

УДК 537.52:621.327

PACS 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Tn

DOI: <https://doi.org/10.24144/2415-8038.2016.39.93-99>

О.Й. Миня, О.К. Шуайбов, З.Т. Гомокі, В.В. Данило, М.М. Чаварга, Л.Е. Кукрі

Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000

e-mail: bandzigel@gmail.com

ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШІ ПОВІТРЯ З ПАРАМИ ЦИНКУ

Наведено спектральні та енергетичні характеристики високовольтного наносекундного розряду між електродами з цинку в повітрі атмосферного тиску при малих віддальх між електродами (0,5-3 мм). Представлено будову розрядної комірки з високою неоднорідністю розподілу напруженості електричного поля в розрядному проміжку, в якому за рахунок «втікаючих» електронів та супутнього рентгенівського випромінювання запалюється однорідний розряд малого об'єму. Досліджувана плазма є селективним джерелом випромінювання в спектральному діапазоні 200-270 нм, що може бути використано для розробки безвіконної, ультрафіолетової, «точкової» лампи.

Ключові слова: високовольтний наносекундний розряд, цинк, повітря, спектр випромінювання, ультрафіолет.

Вступ

Дослідження оптичних характеристик плазми наносекундного розряду у повітрі атмосферного тиску при сантиметрових віддальх між металевими електродами показало, що в спектрах УФ випромінювання превалюють смуги другої додатної системи молекули азоту (280-390 нм), радикалів гідроксилу (OH), окислів азоту (NO), електронно-коливні смуги молекули (CN) та окремі спектральні лінії атомарних радикалів (NI, NII, OI, OII) [1]. При зменшенні віддалі між електродами до 0,5-2,0 мм в спектрах випромінювання наносекундного розряду в повітрі появляются спектральні лінії атомів та іонів матеріалу електродів. В цих розрядах створюються умови для значної перенапруги міжелектродного проміжку, при якому частина електронів переходить в режим неперервного прискорення («втікаючі електрони»), досягаючи енергій на рівні амплітуди імпульсу напруги, що прикладений до проміжку. Режим втечі електронів добре задовольняє як нелокальному [2], так і локальному критерію втечі електронів [3]. Пучок «втікаючих» електронів генерується на передньому фронті імпульсу струму і має тривалість меншу за 1 нс. Під дією цього

пучка електронів і супутнього йому рентгенівського випромінювання, які виконують роль передіонізації, в проміжках з неоднорідним розподілом напруженості електричного поля в проміжку формується однорідний розряд, який може бути використаний для розробок нових УФ-ламп з малим об'ємом плазмового середовища ($V < 10 \text{ мм}^3$). Такі «точкові» УФ-лампи з короткими імпульсами випромінювання необхідні для застосувань в спектроскопії, фотохімії і фотобіології.

В працях [4-6] наведені деякі оптичні та енергетичні характеристики «точкових» УФ-ламп на парах заліза, вольфраму, ванадію та міді при віддалі між електродами 0,5 мм і застосуванні імпульсів струму амплітудою близько 20-100 А і тривалістю 2-50 нс.

Оскільки наносекундний розряд відбувається в парах матеріалу електродів та продуктів деструкції молекул повітря, то імовірним є утворення при цих умовах молекул оксидів металів, які в подальшому об'єднуються між собою в наноструктури [7] і можуть бути синтезованими (за межами плазми) на діелектричній підкладці. На даний час такі плівки знаходять застосування в

мікроелектроніці.

В даній статті наведено перші результати дослідження характеристик «точкової» УФ лампи на парах цинку, розряд у якій запалювався в повітрі атмосферного тиску. Така лампа є безвіконною і може бути зроблена без оптичних елементів (віконець).

