

УДК 533.9:537.52

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ДИАФРАГМЕННОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ

© 2004 г. Е. В. Калашников, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Рачкулик

НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем,  
г. Сосновый Бор, Ленинградская область  
E-mail: evk@sbior.net

Приведены результаты исследования термодинамических параметров плазмы импульсного вакуумного УФ источника света на струйном диафрагменном разряде. Установлен характер истечения продуктов высокотемпературной эрозии плазмообразующего материала диафрагмы в вакуум. Получены спектрально-энергетические характеристики излучения катодной струи в вакуумной УФ области спектра (90–190 нм) в газодинамическом и магнитогазодинамическом режимах течения плазмы на межэлектродном промежутке дециметрового размера.

Коды OCIS: 350.5400.

Поступила в редакцию 10.04.2003.

Струйный диафрагменный разряд (СДР) позволяет получать в отверстии диафрагмы эрозионную плазму практически из любого материала с высокими удельными параметрами: температурой до 70 000 К при давлении до 100 МПа и плотности тока до 1 МА/см<sup>2</sup> [1]. При этом истечение продуктов эрозии материала диафрагмы в виде струй и их оптические свойства определяются электрическими и магнитными полями на промежутке диафрагма–электрод. К преимуществам СДР следует отнести контролируемый состав продуктов эрозии в струе и возможность его изменения. Это позволяет эффективно варьировать спектрально-энергетические характеристики излучения источника света на основе данного типа разряда.

В данной работе ставилась задача исследования свойств излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра струй эрозионной плазмы, истекающих в вакуум из отверстия в пластине (диафрагме) из текстолита, в сильном азимутальном магнитном поле (40 и 100 кЭ) собственного тока разряда.

На рис. 1 приведена схема исследуемого источника света, представляющего собой сильноточный разрядный контур с емкостным накопителем энергии. Разрядное устройство в виде коаксиально расположенных кольцевых анода 1 и катода 2, а также плазмообразующей диафрагмы 3 помещалось в вакуумную разрядную камеру 4 объемом более 50 л с разрежением среды до  $p_0 \approx 1$  Па. Разрядная камера снабжена оптическим иллюминатором 5, прозрачным в УФ и ВУФ областях спектра.

При проведении исследований импульса излучения от струй диафрагменного разряда в УФ и ВУФ диапазонах спектра изменяемыми параметрами в данной работе являлись как геометрические пара-

метры разрядного промежутка (длина межэлектродного промежутка, толщина диафрагмы, диаметр отверстия в ней), так и электрические параметры разрядного контура (зарядное напряжение батареи, индуктивность контура, сопротивление контура). Исследования влияния этих факторов на характеристики плазмы струи проводились при двух значениях плотности разрядного тока в отверстии диафрагмы и использовании в качестве исходного плазмообразующего материала текстолита ( $C_{37}H_{47}O_{16}$ )<sub>n</sub>.

Регистрация изменения параметров разряда, среды и светового импульса проводилась через оптический иллюминатор на многоканальном диагностическом комплексе, описанном в [2].

Переменное в процессе эксперимента пропускание иллюминатора при использовании оптических окон из фторидов щелочно-земельных металлов

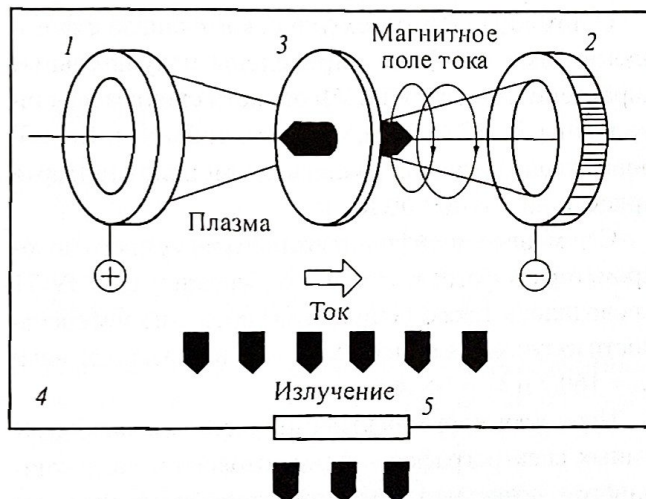


Рис. 1. Схема исследуемого источника света (пояснения в тексте).



