

УДК 537.52:621.327

PACS 52.80.–s, 51.50.+v, 52.80.Tn, 52.90.+z, 52.80.Wq, 52.80.Mg, 79.60.Jv

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.128-136

В.В. Данило, О. Й. Миня, О.К. Шуаїбов, І.В. Шевера, З.Т. Гомокі, М.В. Дудич

Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

e-mail: bandzigel@gmail.com

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛЬНОСТРУМОВОГО НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШАХ ГЕЛІЮ ТА АРГОНУ З МАЛИМИ ДОМІШКАМИ ПАРИ ВОДИ

Наведено електричні і оптичні характеристики сильнострумового наносекундного розряду в сумішах Гелію і Аргону з малими домішками пари води. Тиск інертних газів знаходився в діапазоні (7-220) кПа, парціальний тиск пари води складав (50-133) Па. Віддаль між електродами з Цинку:  $d = 1$  та 5 мм. Показано, що при сильному перенапруженні розрядного проміжку при  $d = 1$  мм, коли величина параметра  $E/p$  в розрядному проміжку досягає 200-300 В/(см Торр) плазма розряду є джерелом УФ-випромінювання в спектральному діапазоні 200-215 нм на спектральних переходах атомів та іонів Цинку. Енергетичний внесок в розряд та інтенсивність УФ випромінювання Цинку збільшувались при зростанні тисків He і Ar. Додавання пари води в розряд слабо впливало на інтенсивність УФ випромінювання Цинку і дозволяло одержати в спектрах випромінювання інтенсивні спектральні лінії атома Водню, які можуть використовуватись для оцінок параметрів плазми.

**Ключові слова:** сильнострумовий наносекундний розряд, Цинк, Гелій, Аргон, пари води, спектр випромінювання, ультрафіолет.

### Вступ

Для калібрування спектральних приладів і різних оптичних елементів необхідним є використання точкових (з об'ємом плазми близько 1-3 мм<sup>3</sup>), імпульсно-періодичних джерел ультрафіолетового випромінювання тривалістю 1-100 нс з імпульсною потужністю випромінювання більшою за 1 Вт [1]. Використання для вирішення цієї проблеми УФ-ламп з накачуванням імпульсно-періодичним бар'єрним чи емнісним розрядами з тривалістю імпульсів струму 10-100 нс не дозволяє одержувати розряд в такому малому об'ємі [2,3]. Тому більш прийнятним виявилось одержання УФ випромінювання нано-секундної тривалості з сильно перенапруженого розряду між двома металевими електродами, розміщеними на міліметрових віддаль, який може розвиватись в формі об'ємного розряду з втікаючими електронами [4]. При малих

віддаль між електродами відбуваються мікрровибухи неоднорідностей на поверхні електродів, що призводить до внесення пари матеріалу електродів в плазму при утворенні ектонів [5]. На сучасному етапі дослідження іскрових наносекундних розрядів спектри УФ випромінювання (200-300 нм) наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску були наведені в статті [6] (розряд між електродами з латуні і нержавіючої сталі). Проте в праці [6] спектри залишились не ідентифікованими, а механізм їх збудження не обговорювався. При використанні для збудження розряду генераторів високої напруги субнаносекундної тривалості між електродами з міді, нержавіючої сталі, ніобію і вольфраму були досліджені деякі характеристики відповідних точкових ламп з спектром випромінювання в діапазоні 200-300 нм, де було зосереджено 40% всієї потужності випромінювання плазми розряду [1]. При застосування

уніполярного наносекундного розряду з тривалістю імпульсів 50-100 нс між мідними електродами в повітрі атмосферного тиску нами були ретельно досліджені спектральні характеристики точкової лампи на іонах міді [7]. Можливості ж застосування в точкових лампах електродів з меншою температурою пароутворення, які б дозволяли збільшити густину пари металу в лампі і дозволяли одержувати УФ випромінювання в вузькому діапазоні спектру (типу цинку, кадмію чи свинцю) залишались не встановленими. Перші результати дослідження точкової лампи на парі цинку в повітрі атмосферного тиску наведені в нашій статті [8].