1. Техніка і умови експерименту

Конструкція системи електродів, між якими запалювався наносекундний розряд атмосферного тиску в повітрі, включала розрядну комірку, виготовлену з оргскла товщиною 30 мм і систему цинкових електродів. Розміри комірки склали 125×60 мм (рис.1). З метою зменшення впливу електромагнітних завад на систему реєстрації характеристик розряду, останній було поміщено в екран з металевої сітки. Діаметр циліндричних цинкових електродів складав 5 мм, а радіус заокруглення робочої торцевої частини електродів був рівним 3 мм. Для локалізації розряду між кінчиками цинкових електродів вони розміщувались всередині діелектричних трубок з фторопласту.

Для запалювання розряду на електроди розрядної комірки подавались біполярні імпульси високої напруги тривалістю 50-100 нс амплітудою $\pm(20-40)$ кВ. При цьому, між кінчиками цинкових електродів запалювався однорідний розряд тривалістю 50-100 нс з амплітудою імпульсів струму 50-170 А і об'ємом плазми меншим за 10 мм³. При міжелектродній віддалі 2,0 мм розрядний проміжок сильно перенапружений, що створює сприятливі умови для формування пучка електронів високої енергії, які вступають в режим неперервного прискорення і залишають розрядний проміжок [3]. Наносекундний розряд атмосферного тиску навіть при нерівномірному розподілі напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку є досить однорідним, як і в працях [4-6], що зумовлено дією системи попередньої іонізації, роль якої в розряді виконує пучок «втікаючих» електронів та супутнє йому рентгенівське

випромінювання.

Імпульси напруги на розрядному проміжку і струму високовольтного наносекундного розряду вимірювались за допомогою ширококутового ємнісного дільника, пояса Роговського та ширококутового осцилографа 6-ЛОР 04. Часове розділення цієї системи реєстрації складало 2-3 нс. Дослідження просторових характеристик розряду проводилось з використанням цифрового фотореєстратора. Частота слідування імпульсів змінювалась в діапазоні $f = 35-1000$ Гц. Для реєстрації спектрів випромінювання плазми використовувався монохроматор МДР-2, фотоелектронний помножувач ФЭУ-106, підсилювач постійного струму та електронний потенціометр КСП-4. Випромінювання плазми розряду аналізувалось в спектральній області 200-650 нм. Система реєстрації випромінювання розряду калібрувалась за випромінюванням дейтерієвої лампи в спектральному діапазоні 200-400 нм та банд-лампи в діапазоні 400-650 нм.

Вимірювання абсолютної потужності випромінювання точкової лампи проводилось за допомогою ультрафіолетового вимірювача абсолютної потужності випромінювання «ТКА-ПКМ», який був налаштований на вимірювання в спектральному діапазоні 200-400 нм.

2. Оптичні характеристики

На рис.2 наведено апаратний спектр випромінювання плазми наносекундного розряду між цинковими електродами в повітрі атмосферного тиску. Оскільки спектральна чутливість системи ФЭУ-106 + монохроматор МДР-2 при зменшенні довжини хвилі з 300 до 200 нм зменшується більше ніж на порядок, то основними в спектрі випромінювання є група інтенсивних спектральних ліній атома та іона цинку на ділянці 200-215 нм.

На рис.3 ця група ліній приведена з врахуванням відносної спектральної чутливості системи реєстрації випромінювання плазми. З спектральних ліній атома цинку виділялись наступні лінії згідно нумерації на рис.3: 1 - 207,0

нм; 2 - 207,9 нм; 3 - 208,7 нм; 4 - 209,8 нм; інтенсивними іонними лініями цинку в цій групі були група нерозділених ліній 7 - (201,2+202,5+203,9) нм; 8 - (206,2+206,4) нм; 9 - 207,9 нм; 10 - 209,9 нм; 11 - 210,2 нм Zn II.

