

УДК 537.523.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВЕРХНОСТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОДНЫХ
СИСТЕМАХ С НАНОРАЗМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ TiO₂**А.В. Лазукин¹, В.А. Михалевский², О.А. Новодворский²,
С.А. Кривов¹¹Московский энергетический институт² Институт проблем лазерных и информационных
технологий РАН, г. Шатура

E-mail: lazukinav@mpei.ru, lazukin_av@mail.ru

Лазукин Александр Вадимович, аспирант, млад. науч. сотр. кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Института электроэнергетики Московского энергетического института.

E-mail: lazukin_av@mail.ru

Область научных интересов: поверхностный диэлектрический барьерный разряд, высоковольтные электротехнологии, электрофизика.

Кривов Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Института электроэнергетики Московского энергетического института.

E-mail: KrivovSA@mpei.ru

Область научных интересов: высоковольтные электротехнологии, электростатика, электрический разряд, поверхностный диэлектрический барьерный разряд, плазма разряда.

Новодворский Олег Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., заведующий лабораторией наноструктур и тонких пленок Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук.

E-mail: onov@mail.ru

Область научных интересов: импульсное лазерное напыление, тонкие пленки, низкоразмерные структуры.

Михалевский Владимир Александрович, аспирант, мл. науч. сотр. Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук.

E-mail: uhr@inbox.ru

Область научных интересов: импульсное лазерное напыление, тонкие пленки, низкоразмерные структуры

Связь между свойствами диэлектрического барьера и характеристиками поверхностного разряда представляет интерес для различных областей высоковольтных электротехнологий (например, в технологиях обеззараживания). Целью данной работы является исследование поверхностного диэлектрического барьерного разряда по поверхности наноразмерного покрытия TiO₂ и его влияние на интегральные оптические характеристики разряда. Разряд создавался синусоидальным напряжением, частотой 14 кГц, в герметичном плазмохимическом реакторе во влажном воздухе атмосферного давления на поверхности барьеров из керамических диэлектриков на основе Al₂O₃ и TiO-MgO и барьеров из керамики на основе Al₂O₃ с наноразмерным покрытием TiO₂. Исследовались спектральные характеристики разряда и внешний вид разрядной зоны. Показано, что интенсивность излучения более значительна на барьере на основе TiO-MgO, при большей потребляемой мощности. Наличие покрытия TiO₂ на барьере на основе Al₂O₃ не повышает интенсивность излучения по сравнению с барьером без покрытия. Также показано, что при длительном воздействии разряда на поверхности покрытия образуются проводящие треки. Результаты исследования показывают, что нанесение покрытия TiO₂, толщиной 90 нм, не позволяет увеличить интенсивность излучения поверхностного разряда. Появление и обесцвечивание треков на поверхности покрытия происходит в результате его обескислороживания и может являться одной из причин повышения концентрации озона на выходе из реактора.

Ключевые слова:

Поверхностный разряд, диэлектрический барьер, диоксид титана, выход заряженных частиц, выход озона, дополнительный электрод, спектр разряда.

Развитие разряда вблизи поверхности твердого диэлектрика зависит от его свойств [1]. Исследования развития подобных разрядов связаны не только с необходимостью их подавления в высоковольтных установках, где скользящие разряды и частичные поверхностные дуги приносят явный вред, являясь причиной постепенного разрушения изоляционных конструкций, эрозии контактов и паразитных потерь мощности, но и с технологическими применениями этого явления. При этом влияние (требуемое

или негативное) может оказываться не только разрядом непосредственно, но и химически активными частицами, а также излучением, возникающими при его развитии, что значительно расширяет зону воздействия. Так УФ-излучение, возникающее при возникновении поверхностного разряда, используется в технологиях связанных с разрушением летучих органических соединений, уничтожением болезнетворных бактерий и разложением загрязнителей в воде. В данной работе исследуются возможные пути повышения интенсивности излучения при переходе от одного материала барьера и к другому и при использовании наноразмерных покрытий на поверхности барьера.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик поверхностного разряда для трех различных типов диэлектрических барьеров. Барьеры представляют собой керамические пластины 15x85 мм, толщиной 1 мм. Один вариант из керамики ВК-94 ($\epsilon=9$), второй из керамики МТ-16 (ООО «Керамика», г. Санкт-Петербург, $\epsilon=16$) и третий из керамики ВК-94 на который, нанесено покрытие TiO_2 , толщиной 90 нм (покрытие закрывает электрод и поверхность барьера. Импульсное лазерное осаждение пленок проводилось в вакуумной камере, откачиваемой турбомолекулярным насосом ТМН - 500 до давления $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Для абляции мишеней использовалось излучение второй гармоники ($\lambda = 532$ нм) Nd:YAG – лазера с модуляцией добротности (длительность импульса по полувывсоте 15 нс, энергия в импульсе до 250 мДж, частота повторений импульсов 10 Гц). Пленки осаждались при температуре подложки $T = 300$ °С. Осаждение осуществлялось в атмосфере молекулярного кислорода при давлении 2×10^{-2} Торр.

