

**Акильдинова А.К.^{1,2}, Усенов Е.А.^{1,2},
Пазыл А.С.^{1,2}, Габдуллин М.Т.¹,
Досболаев М.К.¹, Рамазанов Т.С.¹, Данияров Т.Т.²**

¹Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа,
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²ТОО «Институт прикладных наук и информационных технологий»,
г. Алматы, Казахстан, *e-mail: akildinova@bk.ru

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОПЛАНАРНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

В данной статье были изучены электрические и оптические свойства диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда (ДКПБР). Были получены вольт-амперная характеристика и спектры излучения диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда. Динамическая вольт-амперная характеристика была получена с использованием пояса Роговского, высоковольтного щупа и осциллографа с высокой разрешающей способностью. С целью дальнейшего исследования обработки различных материалов была измерена температура поверхности RPS400, на которой зажигалась плазма. Температура поверхности измерялась с помощью пирометра. Результаты исследований электрических свойств ДКПБР показали, что разряд носит емкостный характер, с наблюдаемыми пиками тока проводимости поверх тока смещения, которые возникают из-за наличия одиночных микрокрупных каналов. Результаты оптико-эмиссионной спектроскопии показали наличие в спектре излучения ДКПБР молекулярных полос азота, а именно второй положительной (N_2 (C-B)) и первой отрицательной (N_2^+ (B-X)) систем, а также линии OH и NO с низкой интенсивностью.

Ключевые слова: плазма атмосферного давления, диэлектрический барьерный разряд, электрические и оптические свойства, диэлектрический копланарный поверхностный барьерный разряд.

Akildinova A.K.^{1,2}, Ussenov Y.A.^{1,2}, Pazyl A.S.^{1,2}, Gabdullin M.T.¹,
Dosbolayev M.K.¹, Ramazanov T.S.¹, Daniyarov T.T.²

¹National nanotechnology laboratory of open type, Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

²LLP „Institute of Applied Sciences and Information Technologies“,
Almaty, Kazakhstan, *e-mail: akildinova@bk.ru

Electrical and optical properties of diffuse coplanar surface barrier discharge

In this paper, the electrical and optical properties of a dielectric coplanar surface barrier discharge (DCSBD) were studied. The current-voltage characteristic and the emission spectrum of a dielectric coplanar surface barrier discharge were obtained. A dynamic current-voltage characteristic was obtained with using the Rogowski Belt, a high-voltage probe, and an oscilloscope with high resolution. In order to further study the processing of various materials, the surface temperature of the RPS400, on which the plasma was ignited, was measured. The surface temperature was measured with a pyrometer. The results of investigations of the electrical properties of DCSBD showed that the discharge character is capacitive with the observed conduction current peaks above the bias current that arise from the presence of single micro-discharge channels. The results of optical emission spectroscopy showed the presence of molecu-

lar bands of nitrogen in the emission spectrum of DCSBD, namely, the second positive (N_2 (C-B)) and the first negative (N_2^+ (B-X)) systems, as well as low-intensity OH and NO lines.

Key words: atmospheric pressure plasma, dielectric barrier discharge, electrical and optical properties, dielectric coplanar surface barrier discharge.

Акильдинова А.К.^{1,2}, Үсенов Е.А.^{1,2}, Пазыл А.С.^{1,2}, Габдуллин М.Т.¹,
Досболаев М.Қ.¹, Рамазанов Т.С.¹, Данияров Т.Т.²

¹Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана, әл-Фараби атындағы ҚашҰУ, Алматы қ., Қазақстан

²ЖШС „Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты“, Алматы қ., Қазақстан, *e-mail: akildinova@bk.ru

Диэлектрлік копланар беттік барьер разрядының электрлік және оптикалық қасиеттері

