

УДК 537.525

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ВЧ ПЛАЗМЕ CHF_3 МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2023 г. Д. Б. Мурин¹, *, И. А. Чесноков¹, С. А. Пивоваренок¹, А. М. Ефремов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Ивановский государственный химико-технологический университет”, Иваново, 153000 Россия

*E-mail: dim86@mail.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

С помощью метода оптической эмиссионной спектроскопии проведены исследования процессов плазмохимического и реактивно-ионного травления кремния в среде трифторметана (CHF_3). Получены и проанализированы зависимости интенсивностей излучения атомов и молекул от времени травления, вкладываемой мощности и давления плазмообразующего газа.

Ключевые слова: плазма, озонобезопасные фреоны, диагностика, активные частицы, травление, спектральный контроль, интенсивности излучения, трифторметан, кремний

DOI: 10.31857/S054412692270020X, **EDN:** CYGNIE

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии электроники во второй половине 20 века привело к необходимости поиска эффективной альтернативы жидкостным методам размерного травления и очистки поверхностей, используемых материалов. Выбор был сделан в пользу технологий, основанных на использовании неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазмы. Основной областью применения плазменных процессов в современной технологии микро- и нанoeлектроники является травление поверхностей полупроводниковых пластин и различных слоев [1]. Под термином “плазменное травление” понимают контролируемое удаление материала с поверхности подложки под воздействием энергетически (ЭАЧ) и химически активных частиц (ХАЧ) плазмы. В зависимости от типов активных частиц, обеспечивающих взаимодействие плазмы с обрабатываемым материалом, процессы плазменного травления подразделяются на три группы [2]: 1) процессы, при которых удаление поверхностных слоев материала происходит в результате химических реакций активных частиц (свободных атомов, радикалов, ионов), так называемое плазмохимическое травление (ПХТ); 2) удаление материала с поверхности происходит в результате физического распыления ионами, которые химически не реагируют с обрабатываемым материалом – ионно-плазменное (ИПТ) травление; 3) процессы, сочетающие совместное воздействие физического распыления и химических реакции (в том числе с химически

активными ионами) – реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ).

Характерной чертой современной технологии плазменного травления является использование сложных газовых систем. В таких системах реализуется комплексное воздействие плазмы на обрабатываемый материал с участием нескольких типов активных частиц и, как следствие, с одновременной реализацией нескольких каналов физического и/или химического взаимодействия. Это открывает возможности гибкой настройки и оптимизации выходных параметров процесса. Так, озонобезопасные газовые системы типа $\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$ (а также их смеси с инертными и молекулярными газами): CF_4 , CHF_3 , CH_2F_2 , CH_3F – являются перспективными плазмообразующими средами при проведении процессов травления полупроводников, в частности кремния [3–7]. Основной целью использования подобных систем является получение свободных атомов галогенов и галогенсодержащих радикалов, которые, обладая высокой химической активностью, позволяют достигать более высоких значений скоростей травления, селективности и анизотропии процесса при формировании топологии микросхем по сравнению с известными жидкостными травителями. В частности, атомарный фтор (F) приводит к непосредственному травлению проводниковых и полупроводниковых материалов, а роль частиц водорода (H), в основном, сводится к восстановлению поверхностных оксидов и/или так называемому “полирующему травлению” обрабатываемой поверхности [8]. Эффек-

тивная реализация и оптимизация плазменных процессов требует знания взаимосвязей между внешними параметрами плазмы, ее параметрами и составом. Одним из основных невозмущающих методов получения такой информации является оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) плазмы [9–12]. Исходя из вышесказанного, и была сформулирована цель данной работы, а именно: контроль кинетики плазмохимического травления по излучению активных частиц и продуктов взаимодействия методом ОЭС.

2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по исследованию параметров плазмы проводились в реакторе индукционно-связанной плазмы (ICP) планарного типа: установка “Платран – 100 ХТ” (13.56 МГц). Данная установка предназначена для плазмохимического травления полупроводниковых материалов, а также металлических пленок. Установка обеспечивает возможность обработки пластин диаметром до 100 мм, а также меньших размеров толщиной от 0.3 до 2 мм. Откачка системы производилась механическим пластинчато-роторным (Leybold VCS, производительность 30 м³/час) и турбомолекулярным (TMP 803 LMTC, производительность 800 л/с) насосами. Контроль рабочего давления в реакторе осуществлялся баратроном с верхним пределом измерения 0.1 Торр. Измерение и контроль расхода плазмообразующего газа проводились при помощи расходомеров с верхним пределом 200 см³/мин. Система контроля температуры предусматривает возможность автоматической стабилизации температуры подложки за счет регулирования скорости потока охлаждающей жидкости.