В даній статті приводяться результати дослідження характеристик сильнострумowego наносекундного розряду між електродами з цинку в середовищі He і Ar при широкій зміні їх тисків і додаванню малих домішок пари води в робочу газову суміш.

В роботі [9] приведені спектри люмінесценції поздовжнього імпульсно-періодичного розряду в газовій суміші Xe-RbBr, у якій виявлено ультрафіолетове випромінювання молекул ексиплексу XeBr\* у спектральному діапазоні 200-425 нм. Максимальна потужність ультрафіолетового випромінювання у загальному обсязі плазми 4,8 Вт. Формування молекул ексиплексу XeBr\* в імпульсно-періодичному розряді в Xe-RbBr.

### Техніка експерименту

Система електродів, між якими запалювався сильнострумовой наносекундний розряд високого тиску в сумішах гелію і аргону з малими домішками пари води, була встановлена в герметичну розрядну комірку, виготовлену з діелектричної труби діаметром 120 мм і довжиною 150 мм. З метою зменшення впливу електромагнітних завад на систему реєстрації характеристик розряду, розрядна комірка була поміщена 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. Розрядна комірка відкачувалась до залишкового тиску повітря 5-10 Па. Тиск інертних газів варіювався в межах 5-200 кПа, а домішок пари води був у діапазоні 50-133 Па.

Система живлення розряду та реєстрації його характеристик описана в статті [8].

### Електричні і оптичні характеристики

Імпульсна потужність розряду та осцилограми напруги на електродах і розрядного струму наносекундного розряду високого тиску при міжелектродній віддалі 5 мм в гелії та аргоні приведені на рис.1 і рис.2. Додавання пари води до інертних газів на рівні парціальних тисків  $p(\text{H}_2\text{O})=50-133$  Па практично не впливало на осцилограми напруги і струму розряду.

Імпульсна електрична потужність наносекундного розряду визначалась шляхом перемноження осцилограм імпульсів напруги і струму. Інтегрування за часом імпульсної потужності дозволяло одержати енергію в одному електричному імпульсі, яка вносилась в плазму. Максимальна імпульсна потужність розряду досягала в гелії 2 МВт (на часовому інтервалі 130-170 нс), а в аргоні вона зменшувалась до 1 МВт (часовий інтервал 50-100 нс). При збільшенні тиску інертних газів в діапазоні 7-220 кПа енергетичний внесок в плазму збільшувався за лінійним законом (гелій з 13 до 58 мДж; аргон з 16 до 69 мДж). При зменшенні віддалі між електродами до  $d=1$  мм, залежність енергетичного внеску в плазму залишалась лінійною, а його величина зростала в 1,5-2 рази.

Максимальний енергетичний внесок в розряд був одержаний в повітрі і досягав 108 мДж ( $p=1$  Атм,  $d=1$  мм).

На рис.3 і рис.4 представлені характерні спектри випромінювання наносекундного розряду між електродами з цинку в середовищі інертних газів без пари води і з додаванням невеликої кількості пари води. Всі спектри приведені за

інтенсивностями до одиниці з врахуванням відносної спектральної чутливості спектрофотометра, що особливо важливо для коректної реєстрації спектральних ліній

цинку в діапазоні довжин хвиль 200-270 нм, де вона може зменшуватись більш ніж на порядок.