Осы мақалада диэлектрлік копланар беттік барьер разрядының (ДКББР) электрлік және оптикалық қасиеттері зерттелді. Диэлектрлік копланар беттік барьер разрядының вольт-амперлік сипаттамасы мен эмиссиялық спектрі алынды. Динамикалық вольт-амперлік сипаттама Роговский белдігі, жоғары кернеулі шұп пен жоғары ажыратымдылық осциллограф қолданумен алынды. Әртүрлі материалдарды өңдеуді одан әрі зерттеу мақсатында плазманың жанатын RPS400 қондырғысының бетінің температурасы өлшенді. Беттік температура пирометр көмегімен өлшенді. ДКББР-ның электрлік қасиеттерін зерттеу нәтижелері разрядтың көлемдік қасиетке ие болатынын, сонымен қатар дара микроразрядтық каналдардың бар болуы үшін пайда болатын ығысу тогының үстіндегі өткізгіштік токтың шыңдары байқалатынын көрсетті. Оптикалық-эмиссиялық спектроскопия нәтижелері ДКББР-ның сәулелену спектрінде азоттың молекулалық сызықтары, атап айтқанда екінші оң (N_2 (C-B)) және бірінші теріс (N_2^+ (B-X)) жүйелердің, төмен интенсивтікті OH пен NO сызықтарын көрсетті.

Түйін сөздер: атмосфералық қысымдағы плазма, диэлектрлік барьер разряды, электрикалық және оптикалық қасиеттер, диэлектрлік копланар беттік барьер разряды.

Введение

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) это разряд, который зажигается в узком газовом зазоре между плоскими или коаксиальными электродами, один из которых или оба покрыты диэлектриком. Особенностью данного вида разряда является то, что он генерируется при атмосферном давлении и в комнатных условиях, не нуждаясь в громоздком вакуумном оборудовании. Отсутствие громоздкого и недешевого вакуумного оборудования для получения плазмы атмосферного давления делает перспективным использование ДБР в технологических процессах, в производственных линиях для обработки очень больших поверхностей и материалов. Также к достоинству диэлектрического барьерного разряда можно отнести получение низкотемпературной, так называемой «холодной» плазмы атмосферного давления. Плазма атмосферного давления (ПАД), получаемая на основе ДБР широко развивается в течение последнего десятилетия и уже активно используется в области плазменной медицины [1,2], для уничтожения раковых клеток [3], агропромышленности [4,5], для обеззараживания воды и остаточных газов [6,7], для обработки поверхности различных материалов и в нанотехнологии [8-11].

Существуют три типа диэлектрических барьерных разрядов. Они могут быть определены в соответствии с пространственной геометрией, в которой зажигается разряд. В большинстве экспериментов два электрода отделены друг от друга небольшим зазором, заполненным газом. В этом случае плазма генерируется главным образом в объеме, заданном газовым зазором и геометрией электродов. Этот тип разряда в литературе упоминается как объемный диэлектрический барьерный разряд (ОДБР) [12-15]. Если зазор между электродами заполнен твердым диэлектрическим материалом, плазма генерируется на поверхности диэлектрика, что приводит к возникновению диэлектрического барьерного разряда (второй тип разряда), который известен как поверхностный диэлектрический барьерный разряд (ПДБР) или поверхностный микроразряд [12,16-18]. На основе ПДБР создаются устройства для управления газодинамическим потоком, называемые актуаторами. В основном актуаторы используются в сфере аэродинамики, целью их практического применения являются: снижение сопротивления элементов конструкции летательных аппаратов, инициирование и интенсификация процессов горения в камерах сгорания двигателей и др. [18,19]. Также в работах [20-22] упоминается третий тип диэлек-

трического барьерного разряда – копланарный диэлектрический барьерный разряд. Отличие конфигурации данного разряда от предыдущих в том, что оба электрода встроены в изолятор, и разряд зажигается в газе над поверхностью диэлектрика. Этот тип диэлектрического барьерного разряда занимает промежуточное положение между объемным и поверхностным разрядами и широко используется в электронике, агропромышленности, медицине. В таких разрядных ячейках электроды расположены вдоль поверхности на равных расстояниях друг от друга и сверху закрыты слоем диэлектрика.

В данной статье рассматриваются электрические и оптические свойства третьего типа ДКПБР, который генерируется при атмосферном давлении и может использоваться для обработки различных полимерных, сельскохозяйственных материалов, текстильных изделий и др. Исследования проводились на установке ДКПБР компании Ropllass модели RPS400. Несмотря на то, что в последнее время много

внимания уделяется исследованию плазмы атмосферного давления, что связано с перспективностью его применения в разных сферах деятельности человека, ДКПБР все еще является недостаточно изученным типом диэлектрического барьерного разряда.

