

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Ужгородська школа з атомної фізики

та квантової електроніки

*до 100-річчя від дня народження
професора Івана Прохоровича Запісочного*

26-27 травня 2022 року



INTERNATIONAL CONFERENCE

Uzhhorod School of Atomic Physics and

Quantum Electronics

*to the 100th anniversary of the birth of Professor Ivan
Prokhorovich Zapisochny*

May 26–27, 2022



Міжнародна конференція
Ужгородська школа з атомної фізики
та квантової електроніки
до 100-річчя від дня народження професора
Івана Прохоровича Записочного

ЗБІРНИК МАТЕРІАЛІВ КОНФЕРЕНЦІЇ

PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE

International Conference
Uzhhorod School of Atomic Physics and
Quantum Electronics
to the 100th anniversary of the birth of Professor
Ivan Zapisochny

Ужгород 2022

Наукову конференцію присвячено знаменній ювілейній даті – 100-річчю від дня народження Івана Прохоровича Записочного відомого українського вченого в галузі атомної фізики, фізичної і квантової електроніки, заслуженого діяча науки України, лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки та премії ім. К.Д. Синельникова НАН України. З його ім'ям пов'язані важливі результати, які сприяли розвитку фізики електронних і атомних зіткнень, спектроскопії вакуумно-ультрафіолетового діапазону, нелінійної оптики, електрон-фотонної та іон-фотонної емісії металевих поверхонь, газової квантової електроніки. Він та його учні мають великі заслуги у створенні цілої серії оригінальних, у тому числі унікальних, установок та прецизійного інструментарію для досліджень багатьох нових явищ та ефектів в електронних оболонках атомів і іонів при їх зіткненнях з електронами, фотонами лазерного випромінювання та між собою, досліджень атомних процесів при взаємодії електронних, іонних і лазерних пучків з поверхнею твердих тіл та активних середовищ лазерів на парах металів і ексимерних молекулах. Збірник містить розгорнуті тези доповідей, які присвячені сучасним експериментальним та теоретичним дослідженням у галузі фізики електронних і атомних зіткнень, багатофотонній іонізації, процесам взаємодії електронних, іонних та лазерних пучків з поверхнею твердих тіл, елементарним процесам у лазерах і низькотемпературній плазмі, спектроскопії атомів, молекул, резонансним явищам, низькоенергетичній ядерній фізиці.

The scientific conference is dedicated to the centenary of Ivan Prokhorovych Zapisochny, a well-known Ukrainian scientist in the field of atomic physics, physical and quantum electronics, Honored Scientist of Ukraine, laureate of the State Award of Ukraine in the field of science and technology and the Sinelnikov Award of the National Academy of Sciences of Ukraine. His name is associated with important results that contributed to the development of physics of electron and atomic collisions, vacuum-ultraviolet spectroscopy, nonlinear optics, electron-photon and ion-photon emission of metal surfaces, and quantum gas electronics. He and his disciples have a great merit in the creation of a whole series of original, sometimes unique, experimental setups and high-precision instruments for the study of numerous novel phenomena and effects in electron shells of atoms and ions at their collisions with electrons, laser-emitted photons and with each other as well as of atomic processes at interaction of electron, ion, and laser beams with solid surfaces and active media of metal vapor lasers and excimer molecules. The collection contains detailed abstracts of reports devoted to modern experimental and theoretical research in the field of physics of electron and atomic collisions, multiphoton ionization, processes of interaction of electron, ion and laser beams with solid surfaces, elementary processes in lasers and low-temperature plasma, spectroscopy of atoms, molecules, resonance phenomena, and low-energy nuclear physics.

Укладачі:

А.М. Завілопуло, д. ф.-м. н.
В.І. Роман, к. ф.-м. н.

Відповідальні за випуск:

Г.М. Гомонай, д. ф.-м. н.,
Т.Ю. Попик к. ф.-м. н.

*Друкується за рішенням Вченої ради Інституту електронної фізики НАН України
5 травня 2022 року, протокол №4*

© ІЕФ НАН України, 2022
© А.М. Завілопуло, укладач, 2022
© В.І. Роман, обкладинка, 2022

ISBN 978-617-7798-90-2

ГАЗОРОЗРЯДНЕ ТОЧКОВЕ ДЖЕРЕЛО УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ГАЗОПАРОВОЇ СУМІШІ АРГОНУ І МІДІ ДЛЯ ЗАСТОСУВАНЬ В МЕДИЦИНІ, БІОЛОГІЇ ТА БІОМЕДИЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ

Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомоки

ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Ужгород
e-mail: roksolana.gritsak@uzhnu.edu.ua

Для розробки імпульсно-періодичних джерел УФ-випромінювання значний інтерес представляє канална стадія іскрового розряду в інертних газах високого тиску, оскільки вона має високу інтенсивність випромінювання в діапазоні довжин хвиль 200-250 нм [1]. Результати дослідження характеристик точкового УФ-випромінювача, з накачуванням перенапруженим біполярним розрядом газопарової суміші атмосферного тиску «аргон-мідь» у відомій нам літературі відсутні, тому актуальною є задача оптимізації такого джерела УФ-випромінювання для застосувань у медицині, біології і біомедичній інженерії.

Дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду проводилось на розрядному модулі, схема якого наведена в [13]. Перенапружений наносекундний розряд між електродами з міді запалювався в герметизованій камері з оргскла при віддалі між мідними електродами $d = 2$ мм і тиску аргону – 6.7; 101 кПа. Експериментальна установка містила розрядний модуль, систему реєстрації оптичного випромінювання на основі монохроматора МДР-2 і систему реєстрації імпульсних електричних та оптичних характеристик. Для запалювання розряду на електроди розрядної комірки подавались біполярні імпульси високої напруги тривалістю 50-150 нс амплітудою $\pm (20-40)$ кВ. Частота повторення імпульсів напруги була вибрана рівною 40-150 Гц. Осцилограми імпульсів напруги і осцилограми імпульсів струму реєструвались за допомогою широкосмугового ємнісного дільника напруги, поясу Роговського з часовим розділенням на рівні 2-3 нс.

Між кінчиками мідних електродів запалювався однорідний розряд тривалістю 100-400 нс з амплітудою імпульсів струму 50-200 А і об'ємом плазми 10-500 мм³. При міжелектродній віддалі 2 мм розрядний проміжок був перенапружений, що створювало сприятливі умови для формування пучка електронів-втікачів високої енергії і супутнього рентгенівського випромінювання [4,5].

Вимірювання потужності випромінювання плазми розряду відбувалось за допомогою ультрафіолетового вимірювача абсолютної потужності випромінювання «ТКА-ПКМ», який дозволяв вести виміри в спектральному діапазоні 200-400 нм.

Розрядна камера відкачувалась форвакумною помпою до залишкового тиску 10 Па. Діаметр мідних циліндричних електродів – 5 мм, а радіус закруглення їх робочої торцевої поверхні був однаковим і рівним – 3 мм. Об'єм розряду залежав від частоти слідування імпульсів напруги. Режим «точкового розряду» досягався лише при частотах повторення імпульсів напруги в діапазоні $f = 40\text{-}150$ Гц. При короткочасному збільшенні частоти до 1000 Гц об'єм плазми газорозрядного випромінювача зростає до $120\text{-}150$ мм³.

При тиску аргону 6,7 кПа перенапружений наносекундний розряд мав вигляд яскравої центральної частини діаметром близько 2 мм, що був рівним міжелектродній віддалі, з якого витікали два струмені плазми зеленого кольору. При збільшенні тиску аргону до 101 кПа збільшувався діаметр яскравої центральної частини в 2-3 рази.

Осцилограми напруги і струму були в формі затухаючих у часі осциляцій, що зумовлено неузгодженістю вихідного опору високовольтного модулятора з опором навантаження. Повна тривалість осциляцій напруги на проміжку та розрядного струму досягала 450 нс при тривалості окремих осциляцій напруги 7-10 нс, а осциляції струму мали тривалість ≈ 70 нс. Для розряду в аргоні атмосферного тиску при $d=2$ мм амплітуда найбільшого спаду напруги на електродах досягала в початковій стадії розряду і складала $\approx \pm 7\text{-}8$ кВ, струму ± 100 А, а імпульсної потужності – 1,2 МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс у плазму близько ≈ 167 мДж.

На рис.1 наведені спектри випромінювання високовольтного наносекундного розряду між мідними електродами в аргоні ($p(\text{Ar}) = 101$ кПа) і віддалі між електродами $d=2$ мм.

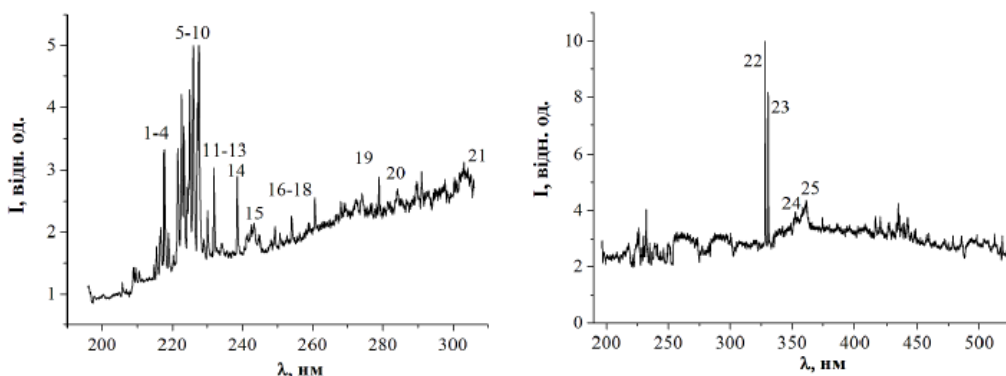


Рис. 1. Спектри випромінювання наносекундного розряду в аргоні між мідними електродами при $d=2$ мм і $p(\text{Ar}) = 101$ кПа.

