

УФ-ИЗЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МНОГОЭЛЕКТРОДНОГО
ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ© 2019 г. А. М. Анпилов^а, Э. М. Бархударов^а, Ю. Н. Козлов^{б, с}, И. А. Косский^а, М. А. Мисакян^д,
И. В. Моряков^{а,*}, М. И. Тактакишвили^а, Н. М. Тарасова^а, С. М. Темчин^а^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия^б Институт химической физики им. Семёнова РАН, Москва, Россия^с Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия^д Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

* e-mail: igor_miw@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2018 г.

После доработки 20.09.2018 г.

Принята в печать 20.09.2018 г.

Исследовано УФ-излучение высоковольтного импульсного многоискрового скользящего разряда в воздухе при атмосферном давлении в диапазоне 200–380 нм. Разряд представлял собой последовательность микроплазменных образований с удельным энерговыделением ~ 1 кДж/см³ и концентрацией электронов 10^{17} см⁻³. В УФ-области спектра доминируют линии атомов и ионов материала электродов. В качестве материала электродов использовались медь и нержавеющая сталь. Измерена интенсивность УФ-излучения методом актинометрии. КПД УФ-излучения относительно вложенной в разряд энергии составляет $\sim 1\%$.

DOI: 10.1134/S036729211902001X

1. ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный импульсный многоискровой скользящий разряд (ВВИМСР) использовался для решения ряда прикладных задач, связанных с плазмохимией [1], поджигом горючих смесей [2, 3] и газодинамикой [4, 5]. Особенность данного разряда в том, что он представляет собой последовательность микроплазменных образований с высоким удельным энерговыделением.

Согласно [6], микроплазма определяется как плазменная среда, имеющая характерные размеры от миллиметра до микрон. Возможны трехмерные, двухмерные (линейные) и одномерные (плоские) микроплазменные образования. Их малый пространственный масштаб позволяет потенциально создавать новые направления исследований в области физики и химии.

Из-за увеличения отношения поверхности к объему, микроплазма может существовать при высоких давлениях и плотностях. Она является эффективной светоизлучающей и реактивной средой.

Для создания микроплазмы используются электрические разряды различного типа: постоянного тока, импульсные, ВЧ и СВЧ. В данной работе микроплазма формируется с помощью ВВИМСР.

Одним из важных факторов, характеризующих исследуемое разрядное устройство, является УФ-излучение. Предварительные результаты по спектральному составу представлены в работе [7]. Было показано, что в области 200–380 нм основное излучение связано с атомами и ионами металлов, из которых изготовлены электроды. Оно практически не зависит от газовой среды (воздух, аргон, азот и пр.).

Основной целью данной работы являются количественные измерения УФ-излучения в области $200 \text{ нм} < \lambda < 380 \text{ нм}$, в воздухе при атмосферном давлении с применением метода актинометрии [8].

Следует отметить, что регистрация полного потока УФ-излучения представляет определенные трудности, в особенности, для систем, обладающих протяженной геометрической формой. Ранее актинометрическая методика была нами использована в ряде работ, например, [9, 10].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, где 1 – металлические электроды, 2 – диэлектрическая трубка, 3 – обратный токовод, 4 – блок питания, 5 – “слепой” ФЭУ-142, 6 – спектрограф AVASPEC-2048, 7 – бифуркаци-

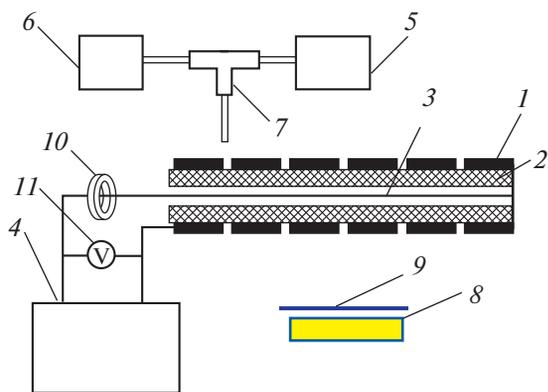


Рис. 1. Схема измерений.

онный световод, 8 – кювета с ферриоксалатом калия, 9 – фильтр БС-8, 10 – пояс Роговского, 11 – делитель напряжения. Параметры источника питания: напряжение $U \leq 20$ кВ; ток $I \leq 230$ А; частота следования импульсов $f \leq 100$ Гц.