В качестве плазмообразующего газа в данной работе использовался трифторметан (фреон R-23, CHF₃). Фреон R-23 брали из баллонов с маркой “чистый” (МРТУ 51–77–66), содержание основного газа не менее 99.985%. В качестве внешних (задаваемых) параметров плазмы выступали вкладываемая мощность (200–1250 Вт), потенциал смещения (0...–107 В), давление газа (1–10 мТорр).

Время травления (обработки) варьировалось от 40 с до 3 минут. Образцы исследуемого полупроводникового материала вырезались из кремниевой пластины ($S \sim 1 \text{ см}^2$). До помещения в реактор поверхность образцов очищалась от масляных, пылевых и жировых загрязнений в толуоле и ацетоне. Скорость травления определялась гравиметрическим методом, путем взвешивания образцов до и после обработки в плазме на аналитических весах WA–34.

Спектральные измерения реализовывались с помощью оптоволоконных спектрометров AvaSpec–2048 и AvaSpec–3648, рабочий диапазон длин волн составлял 200–1000 нм. Фиксация

излучения осуществлялась через кварцевое окно в плазмохимическом реакторе. При расшифровке спектров излучения использовались справочники [13, 14].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод оптической эмиссионной спектроскопии основан на регистрации излучения плазмы в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Одним из необходимых условий использования данного метода является точная идентификация спектра излучения исследуемого газа и установление механизмов образования и гибели излучающих состояний частиц. Основной сложностью при интерпретации результатов спектральных измерений является неоднозначная взаимосвязь измеряемых интенсивностей излучения и концентраций соответствующих частиц в основном состоянии.

Перед исследованием процесса травления Si нами были получены спектры излучения ВЧ-плазмы “чистого газа” фреона R-23 (рис. 1). Было обнаружено, что в спектре присутствует группа линий атомарного фтора в области 620–780 нм (наиболее интенсивными являются линии: 623.9, 685.6, 690.2, 703.7, 739.8 и 775.4 нм). Излучения атомарного H представлено 4-мя характерными линиями серии Бальмера: H_α (656.5 нм), H_β (486.1 нм), H_γ (434.1 нм), H_δ (410.1 нм). Также были зафиксированы две группы линий атомарного углерода (200–300 и 900–1000 нм), наиболее интенсивными линиями являются: 247.8, 296.8, 477.1, 505.2, 909.4 и 940.5 нм соответственно. Излучение молекулярных компонентов представлено полосами CF в интервале от 203 до 230 нм, из которых можно выделить: 202.9, 208.3, 223.8 и 230.8 нм, CF₂ в интервале от 251 до 276 нм, наиболее интенсивными являются: 251.8, 259.5 и 276.1 нм. Спектр излучения молекул водорода представлен слабо интенсивными полосами α-системы Фулхера (575–625 нм). Излучение молекул углерода представлено тремя системами полос Свана (468.4, 471.5, 473.7; 512.9, 516.5; 547.0, 550.2, 554.0, 558.5 и 563.5 нм). Излучение молекулы CN представлено полосой 431.4 нм. Излучение молекулярного фтора представлено полосой 538.8 нм. Ионный состав плазмы фреона R-23 представлен излучением компонента CN⁺ с длиной волны 443.4 нм.

Кроме этого, в спектре излучения плазмы фреона R-23 была обнаружена полоса с длиной волны 388.3 нм. Был проведен сравнительный анализ спектров излучения фреонов R-12 и R-23, в результате которого было установлено, что вид, отенение и интенсивность полосы 388.3 нм при наложении спектров трифторметана и дифтордихлорметана друг на друга практически идентичны. Исходя из состава плазмообразующих газов (CHF₃

