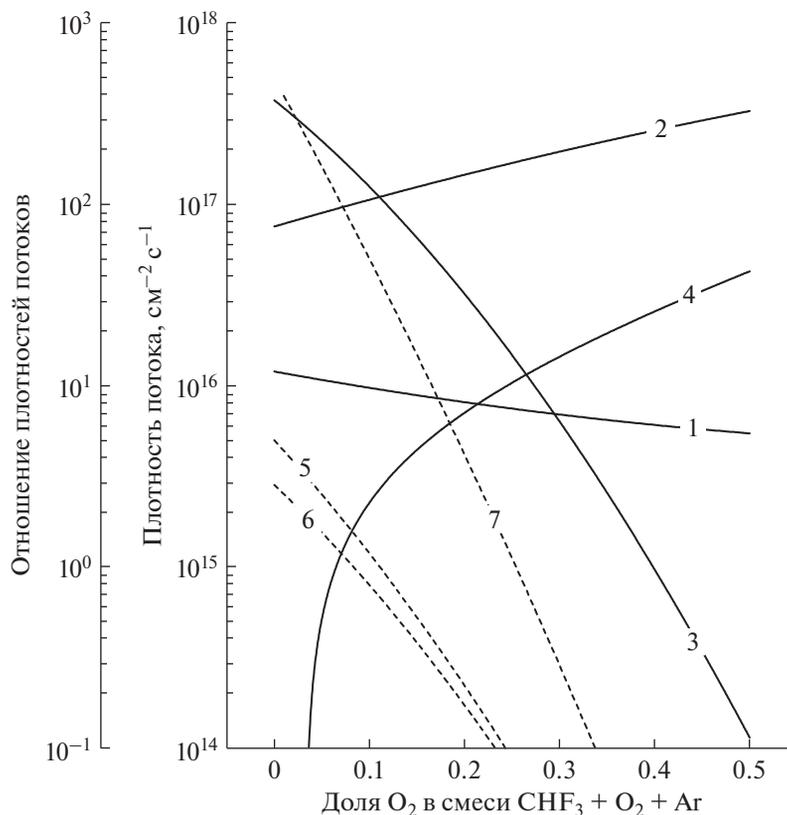


Рис. 4. Плотности потоков (сплошные линии) и отношения плотностей потоков (пунктир) активных частиц в плазме смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$: 1 – Γ_+ ; 2 – Γ_F ; 3 – $\Gamma_{pol} = \Gamma_{\text{CF}_2} + \Gamma_{\text{CF}} + \Gamma_{\text{CHF}}$; 4 – Γ_{O} ; 5 – Γ_{pol}/Γ_F ; 6 – $\Gamma_{pol}/\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ ($\times 10^{-17}$); 7 – $\Gamma_{pol}/\Gamma_F \Gamma_{\text{O}}$ ($\times 10^{-17}$).

ложкодержателе при $W_{dc} = \text{const}$, и M_i эффективная молярная масса ионов, определяемая аналогично m_i . Таким образом, изменение скорости любого ионного процесса при варьировании условий обработки отслеживается параметром $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ [12, 13].

2) Образование полимерной пленки обеспечивается C_xF_y радикалами с $x + y \leq 2$, при этом вероятность полимеризации увеличивается при снижении концентрации атомов фтора [27, 28]. Поэтому изменение скорости связывания радикалов с поверхностью отслеживается отношением Γ_{pol}/Γ_F , где Γ_{pol} – суммарная плотность потока полимеробразующих радикалов. Деструкция полимерной пленки происходит за счет ионного распыления и травления атомами кислорода [4, 30]. Таким образом, относительное изменение толщины пленки h_{pol} за счет действия физического и химического факторов характеризуется параметрами $\Gamma_{pol}/\sqrt{\epsilon_i} \Gamma_+$ и $\Gamma_{pol}/\Gamma_{\text{O}} \Gamma_F$ соответственно, где Γ_{O} – плотность потока атомов кислорода.