На рис. 2 приведена схема устройства для измерения абсолютной величина интенсивности УФ-излучения. На схеме разрядник (1) помещается внутрь кварцевой трубки (2) диаметром $d_1 = 24$ мм, коэффициент пропускания которой не менее 80% в измеряемой области. Пространство между кварцевой трубкой и цилиндрическим сосудом из оргстекла (3) диаметром $d_2 = 45$ мм заполняется актинометрической жидкостью (ферриоксалатом калия) (4). В приведенном устройстве размеры подобраны таким образом, что практически все излучение разрядника в диапазоне 200–400 нм поглощается актинометрической жидкостью. Данный способ измерения УФ-излучения не требует использования специальной расчетной модели, как в случае регистрации только части излучения [9, 10].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Использовался разрядник с шестью промежутками длиной 1.5 мм. В каждом разрядном промежутке формировался микроплазменный разряд, диаметр канала ~ 100 мкм, удельный энерговыход ~ 1 кДж/см³.

Осциллограммы тока, напряжения и рассчитанная по ним мощность, вкладываемая в разряд, приведены на рис. 3. Максимальное значение тока составляло 230 А. Основная (канальная) стадия искрового разряда протекала при среднем напряжении 500 В. Энергия, вложенная в разряд ~ 0.2 Дж.

С помощью спектрографа (AVASPEC-2048) были сняты интегральные спектры излучения для разрядников, электроды которых выполнены из нержавеющей стали и меди (рис. 4). В наблюдае-

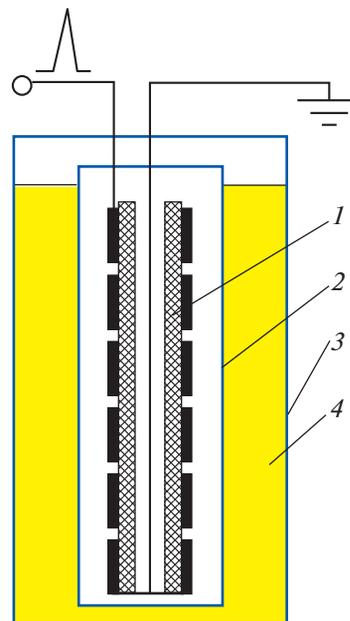


Рис. 2. Схема измерений: 1 – разрядник; 2 – кварцевая; 3 – сосуд из оргстекла; 4 – актинометрическая жидкость (ферриоксалат калия).

мых спектрах в области менее 380 нм в основном преобладают линии атомов и ионов металлов (спектры не калиброваны) [11].

Уширение линии водорода H_{α} (рис. 5) связано с эффектом Штарка в плазменных электрических полях. По уширению линии была измерена концентрация электронов $n_e \sim 10^{17}$ см⁻³ [12]. Для этого в разрядную область вводилось некоторое количество паров воды.

На рис. 6 приведены осциллограммы тока и сигнал с ФЭУ-142 соответствующий излучению, поступающего из разрядного промежутка в диапазоне 112–365 нм.

Для выяснения пространственной картины генерации УФ-излучения был выполнен эксперимент с увеличенным разрядным промежутком 10 мм (типичные осциллограммы приведены на рис. 7). Пространственное разрешение составляло 2 мм. При этом предполагается, что процессы, протекающие в длинном промежутке, качественно не отличаются от процессов в промежутке 1.5 мм.

Из рис. 3 видно, что разряд протекает в две стадии высоковольтной и низковольтной, канальной, стадии, которая характеризуется большой величиной токов и высокой концентрацией электронов. При этом переходной стадии соответствует пик мощности (рис. 3) длительностью 200 нс, который опережает максимум тока. Пик мощности связан с особенностями переходных процессов в электрической цепи. Из рис. 6 видно, что пик излучения, зафиксированного ФЭУ, опе-