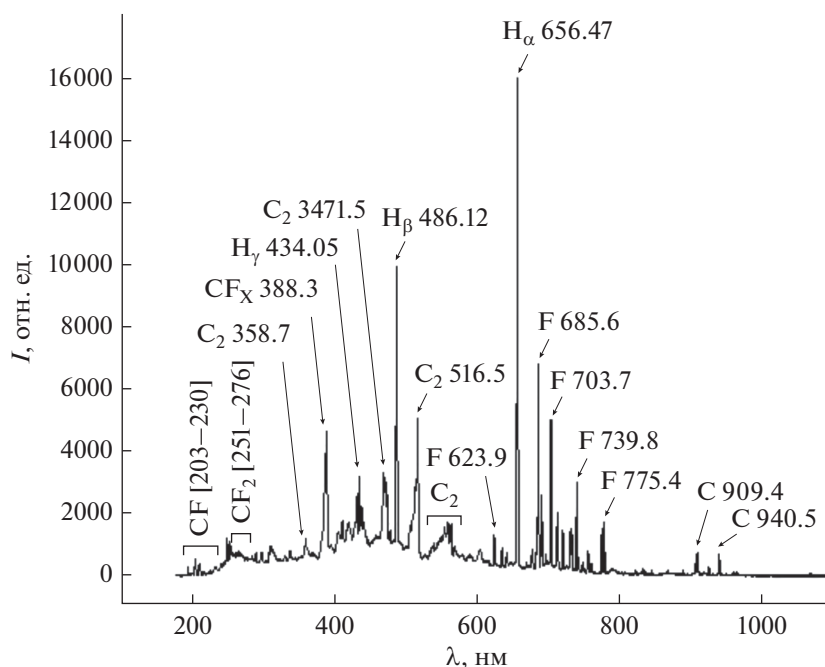


Рис. 1. Спектр излучения ВЧ-плазмы CHF_3 ($p = 2.8$ мТорр, $W = 950$ Вт, $U = 0$ В).

и CF_2Cl_2), можно предположить, что данная полоса относится к молекулярному углероду, либо к фторидам углерода (CF_n , где $n = 1, 2, 3$). Известно, что молекулярный углерод не имеет полосы в данной области спектра. Таким образом, можно предположить, что полоса с длиной волны излучения 388.3 нм принадлежит CF_n (где $n = 1, 2, 3$), хотя, возможно, согласно работы [15] – это может быть молекулярный фтор. Полный список обнаруженных компонентов представлен в табл. 1 и 2.

Следующим этапом работы являлось исследование спектров излучения ВЧ-плазмы фреона R-23 при травлении кремния. Кроме линий атомов и полос молекул характерных для ВЧ-плазмы “чистого” фреона R-23, были обнаружены группы линий атомарного кремния (наиболее интенсивная 288.1 нм), а также полосы излучения SiF в интервале от 258.4 до 336.3 нм. Так же в спектре излучения были зафиксированы полосы молекулярного кремния (в интервале 348–400 нм) и полосы SiH (418.3, 419.9 нм), однако их не удалось проанализировать вследствие слабой интенсивности.

Для анализа влияния внешних параметров разряда на концентрации нейтральных частиц плазмы и кинетику процессов их образования и гибели были выбраны атомарные линии: C (247.8 нм), Si (288.1 нм), H (486.1 нм, 656.5 нм), F (685.6 нм, 703.7 нм) и полосы молекул: CF (202.9 нм), SiF (336.3 нм), CF (388.3 нм), CH (431.4), C₂ (516.5 нм), CF₂ (262.8 нм), F₂ (538.8 нм). Данные излучательные состояния обладают высокой интенсивностью и не перекрываются с соседними

максимумами во всем исследованном диапазоне параметров разряда. Также заметим, что высокие значения энергий возбуждения данных частиц позволяют рассматривать возбуждение электронным ударом как основной механизм заселения верхних состояний. Кроме этого, низкие времена жизни возбужденных состояний обуславливают излучательную дезактивацию как основной механизм гибели возбужденных частиц. Фактически это означает, что для вышеописанных излучательных состояний заселенность возбужденного состояния и интенсивность излучения пропорциональны скорости возбуждения. Следовательно, изменение интенсивности излучения несет информацию об изменении концентрации возбужденных частиц, представляющих основной интерес при анализе и оптимизации плазмохимических процессов с использованием газовых смесей на основе CHF_3 . Также отметим, что в ходе проведения экспериментов было установлено, что целевой процесс травления кремния (появление продуктов взаимодействия плазмы с кремнием) начитается по истечении 40 с. Причиной данного индукционного периода является необходимость удаления активными частицами плазмы пассивирующей пленки SiO_2 ($\text{SiO}_2 + \text{CF}_x \rightarrow \text{SiF}_4 + (\text{CO}, \text{CO}_2, \text{COF}_2)$). Уменьшение индукционного периода возможно при использовании потенциала смещения на подложкодержателе.