Параметры установки СДР при различных значениях плотности тока  $j_0$  в отверстии диафрагмы

| Наименование параметра                                                | $j_0 < 600 \text{ кА/см}^2$                                             | $j_0 > 600 \text{ кА/см}^2$                                           |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Электрические параметры разрядного контура</b>                     |                                                                         |                                                                       |
| Зарядное напряжение, В                                                | 5000                                                                    | 25 000                                                                |
| Емкость, Ф                                                            | $2,8 \times 10^{-3}$                                                    | $12 \times 10^{-6}$                                                   |
| Сопротивление, Ом                                                     | 0,0019                                                                  | 0,003                                                                 |
| Индуктивность, Г                                                      | $5,6 \times 10^{-6}$                                                    | $8 \times 10^{-7}$                                                    |
| <b>Геометрические параметры разрядного устройства</b>                 |                                                                         |                                                                       |
| Длина межэлектродного промежутка, см                                  | 8                                                                       | 8                                                                     |
| Толщина диафрагмы, см                                                 | 0,2–0,6                                                                 | 0,2–0,6                                                               |
| Радиус отверстия в диафрагме, см                                      | 0,2–0,3                                                                 | 0,2–0,3                                                               |
| <b>Термодинамические параметры плазмы катодной струи разряда при:</b> |                                                                         |                                                                       |
|                                                                       | $I_{\text{max}} = 50 \text{ кА},$<br>$t_{\text{max}} = 100 \text{ мкс}$ | $I_{\text{max}} = 98 \text{ кА},$<br>$t_{\text{max}} = 5 \text{ мкс}$ |
| Давление, МПа                                                         | 0,15–0,5                                                                | 0,9                                                                   |
| Температура, К                                                        | $(27–28) \times 10^3$                                                   | $35 \times 10^3$                                                      |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                          | $(0,2–0,8) \times 10^{-5}$                                              | $10^{-6}$                                                             |
| Удельная энтальпия, Дж/г                                              | $(3,4–3,9) \times 10^5$                                                 | $6 \times 10^5$                                                       |
| <b>Параметры светового импульса на:</b>                               |                                                                         |                                                                       |
|                                                                       | $t_{\text{max}} = 100 \text{ мкс}$                                      | $t_{\text{max}} = 5 \text{ мкс}$                                      |
| Длительность импульса, мкс                                            | 400                                                                     | 54                                                                    |
| Интенсивность излучения, Вт/см <sup>2</sup> ср нм                     |                                                                         |                                                                       |
| $\lambda = 235 \text{ нм}$                                            | 1–2                                                                     | 10                                                                    |
| $\lambda = 160 \text{ нм}$                                            | 0,1                                                                     | 1                                                                     |
| $\lambda = 140 \text{ нм}$                                            | 0,01                                                                    | 0,2                                                                   |

(в частности кристаллов  $\text{MgF}_2$ ) учитывалось сравнением параметров излучения с результатами регистрации спектров излучения разряда без оптического окна в оптической схеме регистрации, когда вакуумирование разрядной камеры и спектрального прибора обеспечивалось методами дифференциальной откачки. Это позволяло проводить регистрацию спектров излучения разряда в ВУФ области с коротковолновой границей около 60–90 нм.

Диагностический комплекс содержал фотоэлектрический и спектроскопический каналы, а также каналы регистрации электрических и термодинамических параметров разряда.

С помощью фотоэлектрического канала с фотоэлементами Ф7 были определены излучательные характеристики струй в УФ области спектра на длине волны  $\lambda_1 = 235,0 \pm 0,5 \text{ нм}$  (см. таблицу). Калибровка канала осуществлялась с помощью стандарта яркости на  $T = 40\,000 \text{ К}$ .