Электроды, для формирования нормального к поверхности барьера распределения электрического поля выполнены из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм. Плазмогенерирующий электрод (ПГЭ) шириной 1 мм, длиной 70 мм, электрод-подложка – шириной 10 мм, длиной 80 мм. Края ПГЭ залиты диэлектрическим компаундом для подавления краевых эффектов. Открытая длина разрядной зоны составляет 60 мм.

Для измерения интенсивности излучения в диапазоне спектральных линий от 200 до 1000 нм была подготовлена экспериментальная установка (см. рис. 1), состоящая из устройства позиционирования излучателя (1), системы контроля положения излучателя (3), системы фокусировки (4), спектрометра Ocean Optics HR 4000 (5), компьютера и цифрового осциллографа TDS 2014. Излучатель (2) составлен из трех полосовых электродных систем. Полосовые электроды соединены параллельно и питаются напряжением 14 кГц, 3 кВ в амплитуде.

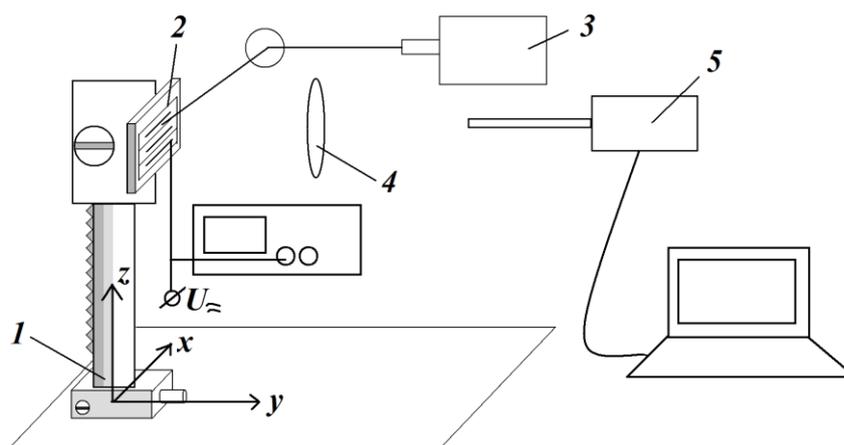


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования относительной интенсивности излучения разряд

Устройство позиционирования позволяет перемещать излучатель в трех измерениях. Это необходимо для того, чтобы наблюдать излучение при горении разряда в разных его точках. Наблюдаемый участок должен находиться в фокальной плоскости. Его положение отслеживается с помощью системы контроля положения. Она включает в себя He-Cd лазер и собирающую линзу. Через систему фокусировки, собранную по схеме телескопа, излучение разряда заводится в волоконный световод, а затем в спектрометр с цифровым управлением. Измерен-

ный спектр сохраняется на компьютере. С помощью осциллографа контролируется напряжение, подаваемое на электродную систему.

Полученные в ходе эксперимента спектры разряда приведены на рис 2.

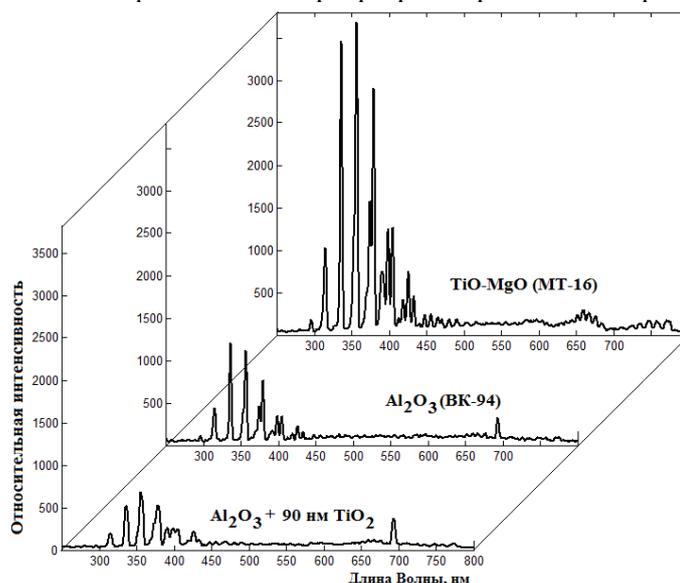


Рис. 2. Спектры поверхностного разряда для различных вариантов диэлектрических барьеров

