

УДК 537.523.2

Влияние частоты питающего напряжения и материала диэлектрического барьера на спектральный состав излучения плазмы поверхностного разряда

А.В. Лазукин, Д.И. Кавыршин, С.А. Кривов, С.Д. Федорович

Сведения об авторах

Лазукин Александр Вадимович — научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Кавыршин Дмитрий Игоревич — младший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН

Кривов Сергей Анатольевич — доктор технических наук, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: KrivovSA@mpei.ru

Федорович Сергей Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ»

Приведены результаты экспериментальных исследований энергетической освещенности в УФ-диапазоне излучения и спектрального состава излучения плазмы поверхностного разряда в зависимости от материала диэлектрического барьера и частоты питающего напряжения. Опыты проводились на осесимметричных электродных системах с электродом в форме диска при питании синусоидальным напряжением частотой от 0,6 до 35 кГц. В качестве материала барьера использованы корундовые керамики различного состава, керамика из чистого нитрида алюминия, сверхвысокий молекулярный полиэтилен и синтетический рубин. Толщина всех барьеров, использованных в работе — 1 мм. Показано, что взаимодействие плазмы разряда с материалом диэлектрического барьера может менять оптический спектр разряда. Например, наблюдалось возникновение непрерывного спектра для нитрида алюминия и отдельные спектральные линии при добавлении малого количества оксида хрома в состав корундовой керамики. Наличие непрерывного спектра излучения плазмы разряда по поверхности нитрида алюминия способствует росту УФ-А-составляющей излучения. Наиболее интенсивное излучение среди рассматриваемых вариантов материалов барьера наблюдалось в УФ-А-диапазоне. Энергетическая освещенность, создаваемая плазмой поверхностного разряда, на три порядка ниже значений, применяемых в качестве доз при предпосевной стимуляции семян. При времени экспозиции 5 мин плазма разряда обеспечивает дозу облучения 45 Дж/м², необходимую для стимуляции семян (доза 4 — 60 кДж/м²). С другой стороны, излучение плазмы не может спровоцировать минимальные повреждения ДНК облучаемого объекта. Доза излучения в УФ-С при экспозиции 15 мин не превышает дозы провокации минимального повреждения ДНК, а именно, образования димера тимина в расчете на длину волны 254 нм. По кривой зависимости энергии разряда от частоты питающего напряжения можно определить область частот, при которых осуществляется переход к более высокоэнергетической форме разряда. Подобный переход связан с ростом УФ-С-составляющей в излучении.

Ключевые слова: поверхностный разряд, энергетическая освещенность, УФ-диапазон, диэлектрический барьер, частота питающего напряжения, оптический эмиссионный спектр.

The effect the power supply frequency and the dielectric barrier material have on the radiation spectrum from surface discharge plasma

A.V. Lazukin, D.I. Kavyrshin, S.A. Krivov, S.D. Fedorovich

Information about authors

Lazukin Aleksandr V. — researcher of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI, SSC RF JSC «NGO «CNIITMASH»

Kavyrshin Dmitriy I. — junior researcher of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

Krivov Sergey A. — Dr.Sci. (Techn.), professor of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI, e-mail: KrivovSA@mpei.ru

Fedorovich Sergey D. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of general physics and nuclear fusion dept., MPEI

The results from experimental studies of irradiance in the UV range and the spectral composition of radiation from the surface discharge plasma as a function of the dielectric barrier material and power supply frequency are presented. The experiments were carried out using axially symmetrical electrode systems containing a disk-shaped electrode by applying a sine-wave power supply voltage with a frequency from 0.6 to 35 kHz. Alumina ceramics of different composition, ceramics from pure aluminum nitride, ultrahigh molecular weight polyethylene, and synthetic ruby were used as the barrier material. The thickness of all barriers used in the study was equal to 1 mm. It is shown that the interaction of discharge plasma with the dielectric barrier material can change the discharge's optical spectrum. For example, the occurrence of a continuous spectrum for aluminum nitride and separate spectral lines in case of adding a small quantity of chromium oxide in the composition of alumina ceramics were observed. The presence of a continuous spectrum of discharge plasma radiation over the aluminum nitride surface facilitates the growth of the UV-A radiation component. The most intense radiation among the considered barrier material versions was observed in the UV-A band. The irradiance formed by surface discharge plasma is three orders of magnitude lower than the values used as doses in subjecting seeds to preplant stimulation. With the exposure time equal to 5 min, the discharge plasma produces the radiation dose equal to 45 J/m² necessary to stimulate seeds (the stimulating dose is in the range from 4 to 60 kJ/m²). On the other hand, the plasma radiation cannot provoke even the minimal damage to the DNA of the irradiated object. The radiation dose in the UV-C band with a 15-min exposure does not exceed the minimum DNA damage inducing dose, namely, the formation of thymine dimer in recalculation for a 254 nm wavelength. By using the discharge energy versus the power supply frequency curve, it is possible to determine the range of frequencies at which the transition to a more high-energy form of discharge takes place. This transition is associated with an increase of the UV-C component in the radiation.