С помощью модифицированного вакуумного монохроматора и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-71 проводилось также осциллографирование интенсивности излучения в полосе  $\Delta\lambda = \pm 0,5 \text{ нм}$  на длинах волн  $\lambda_2 = 160,7$  и  $\lambda_3 = 140,4 \text{ нм}$ .

Использование в спектроскопическом канале вакуумных спектрографов – флюоритового и дифракционного – позволило зарегистрировать распределение интенсивности излучения струи разряда в вакуумной области спектра (рис. 2). На интегральных спектро-

граммах, полученных с помощью дифракционного спектрографа, был зарегистрирован континуум, простирающийся до 90 нм, с наложенным на него линейчатым спектром излучения атомов и ионов плазмообразующего материала, содержащим линии атомов углерода CI 119,3 ( $E_n = 10,39 \text{ эВ}$ ), 156,1 ( $E_n = 7,95 \text{ эВ}$ ),

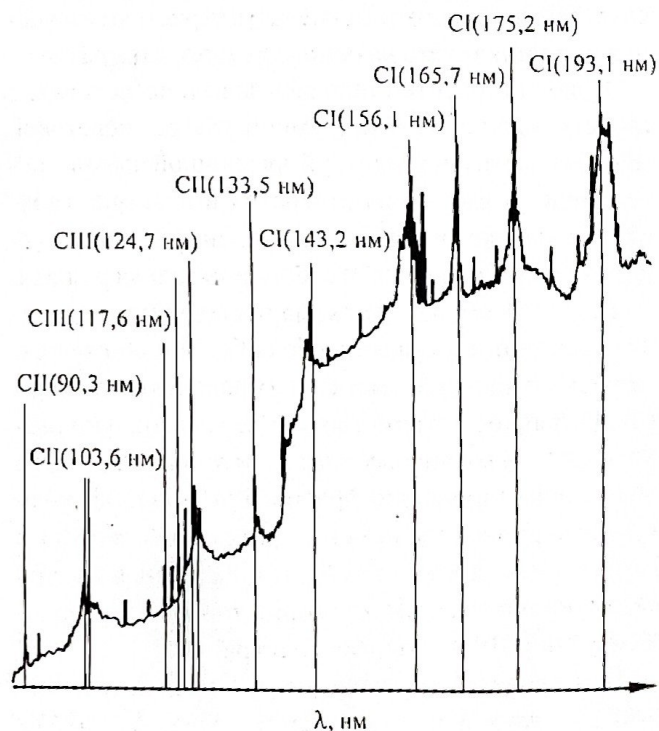


Рис. 2. Спектральный состав излучения катодной струи плазмы СДР в ВУФ диапазоне спектра.



175,2 нм ( $E_n = 9,76$  эВ); линии ионов углерода CII 103,6 ( $E_n = 11,96$  эВ) и 133,5 нм ( $E_n = 9,29$  эВ); линии кратных ионов углерода CIII 117,6, 124,7 нм и др.

Для определения доли энергии излучения в ВУФ диапазоне спектра использовался калориметр, наполняемый азотом, прозрачным в ВУФ области. Регистрация излучения проводилась через оптические иллюминаторы из кристалла  $MgF_2$  и плавленного кварца КУ-2 толщиной 1 мм. Было установлено, что доля ВУФ составляющей излучения в спектральном интервале  $115 < \lambda < 190$  нм составляет 20–25% от общего потока излучения, испускаемого плазмой катодной струи открытого разряда при  $p_0 = 1$  Па.