Из экспериментальных данных видно (рис. 2), что интенсивности излучения при увеличении времени травления кремния практически не изменя-

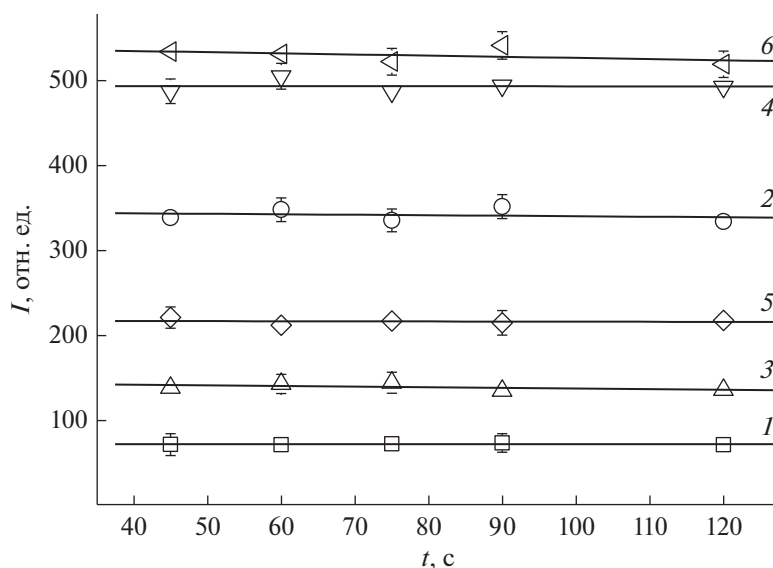


Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения линии Si 288.1 нм (1, 3, 5) и полосы SiF 336.3 нм (2, 4, 6) плазмы CHF_3 от времени травления кремния: $p = 2.8$ мТорр, $W = 950$ Вт, $U = 0$ В (1, 2), $U = -61$ В (2, 3), $U = -107$ В (4, 5).

Таблица 1. Атомарные излучающие состояния ВЧ-плазмы CHF_3 при травлении кремния

Элемент	Длина волны, нм	Переход	ϵ_{th} , эВ	Элемент	Длина волны, нм	Переход	ϵ_{th} , эВ	
C	247.8	$1P_1^{\circ} - 1S_0$	7.68	F	703.7	$2P_{3/2}^{\circ} - 2P_{3/2}$	14.746	
	296.8	$5S_2^{\circ} - 3P_2$	4.18		712.7	$2P_{1/2}^{\circ} - 2P_{1/2}$	14.764	
	477.1	$3P_2 - 3P_2^{\circ}$	10.08		720.2	$2P_{3/2}^{\circ} - 2P_{1/2}$	14.746	
	493.2	$1S_0 - 1P_1^{\circ}$	10.19		731.1	$2S_{1/2}^{\circ} - 2P_{3/2}$	14.68	
	505.2	$1D_2 - 1P_1^{\circ}$	10.13		733.1	$4P_{3/2}^{\circ} - 4P_{5/2}$	14.387	
	538.0	$1P_1 - 1P_1^{\circ}$	9.98		739.8	$4P_{5/2}^{\circ} - 4P_{5/2}$	14.372	
	833.5	$1S_0 - 1P_1^{\circ}$	9.17		742.5	$4P_{1/2}^{\circ} - 4P_{3/2}$	14.399	
	906.2	$3P_1 - 3P_0^{\circ}$	8.85		748.9	$2S_{1/2}^{\circ} - 2P_{1/2}$	14.68	
	909.4	$3P_2 - 3P_2^{\circ}$	8.85		755.2	$4P_{5/2}^{\circ} - 4P_{3/2}$	14.371	
	911.1	$3P_1 - 3P_2^{\circ}$	8.85		760.7	$2D_{3/2}^{\circ} - 2P_{3/2}$	14.387	
	940.5	$1D_2 - 1P_1^{\circ}$	9.00		775.4	$2D_{5/2}^{\circ} - 2P_{3/2}$	14.583	
	962.0	$3S_1 - 3P_1^{\circ}$	8.77		780.1	$2D_{3/2}^{\circ} - 2P_{1/2}$	14.614	
	965.8	$3S_1 - 3P_2^{\circ}$	8.77		H	397.01	$2P_{1/2}^{\circ} - 2S_{1/2}$	13.32
	F	623.9	$4S_{3/2}^{\circ} - 4P_{5/2}$			14.683	410.17	$2D_{5/2} - 2S_{1/2}$
634.8		$4S_{3/2}^{\circ} - 4P_{3/2}$	14.683	434.05		$2D_{5/2} - 2P_{3/2}^{\circ}$	13.05	
641.3		$4S_{3/2}^{\circ} - 4P_{1/2}$	14.683	486.12		$2D_{5/2} - 2P_{3/2}^{\circ}$	12.74	
677.3		$4D_{5/2}^{\circ} - 4P_{5/2}$	14.526	656.47	$2P_{1/2}^{\circ} - 2S_{1/2}$	12.08		
683.4		$4D_{3/2}^{\circ} - 4P_{3/2}$	14.544	Si	250.6	$3P_2^{\circ} - 3P_1$	4.95	
685.6		$4D_{7/2}^{\circ} - 4P_{5/2}$	14.504		251.6	$3P_2^{\circ} - 3P_2$	4.95	
690.2		$4D_{5/2}^{\circ} - 4P_{3/2}$	14.526		252.4	$3P_0^{\circ} - 3P_1$	4.92	
696.6		$2P_{1/2}^{\circ} - 2P_{3/2}$	14.764		288.1	$1P_1^{\circ} - 1D_2$	5.08	