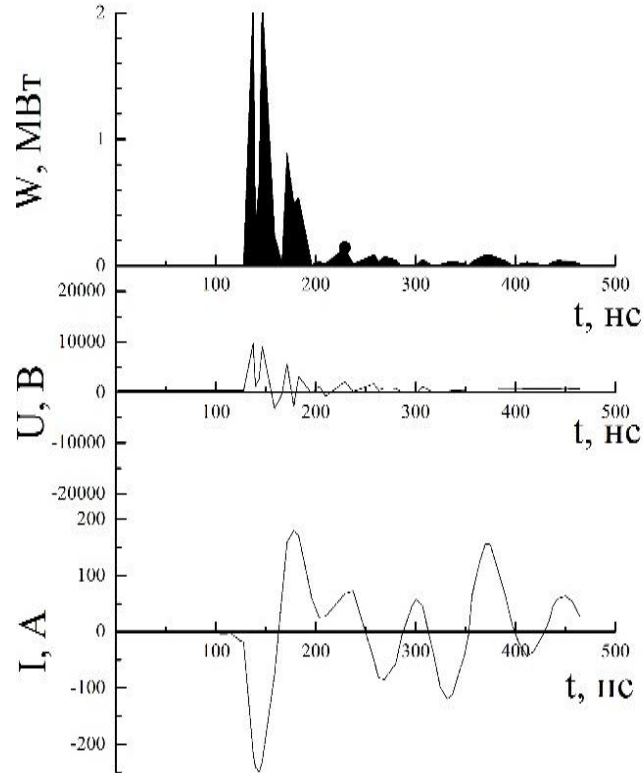


Рис.1. Часові залежності електричної потужності розряду, напруги і сили струму наносекундного розряду при міжелектродній відстані  $d=5$  mm і тиску гелію - 2 Атм.

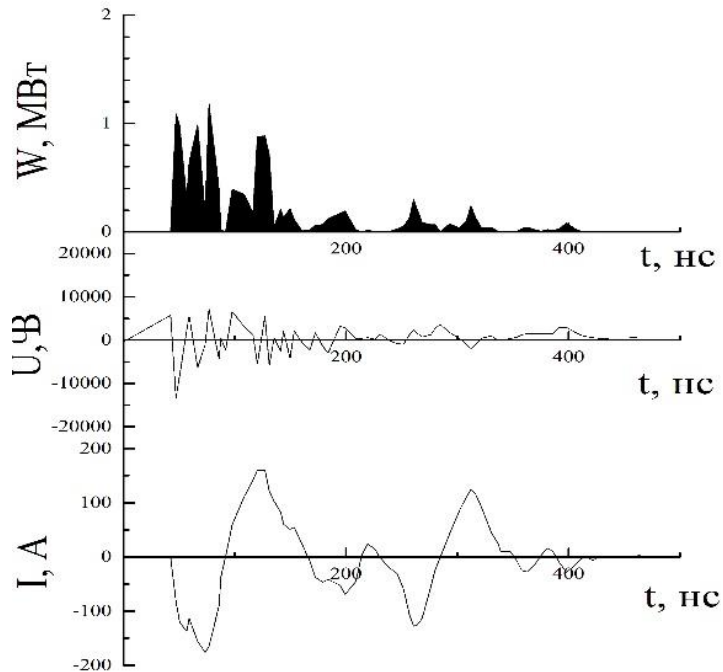


Рис.2. Часові залежності електричної потужності розряду, напруги і сили струму наносекундного розряду: при  $d=5$  mm і тиску гелію - 2 Атм.