В другій за інтенсивністю випромінювання групі спектральних ліній плазми цинку (ділянка 240-255 нм) найбільш інтенсивними були атомарні лінії 242,6 нм; 247 нм, а спектральні лінії 250,2; 255,8 нм Zn I, характерні для лампи

низького тиску [8], були малоінтенсивними. В порівнянні з даними праці [8], УФ спектр випромінювання в цій ділянці спектру включав значно більше інтенсивних спектральних ліній. В ближній УФ і видимій ділянках спектру спектральні лінії цинку випромінювались на фоні широких смуг з максимумами при довжинах хвилі 380 нм і 450 нм, що може бути зумовлено випромінюванням молекули оксиду цинку (ZnO).

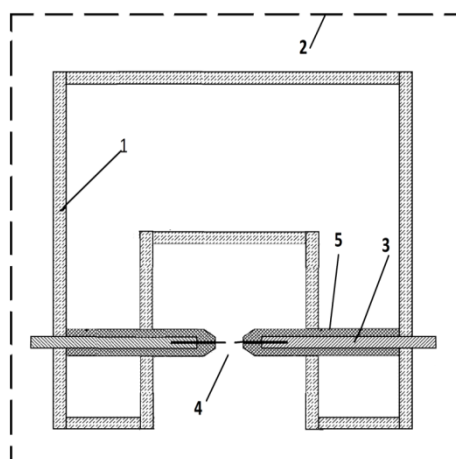


Рис.1. Будова УФ-випромінювача на парах цинку: 1 – корпус випромінювача з оргскла, 2 – екран з металевої сітки, 3 – система утримання електродів і регулювання міжелектродної віддалі, 4 – цинкові електроди, 5 – ізолятори з фторопласту.

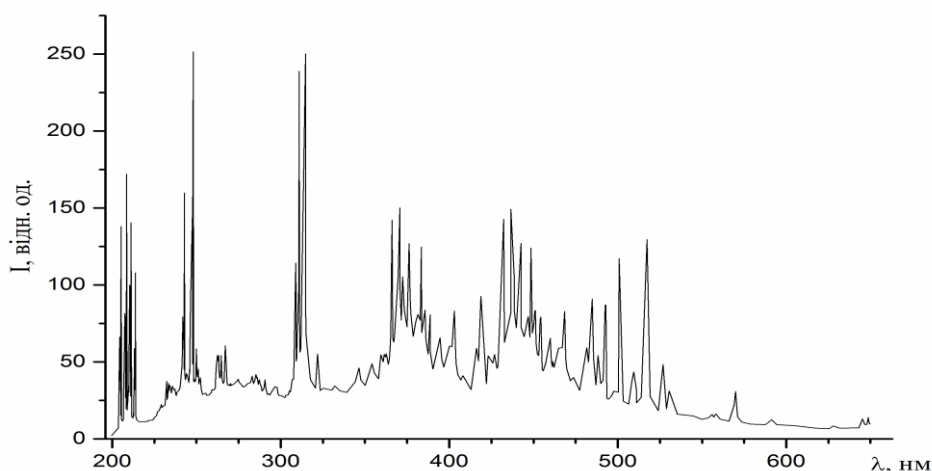


Рис.2. Апаратний спектр випромінювання плазми наносекундного розряду з цинковими електродами в повітрі при міжелектродній віддалі $d = 2$ мм.