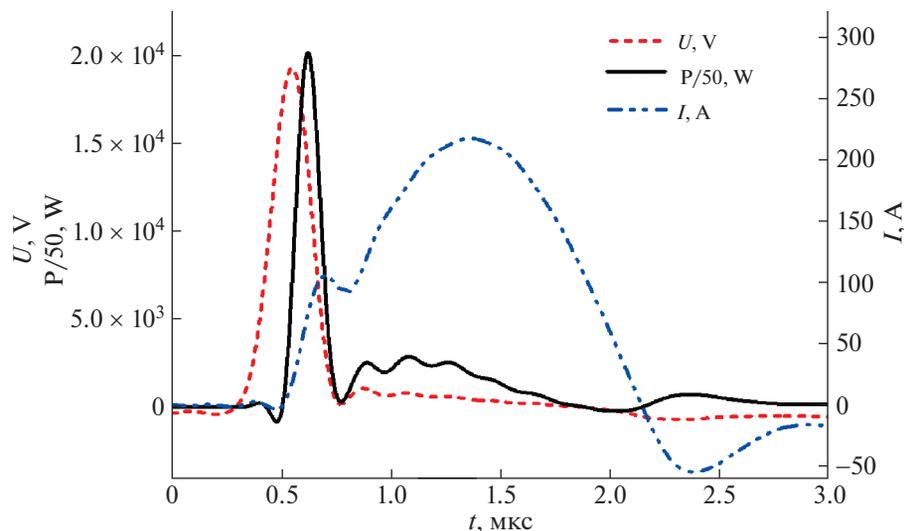


Рис. 3. Осциллограммы тока, напряжения и рассчитанная по ним мощность.

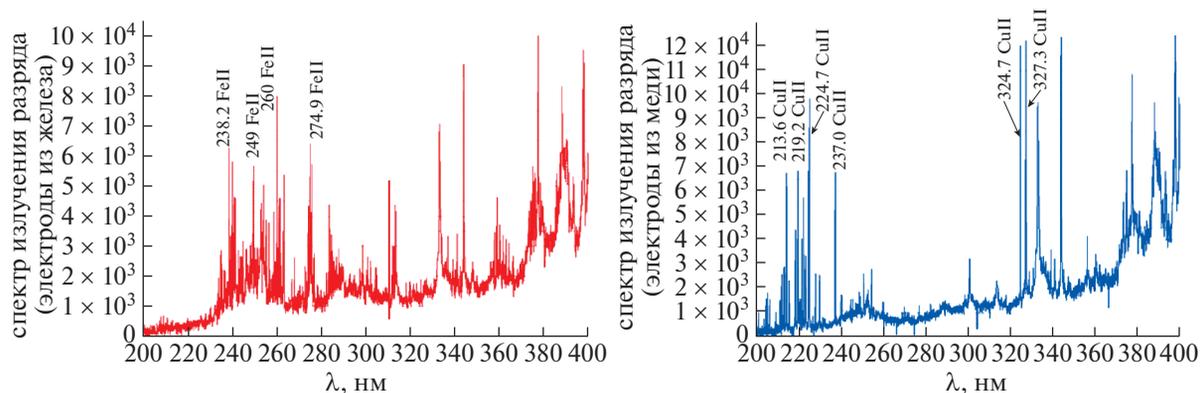


Рис. 4. Спектры излучения разрядника в диапазоне от 230 до 400 нм, с электродами, выполненными из нержавеющей стали (а) и меди (б).

режет максимум тока и при этом практически совпадает с максимумом мощности.

Из приведенных на рис. 7 осциллограмм следует, что сигналы с ФЭУ для разных областей разряда отличаются. В начале импульса основное свечение приходится на прианодную область. Оно совпадает по времени с пиком мощности, что способствует интенсивному распылению электрода, вероятно в результате взрывных процессов [13]. За вспышкой длительностью ~ 250 нс, следует резкий спад интенсивности излучения — это характерно для всех материалов. Начало свечения в катодной области практически совпадает с сигналом из анодной области. Длительность сигнала составляет 2.5 мкс, при этом основное излучение приходится на канальную стадию раз-

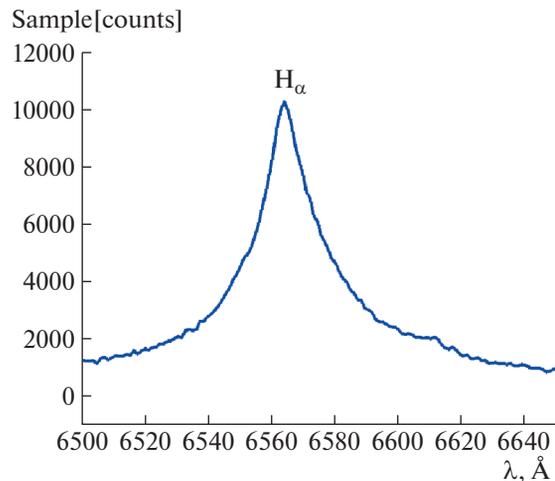


Рис. 5. Спектр излучения, линия H_{α} .