Key words: surface discharge, irradiance, UV band, dielectric barrier, power supply frequency, optical emission spectrum.

Введение

Поверхностный диэлектрический барьерный разряд применяется в сельском хозяйстве [1], пищевой промышленности [2], при электросинтезе озона [3], удалении загрязнений [4], управлении аэродинамикой воздушных потоков [5]. В любом из перечисленных направлений интерес представляет информация о составе излучения плазмы поверхностного разряда и энергии излучения. Интенсивное излучение в области УФ-В (средневолновый диапазон 3,9—4,4 эВ, 280—315 нм) и УФ-А (длинноволновый диапазон 3,1—3,9 эВ, 315—400 нм) способствует стимуляции посевного материала. Линии красного света (600—700 нм) активно поглощаются в растительных клетках, что также стимулирует как развитые растения, так и посевной материал [6]. Взаимное действие УФ-излучения и озона при обеззараживании поверхностей имеет более значительный эффект, чем использование каждого из этих факторов в отдельности [7, 8]. С другой стороны, при использовании поверхностного разряда в качестве источника заряженных частиц [9, 10] и при управлении аэродинамикой воздушного потока [5] энергия разряда, расходуемая на излучение, относится к паразитным потерям, наличие которых неизбежно, но их уровень желательно ограничить для повышения эффективности источника заряженных частиц.

Классический спектр поверхностного разряда атмосферного давления в воздухе содержит набор линий излучения молекулярного азота в области 300—400 нм [11] (вторая положительная система азота). В области коротковолнового УФ-излучения (между 200 и 300 нм) лежат линии излучения оксидов азота, в красной области спектра 590—900 нм в зависимости от энергетики разряда проявляются линии первой положительной системы азота [12]. Интенсивность линий коротковолнового УФ-излучения и линий первой положительной системы азота во влажном воздухе атмосферного давления при умеренном (1,5—2 раза) перенапряжении

на электродах уже на 5 мм от плоскости барьера значительно ниже, чем излучение второй положительной системы азота.

В [13] отмечено, что спектр поверхностного разряда в системе параллельных полос на технической керамике ВК-94 содержит устойчивую линию, близкую к 690 нм, которая не входит в первую положительную систему азота. Авторы связывают наличие этой линии с тепловыми взаимодействиями в плазме. Такое предположение определено требует дополнительной проверки.

При исследовании воздействия УФ-излучения на свойства растительных материалов (посевные качества семян) интерес представляет энергетическая освещенность, измеряемая УФ-радиометрами [14]. В различных работах по исследованию воздействия плазмы поверхностного разряда на биологические объекты, влияние фотонов, излучаемых плазмой, рассматривается наравне с влиянием заряженных частиц, переменных полей и химически активных частиц. Сравнительные данные по энергетической освещенности позволили бы прояснить данный вопрос.

Повышение частоты напряжения питания способствует росту выхода продуктов плазмы поверхностного разряда (например, выход озона [3]). Предполагается, что существует линейная зависимость интенсивности излучения и энергетической освещенности плазмы поверхностного разряда от частоты питающего напряжения. При этом для контроля формы разряда можно использовать данные об энергии, получаемой на основании измерений по методу вольт-кулонных характеристик [15]. Необходимо также учитывать тот факт, что существует определенная частота, при которой разряд переходит в более интенсивную и высокотемпературную форму [16].

Экспериментальная часть

Схематическое изображение экспериментального стенда приведено на рис. 1. В качестве электродов, фор-

