

УДК 533.9

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКСИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ НА СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С SF_6 и CCl_4

В. С. Рогович, В. П. Стародуб, В. С. Шеверя

Экспериментально исследовано образование монофторидов и монохлоридов криптона и ксенона в непрерывной плазменной струе на смешении инертных газов с молекулами SF_6 и CCl_4 . Измерены абсолютные концентрации молекул KrF^* , XeF^* , $KrCl^*$ и $XeCl^*$ в струе. Показано, что энергетический КПД преобразования вводимой в дуговой разряд удельной мощности в спонтанное излучение $B \rightarrow X$ — полосы KrF^* достигает величины 2—4%. Анализируются пути повышения концентраций эксимерных молекул в плазменной струе.

О возбуждении эксимерных молекул в непрерывной плазменной струе на смесях инертных газов с электроотрицательными молекулами SF_6 и CCl_4 сообщалось нами в работах [1, 2]. Такие исследования представляют интерес в связи с проблемой создания непрерывных плазмодинамических лазеров ультрафиолетового диапазона.

Основная особенность исследуемых в настоящей работе плазменных струй состоит в том, что за соплом происходит охлаждение электронов до температур $T_e \leq 0.2$ эВ, и в такой плазме наряду с процессами электрон-ионной рекомбинации могут эффективно протекать процессы прилипания электронов к галогенсодержащим молекулам с образованием отрицательных ионов. Последние могут участвовать в процессе трехчастичной рекомбинации с положительными ионами тяжелых инертных газов и приводить к образованию эксимерных молекул.

В выполненных нами ранее исследованиях [1, 2] смешение плазмы инертных газов с молекулами SF_6 и CCl_4 осуществлялось в пространстве между анодом и соплом (предсопловой камере). Максимально достигнутые концентрации эксимерных молекул были получены для KrF^* и составили $\sim 10^{10}$ см $^{-3}$ в $B^2 \Sigma^+_{1/2}$ -состоянии. Однако на том этапе исследований не были оптимизированы условия образования эксимерных молекул в плазменной струе.

Целью настоящих экспериментальных исследований является выяснение возможности повышения концентраций монофторидов и монохлоридов инертных газов в плазменной струе путем оптимизации условий их образования по месту введения в струю электроотрицательных газов, компонентному составу галогенсодержащих смесей и вводимой в источник плазмы мощности.

Эксперименты проводились на плазмотронной установке, описанной в [1, 3]. Источником плазмы служил плазмотрон постоянного тока с газовыхревой стабилизацией дуги. В качестве плазмообразующих газов использовались аргон и гелий. Диапазон изменения тока дуги составлял 50—220 А, а напряжения 15—40 В. Схема источника плазмы и смешения газов представлена на рис. 1. В данных экспериментах ввод электроотрицательных газов SF_6 и CCl_4 в область свободного расширения струи осуществлялся на расстоянии $l=6$ мм от среза сопла (рис. 1, б) с помощью специальной кольцевидной камеры б через трубки внутренних диаметров ~ 1 мм. Ранее в исследованиях [1, 2] электроотрицатель-

ные газы вводились в плазму по варианту *a* (рис. 1). Расходы газов контролировались с помощью ротаметров типа РМ и РС, а статическое давление в дуговой и предсопловой камере измерялось образцовыми вакуумметрами. Для измерения парциальных давлений SF_6 и CCl_4 применялся U-образный масляный манометр. Температура газа T_g в предсопловой камере в зависимости от режима работы плазмотрона и использования дуговых каналов различной длины изменялась в пределах 2000—3000 К. В экспериментах использовались цилиндрические медные и графитовые сопла критических диаметров 5 мм. Применение графита позволило исключить эрозию материала сопла и обеспечить чистоту компонентного состава плазменной струи.

Излучение струи регистрировалось фотоэлектрической системой с использованием монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106. Абсолютная калибровка системы регистрации проводилась с помощью эталонной вольфрамовой ленточной лампы СИ10-300У и водородной лампы ДВС-25.

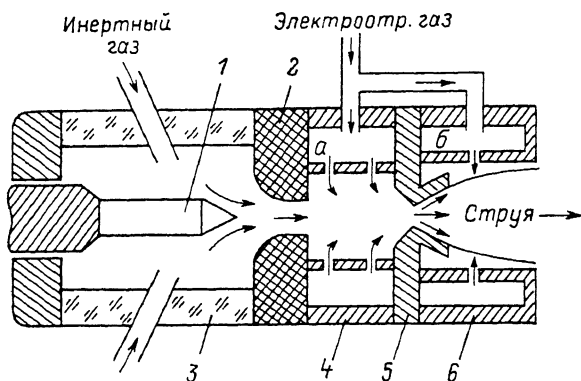


Рис. 1. Схема источника плазмы и смешения газов.