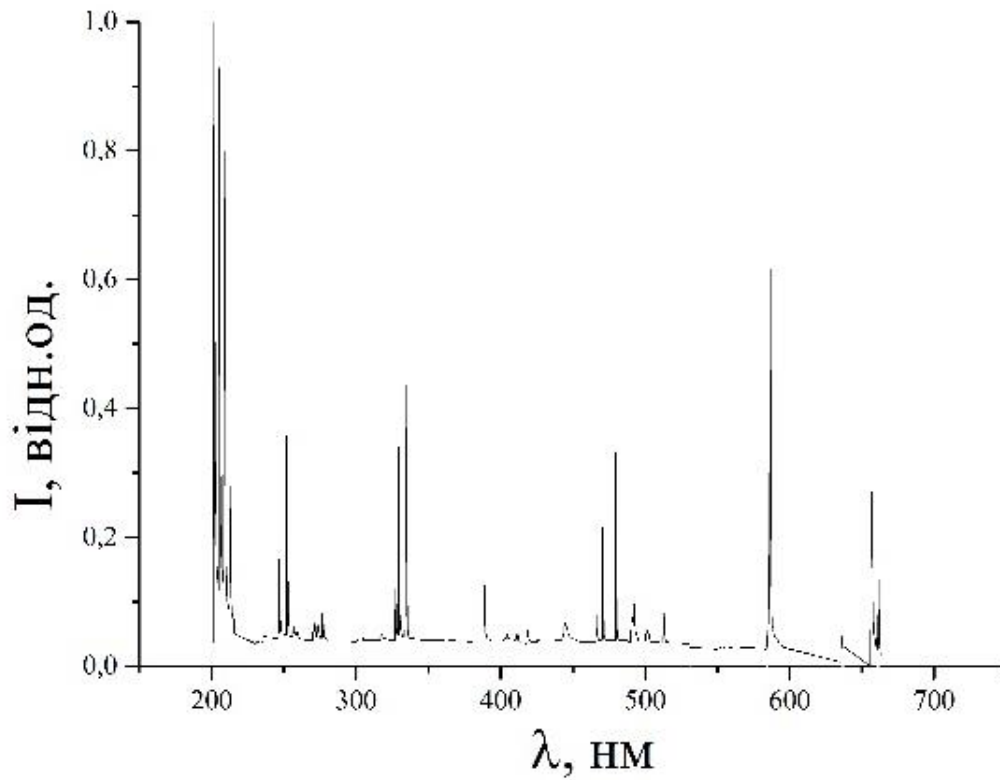


Рис.3. Спектр випромінювання розряду в гелії при  $p = 2$  Атм і міжелектродній відстані  $d=1$  мм.