3) Скорость взаимодействия атомов фтора с обрабатываемой поверхностью определяется соотношением $\gamma_R \Gamma_F$, где γ_R – эффективная вероятность взаимодействия. При постоянной температуре поверхности можно полагать, что в области $h_{pol} < 2$ нм справедливо соотношение $\gamma_R \sim 1/h_{pol}$ [27].

Расчеты показали, что замещение Ag на O_2 в смеси $\text{CHF}_3 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ вызывает резкое снижение как плотности потока полимеробразующих радикалов $\Gamma_{pol} = \Gamma_{\text{CF}_2} + \Gamma_{\text{CF}} + \Gamma_{\text{CHF}}$ ($3.1 \times 10^{17} - 1.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, или в ~ 2000 раз при 0–50% O_2) из-за аналогичного изменения концентраций соответствующих частиц, так и параметра Γ_{pol}/Γ_F ($4.1 - 0.0005$, или в ~ 8000 раз при 0–50% O_2) (рис. 4). Данный факт однозначно свидетельствует о снижении полимеризационной нагрузки газовой фазы на контактирующие с ней поверхности. Существенное падение плотности потока ионов с ростом y_{O_2} не компенсируется ростом их энергии ($-U_{dc} = 190 - 254$ В и $\epsilon_i = 219 - 272$ эВ при 0–50% O_2 , см. рис. 1б), что обуславливает монотонное снижение параметра $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ ($1.8 \times 10^{17} - 8.8 \times$

$\times 10^{16}$ эВ^{1/2} см⁻² с⁻¹, или в ~2 раза при 0–50% O₂). Тем не менее, формальное снижение эффективности деструкции полимерной пленки по физическому механизму не означает роста толщины пленки на обрабатываемой поверхности. Во-первых, снижение $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ (фактически – плотности потока энергии ионов) с избытком компенсируется еще более резким падением полимеризационной активности газовой фазы. Соответственно, характер изменения отношения $\Gamma_{pol} / \sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+ \Gamma_F$ ($2.2 \times 10^{-17} - 5.3 \times 10^{-21}$ эВ^{-1/2} см² с при 0–50% O₂, см. рис. 4) однозначно свидетельствует о смещении баланса скоростей процессов осаждения и распыления полимерной пленки в направлении уменьшения ее толщины. И, во-вторых, рост плотности потока атомов кислорода обеспечивает увеличение скорости химической деструкции полимера, что также способствует снижению h_{pol} . Это подтверждается соответствующим изменением параметра $\Gamma_{pol} / \Gamma_O \Gamma_F$ (рис. 4).

На основании выше сказанного можно с достаточной степенью уверенности полагать, что замещение Ag на O₂ в смеси CHF₃ + O₂ + Ag сопровождается снижением h_{pol} . Предположение о пропорциональном характере изменения величин $\Gamma_{pol} / \sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+ \Gamma_F$ и $\Gamma_{pol} / \Gamma_O \Gamma_F$ с одной стороны и толщины полимерной пленки с другой, позволяет говорить о снижении h_{pol} до двух порядков величины при $y_{O_2} \sim 20\%$. Очевидно, что такая ситуация способствует протеканию процесса травления в кинетическом режиме при отсутствии определяющего влияния h_{pol} на эффективную вероятность взаимодействия атомов фтора. Фактически, это соответствует “классическому” режиму ионно-стимулированной химической реакции, в котором характер зависимости скорости травления от условий обработки формируется только изменениями Γ_F и $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$. На наш взгляд, использование более богатых кислородом смесей может вызвать ухудшение выходных характеристик процесса травления из-за увеличения отношения $\Gamma_F / \sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ (0.43–3.6 эВ^{-1/2} при 0–50% O₂), отражающего вклады спонтанного и ионно-стимулированного химического взаимодействия в общую скорость процесса. Согласно многочисленным экспериментальным данным [2, 3], более высокие значения параметра $\Gamma_F / \sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ отвечают низкой анизотропии травления и высокой шероховатости обработанных поверхностей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование электрофизических параметров плазмы, кинетики плазмохимиче-

