

УДК 533.9

## Исследование основных параметров непрерывной плазменной струи

В. С. Рогулич, Л. Л. Шимон

Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина

*Оптическим методом определены концентрация и температура электронов, получены оценочные данные заселенностей метастабильных атомов криптона и ксенона, а также исследовано влияние примесей галогенидных молекул  $SF_6$  и паров воды на изменение основных характеристик излучения непрерывных плазменных струй разного компонентного состава.*

Ранее нами были исследованы оптимальные условия образования эксимерных молекул  $KrF^*$ ,  $XeCl^*$  и др. и определены абсолютные величины их концентраций [1—3]. При этом недостаточное внимание было уделено определению таких важных параметров плазмы как температура  $T_e$  и концентрация  $N_e$  электронов, концентрация возбужденных и заряженных частиц, а также исследованию влияния электроотрицательных газов на их изменение в плазменной струе на смеси инертных газов с галогенами. Информация об этих параметрах необходима как при моделировании плазмы сложного состава, так и проведении систематических исследований в целях определения основных процессов образования эксимерных молекул в плазменной струе. Перспективным является также исследование возможности создания экологически чистых источников излучения на основе радикала  $OH$ , которые в перспективе могут успешно заменить известные ртутные люминесцентные источники излучения [4]. В плазмодинамическом режиме при исследовании излучения плазмы инертных газов нами наблюдалось интенсивное излучение полос  $OH$  в ультрафиолетовой области спектра.

В данной работе представлены результаты измерений температуры и концентрации электронов, проведена оценка заселенностей метастабильных состояний атомов криптона и ксенона, а также исследовано влияние галогенидных молекул  $SF_6$  и паров воды на изменение основных характеристик излучения плазменных струй разного компонентного состава.

### Техника и методика эксперимента

Экспериментальные исследования излучения плазменных струй проводились на плазмодинамической установке непрерывного действия, где в качестве источника плазмы использовался плазмотрон постоянного тока со звуковым соплом критического диаметра  $\sim 5$  мм при токах дуги 50—150 А и падении напряжения на разрядном промежутке 15—35 В. Плазма инертного газа ( $Ar$ ,  $He$ ) создавалась в дуговой камере плазмотрона, а галогенидные молекулы  $SF_6$  и пары воды вводились в предварительно сформированную плазму инертного газа как в предсопловой камере, так и за сопловым блоком на разных дистанциях от него. Статическое давление инертного газа в дуговой и предсопловой камерах изменялось от нескольких паскаль до 20 кПа. Излучение от струи регистрировалось фотоэлектрической системой с использованием монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106. Основным методом

измерения параметров плазменных струй ( $N_e$ ,  $T_e$  и др.) и заселенностей возбужденных состояний атомов и молекул был оптический. Заселенности возбужденных состояний определялись по абсолютным интенсивностям спектральных линий, которые, в свою очередь, измерялись известным методом сравнения интенсивности струи с излучением эталонного источника у видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Для проведения оценок величин заселенностей метастабильных атомов тяжелых инертных газов нами был использован один из вариантов абсорбционного метода — так называемый метод одного зеркала [5]. Температура электронов определялась по относительным интенсивностям двух спектральных линий за методикой [6, 7], которая справедлива в условиях неравновесной плазмы для группы высоковозбужденных состояний, которые находятся в равновесии с континуумом. Концентрация электронов рассчитывалась по известным значениям  $T_e$  и абсолютным значениям интенсивности одной из спектральных линий по известной формуле Саха [8]. Для контроля за изменением температуры и концентрации электронов в плазме с участием галогенов нами использовались электродондовые методы.

## Результаты исследований

### Спектры излучения и экспериментальные зависимости

Излучение плазменных струй исследовалось в широком диапазоне длин волн (190—800 нм). Сравнение и анализ полученных спектров дают возможность установить некоторые важные особенности, которые существенно отличаются плазму с примесями галогенов и паров воды от плазмы инертных газов.

Было установлено, что введение галогеносителей  $SF_6$ ,  $CCl_4$  и др. в плазму тяжелых инертных газов (одно- и двухкомпонентную) приводит к значительному ослаблению интенсивности атомарных спектральных линий инертных газов и появлению интенсивных полос излучения эксимерных молекул. Типичные спектры излучения моногалогенидов инертных газов изображены на рис. 1, полученные при различных режимах работы плазмодинамического источника в плазме разного компонентного состава.