По полученным спектрам можно сделать вывод о схожести линий разряда в УФ-области спектра. Однако линии значительно отличаются по интенсивности. В спектре разряда по поверхности диэлектрического барьера из керамики МТ-16 присутствует развитая группа линий в инфракрасной области, это определенно приводит к более значительным потерям мощности на изучение. Стоит отметить, что наличие покрытия на поверхности барьера TiO_2 приводит к подавлению излучения разряда в УФ, но не снижает интенсивности в ИК-области.

В работе [2] авторами приводились результаты исследований по сравнению интегральных характеристик поверхностного диэлектрического барьерного разряда в зависимости от состава диэлектрического барьера и наличия либо отсутствия нанометрового покрытия диоксида титана на барьере. Было показано, что наличие на поверхности барьера покрытия TiO_2 толщиной в 90 нм приводит к увеличению выхода озона в сравнении с тем же барьером без покрытия. Стоит отметить, что на барьере из керамики на основе TiO_2 выход озона превышает выход озона на других барьерах, рассматриваемых в исследовании, в том числе и барьерах с нанометровым покрытием TiO_2 .

В данной работе также исследовалось длительное воздействие разряда на поверхность наноразмерной плёнки TiO_2 . Экспериментальный стенд, схематично показан на рис. 3. Основу стенда составляет проточный, водоохлаждаемый плазмохимический реактор (2) снабжен прозрачной крышкой (1), выполненной из стекла с проводящим покрытием. Источник постоянного напряжения и измеритель концентрации озона на выходе реактора, используются для поддержания режима в ходе проведения эксперимента. Высокое напряжение, частотой 14 кГц, приложено к ПГЭ, обратный электрод заземлен, диэлектрический барьер (3), выполненный из керамики, толщиной 1 мм, закреплен на массивном медном радиаторе. Для получения однотипных изображений на поверхность барьера были нанесены прицельные маркеры в виде насечки на плазмогенерирующем электроде (ПГЭ) и барьере. Зона разряда засвечена посторонним источником для удаления с фотографии зашумления.