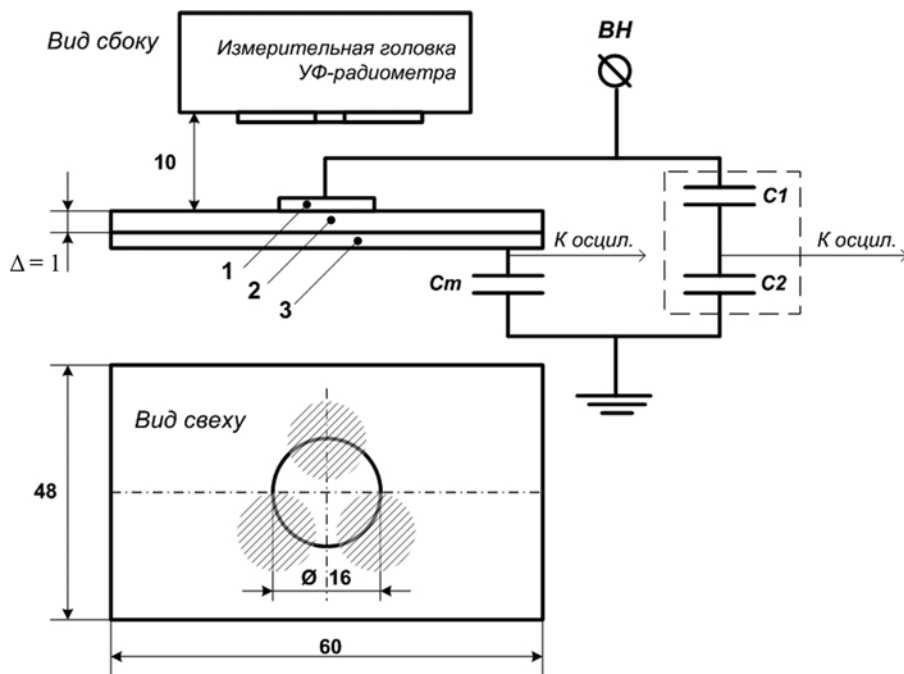


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

мирующей плазмы поверхностного разряда, использовались идентичные фольговые диски 1 диаметром 16 мм, наклеенные на центр диэлектрической пластины 2. Толщина пластины $\Delta = 1$ мм, линейные размеры 60×48 мм. С другой стороны диэлектрической пластины 2 размещается обратный электрод 3, занимающий всю ее поверхность. Материал диэлектрического барьера — технические корундовые керамики ВК-94 (Al_2O_3 94% с добавлением оксида кремния, оксида хрома и оксида марганца) и ВК-96 (Al_2O_3 96% с добавками оксидов кремния и титана), керамика из чистого нитрида алюминия и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Для сравнительного исследования красной области спектра излучения плазмы поверхностного разряда был использован барьер из синтетического рубина (чистый оксид алюминия с добавлением 0,05 весовых процентов оксида хрома; выращен на установке зонной плавки УРН-23М).

Ввод высокого напряжения выполнен в середину электрода-диска 1, что позволило избежать искажений разряда за счет краевых эффектов. Диаметр электрода-диска (16 мм) подобран в соответствии с конструкцией измерительной головки УФ-радиометра (УФ-радиометр ТКА-ПКМ-12, ООО «Научно-техническое предприятие «ТКА»). Фотоприемные устройства, проекция положений которых на плоскость электродной системы показана на рис. 1 штриховкой, находятся в равнозначных условиях облучения. Электрод 3, расположенный на обратной стороне диэлектрической пластины 2, заземлен через измерительный конденсатор. Емкость измерительного конденсатора $C_m = 37,6$ нФ. Геометрическая емкость электродной системы без плазмы разряда — 16 пФ (емкости измерены цифро-

вым RLC -метром E7-22 на частоте 1 кГц). Напряжение питания измерялось (контролировались частота напряжения и его действующее значение) с помощью высоковольтного делителя $C1/C2$ (высоковольтный делитель типа P6015A, Tektronix). Сигналы с нижнего плеча делителя и измерительной емкости использовались для получения вольт-кулонной характеристики (ВКХ) с помощью цифрового осциллографа (TDS3054, Tektronix).

Для питания электродной системы применялись высоковольтные высокочастотные источники на базе полупроводниковых полумостовых инверторов с различными комбинациями высоковольтных трансформаторов и дросселей. Частота питающего напряжения варьировалась в диапазоне 600 Гц — 35 кГц.

Использованный в работе УФ-радиометр относится к спектральному типу и имеет сравнительно нелинейную чувствительность в различных измерительных диапазонах [17]. Наиболее интенсивные спектральные линии излучения поверхностного разряда расположены в диапазонах УФ-А и УФ-В (рис. 2). Пересечение измерительных диапазонов А и В в области 300—320 нм затрудняет интерпретацию данных в диапазоне УФ-В. Таким образом, измерения и сравнения проводились по данным, собранным в диапазонах УФ-А и УФ-С. Плоскость фотометрической головки радиометра находилась на расстоянии 10 мм от плоскости барьера.

