

Экспериментальное исследование испарения перспективных рабочих тел микро-АИПД

Е.О. Чебыкин^{}, А.В. Павлов, Д.К. Федорова, А.П. Подлосинская,
Т.С. Щепанюк, В.Д. Телех*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**evgeny.chebykin@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования и определения параметров световой эрозии фторопласта (C₂F₄)_n. Испарение вызвано облучением образца фторопласта мощным излучением УФ-ВУФ разряда магнитоплазменного компрессора. Спектр излучения разряда включал в себя ВУФ-область. Определение параметров производилось при помощи двухлучевой лазерной голографической интерферометрии

Ключевые слова: абляция диэлектрика, плазменный источник излучения, ультрафиолетовое излучение, взаимодействие излучения с поверхностью.

1. Введение

Исследование светоэрозионных плазменных потоков, генерируемых высокоинтенсивными оптическими эффектами вблизи поверхности облучаемых конденсированных сред, представляется актуальным как для решения задач современной физики неравновесной пространственно-неоднородной плазмы, так и в связи с многочисленными техническими приложениями. Так, явление световой абляции (эрозии) изолятора и электродов фактически определяет режим работы некоторых плазменных ускорителей и электродинамических устройств. К таким устройствам относятся, например, абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД) [1, 2], переживающие сегодня «второе рождение» в связи с «бумом» создания микродвигателей для нано- и пикоспутников стандарта CubeSat [3, 4]. В этих устройствах световая эрозия диэлектриков является основным плазмообразующим процессом и определяет массовый поток рабочего вещества [5, 6]. Кроме того, световая эрозия возникает при модификации поверхности материалов лазерным или ультрафиолетовым излучением [7–9], может вызывать повреждение различных тонких пленок [10, 11] и др.

2. Экспериментальная установка

В качестве источника коротковолнового УФ излучения использовался плазмодинамический разряд магнитоплазменного компрессора (МПК) эрозионного типа, описанный в [12]. Такой источник излучения позволяет получить высокочастотное широкополосное излучение в широком диапазоне спектра – от видимого диапазона до вакуумной УФ области. Для исследования испарения диэлектриков ВУФ излучением использовалась экспериментальная установка и методики диагностики, описанные в [13].

В настоящей работе исследовано испарение фторопласта (ПТФЭ), как наиболее часто используемого рабочего тела/диэлектрика в АИПД. Исследуемые образцы, размером 50×15×5 мм³, устанавливались вблизи среза МПК, на расстоянии 45 мм от оси разряда. Так как в эксперименте использовался протяженный образец, расположенный в ближней зоне квазисферического источника, то на ближний край образца приходило примерно в 2–2.5 раза больше энергии излучения, чем на дальний, это позволило наблюдать различную интенсивность испарения вдоль образца.

Для осуществления «газодинамической фильтрации» спектра излучения плазменного фокуса, разряд проводился в неоне (давление 400 Торр), энерговыделение в разряд составляло 3.5 кДж, остальные характеристики стенда описаны в [13]. Фоновый газ определяет максимальную энергию квантов излучения МПК-разряда, попадающих на поверхность

образца. Энергия квантов ограничивается потенциалами ионизации среды ($I_{Ne} = 21.6$ эВ). Под воздействием такого излучения происходит ионизация паров фторопласта ($I_C = 21.6$ эВ, $I_F = 21.6$ эВ).

3. Обсуждение результатов

Для определения свойств паро-плазменного слоя над поверхностью образца использовалась двухэкспозиционная голографическая интерферометрия [13]. Характерная интерферограмма испарения фторопласта, полученная с помощью описанной установки показана на Рис.1.

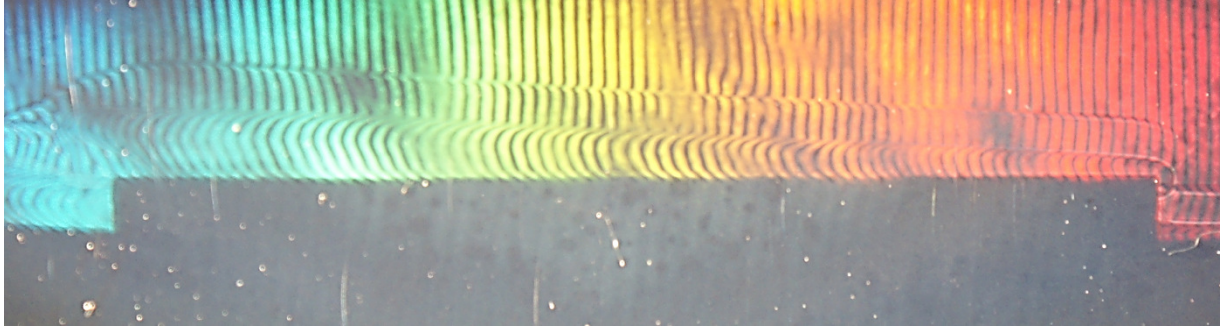


Рис.1. Интерферограмма испарения фторопласта.