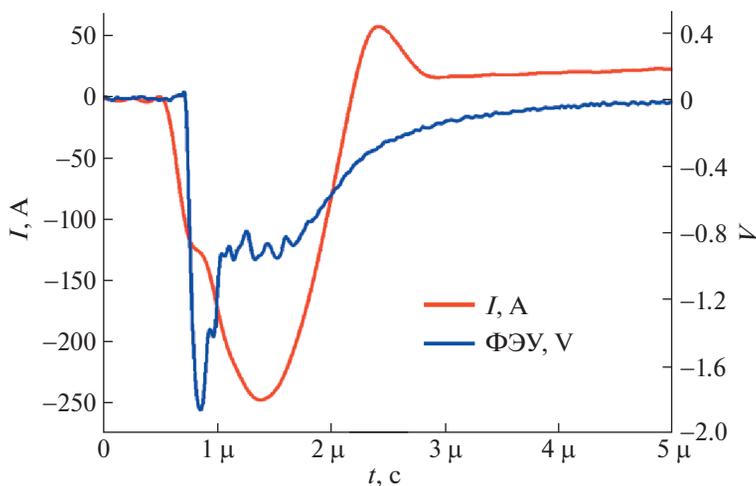


Рис. 6. Осциллограммы тока и ФЭУ-142 для электродов из нержавеющей стали для всего промежутка.

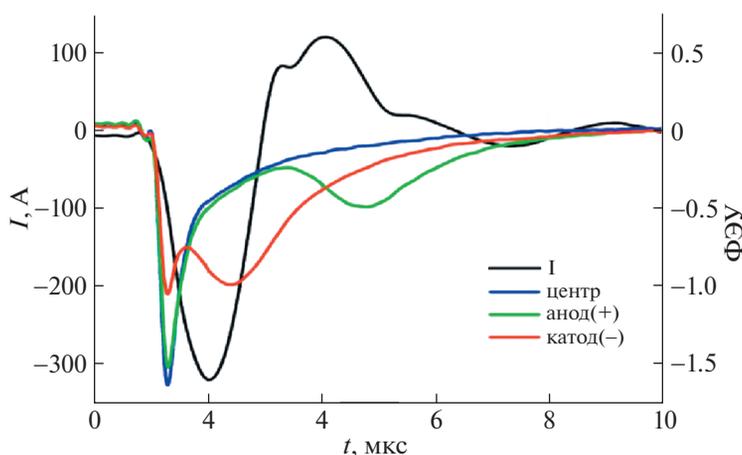


Рис. 7. Осциллограммы тока и ФЭУ-142 для электродов из нержавеющей стали из разных областей разрядного промежутка: на аноде, по центру, на катоде.

ряда. При этом временная картина излучения из центральной и анодной областей практически совпадает.

Из полученных результатов следует, что основным источником УФ-излучения являются приэлектродные области.

Количественные измерения УФ-излучения

Измерение УФ-излучения производилось методом актинометрии. Известно, что ферриоксалат калия в растворе, поглощая излучение в УФ-и видимой областях спектра, восстанавливается в результате фотопереноса электрона от оксалатной группы на ион Fe^{3+} и в растворе образуется ион Fe^{2+} [8]. Квантовый выход фотовосстановления ферриоксалата слабо изменяется в области 200–400 нм (уменьшается от 1.2 до 1.0) и остается

значительным в видимой области спектра, например, при 509 нм он равен 0.86 [14]. Эффективность поглощения изменяется в зависимости от длины волны гораздо сильнее, чем квантовый выход фотовосстановления ферриоксалата. Так раствор ферриоксалата поглощает 99% света при 400 нм и 61% при 436 нм. В этой связи при измерении интенсивности УФ-излучения с помощью ферриоксалата калия необходимо учитывать влияние на результаты видимой части спектра излучения разрядника.