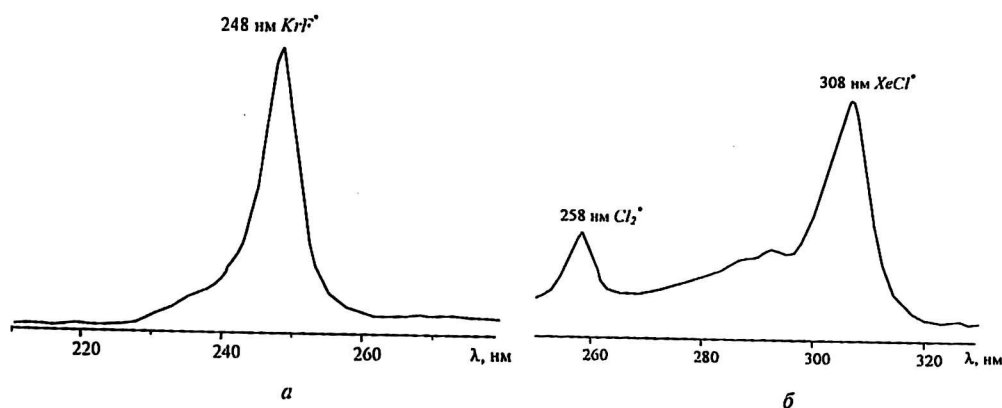


Рис. 1. Спектры излучения эксимерных молекул  $KrF^*$  и  $XeCl^*$ :

а —  $Kr/SF_6$ ;  $P = 11,3$  кПа;  $W = 2,2$  кВт;  
 б —  $Ar/Xe/CCl_4$ ;  $P = 5,3$  кПа;  $W = 1,7$  кВт

При исследовании оптимальных условий образования эксимерных молекул в спектрах излучения плазмы инертных газов (Ar, He, Ar — Kr, He — Kr) наблюдалось излучение гидроксила OH (полосы 306,4; 308,9; 312,6; 282,9 нм и др.), а также линии атомарного водорода и кислорода. Установлено, что в зависимости от состава плазмы и давления инертного газа полосы OH существенно отличались по интенсивности кантов. Увеличение давления инертного газа приводило к росту интенсивности излучения резонансных полос OH (рис. 2).

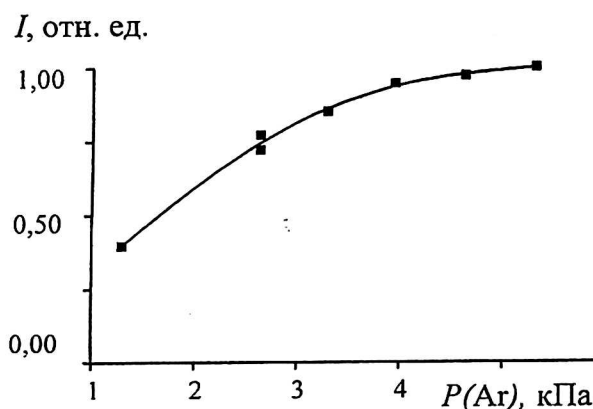


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения полосы  $\lambda = 308,9$  нм молекулы OH от парциального давления аргона при  $W = 2,3$  кВт

Рассмотрим влияние паров  $\text{H}_2\text{O}$  на характеристики излучения плазменных струй на примере аргоновой плазмы с примесью воды. Добавка паров  $\text{H}_2\text{O}$  в плазму инертного газа приводит к значительному уменьшению интенсивности  $I$  линий Ag в исследуемой области спектра. Типичный спектр излучения плазмы инертного газа с примесью воды приведен на рис. 3. Изучались зависимости интенсивности излучения кантов OH (306,4 и 308,9 нм) от парциального давления (расхода) паров воды и введенной в плазмотрон мощности. Было установлено, что при относительно малых парциальных давлениях паров воды ( $\sim 50$  Па) изменение интенсивности излучения полос OH было несущественным. С увеличением расходов паров  $\text{H}_2\text{O}$  (примерно на порядок) интенсивность кантов излучения гидроксила OH уменьшается в 3—3,5 раза. Увеличение как тока, так и общей мощности, введенной в дуговой разряд плазмотрона, наоборот, приводило к значительному росту интенсивности излучения  $I$  спектральных линий Ag и резонансных кантов OH (рис. 4).

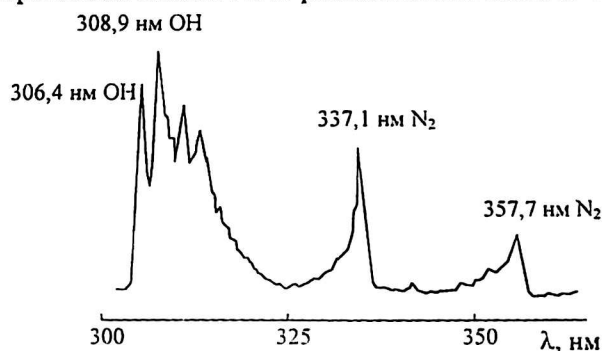


Рис. 3. Спектр излучения плазменной струи на смеси Ar/ $\text{H}_2\text{O}$  при  $P = 4$  кПа,  $W = 2,3$  кВт