1 — катод, 2 — анод, 3 — изолятор, 4, 6 — специальные кольцевидные камеры для ввода галогенсодержащих газов, 5 — сопло.

Исследовано образование эксимерных молекул KrF^* , XeF^* , $KrCl^*$ и $XeCl^*$ в струе на смесях $R-AX_n$ и R_0-R-AX_n , где $R_0=Ar, He$, $R=Kr, Xe$ и $AX_n=SF_6, CCl_4$. Было установлено, что при введении SF_6 и CCl_4 за сопло существенно повышаются интенсивности излучения монофторидов и монохлоридов инертных газов в плазменной струе. Максимумы интенсивности излучения $\lambda 249$ нм KrF^* и $\lambda 353$ нм XeF^* наблюдались вблизи места ввода SF_6 в струю инертных газов, а наиболее высокие интенсивности излучения $\lambda 222$ нм $KrCl^*$ и $\lambda 308$ нм $XeCl^*$ создавались на расстоянии 22—23 мм от места ввода CCl_4 . Следует отметить, что смешение газов по варианту *b* позволяет значительно увеличить плотности эксимеробразующих газов и более эффективно возбуждать эксимерные молекулы как в двух-, так и трехкомпонентных смесях. В настоящих экспериментах более эффективное образование эксимерных молекул наблюдалось в двухкомпонентных смесях. Из представленных зависимостей (рис. 2, *a, б*) следует, что с увеличением расходов (G) криптона, ксенона и SF_6 интенсивности излучения KrF^* и XeF^* в струе увеличиваются (кривые 2). Кривые 1, полученные в результате проектирования максимумов интенсивности на ось абсцисс, указывают на оптимальное соотношение расходов компонент в смесях $Kr-SF_6$ и $Xe-SF_6$. Как видно, данное соотношение близко к 1 : 1. В отличие от смесей двухкомпонентного состава в тройных смесях с Ar и He оптимальное соотношение газовых компонент, участвующих в образовании эксимеров KrF^* и XeF^* , несколько различается и существенным образом зависит как от расхода (давления), так и рода буферного газа в смесях. Наблюдаемые различия в оптимальных составах смесей связаны, в основном, с особенностями поведения дугового разряда в инертных газах разного компонентного состава при определенных электрических параметрах на разрядном промежутке.

В экспериментах изучались также зависимости интенсивности излучения эксимерных полос от вводимой в дуговой разряд мощности (W) как в двух-, так и трехкомпонентных смесях. Результаты данных исследований представлены на рис. 3, а, б. Кривые 1–4 получены при близких к оптимальным соотношениях газовых компонент, а кривые 5, 6 — в неоптимизированных смесях.

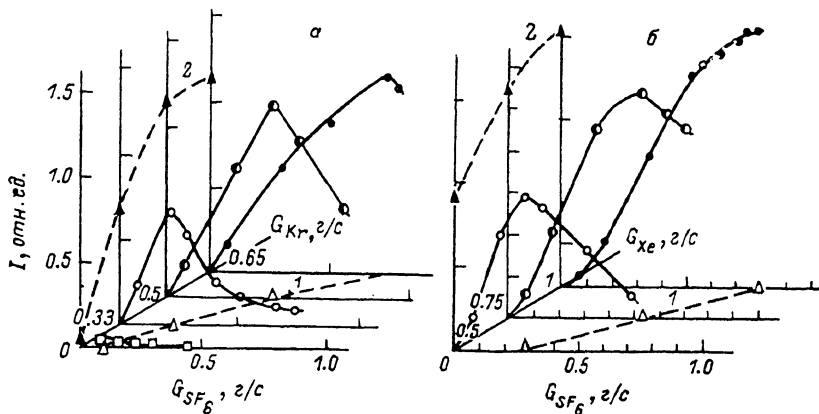


Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения λ 249 нм KrF^* (а) и λ 353 нм XeF^* (б) от расходов газов в смесях Kr-SF_6 и Xe-SF_6 при мощности $W=1.5-2$ кВт.

Видно, что с повышением мощности выход эксимерных молекул увеличивается. Следует отметить, что с повышением мощности в основном увеличивается ток на дуге, а падение напряжения существенно не меняется. В результате увеличения тока значительно повышаются концентрации электронов и положительных ионов инертных газов. Представленные на рис. 3 зависимости свидетельствуют о возможности дальнейшего повышения интенсивности излучения эксимерных молекул в плазменной струе.