ются во всем исследованном диапазоне. Такое поведение полученных зависимостей обусловлено постоянством параметров разряда и хорошо согласуется с литературными данными [16–18]. В то же время, интенсивности излучения продуктов травления Si линейно возрастают (в ~3 раза) с увеличением потенциала смещения от 0 до –107 В. Это связано с тем, что увеличение смещения на подложкодержателе приводит к росту энергии заряженных частиц, участвующих в процессе травления (за счет появления направленного потока ионов на обрабатываемую поверхность) и, как результат, увеличению скорости травления, а также к эффективной газификации продуктов взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

Изменение мощности, вкладываемой в разряд, и потенциала смещения, подаваемого на подложкодержатель, приводит к росту всех интенсивностей излучательных компонентов (например, Si и SiF рис. 3). Это приводит к росту концентрации активных частиц (например, водорода и фтора), что в свою очередь способствует увеличению скорости травления. Заметим, что при отсутствии смещения (0 В) интенсивности излучения линий Si и полос SiF имеют слабый рост, это связано с недостатком энергии ионов для достижения эффективной скорости ионно-стимулированной десорбции продуктов взаимодействия и деструкции пассивирующей пленки. Причинами слабого роста интенсивностей излучения полос CF 202.9 нм, CF₂ 262.8 нм, F₂ 538.8 нм и линии C 247.8 нм с увеличением вкладываемой мощности в разряд могут являться атомно-молекулярные процессы с участием данных радикалов или же эффективное расходование CF, CF₂ и F₂ в процессах диссоциации.

Из рис. 4 видно, что зависимости интенсивности излучения линии Si 288.1 нм (1, 3, 5) и полосы SiF 336.3 нм (2, 4, 6) от давления плазмообразующего газа при всех исследуемых потенциалах смещения возрастают. Такое поведение зависимостей с ростом давления в системе и смещения на подложкодержателе связано с ростом как концентрации активных частиц, так и их энергии, следовательно, это приведет к увеличению скорости травления. Увеличение концентрации активных частиц также можно объяснить исходя из уравнения Менделеева-Клапейрона, из которого следует, что увеличение давления, при прочих постоянных параметрах, приводит к росту числа активных частиц. На рис. 5 представлены зависимости интенсивности излучения полос CF 202.9 нм, SiF 336.3 нм, CH 431.4 нм, CF₂ 262.8 нм, F₂ 538.8 нм в плазме CHF₃ при травлении кремния от давления плазмообразующего газа. На зависимостях видно, что с увеличением давления газа происходит рост интенсивности излучения SiF, CH и F₂. Данный факт обусловлен увеличением как концентрации активных частиц, участвующих в процес-

Таблица 2. Молекулярные излучающие состояния ВЧ-плазмы CHF₃ при травлении кремния

Частица	Длина волны, нм	Переход	ϵ_{th} , эВ
CF	202.9	B ² Δ – X ² Π	–
	208.3		
	213.4		
	230.8		
	239.9		
CF _x	388.3	–	–
CF ₂	251.8	–	–
	255.0		
	259.5		
	262.8		
	328.8		
CH	431.4	A ² Δ – X ² Π	–
CH ⁺	443.38	A ¹ Π – X ¹ Σ	–
F ₂	538.8	C ¹ Σ^+ – B ¹ Π	–
H ₂	583.6	a ³ Σ_g^- – a ³ Π_u^-	13.9
	584.9		13.9
	588.8		13.9
	599.4		13.9
	601.8		13.9
	603.1		13.9
	606.9		13.9
	612.1		13.9
	616.1		13.9
C ₂	358.7	c ¹ Π_g – b ¹ Π_u	–
	360.7		–
	385.2		–
	436.5	A ³ Π_g – X ³ Π_u	–
	468.4		–
	471.5		–
	473.7		–
	512.9		–
	516.5		–
	547.0		–
	550.2		–
	554.0		–
	558.5		–
	563.5		–
	SiF		258.4
296.7		B ² Σ^+ – X ² Π	–
334.6		a ⁴ Σ^- – X ² Π	–
336.3			–
SiH	418.3	A ² Δ – X ² Π	–
	419.8		–