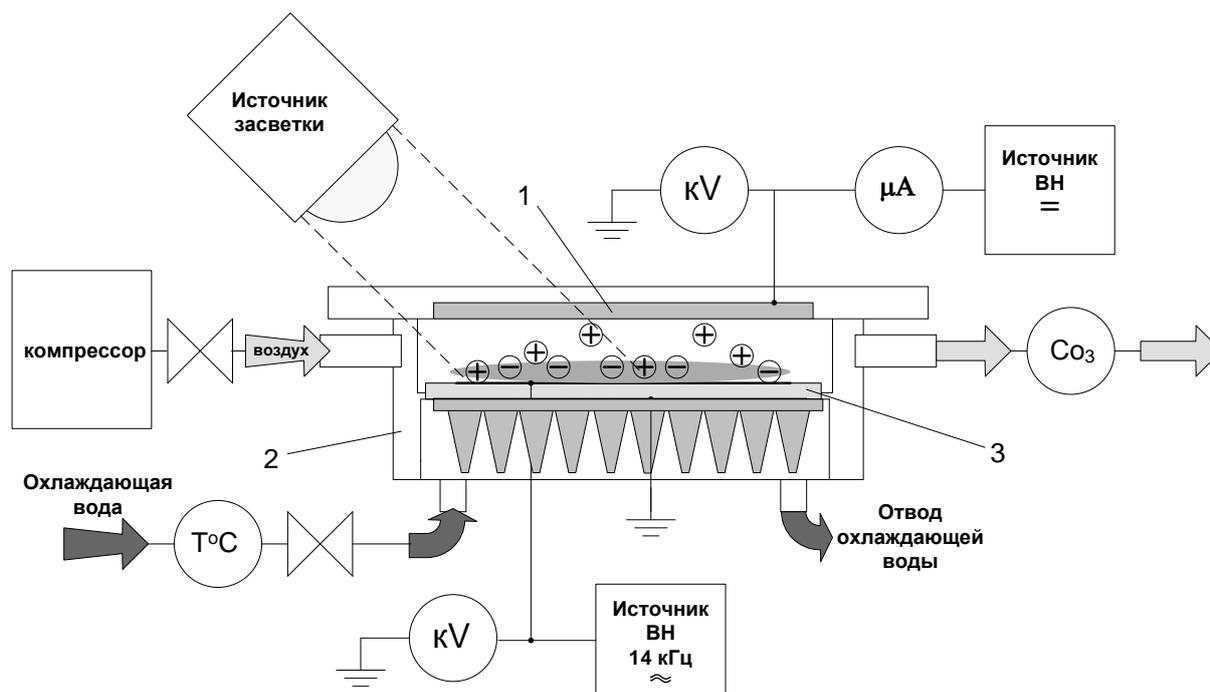


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования длительного воздействия разряда на поверхность диэлектрического барьера

К образцу было приложено напряжение 1,8 кВ в течение 40 мин. После снятия напряжения на поверхности покрытия были обнаружены полосовые треки черного цвета, причем по мере удаления от края ПГЭ интенсивность цвета уменьшалась. Положение треков соответствовало положению каналов разряда. Треки распределились по поверхности не регулярно, имелись места, где треки под разрядом не образовались. При последующем приложении 1,8 кВ к образцу разряды зажглись на поверхности так, что их положение не совпадало и не пересекало треки. Далее к образцу в течение 2-х минут прикладывались напряжения 1,8; 2,1; 2,3; 2,4; 2,5; 2,7; 2,8; 3,0 кВ. После каждого 2-х минутного приложения образец выдерживался без напряжения 5 минут, и проводилось фотографирование развития треков. Суммарная наработка под разрядом составила 1 час. Фотографии формирующихся на поверхности треков приведены на рис. 4. Указано время наработки покрытия в разряде до получения фотографии.

С увеличением кратности приложенного напряжения треки удлинялись и приобретали более насыщенный цвет (рис. 4). Большинство треков разветвлялись – можно выделить четкий «ствол» от которого брали начала более тонкие и менее яркие треки. Причем на определенном удалении от ПГЭ изменялось направление развития треков – они все более «загибались» - отклонялись от линии «ствола». Наличие треков в значительной степени изменило вид разряда по поверхности пленки, как уже было отмечено, разряды не пересекают треки – они занимают свободные места на поверхности и при напряжениях более 2,3 кВ появляются очаги разрядов берущих свое начало с конца линии трека. Так же над треками появляется свечение, повторяющее их основные очертания (рис. 5). Это свидетельствует о наличии проводимости по всей длине трека.

Далее образец выдерживался без напряжения в атмосферном воздухе влажность 40% температурой 24 °С. После 20 часов выдержки произошло обесцвечивание треков, и исчезновение их части наиболее удаленной от плазмогенерирующего электрода. После 60 часовой выдержки основная часть треков обесцвечивалась и покрытие восстанавливало свою целостность.