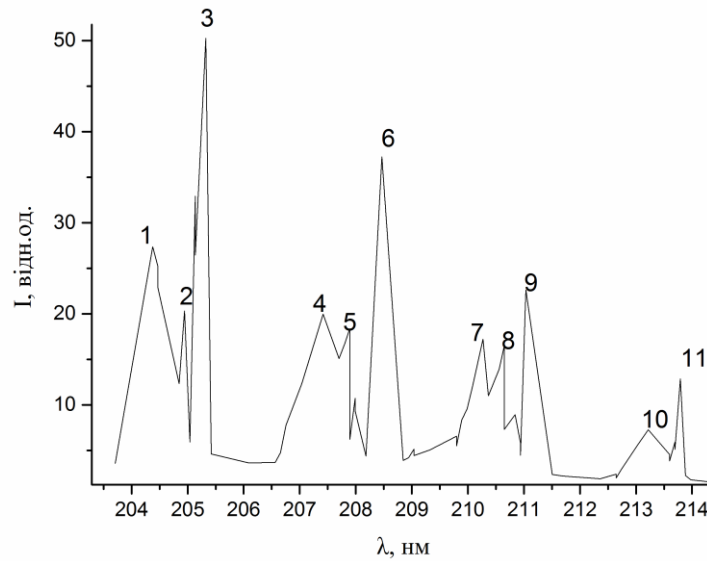


Рис.3. Ділянка спектру випромінювання наносекундного розряду (приведена до відносної спектральної чутливості фотопомножувача та монохроматора) в парах цинку з найбільш інтенсивними спектральними лініями

На рис.4 наведено залежності відносної інтенсивності УФ-випромінювання плазми цинку в спектральному діапазоні 200-280 нм від частоти слідування імпульсів та величини напруги на робочій ємності високовольтного модулятора. Найбільший

вплив на інтенсивність УФ випромінювання мало збільшення частоти слідування імпульсів, особливо в діапазоні 500-1000 Гц (рис.4.). Величина абсолютної потужності УФ випромінювання змінюється у цьому діапазоні в межах 10 - 100 мВт.

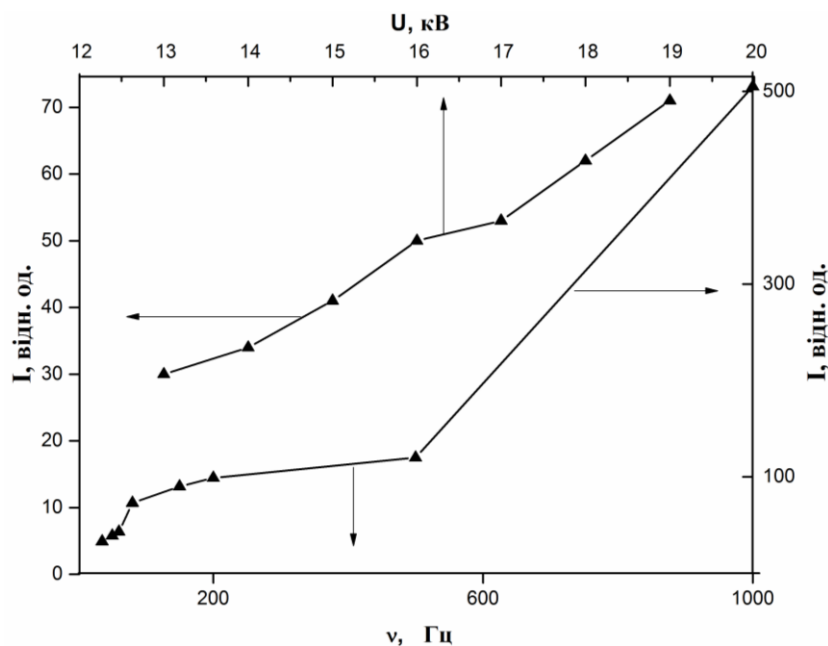


Рис.4. Залежність середньої потужності УФ-випромінювання (діапазон 200-280 нм) наносекундного розряду від частоти слідування імпульсів (при напрузі $U = 13$ кВ, верхня крива) та від напруги на робочому конденсаторі високовольтного імпульсного модулятора (при частоті $\nu = 35$ Гц, нижня крива).

Оцінки густини електронів в подібній плазмі показують, що густина електронів та іонів плазми велика і знаходиться в діапазоні $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При таких умовах найбільш імовірними процесами заселення верхніх збуджених станів атомів і іонів цинку можуть бути електрон-іонна рекомбінація [9] та збудження іонів цинку електронами. Ефективні перерізи таких процесів досить великі і знаходяться для

цинку в діапазоні $10^{-16} - 10^{-17} \text{ см}^2$.