На рис. 8 приведена зависимость выхода Fe^{2+} , регистрируемого спектрофотометрически в виде его комплекса с о-фенантролином, от времени облучения ферриоксалата. Электроды разрядника были сделаны из меди (рис. 8а) и нержавеющей стали (рис. 8б):

$$D_{510} = \epsilon lc,$$

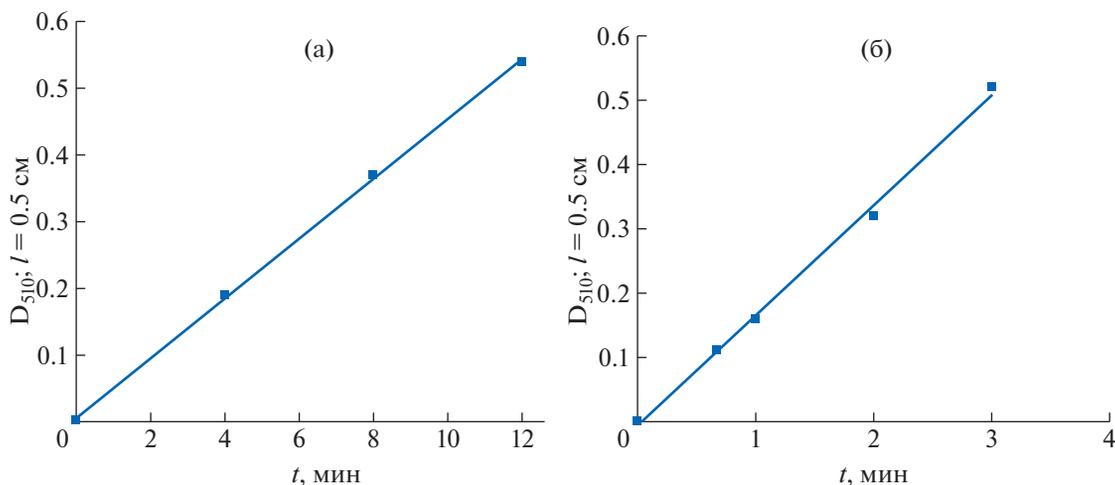


Рис. 8. Зависимость оптической плотности комплекса с о-фенантролином от времени облучения ферриоксалата, электроды из меди (а) и нержавеющей стали (б).

где D_{510} — оптическая плотность раствора, $\epsilon = 1.1 \times 10^4 \text{ М}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ — коэффициент экстинкции, $l = 0.5 \text{ см}$ — оптическая длина кюветы, c — концентрация двухвалентного железа.

Выполненные измерения показали, что выход фотовосстановления ферриоксалата прямо пропорционален времени экспозиции. По числу квантов разрядник с электродами, выполненными из нержавеющей стали, излучает почти в 4 раза интенсивнее, чем с электродами из меди. Рассчитанная по измеренным данным интенсивность излучения разрядника, приняв квантовый выход фотовосстановления ферриоксалата независимым от длины волны и равным 1.0, составляет 3.5×10^{15} квантов/импульс или 2.3×10^{16} квантов на Дж энергии, вложенной в разряд. Для разрядника с медными электродами интенсивность излучения в 3–3.5 раза меньше, чем для соответствующего по конструкции разрядника с электродами из нержавеющей стали. Была проведена попытка сравнить интенсивности УФ-излучения ($190 \text{ нм} \leq \lambda \leq 380 \text{ нм}$) разрядников с электродами из меди и нержавеющей стали с помощью прокалиброванного спектрографа Avaspek 2048 по схеме на рис. 1. Предварительные результаты показывают достаточно хорошее совпадение с данными актинометрии.

Для определения доли видимого света в результатах актинометрических измерений, были выполнены специальные эксперименты. Суть их состояла в том, что в некоторой точке относительно разрядника устанавливалась кварцевая кювета с ферриоксалатом калия (рис. 1), фотовосстановление которого определяли для двух случаев: в отсутствие и при наличии светофильтра БС-8. Светофильтр имеет крутую границу

пропускания в диапазоне 360–400 нм (50% пропускания при 380 нм, 0% при 360 нм и более 80% при 400 нм). В первом случае фотовосстановление ферриоксалата связано как с поглощением УФ, так и видимого света, во втором случае ферриоксалат восстанавливался в основном под действием видимого света. Очевидно, что разница этих величин соответствует интенсивности УФ-излучения разрядника в области $\lambda < 380 \text{ нм}$. Измерения, выполненные для разрядника с шестью разрядными промежутками, электродами из нержавеющей стали при вложенной в разряд энергии 0.2 Дж в импульсе, показали, что доля УФ-излучения составляет 80–85% от полной интенсивности излучения, регистрируемой ферриоксалатом (рис. 8б).

Для разрядника с медными электродами (рис. 8а) доля УФ-излучения, определенная таким же способом, составляла 65–75% от полной интенсивности излучения.