Экспериментальная установка

Эксперименты были проведены на установке диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда компании Ropllass модели RPS400. RPS400 полнофункциональный плазменный генератор атмосферного давления, обеспечивающий площадь плазмы около 8 x 20 см. Система RPS400 использует диффузный копланарный поверхностный барьерный разряд для создания плазмы атмосферного давления. Он подходит для обработки текстильных изделий, пластмасс, металлов, дерева, стекла и др. На рисунке 1 приведен общий вид экспериментальной установки RPS400.

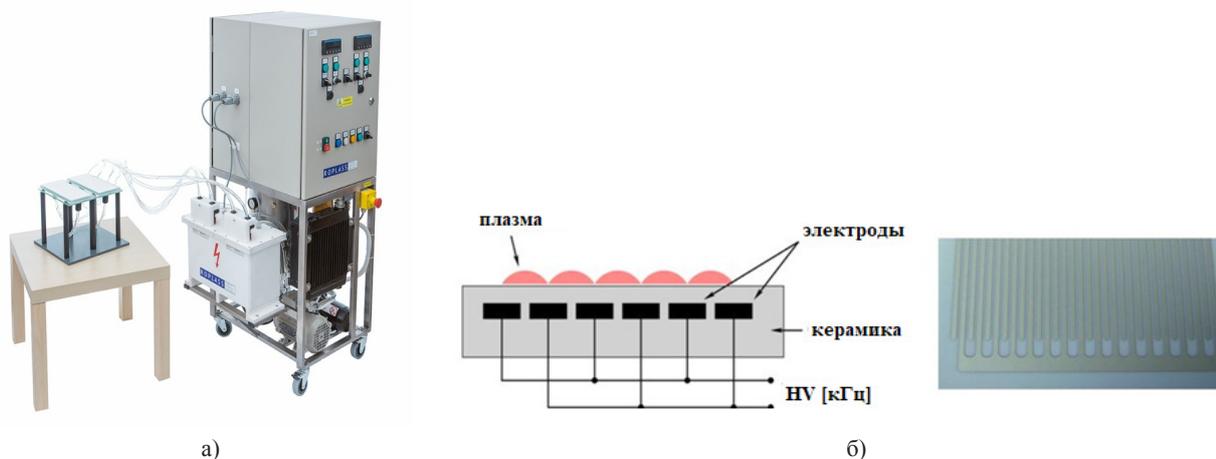


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установки (RPS400) для генерации плазмы (а) и схематическое изображение электродной системы ДКПБР (б)

Электродная система ДКПБР устроена следующим образом: две системы параллельных ленточных электродов (ширина 1,8 мм, толщина 0,1 мм, длина 230 мм), сделанных из серебра, были встроены в 96%-ный оксид алюминия. Толщина керамического слоя между плазмой и электродами составляла 0,4 мм [23]. Разряд включался синусоидальным высоковольтным напряжением (17 кГц, примерно 3 кВ от пика до пика), поставляемым с помощью плазменного источника питания HV.

Электрические параметры разряда измерялись с помощью пояса Роговского с подключением сопротивления номиналом 47 Ом и высоковольтным щупом Tektronix P6015 (1:1000). Сигналы регистрировались цифровым осциллографом Le Croy.

С целью предварительного исследования химического состава и кинетических реакций разряда были изучены оптические свойства диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда. Для этого был использован

оптико-эмиссионный спектрометр фирмы Solar Systems. Спектрометр состоит из оптической системы, собранной в единый блок для регистрации сигнала, оптического волокна для передачи излучения и из самого спектрометра. Далее полученный сигнал обрабатывается через персональный

компьютер. Время экспозиции варьировалось между 500-1500 мкс, для уменьшения шумов измеренный спектр окружающего фона был исключен через программное обеспечение спектрометра. Схематическое изображение измерительной системы ДКПБР показано на рисунке 2.