Для регистрации эмиссионного спектра в работе использовался дифракционный трехканальный волоконно-оптический спектрометр «AvaSpec-ULS2048x16» фирмы «Avantes», позволяющий выполнить калиброванные спектрорадиометрические измерения при исследовании спектров испускания, тре-

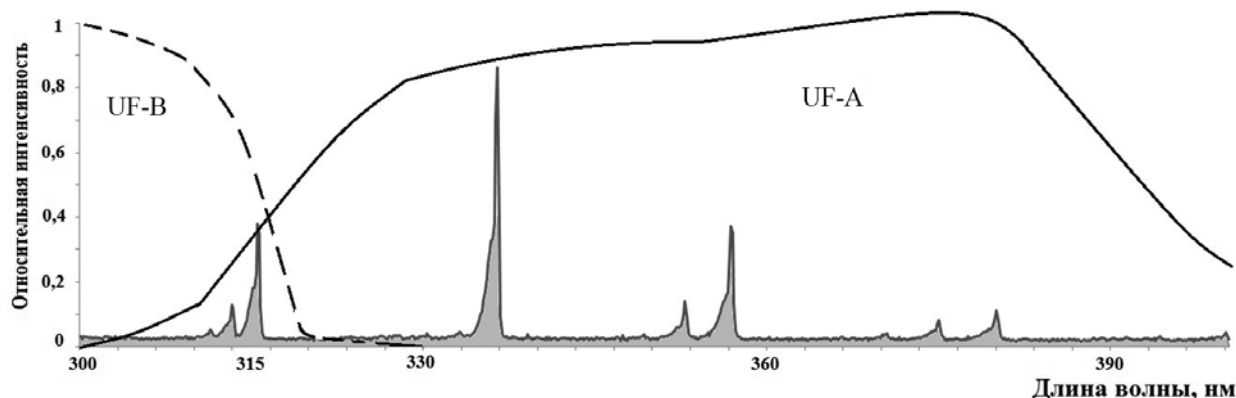


Рис. 2. Типичный спектр поверхностного разряда с наложением чувствительности фотоприемных устройств прибора ТКА-ПКМ-12 по диапазонам УФ-А и УФ-В

бующих достаточно высокой разрешающей способности в широком спектральном диапазоне (300—1100 нм). Ультрафиолетовый канал спектрометра имеет разрешение не хуже 0,18 нм, канал видимого диапазона — не хуже 0,12 нм, а инфракрасный канал — не хуже 0,3 нм. Входное сечение оптоволоконного кабеля спектрометра помещалось на расстоянии нескольких сантиметров от исследуемого образца, что свело к минимуму эффекты, связанные с поглощением излучения плазмы в воздухе.

Результаты и обсуждение

Спектр плазмы разряда по поверхности технической керамики ВК-94 кроме традиционного набора линий излучения систем азота содержит две линии, лежащие в красной области спектра, близкие к 693 и 695 нм (участок зарегистрированного спектра при 3,5 кВ действующего напряжения приведен на рис. 3). Указанные линии отсутствуют в излучении поверхностного разряда на барьерах нитрида алюминия, технической керамики ВК-96 и СВМПЭ. Данные линий соответствуют известным линиям излучения рубинового лазера. Для проверки способности излучения плазмы поверхностного разряда атмосферного давления к возбуждению атомов хрома в материале барьера и исключения влияния прочих примесей был подготовлен барьер из синтетического рубина с концентрацией оксида хрома, близкой к оптимальной для лазерного рубина. В спектре излучения плазмы, существующей на поверхности рубинового барьера, также присутствуют линии, близкие к 693 и 695 нм (участок спектра изображен на рис. 4). Следовательно, плазма поверхностного разряда передает в диэлектрический барьер энергию, достаточную для возбуждения атомов хрома.

Спектр плазмы разряда на барьере из СВМПЭ менее интенсивный, чем на барьерах из керамических материалов, энергетическая освещенность в УФ-С диапазоне у полимера ниже почти на порядок. В диапазоне УФ-А спектр плазмы на барьере из нитрида