Таким чином, дослідження характеристик сильнострумового наносекундного розряду між електродами з цинку в повітрі атмосферного тиску показало, що на його основі може бути розроблена селективна, безвіконна ультрафіолетова лампа для застосувань в спектроскопії та мікро-нанотехнологіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pai D. Z. Nanosecond repetitively pulsed discharge in air at atmospheric pressure - the spark regime / D. Z. Pai, D. L. Lacoste, - Plasma Sources Sci. Technol. 2010. V.19. 065015 (10 pp).
2. Бабич Л.П. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов / Л. П. Бабич, Т. В. Лойко, В. А. Цукерман.- УФН. 1990. Т.160, № 7. С.49-72.
3. Tarasenko V. F. Electron runaway mechanism in dense gases and the production of high power subnanosecond electrons beams / V. F. Tarasenko, S. I. Yakovlenko. - UFN. 2004. V.174. N 9, P.953-971.
4. Точечный источник УФ излучения с частотой 1 кГц и короткой длительностью импульса / Е. Х. Бакшт, В. Ф. Тарасенко, Ю. В. Шутько, М. В. Ерофеев. - Изв. ВУЗов. Физика. 2011. № 11. С.91-94.
5. Point-like pulse-periodic UV radiation Source with short pulse duration / E. Kh. Bakst, V. F. Tarasenko, Yu. V. Shut'ko, M. M. V. Erofeev. - Quantum Electronics - 2012. V.42, N 2. P.153-156.
6. Shuaibov A. K. Emission Characteristics of the Cathode Region of nanosecond Discharge in Atmospheric-Pressure Air / A. K. Shuaibov, G. E. Laslov, Ya. Yu. Kozak. - Optics and Spectroscopy. 2014. V.116, №.4. P.552-556.
7. Itina T. E. Nanoparticle formation by laser ablation in air and by spark discharge at atmospheric pressure / T. E. Itina, A. Voloshko. - Appl. Phys. B. DOI 10.1007/s00340-013-5490-6.
8. Комбинированный излучатель для спектрофотометров на область спектра 200-1000 нм / С. И. Максимов, А. В. Кретирина, Н. С. Фомина, Л. Н. Галль.- Научное приборостроение. 2015. Т.25, № 1. С.36-41.
9. Гомонай А.Н. Радиационний распад автоионизационних состояний в процессе диелектронний рекомбинации ионов Zn^+ и Cd^+ // ЖПС. 2015. Т82. N №1. С.17-22.

Стаття надійшла до редакції 19.05.2016 р.

А.И. Миня, А.К. Шуайбов, З.Т. Гомоки, В.В. Данило, М.М. Чаварга,
Л.Е. Кукри

Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, ул. Пидгирна 46, Украина, 88000
e-mail: bandzigel@gmail.com

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСИ ВОЗДУХА С ПАРАМИ ЦИНКА

Приведены спектральные и энергетические характеристики высоковольтного наносекундного разряда между электродами из цинка в воздухе атмосферного давления при малых расстояниях между электродами (0,5-3 мм). Представлены строение разрядной ячейки с высокой неоднородностью распределения напряженности электрического поля в разрядном промежутке, в котором за счет «убегающих» электронов и сопутствующего рентгеновского излучения зажигается однородный разряд малого объема. Исследуемая плазма является селективным источником излучения в спектральном диапазоне 200-270 нм, что может быть использовано для разработки безоконные, ультрафиолетовой, «точечной» лампы.

Ключевые слова: высоковольтный наносекундный разряд, цинк, воздух, спектр излучения, ультрафиолет.