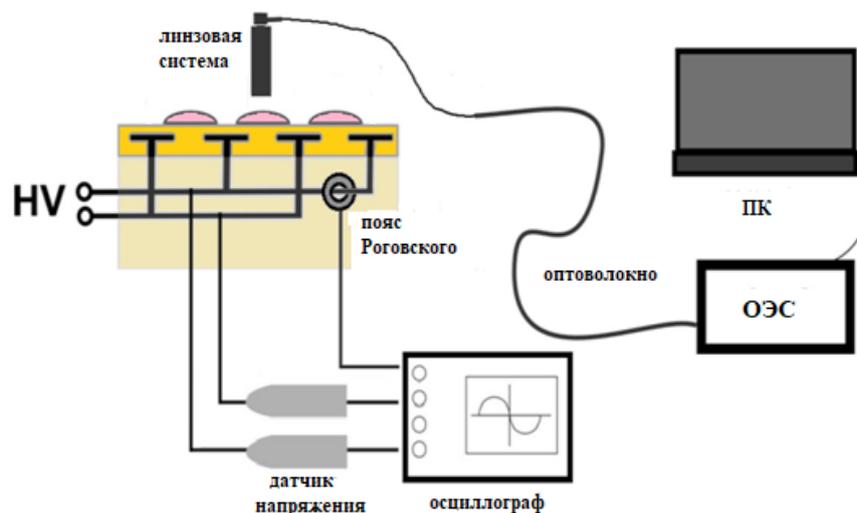


Рисунок 2 – Схематическое изображение измерительной системы ДКПБР

Результаты экспериментов

Электроды расположены на равном расстоянии друг от друга на поверхности под слоем диэлектрика. При подаче высоковольтных импульсов от источника питания на поверхности зажигается разряд. Высоковольтные импульсы имеют частоту повторения импульсов 16,5 кГц и имеют форму синусоиды с максимальным пиковым напряжением 3 кВ (Рис. 3). Как видно из рисунка 3, текущие характеристики напряжения демонстрируют емкостный характер с фазовым сдвигом тока на 90°. Также из осциллограммы тока видно, что есть пики разрядного тока поверх тока смещения, которые возникают из-за одиночных стримеров.

Эксперименты проводились при разных мощностях от 81 Вт до 300 Вт с шагом 20 Вт. Результаты экспериментов показали, что с увеличением мощности, число микроразрядов растет, постепенно заполняя поверхность. Полное заполнение поверхности происходит при мощности 220 Вт. Ниже, на рисунке 4, приведены изображения поверхности экспериментальной установки при мощности 120 Вт (поверхность частично

заполнена) и при мощности 220 Вт (поверхность полностью заполнена микроразрядами).

Суммарная мощность, потребляемая плазмой разряда, рассчитывалась по измеренным значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$

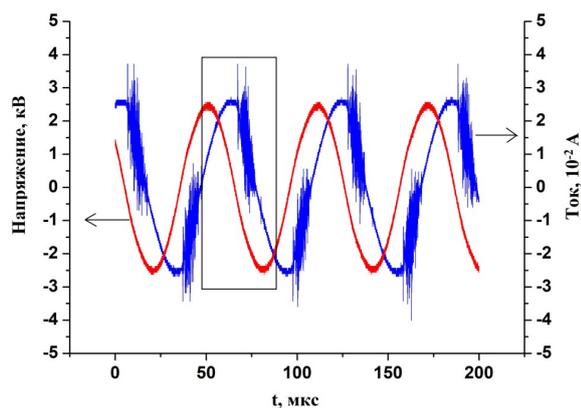
$$P = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} I(t) \cdot U(t) dt$$

Суммарная мощность составляет в среднем около 9 Вт. Ниже, на рисунке 5, приведена зависимость мощности, рассчитанной по измеренным значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ разряда, от подаваемой мощности. Как видно из графика зависимость имеет линейный характер, при этом суммарная мощность на порядок меньше подаваемой мощности. Высокие токи и напряжения создают нагрузку на цепь источника питания и в конечном счете существенно увеличивают потери мощности в электрической цепи и на диэлектриках [24].