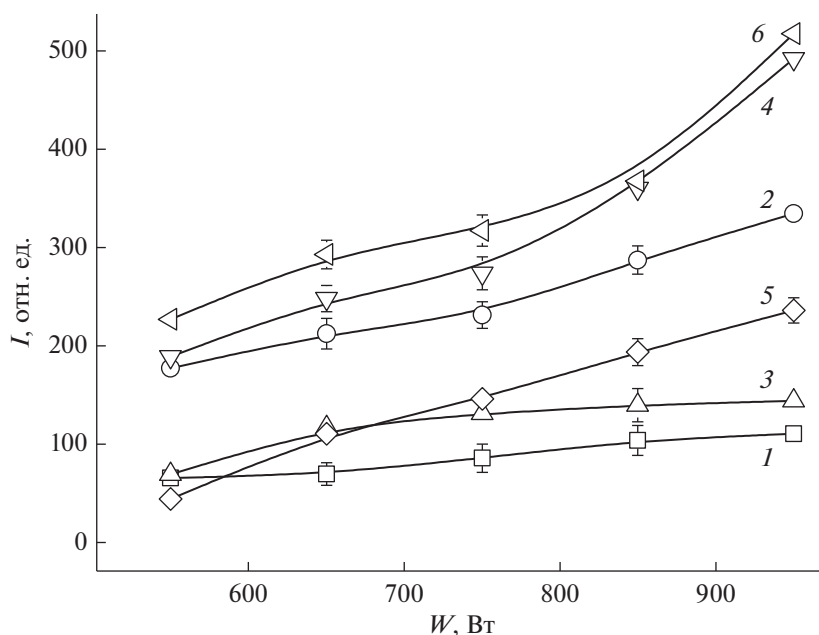


Рис. 3. Зависимости интенсивности излучения линии Si 288.1 нм (1, 3, 5) и полосы SiF 336.3 нм (2, 4, 6) в плазме CHF_3 от мощности, вкладываемой в разряд, при травлении кремния ($p = 2.8$ мТорр, $W = 950$ Вт, $U = 0$ В (1, 2), $U = -61$ В (3, 4), $U = -107$ В (5, 6)).

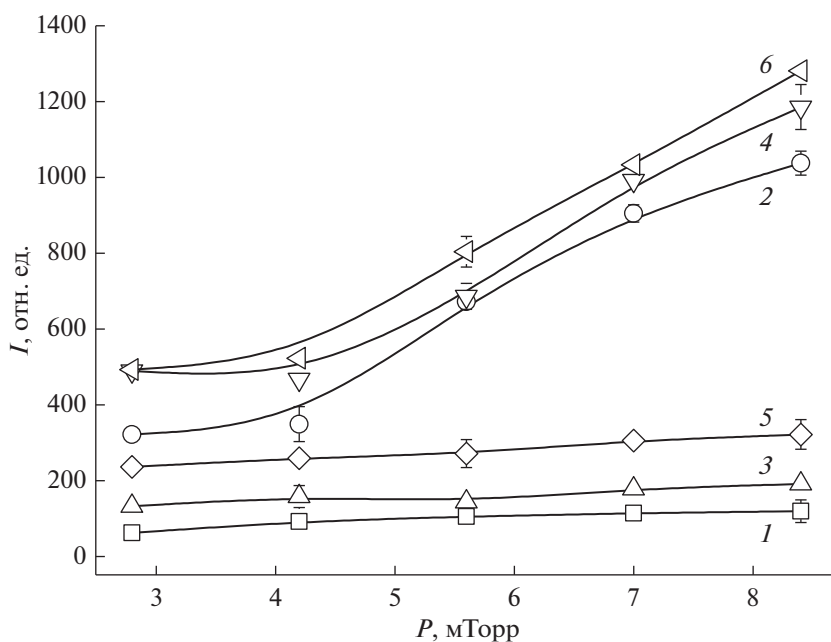


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения линии Si 288.1 нм (1, 3, 5) и полосы SiF 336.3 нм (2, 4, 6) в плазме CHF_3 от давления плазмообразующего газа при травлении кремния ($\tau = 60$ с, $W = 950$ Вт, $U = 0$ В (1, 2), $U = -61$ В (2, 3), $U = -107$ В (4, 5)).

се травления, так и общей концентрации частиц в объеме плазмы. Характер поведения зависимостей интенсивностей излучения CF и CF_2 можно связать с их гибелью в различных атомно-молекулярных процессах, происходящих в объеме плазмы или на поверхности обрабатываемого материала.