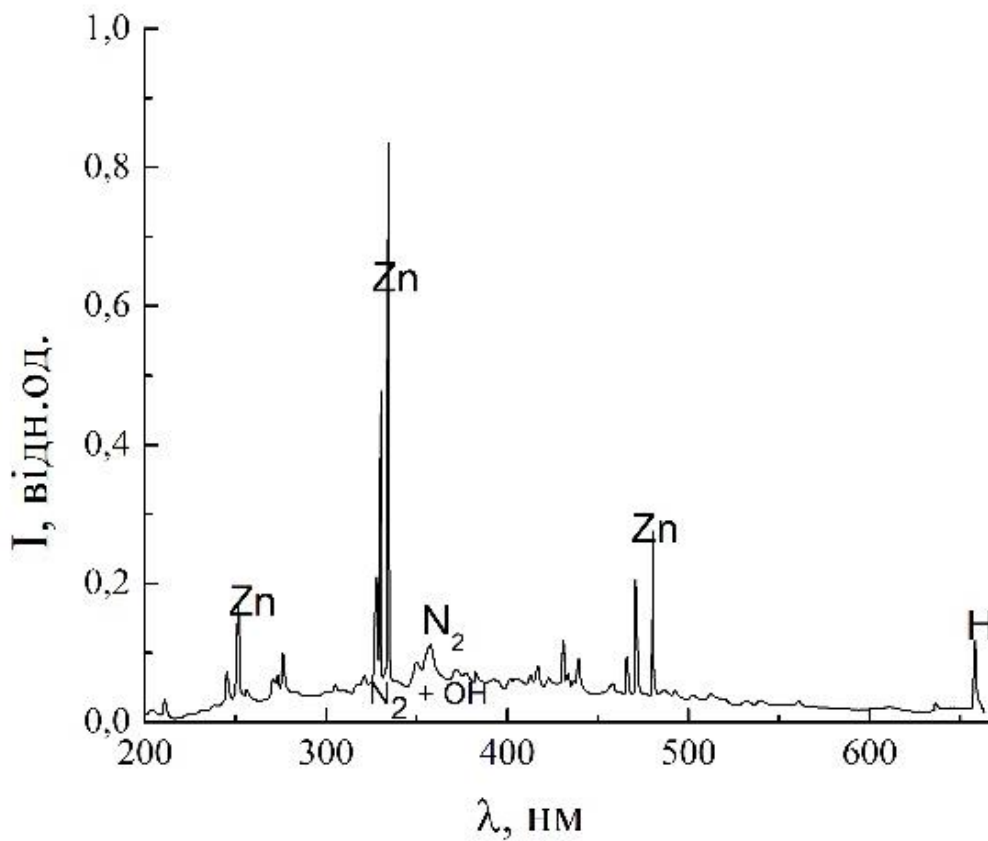


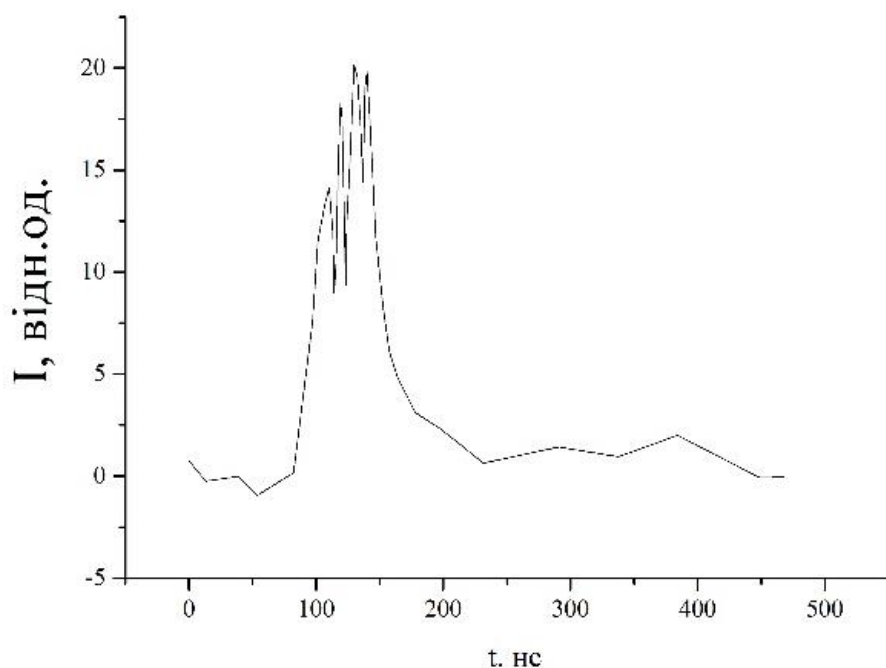
Рис.4. Спектр випромінювання розряду в аргоні при  $p = 1$  Атм і між електродній відстані  $d=5$  мм.

При міжелектродній віддалі 1 мм як гелії, так і в аргоні високого тиску основною в спектрі випромінювання розряду була група інтенсивних спектральних ліній атомів та однозарядних іонів цинку в спектральному інтервалі 200-215 нм. Найбільш інтенсивними спектральними лініями атома цинку були: 207,0 нм; 207,9 нм; 208,7 нм; 209,8 нм; 210,4 нм; 213,9 нм Zn I. Найінтенсивніші іонні спектральні лінії цинку в цій групі були нерозділеними і спостерігались у вигляді груп нерозділених ліній (201,2+202,5+203,9) нм; (206,2+206,4) нм; 207,9 нм; 209,9 нм; 210,2 нм Zn II. При збільшенні міжелектродної віддалі до 5 мм (що приводило до різкого спаду напруженості електричного поля) інтенсивність цієї групи спектральних ліній цинку зменшувалась практично до нуля (рис.4). Друга за інтенсивністю випромінювання група найбільш короткохвильових спектральних ліній цинку спостерігалась на ділянці 240-255 нм при  $d=1$  та 5 мм. Найбільш інтенсивними тут були атомарні спектральні лінії 242,6; 247; 250,2; 255,8 нм Zn I. Менш інтенсивними були дві групи спектральних ліній цинку в спектральних діапазонах 325-340 та 460-520 нм. В сумішах гелію з парою води спостерігались найбільш інтенсивні спектральні лінії атома He (667,8; 587,5;

504,7; 501,5; 492,2; 471,3) та атома водню. В досліджуваному спектральному діапазоні в плазмі на основі аргону і пари води спостерігались (крім ліній цинку) лише найбільш інтенсивні спектральні лінії атома водню – 656,3; 486,1 нм.

Осцилограми на деяких спектральних переходах атомів цинку і водню в гелії атмосферного тиску приведені на рис.5.

Внаслідок нечутливості імпульсного приймача в області довжин хвиль 200-280 нм, осцилограми випромінювання досліджувались лише в більш довгохвильовій області. Основний максимум випромінювання плазми корелювався з першим головним максимумом імпульсної потужності розряду. Для спектральної лінії атома цинку спостерігався і другий менш інтенсивний максимум випромінювання при часах 350-400 нс. Для спектральної лінії атома водню основним був другий максимум випромінювання, який спостерігався коли до розрядного проміжку вже напруга не прикладається, а струм іще був великий. Імовірним механізмом появи другого максимуму на цій осцилограмі може бути дисоціативна рекомбінація іонів молекули води з електронами низької енергії.