Было также установлено, что истечение продуктов эрозии материала диафрагмы и их оптические свойства в значительной степени определяются электрическими и магнитными полями на промежутке диафрагма–электрод. Сила тока разряда, регулируемая и измеряемая при проведении эксперимента, являлась задаваемым параметром при исследовании оптических свойств струи. Для режимов электропитания разряда, когда амплитуда тока не превышала 75 кА (плотность тока в отверстии диафрагмы  $j_0 < 600$  кА/см<sup>2</sup>), параметр Холла  $\beta = \omega_n / \nu_m < 1$ , где циклотронная частота  $\omega_n = 1,4 \times 10^9$  Гц, а частота столкновений электронов  $\nu_m = 2,66 \times 10^{11}$  с<sup>-1</sup> [3]. При этом реализовался газодинамический режим течения плазмы. Излучательные свойства плазмы струй разряда в газодинамическом режиме для УФ и ВУФ областей спектра приведены в таблице.

При плотности тока  $j_0 > 600$  кА/см<sup>2</sup> начинал сказываться эффект Холла. В частности, это наглядно проявлялось в изменении конфигурации струи, при котором наблюдалась асимметрия анодной и катодной струй. Это изменение соответствовало напряженности магнитного поля, значительно превышающей  $6 \times 10^6$  А/м, что является характерным для магнитогазодинамического режима течения плазмы. В этом режиме яркостная температура плазмы на оси струи в УФ области ( $\lambda = 235$  нм) достигает своего максимального значения, которое в свою очередь зависит от геометрических размеров отверстия диафрагмы (см. таблицу). Объясняется этот эффект тем, что скорость и плотность выдуваемой из отверстия струи увеличиваются из-за усиления магнитного обжатия при росте тока разряда. Магнитное давление пропорционально зависит от квадрата тока, как и вводимая электрическая мощность. Таким образом, баланс энергии в магнитогазодинамическом режиме соблюдается без увеличения удельной энтальпии и дальнейшего роста температуры плазмы.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

Для достижения высокой интенсивности излучения в коротковолновой части оптического диапазона

спектра и энтальпии плазмы при создании мощных источников света на основе электроразрядной плазмы необходимо вкладывать максимальную электрическую мощность в разрядный промежуток при эффективном способе ее отвода. Импульсный диафрагменный разряд по струям эрозионной плазмы, истекающим из отверстия плазмообразующей диафрагмы и замыкающим межэлектродный промежуток между кольцевыми электродами, позволяет успешно достичь поставленную цель. Интенсивный теплоотвод за пределы межэлектродного промежутка осуществляется выносом плазмы и излучения при истечении струй из отверстия диафрагмы в отверстия кольцевых электродов. При этом вывод излучения осуществляется как из отверстия диафрагмы в осевом направлении, так и от самих плазменных струй в радиальном направлении, что может быть использовано при создании плазменного излучателя большой мощности в коротковолновой области спектра.

Доля ВУФ составляющей излучения в спектральном интервале  $115 < \lambda < 190$  нм составляет 20–25% от общего потока, испускаемого углерод-водородной плазмой катодной струи открытого разряда при  $p_0 = 1$  Па; при фиксированной электрической мощности, вкладываемой в разрядный промежуток, интенсивность и спектральный состав излучения струй определяются структурой уровней энергии и потенциалов ионизации атомов и ионов химических элементов, входящих в исходный плазмообразующий материал диафрагмы; при форсировании режима электропитания разряда до 100 кА с переходом в магнитогазодинамический режим истечения струй из отверстия диафрагмы из текстолита существенный рост интенсивности излучения струи для коротковолновой области спектра ( $\lambda = 140–160$  нм) ограничен величиной порядка 0,1–1 Вт/см<sup>2</sup>ср нм. Это объясняется тем, что в ВУФ области плазма струй является оптически тонкой, а суммарная интенсивность излучения обусловлена излучением спектральных линий ионов, входящих в состав данной электроразрядной плазмы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников Е.В., Подмошенский И.В., Rogovcev П.Н. Импульсный источник УФ излучения на основе катодной струи диафрагменного разряда в вакууме // Сб. тез. докл. II Всес. симп. по радиационной плазмодинамике. М.: МГТУ, 1991. Ч. 1. С. 63–64.
2. Калашников Е.В. Радиальное распределение давления в струе плазмы сильнооточного диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 501–505.
3. Кролл Н., Трайвелтис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975. 525 с.