На рис. 6 представлены зависимости интенсивности излучения линий C 247.8 нм (1), Si 288.1 нм (2), H_α 656.5 нм (3), F 685.6 нм (4) в плазме CHF_3 при травлении кремния от давления плазмообразующего газа. Уменьшение интенсивности излучения H_α 656.5 и F 685.6 нм может быть связана с

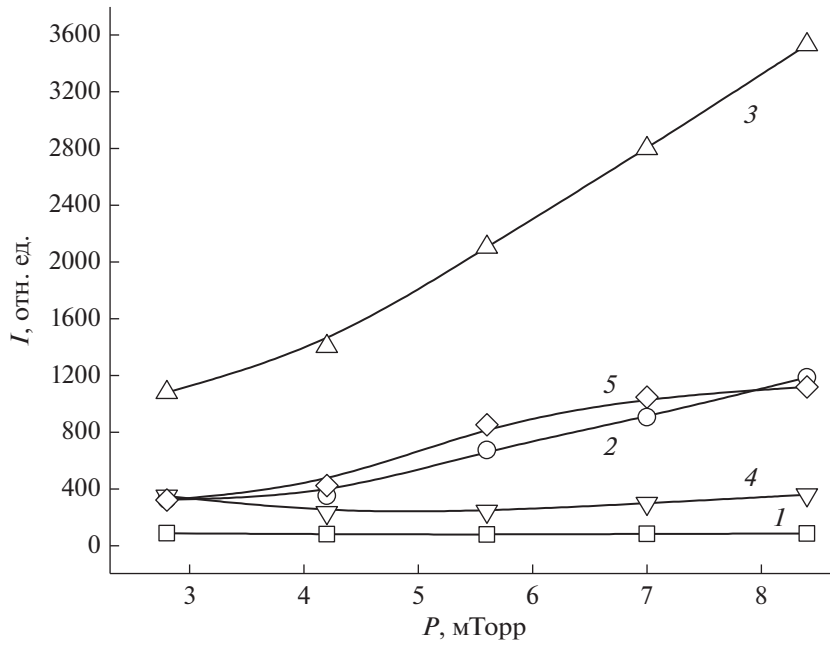


Рис. 5. Зависимости интенсивности излучения полос CF 202.9 нм (1), SiF 336.3 нм (2), CH 431.4 нм (3), CF₂ 262.8 нм (4), F₂ 538.8 нм (5) в плазме CHF₃ от давления плазмообразующего газа при травлении кремния ($\tau = 60$ с, $W = 950$ Вт, $U = 0$ В).

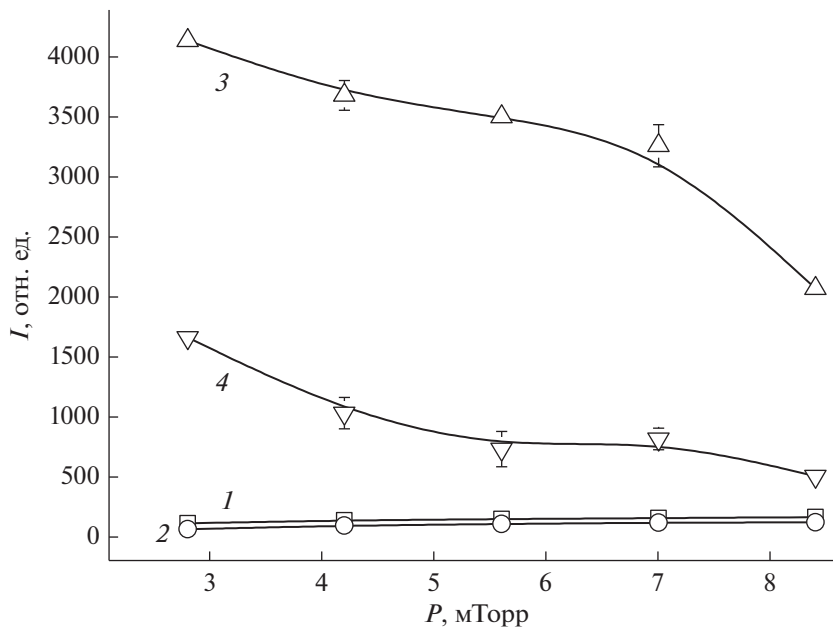


Рис. 6. Зависимости интенсивности излучения линий C 247.8 нм (1), Si 288.1 нм (2), H α 656.5 нм (3), F 685.6 нм (4) в плазме CHF₃ от давления плазмообразующего газа при травлении кремния ($\tau = 60$ с, $W = 950$ Вт, $U = 0$ В).