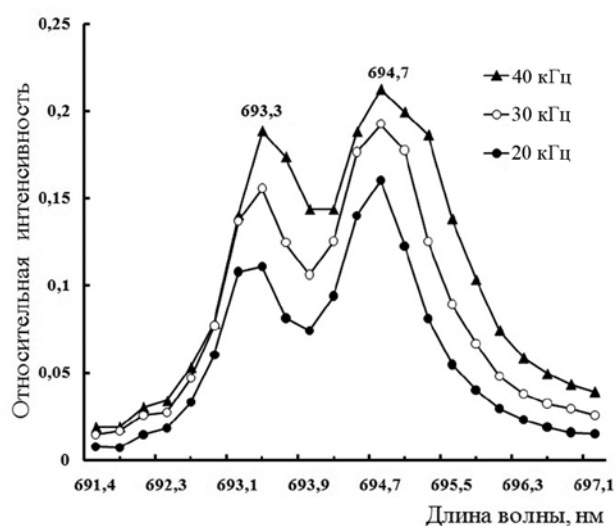


Рис. 3. Участок спектра разряда по поверхности керамики ВК-94 при разных частотах

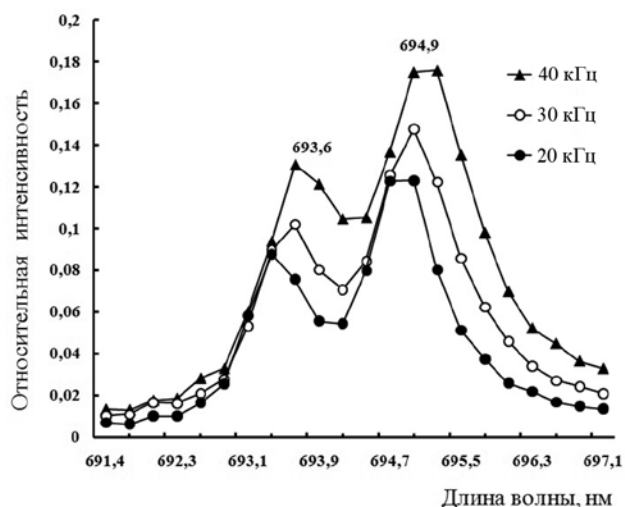


Рис. 4. Участок спектра разряда по поверхности синтетического рубина при разных частотах

алюминия наиболее интенсивный. В диапазоне УФ-С наибольшая энергетическая освещенность наблюдается на барьерах из оксида алюминия (рис. 5).

Сравнительно высокая интенсивность линий, входящих в УФ-А-диапазон, в плазме на барьере из нитрида алюминия связана с наличием в ее спектре излучения достаточно широкого континуума. Сравнение спектров разряда на корундовой керамике и нитриде алюминия показано на рис. 6. Как видно из рис. 7, континуум не зависит от действующего напряжения, приложенного к электродам, и частоты питающего напряжения.

С ростом частоты питающего напряжения интенсивность континуума не меняется, однако возрастает интенсивность отдельных спектральных линий. Это объясняет то обстоятельство, что на высоких частотах энергетические освещенности в УФ-А-диапазоне, создаваемые плазмой на поверхности корундовых керамик и нитрида алюминия, становятся близкими по значению (см. рис. 5, левый фрагмент). Наличие кон-

тинуума, как и наличие линий 693 и 695 нм связано с взаимодействием плазмы разряда с поверхностью диэлектрического барьера.

Положительный эффект на всходы при прямой УФ-обработке семян яровой пшеницы наблюдается при дозах 4—5 кДж/м² (лампа ДРТ-400) [6]. Оптимальная доза УФ-излучения для семян хлопчатника — около 60 кДж/м² (лампа ДРТ -240) [18]. УФ-лампа мощностью 8 Вт, расположенная на расстоянии 10 мм от измерительной головки УФ-радиометра ТКА-ПКМ-12, дает следующие значения энергетической освещенности: диапазон УФ-А — 0,76 Вт/м², диапазон УФ-С — 25 Вт/м². Дозы излучения, которые может обеспечить система с поверхностным разрядом в рассматриваемой геометрии при 15-минутной экспозиции, достигают 45 Дж/м² в УФ-А-диапазоне и 3,5 Дж/м² в УФ-С-