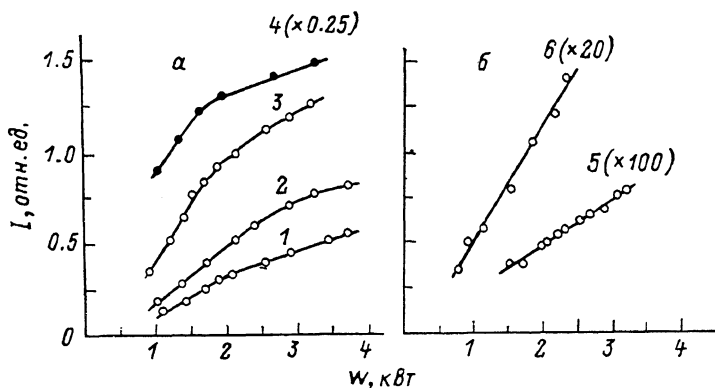


Рис. 3. Зависимости интенсивности излучения λ 249 нм KrF^* и λ 353 нм XeF^* (а), λ 308 нм XeCl^* и λ 222 нм KrCl^* (б) от вводимой в дуговой разряд мощности в двух- и трехкомпонентных смесях.

G_{Xe} : 1, 2, 3 — 1; 6 — 0.3 г/с; G_{Kr} : 4 — 0.68, 5 — 0.05 г/с; G_{Ar} : 1 — 0.45; 2 — 0.25; 3, 4 — 0; 5, 6 — 0.1 г/с; G_{SF_6} : 1–4 — 0.72 г/с; G_{CCl_4} : 5, 6 — 0.1 г/с.

мерных молекул в плазменной струе. Из сравнения кривых 1–3 также следует, что более эффективное образование эксимеров XeF^* происходит в смеси Xe-SF_6 и несколько уменьшается при увеличении расхода (парциального давления) аргона в смеси Ar-Xe-SF_6 . Одной из возможных причин уменьшения эффективности образования XeF^* в трехкомпонентных смесях с Ar является то обстоятельство, что в струе на смеси Ar-Xe-SF_6 наряду с образованием молекул XeF^* происходит также образование эксимерных молекул ArF^* , излучение которых находится в ВУФ области спектра и в данных экспериментах не исследовалось.

Интегральная концентрация молекул KrF^* в B -состоянии составила величину $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при вкладываемой в дуговой разряд удельной мощности $1.5\text{--}2 \text{ кВт/см}^3$ и суммарном расходе газов $G=1.4 \text{ г/с}$ (смесь Kr-SF_6). Это эквивалентно удельной мощности $40\text{--}60 \text{ Вт/см}^3$ спонтанного излучения KrF^* и эффективности преобразования $2\text{--}4 \%$. Для XeF^* (B) суммарная концентрация возбужденных молекул достигала $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, что соответствует энергетическому КПД преобразования вводимой в разряд удельной мощности в спонтанное излучение эксимерной полосы $\sim 0.2 \%$. Концентрации молекул KrCl^* и XeCl^* в B -состояниях не превышали величины 10^{10} см^{-3} , поскольку не удалось обеспечить необходимые в эксперименте расходы CCl_4 .

Таким образом, полученные экспериментальные результаты указывают на принципиальную возможность повышения концентраций эксимерных молекул в непрерывной плазменной струе. Однако при энергетических параметрах исследуемого нами источника плазмы достижение концентраций эксимерных молекул $N^* > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ в струе является проблематичным. Дальнейшее повышение концентраций моногалогенидов инертных газов может быть достигнуто путем увеличения вводимой в дуговой разряд мощности, повышением степени ионизации плазмы, увеличением расходов газов и эффективности их смешения, что связано с необходимостью усовершенствования конструкции источника плазменной струи. Следует также выяснить эффективность других галоген-агентов при образовании эксимерных молекул в плазменной струе.

Литература

- [1] Рогоulich В. С., Стародуб В. П., Шевера В. С. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 10, с. 606—609.
- [2] Рогоulich В. С., Стародуб В. П., Шевера В. С., Богачева С. П. Тез. докл. VII Всес. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Ташкент, 1987, ч. 2, с. 53—54.
- [3] Богачева С. П., Вереш М. Ф., Запесочный И. П. и др. УФЖ, 1985, т. 30, № 2, с. 186—189.

Ужгородский государственный университет

Поступило в Редакцию
5 января 1988 г.