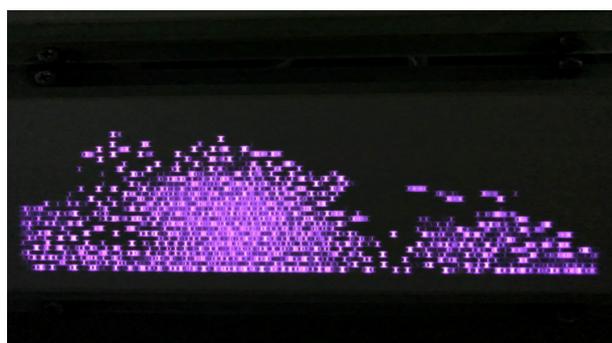
Химический состав плазмы был определен с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии. В спектре излучения ДКПБР наблюдались

молекулярные полосы азота, а именно вторая положительная (N_2 (C-B)) и первая отрицательная (N_2^+ (B-X)) системы. На рисунке 6 наблюдаемые пиковые значения от 300 нм до 470 нм состоят из радикалов OH (308 нм), N_2 (337 нм и 357 нм), N_2^+ (380 нм, 390 нм, 427 нм и 470 нм). Из-за обилия молекул азота в атмосфере, азотные полосы, естественно, являются доминирующими.

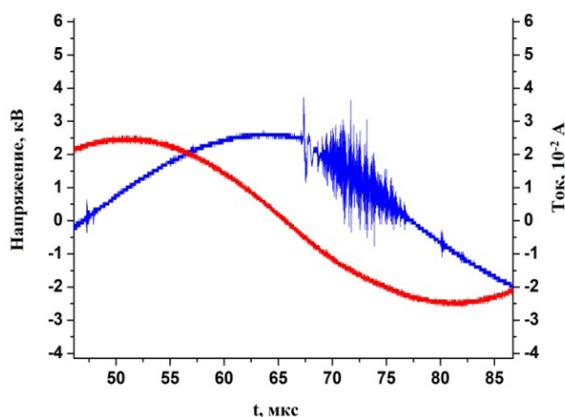
ОН радикалы также видны из-за наличия пара воды в воздухе [25]. Интенсивности выбросов других радикалов, таких как NO, которые ожидаются в условиях, приведенных во влажной атмосфере, были пренебрежимо низкими из-за низкой плотности и эффективного столкновительного гашения соответствующих возбужденных состояний.



а)



б)



с)

Рисунок 3 – а) Вольт-амперная характеристика ДКПБР для частоты повторения импульсов $f=16,5$ кГц и напряжения $U = 3$ кВ; б) фотография поверхности ДКПБР при подаваемой мощности 81 Вт и частоты повторения импульсов $f=16,5$ кГц; в) пики разрядного тока поверх тока смещения

Также был проведен ряд экспериментов для измерения температуры поверхности экспериментальной установки. Данные измерения проводились с целью определения температуры при разных подаваемых мощностях, а также для исключения тепловых эффектов диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда при дальнейших исследованиях по обработке

агрокультур и полимерных материалов. Температура поверхности измерялась с помощью пирометра UNIT UT 303С. Эксперименты были проведены при различных мощностях от 200 Вт до 260 Вт, с шагом 20 Вт. Результаты измерений показали, что с увеличением мощности температура возрастает, при мощности 200 Вт температура поверхности была равна $58^{\circ}C$, а при макси-

мальной мощности 260 Вт температура достигла 63°C (таблица 1). В таком случае можно предположить, что при дальнейших исследованиях по

обработке полимеров и сельскохозяйственных культур тепловые эффекты при данном диапазоне мощностей можно исключить.

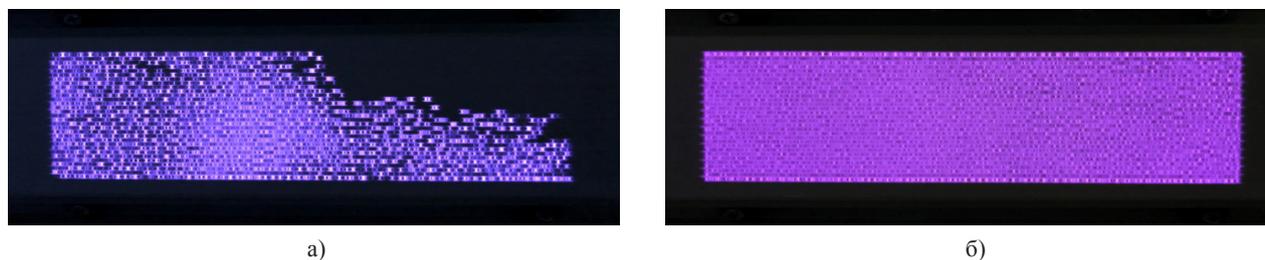


Рисунок 4 – Изображения поверхности экспериментальной установки при мощностях 120 Вт (а) и 220 Вт (б)