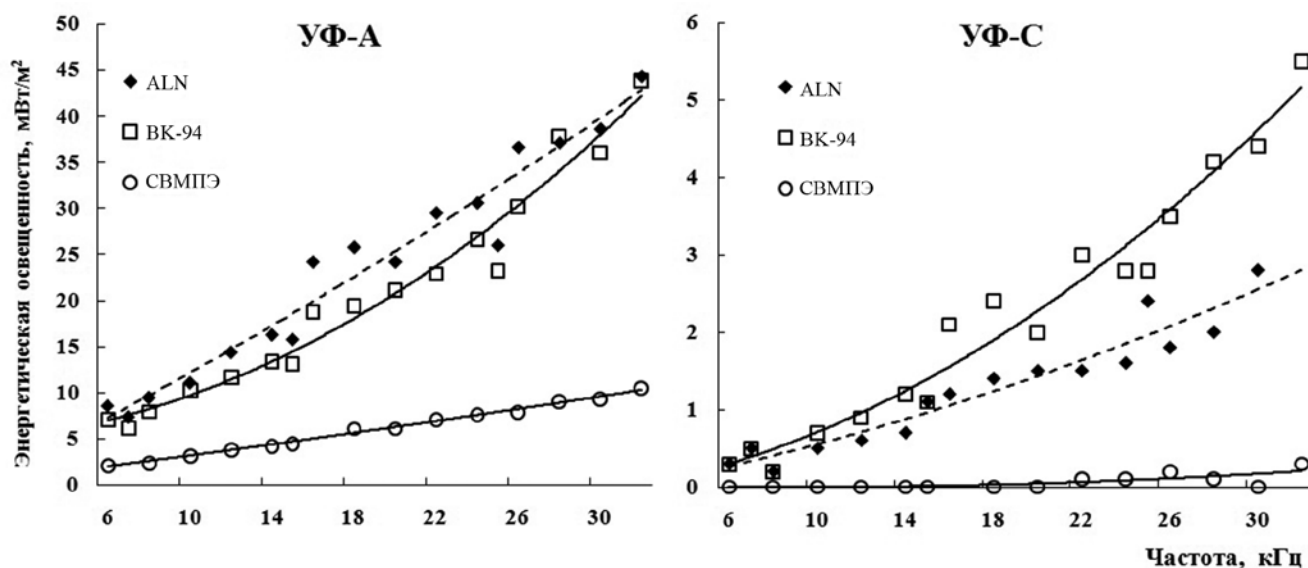


Рис. 5. Энергетическая освещенность, создаваемая плазмой поверхностного разряда, существующей на барьерах из нитрида алюминия, BK-94 и СВМПЭ, для диапазонов УФ-А и УФ-С, различных частот и напряжения 3,5 кВ

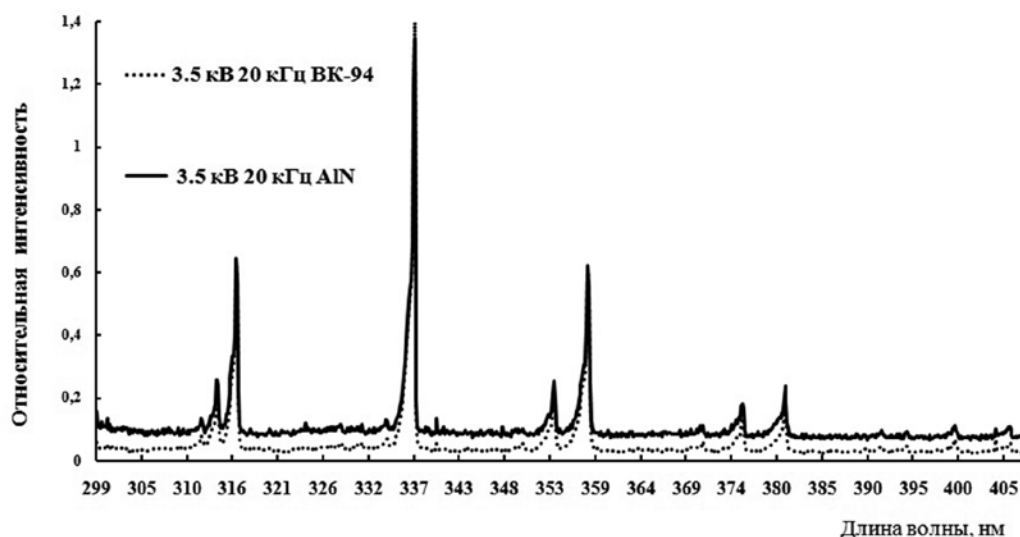


Рис. 6. Участок эмиссионного спектра разряда в диапазоне УФ-А на барьерах из керамики BK-94 и нитрида алюминия