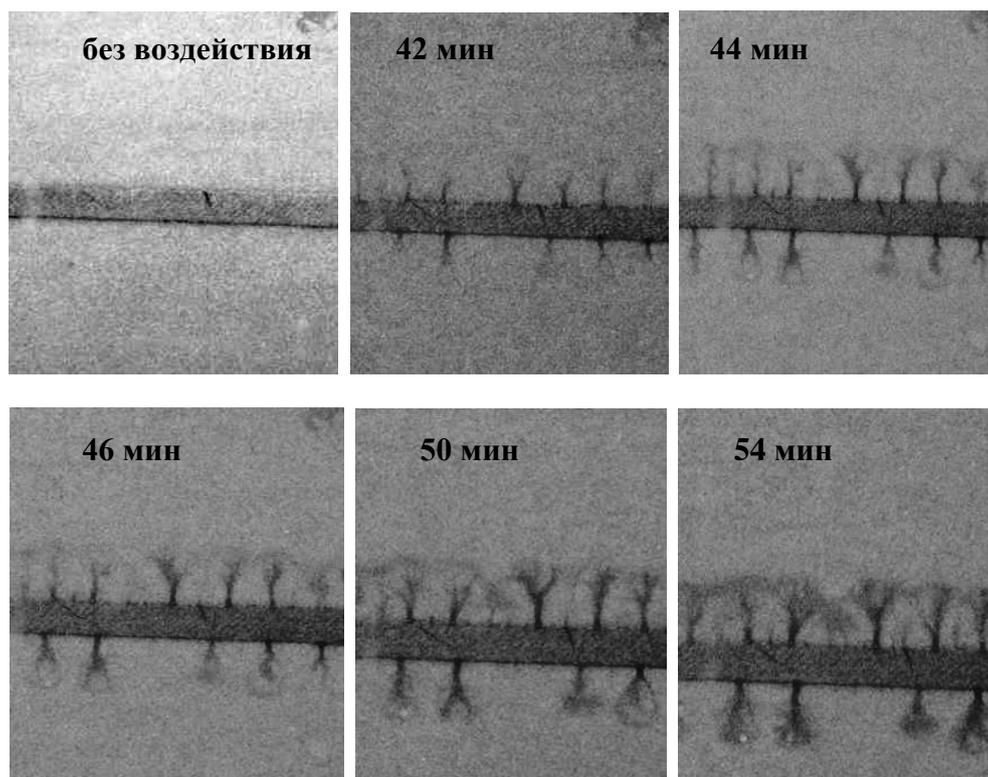


Рис. 4. Процесс формирования треков на поверхности барьера с покрытием TiO_2 .

На основании экспериментально установленного факта обесцвечивания треков на поверхности плёнки и наличии у треков частичной проводимости можно сделать вывод о том, что их появление связано с обескислороживанием кристаллической решетки TiO_2 . При выдержке в атмосферном воздухе, решетка насыщается кислородом, и треки обесцвечиваются, восстанавливая целостность плёнки.

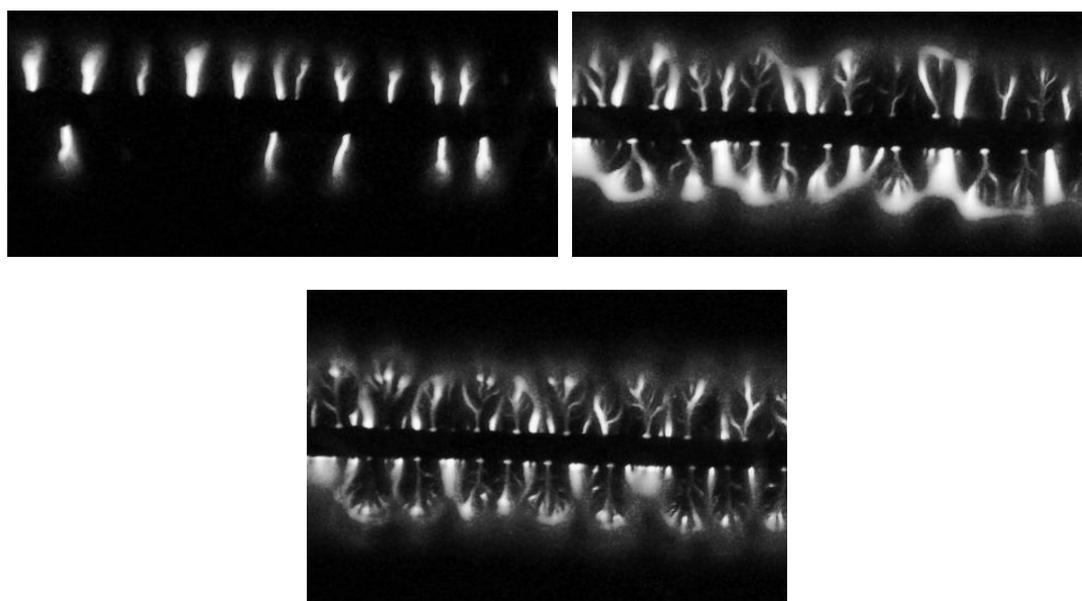


Рис. 5. Фотографии разряда по поверхности треков

Дальнейшие исследования будут направлены на установление связи между образованием треков на поверхности плёнки TiO_2 различной толщины и повышением выхода озона.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8391 от 24 августа 2012 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. V. Sokolova, K. Kozlov, A. Mitin, and P. Tatarenko. The role of barrier surface properties in barrier surface discharge behavior. Eur. Phys. J. Appl. Phys. (2013) 61: 24312
2. Лазукин А.В., Кривов С.А., Зувев Д.А., Шорохова А.В., Новодворский О.А. Особенности поверхностного разряда по барьеру с нанометровыми покрытиями TiO₂. Труды МКЭЭЭ-2012, Крым, Алушта 23-29 сентября 2012 г, стр. 10-12
3. "Взаимодействие поверхностного разряда в воздухе с плёнкой диоксида титана". Митин А.Н., Соколова М.В. М., Вестник МЭИ, Издательский дом МЭИ, №5, 2011 г., стр. 15-22.

Поступила 01.04.2014 г.