а

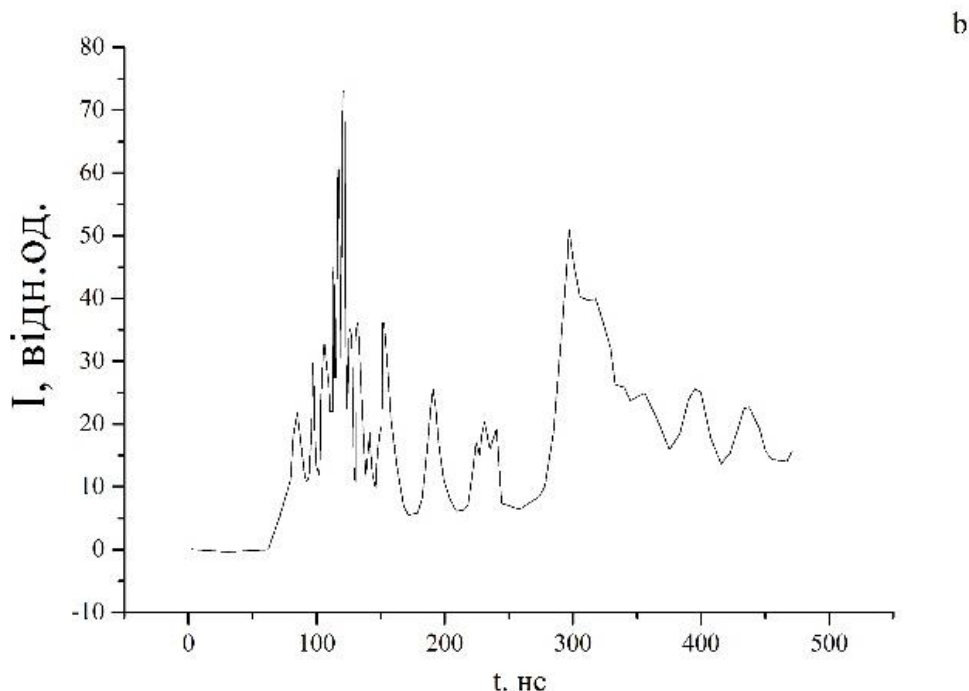


Рис.5. Осцилограми випромінювання плазми розряду в гелії при  $p=1$  Атм та  $d=5$  мм на переходах: а) – 481,1 нм Zn I, б) – 486,3 нм H I.

Найбільш імовірними механізмами утворення збуджених атомів та іонів цинку в умовах даного експерименту може бути збудження іонів цинку електронами з основного стану і в процесах електрон-

### Висновки

Дослідження характеристик сильно-струмового наносекундного розряду в сумішах гелію і аргону з малими домішками пари води, що запалювався між електродами з Цинку, виявило, що при віддалі між електродами 1 мм і значному перенапруженні розрядного проміжку в спектрах випромінювання плазми основною є група інтенсивних спектральних ліній атома та іона Цинку з спектрального інтервалу 200-215 нм.

іонної рекомбінації [10]. В сумішах на основі гелію іонізація цинку відбувається ефективно в процесах пеннінг-іонізації та ступінчатої іонізації атома цинку електронами.

Імпульсна потужність розряду досягала 1-2 МВт при тисках інертних газів 2 Атм, а енергетичний внесок в плазму складав 60-70 мДж.

На основі даного розряду може бути розроблена селективна ультрафіолетова лампа на спектральних лініях атомів та іонів цинку, а спектральні лінії атома водню, що є продуктом дисоціативного збудження молекул води, можуть використовуватись для діагностики параметрів плазми.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Point-like pulse-periodic UV radiation Source with short pulse duration / E. K.Bakst, V. F. Tarasenko, Y. V. Shut'ko, M. V. Erofeev. // *Quantum Electronics*. – 2012. – №42. – Pp. 153–156.
2. Use of a low pressure helium/water vapor discharge as a mercury-free source of ultraviolet emission / D.Levko, A. K. Shuaibov, R. Grizak, A. Ysembaliuk. // *Journal of Applied Physics*. – 2014.
3. Shuaibov A. K. Optical characteristics of UV-VUV lamps on the electronic-vibrational transition of the hydroxyl radical pumped by a nanosecond capacitive discharge / A. K. Shuaibov, R. Grizak. // *High. Volt.* – 2017. – Pp. 78–81.