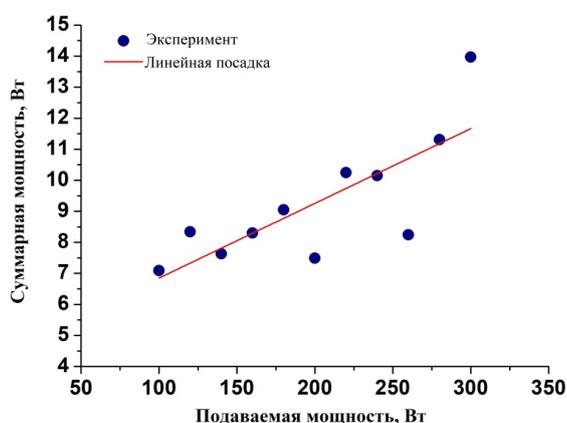


Рисунок 5 – Зависимость суммарной мощности, рассчитанной по значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ разряда, от подаваемой мощности

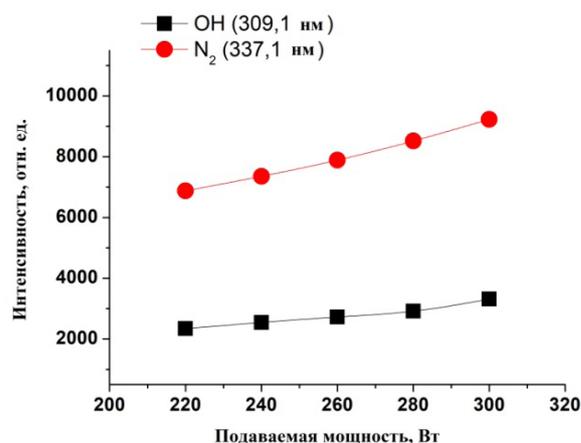
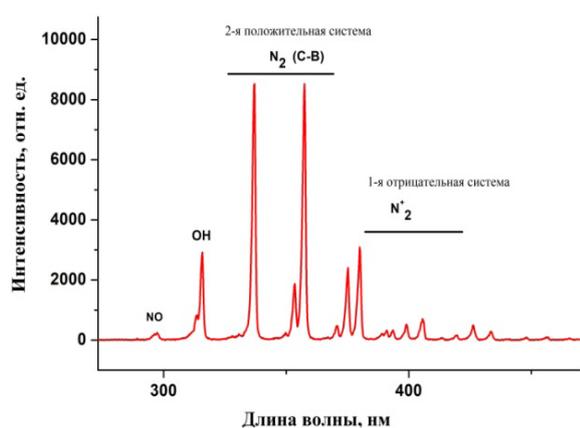


Рисунок 6 – Спектр излучения диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда в диапазоне волн 300-470 нм (слева) и интенсивности линий OH и N_2 при приложенных мощностях 200-320 Вт

Таблица 1 – Значения температур, измеренных при разных мощностях

P, Вт	200	220	240	260
<T>, °C	58	60	62	63

Заключение

Исследована вольт-амперная характеристика и спектры излучения ДКПБР. Показано, что ДКПБР носит емкостный характер, с наблюдаемыми пиками разрядного тока поверх тока смещения, которые возникают из одиночных стримеров. Результаты оптико-эмиссионной спектроскопии показали наличие в спектре излучения ДКПБР молекулярных полос азота, а именно второй положительной ($N_2(C-B)$) и первой отрицательной ($N_2^+(B-X)$) систем. Полученные экспериментальные данные могут быть полезны при исследовании физических процессов в ДКПБР. Эксперименты проводились при разных

мощностях от 81 Вт до 300 Вт с шагом 20 Вт. Результаты экспериментов показали, что с увеличением мощности, число микрозарядов растет, постепенно заполняя поверхность. Полное заполнение поверхности происходит при мощности 220 Вт. Также был проведен ряд экспериментов для измерения температуры поверхности экспериментальной установки. Эксперименты были проведены при различных мощностях от 200 Вт до 260 Вт, с шагом 20 Вт. Результаты измерений показали, что с увеличением мощности температура возрастает, при мощности 200 Вт температура поверхности была равна 58°C, а при максимальной мощности 260 Вт температура достигла 63°C. В таком случае можно предположить, что при дальнейших исследованиях по обработке полимеров и агрокультур тепловые эффекты при данном диапазоне мощностей можно исключить.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РК в рамках проекта ИРН AP05134280.