Изгиб интерференционной полосы однозначно связан с показателем преломления n , который в свою очередь, зависит от изменения концентрации частиц и степени ионизации по формуле:

$$n - 1 = \sum_i C_i N_i, \quad (1)$$

где C_i – рефракция частиц i -го сорта в расчете на одну частицу, N_i – доля этих частиц в единице объема.

Газодинамические структуры над поверхностью образцов при светозероизонном испарении описаны нами в [14]: наблюдаются ударная волна, ударно-сжатый газ, контактная граница раздела «плазма-сжатый газ», плазма паров.

Допустив, что в плазме выполняется приближение локального термодинамического равновесия, уравнение (1) можно дополнить системой уравнений Саха и термодинамическими соотношениями.

$$\frac{N_{z+1,A} N_e}{N_{z,A}} = 2 \frac{u_{z+1,A}}{u_{z,A}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right) \exp \left(- \frac{I_{z,A} - \Delta I_z}{kT} \right), \quad (2)$$

$$\alpha_E = \frac{\sum_z N_{z,A} z}{N_0}, \quad (3)$$

$$\sum N_{z,A} = N_0, \quad (4)$$

$$p = NkT(1 + \alpha_e), \quad (5)$$

где A – атомный номер элемента, z – заряд иона (для атома $z = 0$), N – концентрация частиц, u – статистическая сумма, m_e – масса электрона, T – температура плазмы, I – энергия ионизации, ΔI_z – поправка на неидеальность, α_e – степень ионизации плазмы.

Тогда, полученная замкнутая система уравнений позволяет определить распределение концентрации газа/плазмы и температуры по высоте над образцом и по длине образца вдоль оси разряда (Рис.2 и Рис.3).

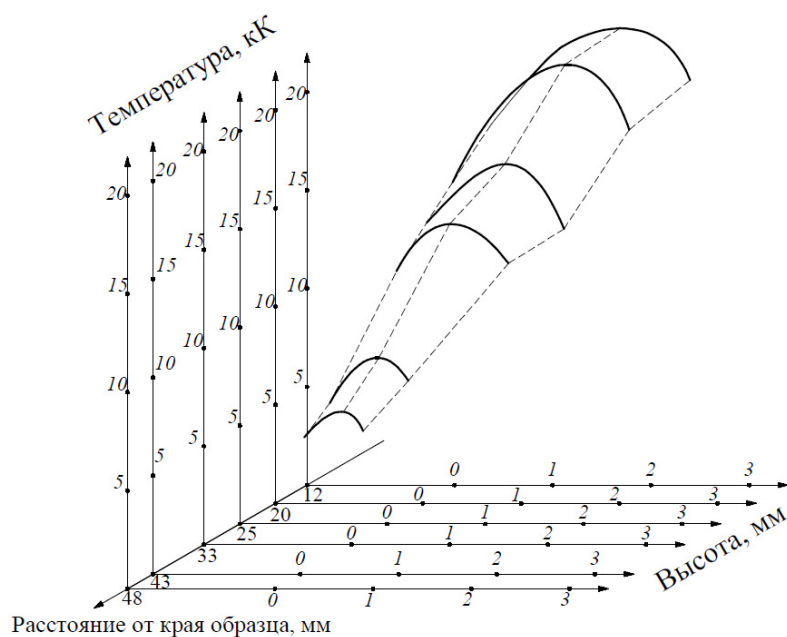


Рис.2. Распределение температуры плазмы вдоль оси разряда и по высоте.

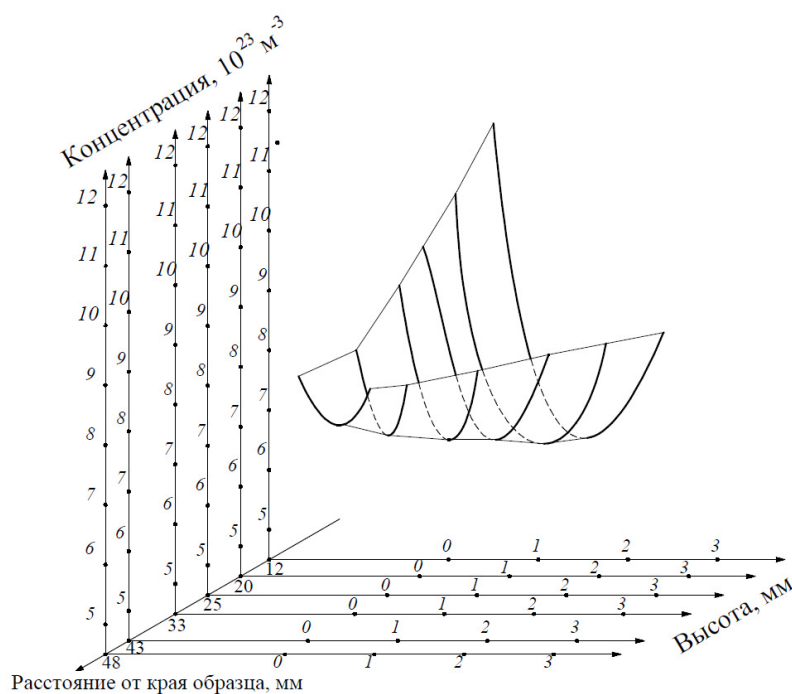


Рис.3. Распределение концентрации плазмы вдоль оси разряда и по высоте.