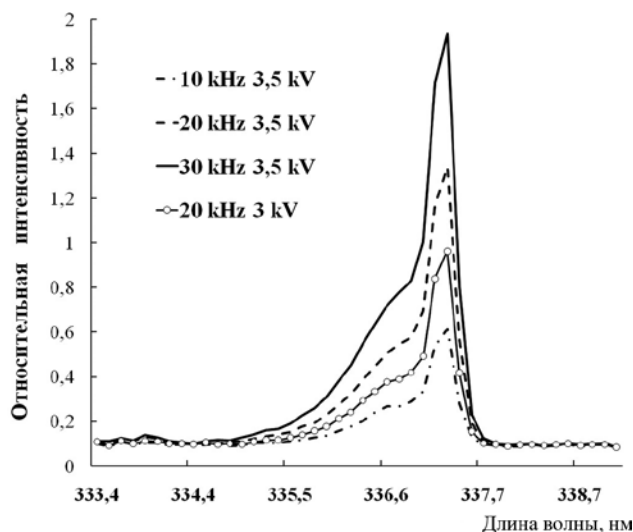


Рис. 7. Участок эмиссионного спектра разряда по поверхности керамики BK-94

диапазоне (3,5 кВ, 30 кГц). Указанные дозы на три порядка ниже желательных, таким образом, даже с учетом существующих затруднений и возможных погрешностей при измерении энергетической освещенности источников [19] сложно предполагать, что УФ-излучение поверхностного разряда является эффективным действующим фактором для предпосевной подготовки семян. С другой стороны, доза излучения в УФ-С (при 15-минутной экспозиции) не превышает дозы провокаций минимального повреждения ДНК, а именно, образования димера тимина, составляющей 5 Дж/м^2 (доза принятая для повреждения молекулы ДНК в расчете на длину волны 254 нм) [20].

При анализе графиков зависимости энергетической освещенности от частоты питающего напряжения (см. рис. 5) видно, что в диапазоне УФ-С плазма разряда

по поверхности керамики BK-94 излучает более интенсивно, чем на поверхности нитрида алюминия. С ростом частоты различия между значением энергетической освещенности все более значительные. Визуально в разряде на поверхности керамики BK-94 (как и на BK-96) наблюдаются протяженные шнуры. Подобные образования описаны в [16], и появление их связано с ростом частоты (или повышением напряжения питания). Для контроля перехода поверхностного разряда к высокоэнергетической форме были построены зависимости энергии разряда (на основании полученных ВКХ) от частоты для плазмы поверхностного разряда на различных материалах барьера (рис. 8). Кривая зависимости энергии разряда по поверхности корундовой керамики постепенно возрастает при повышении частоты выше 20 кГц.

Как следует из рис. 8, энергия разряда по поверхности СВМПЭ ниже, чем энергия разряда по поверхности керамических барьеров. Количественно при частоте 30 кГц отношение энергий разряда по поверхности нитрида алюминия и СВМПЭ составляет 4,6. Отношение энергии для керамики BK-94 и СВМПЭ при той же частоте составляет 7. С учетом этих результатов совершенно иначе могут быть представлены результаты по излучению (см. рис. 5). Отношение энергетической освещенности, создаваемой плазмой разряда на керамическом барьере (как на барьере из нитрида алюминия, так и на барьере из корундовой керамики), к энергетической освещенности, создаваемой плазмой на барьере из СВМПЭ в диапазоне УФ-А, составляет 4 раза, в диапазоне УФ-С более 10 раз. Следовательно, доля энергии, переносимая из плазмы в излучение может быть более значительной для керамических барьеров. Однако, для уточнения этого вопроса необходимо провести исследования абсолютной излучательной способности поверхностного разряда на различных барьерах.

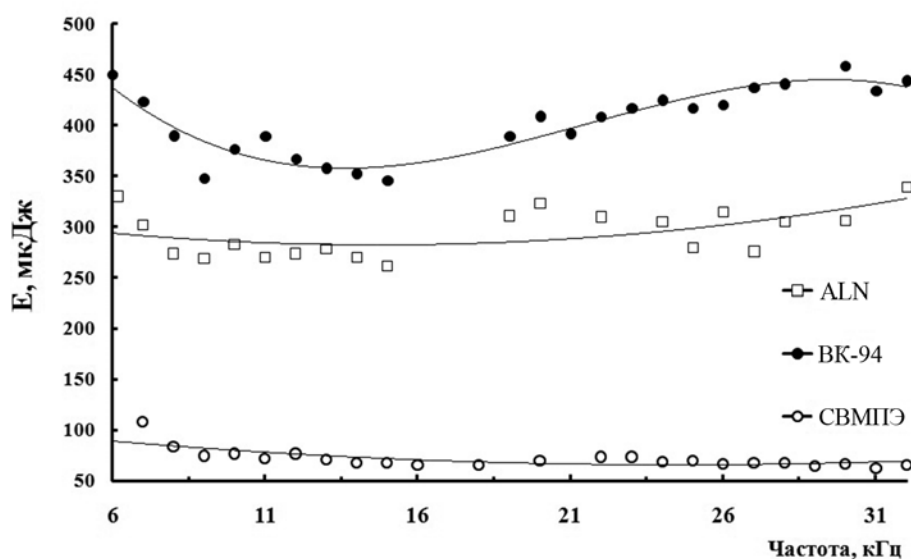


Рис. 8. Зависимость энергии поверхностного разряда от частоты питающего напряжения (3,5 кВ действующего)

Выводы

Таким образом, наличие линий в эмиссионном спектре плазмы разряда по поверхности корундовой керамики 693 и 695 нм связано с наличием оксида хрома в ее составе.