ских процессов и стационарного состава газовой фазы в системе CHF₃ + O₂ + Ar с переменным соотношением компонентов O₂/Ar в условиях индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда. Показано, что в бескислородной системе CHF₃ + Ar выполняется условие $n_{HF} > n_{CF_x} > n_{CHF_x}$, которое обеспечивается эффективным протеканием процессов вида CHF_x + F → CF_x + HF, CHF_x + H → CHF_{x-1} + HF и CF_x + H → CF_{x-1} + HF. Установлено, что замещение аргона на кислород сопровождается резким снижением концентраций компонентов CHF_x и CF_x из-за их диссоциации при взаимодействии с атомами кислорода, а также ростом концентрации атомов фтора по причине снижения частоты гибели этих частиц в объемных процессах. При модельном анализе кинетики гетерогенных процессов подтверждено, что увеличение доли кислорода в плазмообразующей смеси приводит к снижению полимеризационной нагрузки газовой фазы на контактирующие с ней поверхности, а также вызывает резкое (до двух порядков величины при ~20% O₂) уменьшение толщины фторуглеродной полимерной пленки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-07-00804А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wolf S., Tauber R.N. Silicon Processing for the VLSI Era. Volume 1. Process Technology. Lattice Press, New-York, 2000. 416 p.
2. Rooth J.R. Industrial Plasma Engineering. IOP Publishing LTD. Philadelphia. 2001. 658 p.
3. Roosmalen A.J., Baggerman J.A.G., Brader S.J.H. Dry etching for VLSI. Plenum Press, New-York, 1991. 490 p.
4. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing. John Wiley & Sons Inc., New-York, 1994. 757 p.
5. Yeom G.Y., Kushner M.J. Si/SiO₂ etch properties using CF₄ and CHF₃ in radio frequency cylindrical magnetron discharges // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. P. 857–859.
6. Rossnagel S.M., Cuomo J.J., Westwood W.D. (Eds.). Handbook of plasma processing technology. Noyes Publications, ParkRidge, 1990. 338 p.
7. Cartry F.G., Peignon M.-C., Cardinaud Ch. Selective and deep plasma etching of SiO₂: Comparison between different fluorocarbon gases (CF₄, C₂F₆, CHF₃) mixed with CH₄ or H₂ and influence of the residence time // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. V. 20. P. 1514–1521.
8. Ho P., Johannes J.E., Buss R.J. Modeling the plasma chemistry of C₂F₆ and CHF₃ etching of silicon dioxide, with comparisons to etch rate and diagnostic data // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19. P. 2344–2367.
9. Bose D., Rao M.V.V.S., Govindan T.R., Meeyappan M. Uncertainty and sensitivity analysis of gas-phase chemistry in a CHF₃ plasma // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. P. 225–234.