Литература

- 1 Laroussi M., From Killing Bacteria to Destroying Cancer Cells: 20 Years of Plasma Medicine // *Plasma Process. Polym.* – 2014. Vol. 11(1138). – P. 345.
- 2 Laroussi M., Low-Temperature Plasma Jet for Biomedical Applications: A Review // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2015. – Vol. 43(3). – P. 13.
- 3 Keidar M., Plasma for cancer treatment // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2015. Vol. 24. P.138.
- 4 Mariotti D., Belmonte T., Benedikt J., Velusamy T., Jain G., Svrcak V., Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma Processes for “Green” Third Generation Photovoltaics // *Plasma Process. Polym.* – 2016. – Vol. 13. –P. 70.
- 5 Lakshman K., Gerard J., de Groot J., Non-Thermal Plasma Treatment of Agricultural Seeds for Stimulation of Germination, Removal of Surface Contamination and Other Benefits: A Review // *Plasma Process. Polym.* – 2015. Vol. 12. – P. 136.
- 6 Massines F., Sarra-Bournet C., Fanelli F., Naude N., Gherardi N., Atmospheric Pressure Low Temperature Direct Plasma Technology: Status and Challenges for Thin Film Deposition // *Plasma Process. Polym.* – 2012. – P.105.
- 7 Christopher J., Whitehead Plasma-catalysis: the known knowns, the known unknowns and the unknown unknowns // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2016. Vol. 49.– P. 120.
- 8 Kortshagen U., Nonthermal Plasma Synthesis of Nanocrystals: Fundamentals, Applications, and Future Research Needs // *Plasma Chem Plasma Process.* – 2016. Vol. 36.– P. 105.
- 9 Dogan I., Mauritius C., van de Sanden M., Gas-Phase Plasma Synthesis of Free-Standing Silicon Nanoparticles for Future Energy Applications // *Plasma Process. Polym.* – 2016. – Vol. 13. –P. 19.
- 10 Kyong N., Seung M., Anurag M., Geun Y., Atmospheric Pressure Plasmas for Surface Modification of Flexible and Printed Electronic Devices: A Review // *Thin Solid Films.* – 2015.– P. 103.
- 11 Sun H., Chiu Y. and Chen W., Renewable polymeric materials for electronic applications // *Polymer Journal.* – 2017. – Vol. 49(61). – P. 73.
- 12 Gibalov V., Pietsch G., Dynamics of dielectric barrier discharges in coplanar arrangements // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. Vol. 33. P. 2618–2636.
- 13 Pietsch G., Peculiarities of Dielectric Barrier Discharges // *Contrib. Plasma Phys.* 2001. Vol. 41. P. 620–628.
- 14 Усенов Е.А., Габдуллин М.Т., Досболаев М.К., Данияров Т.Т., Рамазанов Т.С., Электрические и оптические свойства диэлектрического барьерного разряда // *KazNU Bulletin. Physics series.* – 2016. – Т. 1(56). – С. 13.
- 15 Adamovich I., The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 50(323001). –P. 84.
- 16 Jeon J., Rosentreter T., Li Y., Isbary G., Thomas H., Zimmermann J., Morfill G., Shimizu T. Sporicidal properties from surface micro-discharge plasma under different plasma conditions at different humidities // *Plasma Process. Polym.* 2014. Vol. 11. – P. 426–436.

17 Пазыл А.С., Акильдинова А.К., Данияров Т.Т., Үсенов Е.А., Досболаев М.К., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т., Низкотемпературная плазма струйного типа при атмосферном давлении // Журнал проблем эволюции открытых систем. 2016. Т. 2. С.52.

18 Reece R., Aerodynamic Flow Acceleration Using Paraelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma // Phys. of Plasmas. – 2003. – Vol.10(5). – P.2117.