Решение системы уравнений (1–5) позволяет помимо термодинамических свойств плазмы определить также ионизационный состав плазмы, а, следовательно, соотношение числа атомов/ионов углерода и фтора. В результате возможно оценить массовый выход фторопласта (Рис.4).

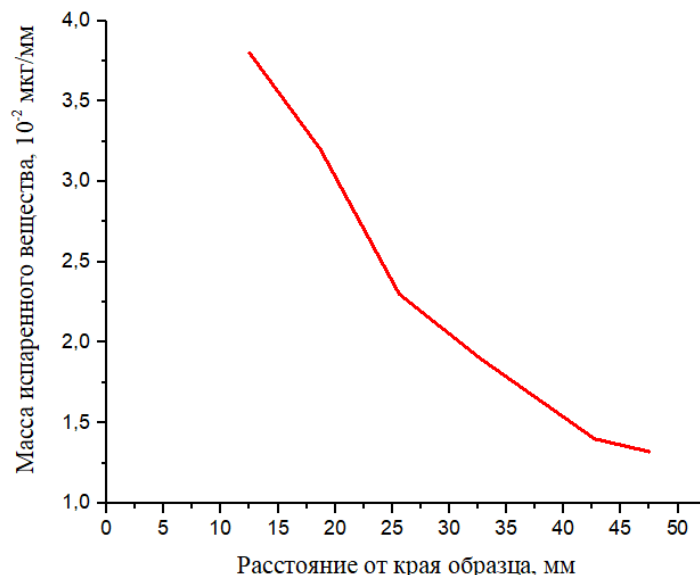


Рис.4. Распределение массы испаренного фторопласта плазмы вдоль оси разряда

4. Заключение

Исследовано испарение $(C_2F_4)_n$ широкополосным высокояркостным излучением.

Определены параметры плазмы паров фторопласта над поверхностью облучаемого ВУФ-излучением образца. В точках, где температура плазмы максимальна, концентрация ожидаемо оказалась минимальной. При этом максимум концентрации наблюдается в приповерхностном слое.

Предложена методика определения массы испаренного вещества. Получена зависимость «погонного» массового выхода от расстояния до источника излучения.

Благодарности

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00087.

5. Список литературы

- [1] Burton R.L., Turchi P.J., *Journal of Propulsion and Power*, **14**(5), 716, 1998; doi: 10.2514/2.5334
- [2] Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Хрусталёв М.М., *Труды МАИ*, **73**, 2014;
- [3] O'Reilly D., Herdrich G., Kavanagh D.F., *Aerospace*, **8**, 22, 2021; doi: 10.3390/aerospace8010022
- [4] Lemmer K., *Acta Astronautica*, **134**, 231, 2017; doi: 10.1016/j.actaastro.2017.01.048
- [5] Popov G.A., Antropov N.N., *Acta Astronautica*, **59**, 175, 2006; doi: 10.1016/j.actaastro.2006.02.009
- [6] Huang T., Wu Z., Sun G., Liu X., Yeong W., Ling L., *Acta Astronautica*, **173**, 69, 2020; doi: 10.1016/j.actaastro.2020.04.010

- [7] Lippert T., *Plasma Processes Polym.*, **2**, 525, 2005; doi: 10.1002/ppap.200500036
- [8] Phipps C., *Laser Ablation and its Applications*. (Berlin: Heidelberg, 2007).
- [9] Skurat V., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **208**, 27, 2003; doi: 10.1016/S0168-583X(03)00636-0
- [10] Grabovski E.V., et al., *Matter and Radiation at Extremes*, **2**, 129, 2017; doi: 10.1016/j.mre.2016.11.007
- [11] Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., Shkaplerov A.N., Kuritsyn A.A., Gorodov A.I., *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **405**, 112970, 2021; doi: 10.1016/j.jphotochem.2020.112970
- [12] Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Protasov Yu.S., Shashkovskii S.G., *High Temperature*, **27**(1) , 141, 1989; [English translation]
- [13] Pavlov A.V., Protasov Yu.Yu., Telekh V.D., Shchepanuk T.S., *Scientific Visualization*, **11**(3), 111, 2019; doi: 10.26583/sv.11.3.10
- [14] Pavlov A.V., Shchepanuk T.S., Chebykin E.O., Protasov Y.Y., Telekh V.D., *Journal of Physics: Conference Series*, **2270**, 2022; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012078