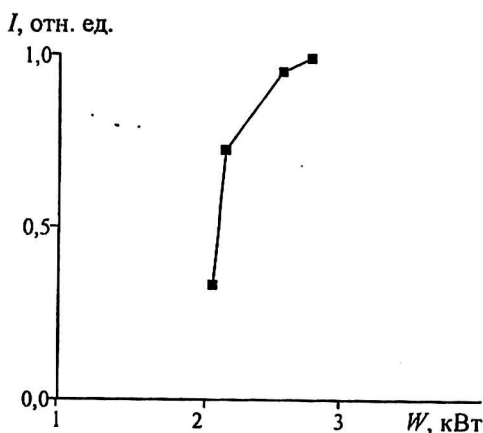


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения полосы  $\lambda = 308,9$  нм ОН от введенной в дуговой разряд плазматрона мощности на смеси  $Ar/H_2O$  при  $P = 4$  кПа

Введение галогенидных молекул  $SF_6$  в струю плазмы инертных газов приводило к уменьшению интенсивности полос ОН, некоторых полос излучения  $N_2$ , а также линий атомарного водорода и кислорода. При условиях, эффективных для образования эксимерных молекул, т. е. в смесях тяжелых инертных газов с галогенами, излучения полос ОН практически не наблюдалось.

Таким образом, исследование спектров показало, что введение галогенонесителей и паров воды в плазму инертных газов приводит как к образованию эксимерных молекул, так и существенному изменению характеристик излучения плазменных струй.

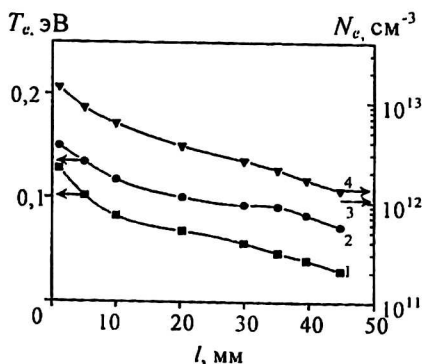
### Температура и концентрация электронов.

#### Влияние электроотрицательных газов на изменение основных параметров плазменной струи

Для определения  $T_e$  и  $N_e$  в плазме инертных газов выбирались атомарные линии нескольких серий с общим нижним уровнем, которые несильно отличаются длинами волн, размещены энергетически непосредственно под границей ионизации данных атомов и излучают из высоковозбужденных состояний. Основные результаты измерений температуры и концентрации электронов представлены на рис. 5.

Рис. 5. Распределение температуры и концентрации электронов вдоль плазменной струи:

1, 4 —  $Ar$ ;  $P = 7,3$  кПа;  $W = 1,5$  кВт;  
2, 3 —  $He$ ;  $P = 10,6$  кПа;  $W = 3,2$  кВт



Видно, что максимальные значения этих параметров в струях плазмы инертных газов обеспечиваются возле среза сопла и равны, соответственно,  $T_e = 0,15$  эВ и  $N_e = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . С удалением от сопла значения  $T_e$  и  $N_e$  уменьшаются, при этом скачки уплотнения почти отсутствуют.

Рассмотрим влияние примесей галогенов на изменение основных параметров плазменной струи на примере  $SF_6$ . Следует отметить, что с введением галогеноносителей  $SF_6$  и  $CCl_4$  в плазму инертных газов происходит значительное уменьшение интенсивности излучения атомарных линий инертных газов и использование оптических методов измерения параметров плазменной струи было затруднительным. Поэтому в смесях инертных газов с галогенами для контроля за изменением  $N_e$  и  $T_e$  были использованы электродондовые методы. Установлено, что введение молекул шестифтористой серы в струю плазмы аргона приводит к резкому уменьшению электронного тока на зонд и увеличению температуры электронов. Резкое уменьшение величины электронного тока  $i_e$  приводит к уменьшению концентрации электронов, поскольку  $i_e \sim N_e$ . Полученные в эксперименте эффекты уменьшения  $N_e$  и увеличения  $T_e$  связаны, на наш взгляд, с процессами прилипания электронов до сильно электроотрицательных молекул галогенов с образованием фрагментарных отрицательных ионов. Как известно [9], процесс прилипания электронов к  $SF_6$  протекает очень эффективно и носит резонансный характер при энергиях электронов, близких к нулю, т. е. при таких значениях  $T_e$ , которые реально обеспечиваются в наших экспериментальных условиях.