19 Aminy E., Flexible photovoltaic power systems: integration opportunities, challenges and advances // Flex. Print. Electron. – 2017. – Vol. 2(013001). –P. 201.

20 Brandenburg R., Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments // Plasma Sources Science and Technology. 2017. Vol. 26. P. 29.

21 Ito M., Oh J., Ohta T., Shiratani M., Hori M. Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies // Plasma Process Polym. 2017. No. 1700073. P. 1-15.

22 . Gandhiraman R., Singh E., Plasma jet printing for flexible substrates // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 108. – P. 234.

23 <http://www.roplass.cz/products/product/rps400-roplass-plasma-system-400-w/>

24 Cech J., Zemánek M., Stahel P., Dvoráková H., Cernák M., Influence of substrate thickness on diffuse Coplanar surface barrier discharge properties // Acta Polytechnica. 2014. Vol. 54(6). – P. 383–388.

25 Offerhaus B., Lackmann J., Kogelheide F., Spatially resolved measurements of the physical plasma parameters and the chemical modifications in a twin surface dielectric barrier discharge for gas flow purification // Plasma Process Polym. 2017. P. 1-14.

References

- 1 M. Laroussi, Plasma Process. Polym. 11, 345 (2014).
- 2 M. Laroussi, IEEE Transactions on Plasma Science 43(3), 13 (2015).
- 3 M. Keidar, Plasma Sources Sci. Technol.24, 138 (2015).
- 4 D. Mariotti, T. Belmonte, J. Benedikt, T. Velusamy, G. Jain, and V. Svrcek, Plasma Process. Polym. 13, 70 (2016).
- 5 K. Lakshman, J. Gerard, and J. de Groot, Plasma Process. Polym. 12, 136 (2015).
- 6 F. Massines, C. Sarra-Bournet, F. Fanelli, N. Naude, and N. Gherardi, Plasma Process. Polym. 105 (2012).
- 7 J. Christopher, J. Phys. D: Appl. Phys. 49, 120 (2016).
- 8 U. Kortshagen, Plasma Chem Plasma Process. 36, 105 (2016).
- 9 Dogan and C. Mauritius, M. van de Sanden, Plasma Process. Polym. 13, 19 (2016).
- 10 N. Kyong, M. Seung, M. Anurag, and Y. Geun, Thin Solid Films. 103 (2015).
- 11 H. Sun, Y. Chiu, and W. Chen, Polymer Journal 49(61), 73 (2017).
- 12 V. Gibalov and G. Pietsch, J. Phys. D: Appl. Phys. 33, 2618-2636 (2004).
- 13 G. Pietsch, Contrib. Plasma Phys. 41, 620-628 (2001).
- 14 E. Usenov, M. Gabdullin, M. Dosbolaev, T. Daniyarov, and T. Ramazanov, Recent Contributions to Physics, 1(56), 13 (2016). (in Russ)
- 15 Adamovich, J. Phys. D: Appl. Phys. 50(323001), 84 (2017).
- 16 J. Jeon, T. Rosentreter, Y. Li, G. Isbary, et al., Plasma Process. Polym. 11, 426-436 (2014).
- 17 Pazil, A. Akildinova, T. Daniyarov, E. Ysenov, M. Dosbolaev, T. Ramazanov, and M. Gabdullin, Journal of the Problems of Evolution of Open Systems.2, 52 (2016). (in Russ)
- 18 R. Reece, Phys. of Plasmas.10(5), 2117 (2003).
- 19 E. Aminy, Flex. Print. Electron. 2(013001), 201 (2017).
- 20 R. Brandenburg, Plasma Sources Science and Technology 26, 29 (2017).
- 21 M. Ito, J. Oh, T. Ohta, M. Shiratani, and M. Hori, Plasma Process Polym. 1700073, 1-15 (2017).
- 22 R. Gandhiraman, E. Singh, Applied Physics Letters. 108, 234 (2016).
- 23 <http://www.roplass.cz/products/product/rps400-roplass-plasma-system-400-w/>
- 24 J. Cech, M. Zemánek, P. Stahel, H. Dvoráková, and M. Cernák, Acta Polytechnica 54(6), 383-388 (2014).
- 25 B. Offerhaus, J. Lackmann, and F. Kogelheide, Plasma Process Polym. 1-14 (2017).