PACS 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Tn

О.У. Minya, О.К. Shuaibov, Z.T. Homoki, V.V. Danylo,
M.M. Chavarga, L.E. Kukri

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Pidhirna Str., 46
e-mail: bandzigel@gmail.com

OPTICAL CHARACTERISTICS OF NANOSECOND DISCHARGE ON A MIXTURE OF AIR WITH VAPORS ZINC

Introduction: Research optical characteristics of plasma nanosecond discharge in the air between metal electrodes showed that UV spectra prevail band molecules of N₂, OH, NO, CN and spectral lines NI, NII, OI, OII. As the distance between the electrodes to 0.5-2.0 mm in the spectra of radiation level in the air appear spectral lines of atoms and ions electrode material. These "point" UV lamp with short pulses of radiation needed for applications in spectroscopy, photochemistry and photobiology.

Purpose: This article presents the results of research performance "point" UV lamps based on zinc electrodes at atmospheric pressure.

Methods: Investigated spectral, electrical and optical properties. At the lamp electrodes submitted bipolar pulses of high voltage 50-100 ns duration, amplitude of \pm (20-40) kV. Thus, between the zinc electrode ignited uniform discharge duration of 50-100 ns, pulse amplitude current 50-170 A and plasma volume less than 10 mm³. An spectral and power characteristics of high-voltage nanosecond discharge between the zinc electrodes in air atmospheric pressure at small distances between the electrodes. This plasma is a selective source of radiation in the spectral range 200-270 nm.

Conclusion: Thus, the study of characteristics nanosecond discharge between the zinc electrodes in air of atmospheric pressure showed that based on it can be developed selective, windowless ultraviolet lamps for applications in spectroscopy and micro-nanotechnologies.

Keywords: high-voltage nanosecond discharge, zinc, air, emission spectrum, ultraviolet.

PACS NUMBER: 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Tn

REFERENCES

1. Pai D. Z. (2010) Nanosecond repetitively pulsed discharge in air at atmospheric pressure - the spark regime / D. Z. Pai, D. L. Lacoste, C.O. Laux. - Plasma Sources Sci. Technol. 2010. V.19. 065015 (10 pp).
2. Babich L. P, Loiko T. V, Tsukerman V. A, (1990), "High-voltage nanosecond discharge in a dense gas at a high overvoltage with runaway electrons", Sov. Phys. Usp. 33 (7) pp. 521–540.
3. Tarasenko V. F. (2004), "Electron runaway mechanism in dense gases and the production of high-power subnanosecond electrons beams". UFN. Volume.174. No. 9, pp. 953-971.
4. Baksht E. H, Tarasenko V. F, Shut'ko Ju. V, Erofeev M. V, (2011), "Spot UV light source with a frequency of 1 kHz and a short pulse duration" ["Tochechnyj istochnik UF izlucheniya s chastotoj 1 kGc i korotkoj dlitel'nost'ju impul'sa"], - Izv. VUZov. Fizika. No 11, pp. 91-94.
5. Bakst E. Kh., Tarasenko V. F. (2012), "Point-like pulse-periodic UV radiation Source with short pulse duration", Quantum Electronics. Volume. 42, No. 2. pp. 153-156.
6. Shuaibov A. K. (2014), "Emission Characteristics of the Cathode Region of nanosecond Discharge in Atmospheric-Pressure Air", Optics and Spektroskopy. Volume. 116, No. 4. pp. 552-556.
7. Itina T. E. (2009) Nanoparticle formation by laser ablation in air and by spark discharge at atmospheric pressure / T. E. Itina, A. Voloshko. - Appl. Phys. B. DOI 10.1007/s00340-013-5490-6.
8. Maksimov S. I, Kretinina A. V, Fomina N. S., Gall L. N, (2015), "Combined radiator for spectrophotometers for the spectral region 200-1000 nm" ["Kombinirovannyj izluchatel' dlja spektrofotometrov na oblast' spektra 200-1000 nm"], Nauchnoe priborostroenie T.25, No 1. pp. 36-41.
9. Gomonai, A.N, (2015), "Radiative Decay of Autoionizing np^2 -States During Dielectronic Recombination of Zn^+ and Cd^+ Ions", J Appl Spectrosc, Vol. 82, No. 1, pp. 17–22.

© Ужгородський національний університет