тем, что данные частицы расходуются на образование фторидов кремния и углерода, а также частиц типа CH_x (что подтверждается данными рис. 5, зависимость 3) как в объеме плазмы, так и на поверхности обрабатываемого материал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы получены и проанализированы спектры излучения плазмы ВЧ-разряда трифторметана при травлении кремния. Показано, что излучение плазмы ВЧ-разряда представ-

лено атомарными и молекулярными компонентами. Сделано предположение, что зависимости интенсивностей линий и полос от внешних условий разряда определяются возбуждением излучающих состояний при прямых электронных ударах. Получены и проанализированы зависимости интенсивностей излучения атомов и молекул от внешних параметров разряда. Полученные данные вносят вклад в развитие современной плазмохимии, а именно устанавливают взаимосвязи между внешними параметрами плазмы, ее внутренними характеристиками и составом; предлагают оптимальные режимы проведения процессов плазмохимического и реактивно-ионного травления и организации невозмущающих спектральных методов контроля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00216, <https://rscf.ru/project/22-29-00216/>.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР. Тема № FZZW-2020-0009.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галперин В.А., Данилкин Е.В., Мочалов А.И.* Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях / Под ред. Тимошенко С.П. М.: БИНОМ, 2018. 283 с.
2. *Данилин Б.С., Киреев В.Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Под ред. Данилин Б.С. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
3. *Glauco F. Bauerfeldt, Graciela Arbillá.* Kinetic analysis of the chemical processes in the decomposition of gaseous dielectrics by a non-equilibrium plasma – Part 1: CF₄ and CF₄/O₂// J. Braz. Chem. Soc. 2000. V. 11. № 2. P. 121.
4. *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.
5. *Rossnagel S.M., Cuomo J.J., Westwood W.D. (Eds.).* Handbook of plasma processing technology. Noyes Publications, Park Ridge, 1990. 338 p.
6. *Ситанов Д.В., Пивоваренок С.А.* Кинетика рекомбинации атомов в плазме хлора на образцах кремния // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 8. С. 624–634.
7. *Gaboriau F., Cartry 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. *Пивоваренок С.А., Дунаев А.В., Ефремов А.М., Светцов В.И.* Плазменное наноразмерное травление GaAs в хлоре и хлороводороде // Нанотехника. 2011. № 1 (25). С. 69–71.
9. *Пивоваренок С.А., Дунаев А.В., Мурин Д.Б., Ефремов А.М., Светцов В.И.* Электрофизические параметры и эмиссионные спектры плазмы тлеющего разряда в хлористом водороде // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. № 9. С. 48–52.
10. *Дунаев А.В., Пивоваренок С.А., Капинос С.П., Ефремов А.М., Светцов В.И.* Спектральный контроль процесса травления арсенида галлия в хлороводороде // Нанотехника. 2012. № 1 (29). С. 93–95.
11. *Мурин Д.Б., Ефремов А.М., Светцов В.И., Пивоваренок С.А., Годнев Е.М.* Интенсивности излучения и концентрации нейтральных частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока в смесях HCl–H₂ и HCl–O₂ // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 8. С. 41–44.
12. *Мурин Д.Б., Ефремов А.М., Светцов В.И., Пивоваренок С.А., Овцын А.А., Шабдаров С.С.* Интенсивности излучения и концентрации активных частиц в плазме тлеющего разряда в смесях хлористого водорода с аргонном и гелием // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 4. С. 29–32.
13. *Пирс Р., Гейдон А.* Отождествление молекулярных спектров. М.: Изд. иностр. лит., 1949. 540 с.
14. *Свентицкий А.Р., Стриганов Н.С.* Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 900 с.
15. *DU Wei, YE Chao, CHENG Shan-hua, NING Zhao-yuan* // Plasma Science & Technology. 2002. V. 4. № 6. P. 1535.
16. *Ефремов А.М., Дунаев А.В., Мурин Д.Б.* Параметры плазмы и кинетика травления GaAs в газовых смесях HCl с добавками Ar, H₂ и Cl₂ переменного начального состава // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 6. С. 52–61.
17. *Дунаев А.В., Мурин Д.Б.* Исследование травления арсенида галлия в разряде постоянного тока в хлороводород содержащих смесях при низком давлении // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 4. С. 390–396.
18. *Пивоваренок С.А., Мурин Д.Б.* Кинетика травления кремния в плазме трифторметана // Химия высоких энергий. 2022. Т. 56. № 3. С. 223–226.