Принимая во внимание, что лишь 80% регистрируемого излучения разрядника обусловлено ультрафиолетом, получим, что УФ-излучение составляет для нержавеющей стали 2.8×10^{15} квантов/импульс и 1.8×10^{16} квантов на Дж энергии, вложенной в разряд, соответственно для меди 0.6×10^{15} квантов/импульс и 0.4×10^{16} квантов на Дж.

При этом КПД УФ-излучения разрядника с электродами из нержавеющей стали относительно вложенной в разряд энергии составляет ~1%. Средняя мощность УФ-излучения в диапазоне 200–380 нм составляет ~1 кВт в импульсе.

Для определения оптимальных условий генерации УФ-излучения были выполнены следующие эксперименты: для разрядных промежутков

длиной 1.5 мм, 3 мм и 11 мм была определена эффективность излучения УФ. Результаты свидетельствуют о том, что эффективность возрастает с уменьшением длины разрядного промежутка. Следовательно, многоэлектродная система с промежутками малой длины является предпочтительней для генерации УФ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют эффективность разрядного устройства в качестве источника УФ-излучения в диапазоне 200–380 нм – КПД 1%. Данную систему можно рассматривать как совокупность микроплазменных разрядов линейной геометрии с удельным энерговыделением ~ 1 кДж/см³. Возможны различные варианты конструкции (разрядной) системы, например кольцевые, спиральные и пр. Предлагаемое устройство может быть эффективно использовано в различных целях, в том числе в медико-биологических исследованиях и для обработки поверхностей.

Авторы благодарят Артемьева К.В. за участие в измерении спектров и обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аувхидиани А.М., Бархударов Э.М., Гелашвили Г.В., Косый И.А., Мелитаури И.Г., Силаков В.П. // Физика плазмы. 1996. Т. 22. С. 470.
2. Бережецкая Н.К., Грицинин С.И., Копьёв В.А., Косый И.А., Кулешов П.С., Попов Н.А., Старик А.М., Тарасова Н.М. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 1.
3. Kossyi I.A., Silakov V.P., Tarasova N.M. // Plasma Phys. Reports. 2001. V. 27. P. 757.
4. Бережецкая Н.К., Большаков Е.Ф., Голубев С.К., Дорофеев А.А., Косый И.А., Семёнов В.Е., Терёхин В.Е. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 1926.
5. Бархударов Э.М., Мдивнишвили М.О., Соколов И.В., Тактакишвили М.И., Терёхин В.Е. // Изв. АН СССР: Механика жидкости и газа. 1990. № 5. С. 183.
6. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A.B., Gutsol A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U., Mason N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 253001.
7. Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Косый И.А., Моряков И.В., Тактакишвили М.И., Тарасова Н.М. // Тез. 44 междунар. Звенигородской конф. 2017.
8. Hatchard C.G., Parker C.A. // Proc. Roy. Soc., London. 1956. V. A235. P. 518–536.
9. Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Двоенко А.В., Козлов Ю.Н., Косый И.А., Моряков И.В., Тактакишвили М.И., Темчин С.М. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 265–271.
10. Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Bark Yu.V., Zadira Yu.V., Christofi N., Kozlov Yu.N., Kop'ev V.A., Kossyi I.A., Silakov V.P., Taktakishvili M.I., Temchin S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 993.
11. Могунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012.
12. Грим Г. Уширения спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978.
13. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: Из-во МФТИ, 1997.
14. Калвер Дж., Питтс Дж. Фотохимия. М., 1968.

UV Radiation of High-Voltage Multi-Electrode Surface Discharge in Gaseous Medium

A. M. Anpilov^a, E. M. Barkhudarov^a, Yu. N. Kozlov^{b, c}, I. A. Kossyi^a, M. A. Misakyan^d, I. V. Moryakov^{a, *}, M. I. Taktakishvili^a, N. M. Tarasova^a, and S. M. Temchin^a

^a Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

^b Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

^c Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, 117997 Russia

^d National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia

* e-mail: igor_miw@mail.ru

Abstract—UV radiation of high-voltage pulsed multispark surface discharge in atmospheric-pressure air in the spectral range of 200–380 nm was investigated. The discharge was a sequence of microplasma objects with a specific energy deposition of ~ 1 kJ/cm³ and electron density of 10^{17} cm⁻³. Copper and stainless steel were used as the electrode materials. It is found that lines of atoms and ions of the electrode material dominate in the discharge UV spectrum. The UV radiation intensity was measured using the actinometry technique. The UV radiation efficiency relative to the energy deposited in the discharge is found to be $\sim 1\%$.