Сравнительно высокая интенсивность линий, входящих в УФ-А-диапазон, в плазме на барьере из нитрида алюминия связана с наличием в ее спектре излучения достаточно широкого континуума. Причины возникновения и свойства которого будут приведены в последующих работах.

Интенсивность излучения плазмы на поверхности барьера СВМПЭ значительной ниже, чем на керамических барьерах.

Переход к более высокоэнергетической форме поверхностного разряда сопряжен с ростом интенсивности излучения в диапазоне УФ-С.

Литература

1. **Dobrin D., Magureanu M., Mandache N., Ionta M.D.** The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth // *Innovative Food Sci. and Emerging Tech.* 2015. V. 29 P. 255—260.
2. **Schlüter O. e. a.** Opinion on the use of plasma processes for treatment of foods // *Mol. Nutr. Food Res.* 2013. V. 57. P. 920927.
3. **Pekárek S.** Experimental study of surface dielectric barrier discharge in air and its ozone production // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 075201.
4. **Jolibois J., Takashima K., Mizuno A.** Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NO_x removal // *J. Electrostatics.* 2012. V. 70. P. 300—308.
5. **Moreau E.** Airflow control by non-thermal plasma actuators // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40 P. 605—636.
6. **Курочкина О.А.** Предпосевная обработка семян яровой пшеницы ультрафиолетовыми лучами: дис... канд. с-х наук. Курган, 2009.
7. **Fernández A., Thompson A.** The inactivation of Salmonella by cold atmospheric plasma treatment // *Food Research Intern.* 2012. V. 45. P. 678—684.
8. **Boudam M. K. e. a.** Bacterial spore inactivation by atmospheric-pressure plasmas in the presence or absence of UV photons as obtained with the same gas mixture // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. V. 39. P. 3494—3507.
9. **Мошкунев С.И. и др.** Электродинамический эффект, получаемый при высокочастотном барьерном разряде в газе // *Прикладная физика.* 2011. Вып. 6. С. 32—38.
10. **Лазукин А.В., Кривов С.А.** О возможностях применения поверхностного разряда для осаждения аэрозоля // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. 18 Междунар. науч.-техн. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. Т. 4. С. 461—462.*
11. **Biganzoli I. e. a.** Optical and electrical characterization of a surface dielectric barrier discharge plasma actuator // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2013. V. 22. P. 025009.
12. **Kitazaki S., Koga K., Shiratani M., Hayashi N.** Effects of Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma Irradiation on Yeast Growth // *Res. Soc. Symp. Proc.* 2012. P. 1469.
13. **Андреев В.В., Васильева Л.А.** Исследование поверхностного барьерного разряда, создаваемого электродами в виде ряда параллельных полос // *Прикладная физика.* 2012. Вып. 6. С. 116—123.
14. **ГОСТ Р 8.759—2011.** ГСИ. Измерение энергетической освещенности и энергетической экспозиции ультрафиолетового излучения в фотобиологии. Методика измерений.
15. **Manley T.** The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge // *Trans. Electrochem. Soc.* 1943. V. 84. P. 83—96.
16. **Thomas F. O., Corke T., Iqbal M., Kozlov A., Schatzman D.** Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control // *J. AIAA.* 2009. V. 47. P. 2169—2178.
17. **Научно-техническое предприятие «ТКА»** [Офиц сайт]. <http://www.tkaspb.ru/main/index.php?productID=27> (дата обращения 11.09.16).
18. **Юлдашев Р.З.** Повышение посевных качеств семян хлопчатника в республике Таджикистан методами предпосевого ультрафиолетового и низкотемпературного плазменного облучения: автореф. дис... канд. техн. наук. СПб., 2013.
19. **Антонов В.В., Ишанин Г.Г.** Коррекция спектральной чувствительности УФ-радиометра спектрофотометрическим методом // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.* 2011. № 3 (73). С. 9—14.
20. **Конев С.В., Вологовский И.Д.** Фотобиология. Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1979.

Статья поступила в редакцию 23.05.2016