4. 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. // Успехи Физических Наук. – 1990. – №7. – С. 49–72.
5. Mesyats G. A. Electron Avalanche from metal / G. A. Mesyats. // Usp. Fizich. Nauk. – 1992. – №6. – Рр. 601–626.
6. Искровой пробой воздуха наносекундными импульсами напряжения / [В. В. Ахмадеев, Л. М. Василяк, С. В. Костюченко та ін.]. // ЖТФ. – 1996. – №4. – С. 58–67.
7. Shuaibov A. K. Emission Characteristics of the Catode Region of nanosecond Discharge in Atmospheric-Pressure Air / A. K. Shuaibov, G. E. Laslov, Y. Y. Kozak. // Optics and Spektroskopy. – 2014. – №4. – Рр. 552–556.
8. Оптичні характеристики наносекундного розряду на суміші повітря з парами цинку / О. Й.Миня, О. К. Шуаїбов, З. Т. Гомокі, В. В. Данило. // Вісник Ужгородського університету. Фізика. – 2016. – №39. – С. 93–99.
9. Heneral A. A. Emission characteristics of Xe–RbBr plasma / A. A. Heneral, S. V. Avtaeva. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – №50. – С. 7.
10. Гомонай А. Н. Радиационный распад автоионизационных состояний в процессе диэлектронный рекомбинации ионов  $Zn^+$  и  $Cd^+$  / А. Н. Гомонай. // ЖПС. – 2015. – №1. – С. 17–22.

Стаття поступила до редакції 10.07.2017.

В.В. Данило, А.И. Миня, А.К. Шуаибов, И.В.Шевера, З.Т. Гомоки, М.В. Дудич

Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, ул. Волошина, 54, Украина, 88000  
e-mail: bandzigel@gmail.com

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСЯХ ГЕЛИЯ И АРГОНА С МАЛЫМИ ПРИМЕСЯМИ ПАРОВ ВОДИ

Приведены электрические и оптические характеристики сильноточного наносекундного разряда в смесях гелия и аргона с малыми примесями паров воды. Давление инертных газов находилось в диапазоне (7-220) кПа, парциальное давление паров воды составляло (50-133) Па. Расстояние между электродами из цинка:  $d = 1$  та 5 мм. Показано, что при сильном перенапряжении разрядного промежутка при  $d = 1$  мм, когда величина параметра  $E/p$  в разрядном промежутке достигало 200-300 В/(см Торр), плазма разряда является источником УФ-излучения в спектральном диапазоне 200-215 нм на спектральных переходах атомов и ионов цинка. Энерговклад в разряд и интенсивность УФ излучения цинка увеличивалась при увеличении давления He і Ar. Введение паров воды в разряд слабо влияло на интенсивность УФ излучения цинка і позволяло получать в спектрах излучения интенсивные спектральные линии атома водорода, которые могут использоваться для оценок параметров плазмы.

**Ключевые слова:** сильноточный наносекундный разряд, цинк, гелий, аргон, пары воды, спектр излучения, ультрафиолет.

PACS 52.80.–s, 51.50.+v, 52.80.Tn, 52.90.+z, 52.80.Wq, 52.80.Mg, 79.60.Jv

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.128-136

V.V. Danylo, O. Y. Minya, O.K. Shuaibov, I.V. Shevera, Z.T.

Homoki, M.V. Dudych

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

e-mail: bandzigel@gmail.com

## CHARACTERISTICS OVERVOLTAGE NANOSECOND DISCHARGES ON MIXTURES OF HELIUM AND ARGON WITH ADMIXTURES OF WATER VAPOR

**Introduction.** Nanosecond overvoltage discharges in high-pressure gases between metal electrodes are promising for applications in selective "point" UV-VUV lamps. The most investigated working media of such lamps are vapors of copper and iron in atmospheric pressure air. The use of electrodes with a lower melting point and a transition to a gaseous state, for example, zinc in a medium of high-pressure inert gases has been little studied, which hampers the understanding of the physics of processes in these lamps and the optimization of their output characteristics.