Особливістю цих спектрів випромінювання була наявність континууму, на фоні якого спостерігались всі спектральні лінії і смуги. Природа даного континууму в умовах нашого експерименту пов'язана з тепловим і

рекомбінаційним випромінюванням плазми. Форма континууму з широким максимумом при 400-450 нм добре корелювала з результатами, відомими з літератури.

Так, в [6] для іскрового розряду в аргоні атмосферного тиску між електродами з алюмінію при $d=10$ мм у спектрі випромінювання було зареєстровано інтенсивний континуум у діапазоні довжин хвиль 350-460 нм з максимумом при $\lambda=420$ нм.

У спектрах випромінювання плазми розряду (рис.2) на суміші аргону з парами міді в УФ-діапазоні довжин хвиль 214-330 нм (лінії 1-23) спостерігалось випромінювання на переходах атома і однозарядного іона міді. Найбільш інтенсивною іонною спектральною лінією була лінія з $\lambda = 227.62$ нм Cu II, а з атомарних найінтенсивнішими були резонансні спектральні лінії атома міді з $\lambda = 324.75$ і 327.39 нм Cu I, у яких нижнім енергетичним рівнем є основний рівень.

Найвищою енергією верхнього рівня для ліній Cu II була $E_{\text{верх}} = 18,77$ еВ, а для атомарних ліній максимальна енергія верхнього рівня складала $E_{\text{верх}} = 7,18$ еВ. В УФ спектрі також спостерігались смуги другої додатної системи молекули азоту, оскільки в даних експериментах відкачування розрядної камери відбувалось лише до залишкового тиску повітря ≈ 10 Па. В діапазоні довжин хвиль 360-659 нм спостерігалось випромінювання переважно на переходах Ag I; Ag II, а також інтенсивна спектральна лінія атома водню ($\lambda = 656,29$ нм), яка зумовлена залишковим тиском повітря в камері після її відкачування форвакуумною помпою.

При відстані між електродами 2 мм і використанні біполярного генератора високовольтних наносекундних імпульсів відбувається формування однієї чи декількох (при сильному перенапруженні розрядного проміжку) катодних плям, які рухаються одна назустріч одній.

Для високовольтного наносекундного розряду в аргоні атмосферного тиску деякі оптичні і газодинамічні характеристики плазми катодної плями наводяться в [7]. Проте в цих експериментах, проведених при міжелектродній віддалі $d = 10$ мм між електродами з алюмінію, чітко фіксувалось випромінювання плазми катодної плями діаметром $\approx 0.2-0.3$ мм і прив'язаного до неї плазми дифузного розряду, який займав більшу частину розрядного проміжку. Формування катодних плям у перенапруженому наносекундному розряді пояснюється вибухоemisійною моделлю [8], яка заснована на внесенні значної енергії на мікрівістрях поверхні катода з наступним їх нагріванням і вибухом. Катодна пляма формувалась одночасно з початком різкого зростання струму і спаду напруги на проміжку і на початкових стадіях формування була напівсферичною і мала швидкість розширення $\approx 2.5 \cdot 10^6$ см/с. Такій швидкості руху катодної плями відповідала кінетична енергія 50-100 еВ, при якій формується «ектон» з числом електронів $10^{11}-10^{12}$ і згусток парів металу. На початковій стадії розряду радіус катодної плями не перевищував $\approx 10^{-6}$ м і з плином часу t від 5 до 50 нс він збільшувався від 0,5 до $4,3 \cdot 10^{-4}$ см [9].

Температура електронів прикатодної плазми аргону атмосферного тиску, яка оцінювалась за відносними інтенсивностями випромінювання спектральних ліній аргону, в початкові моменти її формування (на проміжку часу ≈ 30 -40 нс) досягала 5 еВ, а в наступні моменти часу ($\tau = 50$ -500 нс) зменшувалась від 4.2 до 3.4 еВ [9].

На рис.2 наведено результати оптимізації середньої інтенсивності УФ-випромінювання розряду в залежності від частоти повторення імпульсів.

Максимальні величини середньої потужності УФ-випромінювання в аргоні при тиску аргону 101 кПа для різних діапазонів УФ випромінювання складали: УФ-С (200-280 нм) - 67 мВт/м², УФ-В (280 - 315 нм) - 65 мВт/м² і УФ-А (315-400 нм) - 204 мВт/м² (при $U_{зар} = 20$ кВ, $f = 1$ кГц).