10. Proshina O., Rakhimova T.V., Zotovich A., Lopaev D.V., Zyryanov S.M., Rakhimov A.T. Multifold study of volume plasma chemistry in Ar/CF₄ and Ar/CHF₃ CCP discharges // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. P. 075005.
11. Ефремов А.М., Мурин Д.Б., Кwon К.-Н. Параметры плазмы и кинетика активных частиц в смесях CF₄ (CHF₃) + Ar переменного начального состава // Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 6. С. 414–423.
12. Ефремов А.М., Мурин Д.Б., Кwon К.-Н. Особенности кинетики объемных и гетерогенных процессов в плазме смесей CHF₃ + Ar и C₄F₈ + Ar // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 2. С. 125–133.
13. Efremov A., Lee J., Kim J. On the control of plasma parameters and active species kinetics in CF₄ + O₂ + Ar gas mixture by CF₄/O₂ and O₂/Ar mixing ratios // Plasma Chem. Plasma Process. 2017. V. 37. P. 1445–1462.
14. Son J., Efremov A., Yun S.J., Yeom G.Y., Kwon K.-H. Etching characteristics and mechanism of SiN_x films for Nano-Devices in CH₂F₂/O₂/Ar inductively coupled plasma: Effect of O₂ mixing ratio // J. Nanosci. Nanotech. 2014. V. 14. P. 9534–9540.
15. Johnson E.O., Malter L. A floating double probe method for measurements in gas discharges // Phys. Rev. 1950. V. 80. P. 58–70.
16. Shun'ko V. Langmuir probe in theory and practice. Universal Publishers. Boca Raton. 2008. 245 p.
17. Caneses J.F., Blackwell B. RF compensation of double Langmuir probes: modelling and experiment. Plasma Sources Sci. Technol. 2015. V. 24. P. 035024.
18. Kwon K.-H., Efremov A., Kim M., Min N.K., Jeong J., Kim K. A model-based analysis of plasma parameters and composition in HBr/X (X = Ar, He, N₂) inductively coupled plasmas // J. Electrochem. Soc. 2010. V. 157. P. H574–H579.
19. Efremov A., Min N.K., Choi B.G., Baek K.H., Kwon K.-H. Model-based analysis of plasma parameters and active species kinetics in Cl₂/X (X = Ar, He, N₂) inductively coupled plasmas // J. Electrochem. Soc. 2008. V. 155. P. D777–D782.
20. Hsu C.C., Nierode M.A., Coburn J.W., Graves D.B. Comparison of model and experiment for Ar, Ar/O₂ and Ar/O₂/Cl₂ inductively coupled plasmas // J. Phys. D. Appl. Phys. 2006. V. 39. № 15. P. 3272–3284.
21. Lee B.J., Efremov A., Yang J.W., Kwon K.-H. Etching characteristics and mechanisms of MoS₂ 2D Crystals in O₂/Ar inductively coupled plasma // J. Nanosci. Nanotechnol. 2016. V. 16. № 11. P. 11201–11209.
22. Lim N., Efremov A., Yeom G.Y., Kwon K.-H. On the etching characteristics and mechanisms of HfO₂ thin films in CF₄/O₂/Ar and CHF₃/O₂/Ar Plasma for Nano-Devices // J. Nanosci. Nanotechnol. 2014. V. 14. № 12. P. 9670–9679.
23. NIST Chemical Kinetics Database. <https://kinetics.nist.gov/kinetics/welcome.jsp>
24. Christophorou L.G., Olthoff J.K. Fundamental electron interactions with plasma processing gases. Springer Science + Business Media. New York. 2004. 780 p.
25. Turban G., Grolleau B., Launay P., Briaud P. A mass spectrometric diagnostic of C₂F₆ and CHF₃ plasmas during etching of SiO₂ and Si // Revue Phys. Appl. 1985. V. 20. P. 609–620.
26. Takahashi K., Hori M., Goto T. Characteristics of fluorocarbon radicals and CHF₃ molecule in CHF₃ electron cyclotron resonance downstream plasma // Jpn. J. Appl. Phys. 1994. V. 33. P. 4745–4758.
27. Standaert T.E.F.M., Hedlund C., Joseph E.A., Oehrlein G.S. Role of fluorocarbon film formation in the etching of silicon, silicon dioxide, silicon nitride, and amorphous hydrogenated silicon carbide // J. Vac. Sci. Technol. A. 2004. V. 22. P. 53–60.
28. Stoffels W.W., Stoffels E., Tachibana K. Polymerization of fluorocarbons in reactive ion etching plasmas // J. Vac. Sci. Tech. A. 1998. V. 16. P. 87–95.
29. Kay E., Coburn J., Dilks A. Plasma chemistry of fluorocarbons as related to plasma etching and plasma polymerization. In: Veprek S., Venugopalan M. (eds) Plasma Chemistry III. Topics in Current Chemistry. V. 94. Springer, Berlin, Heidelberg. 1980.
30. Jansen M., Gardeniers H., de Boer M., Elwenspoek M., Fluitman J. A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology // J. Micromech. Microeng. 1996. V. 6. P. 14–28.
31. Gray D.C., Tepermeister I., Sawin H.H. Phenomenological modeling of ion enhanced surface kinetics in fluorine-based plasma etching // J. Vac. Sci. Technol. B. 1993. V. 11. P. 1243–1257.
32. Lee C., Graves D.B., Lieberman M.A. Role of etch products in polysilicon etching in a high-density chlorine discharge // Plasma Chem. Plasma Proc. 1996. V. 16. P. 99–118.