**Purpose.** The aim of this work is to study the characteristics of an overstressed nanosecond discharge between electrodes from zinc in high pressure helium and argon that can be used to develop selective point lamps in the spectral range of 200-215 nm.

**Methods.** The optical-spectroscopic method of investigation of discharge plasma with high time separation is used in this work.

**Results** Optical-spectroscopic method with high temporal resolution is used in this work for investigation of the discharge plasma.

As a result of the study of the optical characteristics of an overstressed nanosecond discharge in helium and argon (at pressures  $p = 7-220$  kPa) with a distance between zinc electrodes of 1 mm it was found that it is a source of UV radiation of zinc atoms and ions in the spectral range of 200-215 nm. The peak value of the electric power of the discharge is  $\sim 1-2$  MW, and the energy deposition to the plasma per pulse is  $\sim 60-80$  mJ. At adding small amount of water vapor impurities to inert gases, intense spectral lines of the hydrogen atom were recorded in the plasma emission spectra; the H lines can be used to estimate the plasma parameters.

**Conclusion** The experiments revealed the suitability of this discharge for use in a selective "point" UV lamp operating on zinc vapors.

**Key words:** high-voltage nanosecond discharge, zinc, helium, argon, water vapor, emission spectrum, ultraviolet.

### REFERENCES

1. Bakst E. K., Tarasenko V. F., Shut'ko Y. V., Erofeev M. V. (2012) "Point-like pulse-periodic UV radiation Source with short pulse duration", *Quantum Electronics.*, No. 42., pp. 153–156.
2. Levko D., Shuaibov A. K., Gritzak R., Ysembaliuk A. (2014) "Use of a low pressure helium/water vapor discharge as a mercury-free source of ultraviolet emission", *Journal of Applied Physics.*
3. Shuaibov A. K. (2017) "Optical characteristics of UV-VUV lamps on the electronic-vibrational transition of the hydroxyl radical pumped by a nanosecond capacitive discharge", *High. Volt.*, Pp. 78–81.
4. Babich L. P. (1990) "High-voltage nanosecond discharge in dense gases at large overvoltages, developing in the runaway mode of electrons" [*Vyisokovoltnyi nanosekundnyi razryad v plotnyh gazah pri bolshih perenapryazheniyah, razvivayus-chiysya*]



- v rezhime ubeganiya elektronov] // Physics-Uspekhi , No. 7. , Pp. 49–72.
5. Mesyats G. A.(1992) “Electron Avalanche from metal” Usp. Fizich. Nauk. No. 6. , Pp. 601–626.
  6. Ahmadeev V. V., Vasilyak L. M., Kostyuchenko S. V. (1996), “The spark breakdown of air by nanosecond voltage pulses” [Iskrovoy proboy vozduha nanosekundnyimi impulsami napryazheniya], Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, No. 4. , Pp. 58–67.
  7. Shuaibov A. K. (2014) “Emission Characteristics of the Cathode Region of nanosecond Discharge in Atmospheric-Pressure Air”, Optics and Spektroskopy , №4. , Pp. 552–556.
  8. Minya O.Y., Shuaibov O.K., Homoki Z.T., Danylo V.V., Chavarga M.M., L.E. Kukri (2016) “Optical characteristics of nanosecond discharge for a mixture of air with zinc pairs”, [Optychni kharakterystyky nanosekundnoho rozriadu na sumishi povitria z paramy tsynku] Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics , No. 39., Pp. 93–99.
  9. Heneral A. A. Emission characteristics of Xe–RbBr plasma / A. A. Heneral, S. V. Avtaeva. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – №50. – C. 7.
  10. Gomonay A. N.(2015) “Radiation decay of autoionization states in the process of dielectronic ion recombination ionov Zn+ i Cd+” [Radiatsionnyiy raspad avtoionizatsionnyih sostoyaniy v protsesse dielektronniy rekombinatsii ionov Zn+ i Cd+ ], JAS. , No. 1. ,Pp. 17–22.

© Ужгородський національний університет