При збільшенні частоти повторення імпульсів від 40 до 1000 Гц найбільшим було зростання інтенсивності випромінювання розряду в UV-A (315-400 нм) діапазоні, зокрема, в діапазоні частот $\Delta f = 350$ -1000 Гц, вона збільшувалась від 8 до 95 мВт/м².

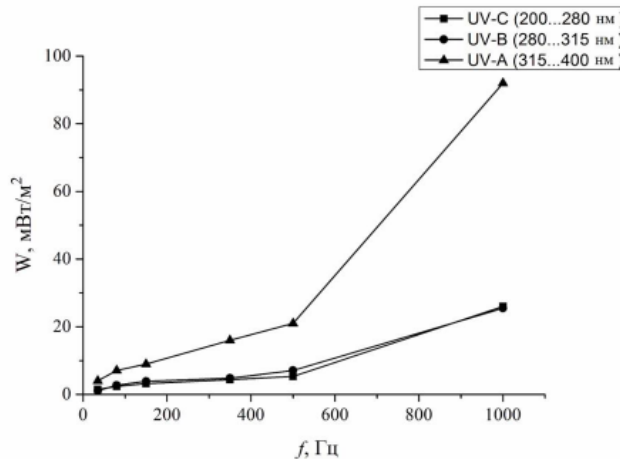


Рис. 2. Залежність інтенсивності УФ-випромінювання УФ-С, УФ-В, УФ-А діапазонів високовольтного наносекундного розряду від частоти повторення імпульсів напруги при зарядній напрузі $U = 13$ кВ ($f = 80$ Гц, $p(\text{Ar}) = 101$ кПа, $d = 2$ мм).

В діапазонах UV-B UV-C ріст густини потужності випромінювання був меншим і спостерігався в діапазоні 3,0-25,0 мВт/м². Збільшення інтенсивності УФ-випромінювання розряду в залежності від величини зарядної напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора при фіксованій частоті повторень було менш ефективним і знаходилося в діапазоні 8,0-24 мВт/м². При цьому відносні співвідношення між інтенсивностями випромінювання в діапазонах УФ-С, УФ-В, УФ-А були такими ж як і для відповідних залежностей від частоти.

Таким чином, встановлено, що при тисках аргону 101 кПа між електродами з міді при міжелектродній віддалі 2 мм запалювався однорідний у просторі перенапружений наносекундний розряд з імпульсною електричною потужністю до 1.2 МВт, а енергетичний внесок у плазму за один імпульс складав – 176 мДж. Дослідження спектральних характеристик плазми на основі парогазових сумішей «мідь - аргон» показало, що найбільш інтенсивними були спектральні резонансні лінії атома міді ($\lambda = 324.75$ і 327.39 нм Cu I); з ліній однозарядного іона міді в інтервалі 200-330 нм найінтенсивнішою була лінія $\lambda=227.62$ нм Cu II. З іонних спектральних ліній у видимій ділянці спектра виділялась лінія з $\lambda = 618.86$ нм Cu II.

Максимальне значення середньої потужності УФ-випромінювання при $p(\text{Ar})=101$ кПа спостерігалось для діапазону УФ-А при абсолютній густині випромінювання 204 мВт/м². Найбільш ефективним було збільшення частоти повторення імпульсів до 1000 Гц, а не збільшення величини зарядної напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора.

- [1] О.К. Шуайбов, Нові газорозрядні методи одержання селективного ультрафіолетового і видимого випромінювання та синтезу наноструктур оксидів перехідних металів: монографія (Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла»: 2019).
- [2] A. Shuaibov, A. Minya, A. Malinina, A. Malinin, R. Golomb, I. Shevera, Z. Gomoki, V. Danilo, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 9, 3 (2018).
- [3] A. K. Shuaibov, A. Y. Minya, A. A. Malinina, A. N. Malinin, Z. T. Gomoki, I. V. Shevera, V. V. Danilo, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 56, № 4 (2020).
- [4] V. F. Tarasenko, *Runaway electrons preionized diffuse discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
- [5] D. V. Beloplotov, V. I. Lomaev, D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko, *Journal of Physics: Conference Series* 652 (2015).
- [6] A. K. Shuaibov, A. Y. Minya, A. A. Malinina, A. N. Malinin, Z. T. Gomoki, V. V. Danilo, Yu. Yu. Bilak, *Journal of Metallic Material Research.*, 3, № 02: 37 (2020).
- [7] V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G.B. Ragimkhanov, *Applied Physics* 2, 3 (2014).
- [8] G. A. Mesyats, *Usp. Fizich. Nauk* 165, 6 (1995).
- [9] O. A. Omarov, N. O. Omarova, P. Kh. Omarova, A. A. Aliverdiev, *High Temperature* 57, 2 (2019).