#### Концентрация метастабильных атомов криптона и ксенона

Для проведения оценок величины концентрации метастабильных атомов в плазменной струе нами был применен метод одного зеркала, который основан на известном соотношении между концентрацией поглощающих атомов  $N_i$  и коэффициентом поглощения в центре спектральной линии  $\chi_0$  [5].

$$f_{ik} N_i = 1,21 \cdot 10^{19} \frac{\Delta\lambda_D}{\lambda^2} \chi_0,$$

где  $f_{ik}$  — сила осциллятора перехода;

$\lambda_D$  — ширина линии в случае доплеровского контура;

$\lambda$  — длина волны.

Значение  $\chi_0$  определялось экспериментально исходя из связи коэффициента поглощения с относительным самопоглощением  $A$  данной линии:

$$A = \frac{(1+r) - \frac{I_3}{I_{6.3}}}{r} = \Phi(\chi_0 x, 1), \quad (1)$$

где  $\Phi(\chi_0 x, 1)$  — функция Ладенбурга—Леви;

$r$  — коэффициент отражения зеркала;

$I_3$  — интенсивность спектральной линии при открытом зеркале;

$I_{6.3}$  — интенсивность линии при закрытом зеркале.

Коэффициент отражения зеркала определялся в эксперименте по формуле

$$r = \left( \frac{I_3}{I_{6.3}} \right)_{\chi_0=0} - 1.$$

Изменив  $r$ , а также  $I_3$  и  $I_{6.3}$  для линии, испытывающей поглощение, по формуле (1) определяется значение  $A$ .

Используя данные измерений для  $\chi_0$  и оценочные данные для  $\lambda_D$ , были рассчитаны концентрации метастабильных атомов криптона и ксенона в плазменной струе, максимальные значения которых достигаются возле среза сопла, при этом  $N_{Kr} \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{Xe} \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Следует отметить, что концентрации метастабильных атомов KгI и ХеI в струе определяются в основном заселенностью энергетически низколежащих состояний  $5s$  и  $6s$ , т. е. состояний, которым соответствуют энергии возбуждения 9,91 и 8,31 эВ. Заселенности верхних  $5s'$ ,  $6s'$  метастабильных состояний KгI и ХеI с энергиями возбуждения 10,56 и 9,45 эВ, соответственно, были приблизительно на порядок меньшими.

Полученные в эксперименте значения концентраций метастабильных атомов криптона и ксенона дали возможность оценить вклад гарпунной реакции в заселение возбужденных состояний эксимерных молекул, а также величину электронной температуры в дуговой камере плазмотрона. По отношению к процессу ион-ионной рекомбинации вклад гарпунной реакции в заселение возбужденных состояний моногалогенидов инертных газов ( $RX^*$ ) примерно на порядок ниже.

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что непрерывный плазмодинамический источник создает плазму с концентрацией электронов  $N_e = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T_e = 0,1-0,2 \text{ эВ}$ , при этом вдоль струи значение  $T_e$  уменьшается в 2-3 раза, а концентрация электронов падает почти на порядок на расстоянии  $l = 50 \text{ мм}$  от сопла. С введением галогеноносителей и паров воды происходит существенное изменение основных параметров и характеристик плазменной струи. Между процессами уменьшения  $N_e$ , увеличения  $T_e$  и образования эксимерных молекул (моногалогенидов инертных газов) существует тесная взаимосвязь, что подтверждается и ранее полученными данными [1, 3]. По отношению к гарпунной реакции процесс ион-ионной рекомбинации вносит доминирующий вклад в заселение возбужденных состояний эксимерных молекул.

### Литература

1. Рогулич В. С., Стародуб В. П., Шевера В. С. // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. № 4. С. 756.
2. Рогулич В. С., Шевера В. С. // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 4. С. 188.
3. Рогулич В. С., Шевера В. С. // УФЖ. 1999. Т. 44. № 9. С. 1082.
4. Вуль А. Я., Кидалов С. В., Миленин В. М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. № 1. С. 10.
5. Фриш С. Э. Спектроскопия газоразрядной плазмы / Под ред. С. Э. Фриша. — Л.: Наука, 1970.
6. Грим Г. Спектроскопия плазмы. — М.: Атомиздат, 1969.
7. Ющенкова Н. И., Андреев Ю. Ю., Киселев В. М. и др.: Препринт/МИНХС. — М., 1974.
8. Лукьянов Г. А. Сверхзвуковые струи плазмы. — Л.: Машиностроение, 1985.
9. Бучельникова Н. С. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. № 5. С. 1119.

## Research of basic parameters of continuous plasma jet

V. S. Rogulich, L. L. Shimon  
Uzhgorod national university, Uzhgorod, Ukraine

*The concentration and electrons temperature were determined by optical method, the estimated data of krypton and xenon metastable atoms population are obtained and the influence of impurity of halogen molecules  $SF_6$  and water vapour on the alteration of basic characteristics of radiation of continuous plasma jets of different componental structure is investigated.*