

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

ГАЗОРОЗРЯДНИЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛІВОК НА ОСНОВІ СУПЕРІОННОГО ПРОВІДНИКА (Ag₂S)

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

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

На даний час актуальним є пошук нових способів синтезу тонких плівок на основі суперіонного провідника – Ag₂S, покращення умов і здешевлення процесу синтезу за рахунок застосування перенапруженого наносекундного розряду атмосферного тиску між електродами зі сполуки на основі суперіонних провідників з екзотичним механізмом їх розпорощення.

Наносекундний розряд між електродами з суперіонного провідника (Ag₂S) запалювався в розрядній камері, виготовленій з оргскла, при тиску повітря $p = 101$ кПа. Віддаль між електродами складала 2 мм. Діаметр циліндричних електродів – 5 мм. Радіус заокруглення робочої торцевої поверхні полікристалічних електродів був однаковим і складав $R \approx 10-12$ мм. Масивні зразки полікристалів на основі суперіонного провідника Ag₂S були синтезовані в технологічній лабораторії хімічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Запалювання перенапруженого наносекундного розряду відбувалось за допомогою біполярного високовольтного модулятора імпульсів напруги з загальною тривалістю 50-150 нс і сумарною амплітудою додатних і від'ємних складових $\pm 20-60$ кВ. Частота повторення імпульсів напруги могла варіюватись в межах 40-1000 Гц. Осцилограми імпульсів напруги на розрядному проміжку і осцилограми імпульсів струму реєструвалися за допомогою ширококутового емнісного дільника напруги, поясу Роговського та ширококутового осцилографа 6ЛОР-04. Часове розділення цієї системи вимірювання характеристик електричних імпульсів складало 2-3 нс. Імпульсна електрична потужність перенапруженого наносекундного розряду визначалася графічним множенням осцилограм імпульсів напруги і струму. Інтегрування за часом імпульсної потужності дозволяло одержувати енергію в одному електричному імпульсі, яка вносила в плазму.

Більш детально методика експерименту наведена в працях [1-3].

При встановленні скляної підкладки на віддалі 2-4 см від центра розрядного проміжку і часі горіння розряду 1.0-1.5 години (при $f = 1000$ Гц) на підкладці фіксувалось осадження тонкої плівки з продуктів розпорощення матеріалу електродів.

Світлини розряду одержувались з використанням цифрової фотокамери (час експозиції ≈ 1 с). Як масштаб для встановлення об'єму плазми була використана віддаль між електродами. Об'єм розрядної плазми залежав від частоти слідування імпульсів напруги.

При проведенні експериментальних досліджень використовувались цифровий двоканальний спектрометр з компенсацією астигматизму «SL-40-2-1024USB» і спектрометр комбінаційного розсіювання (раманівський) спектрометр «XploRA PLUS» центру колективного користування науковим обладнанням «Лабораторія експериментальної та прикладної фізики» при ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

При міжелектродній віддалі 2 мм розрядний проміжок (рис.1) для повітря атмосферного тиску був перенапруженим, а розряд – однорідним.

В сильному електричному полі між електродами на основі суперіонного провідника Ag_2S відбуваються мікрровибухи нановістрь і формування ектонів на поверхні електродів [4], що сприяло внесенню парів суперіонного провідника Ag_2S і продуктів їх розпаду (Ag , S) в плазму розряду і осадженню їх на діелектричній підкладці в вигляді тонкої плівки на основі суперіонного провідника Ag_2S .

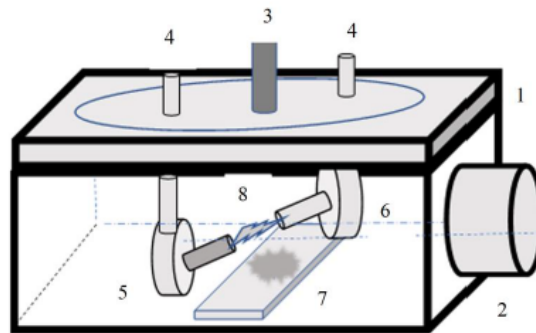


Рис.1. Схема розрядного модуля: 1 – розрядна камера, 2 – вікно з кварцу, 3,4 – високочольні вводи, 5,6 – електроди, 7– підкладка для напорошення плівки, 8 – плазма.

Такий вигляд розряду – це передумова одержання однорідних потоків розпиленої з поверхні електродів сполуки Ag_2S , продуктів її деструкції в плазмі, а також потоку УФ-випромінювання плазми та осадженню продуктів матеріалу електродів на діелектричній підкладці у вигляді тонкої плівки.

Тривалість імпульсів напруги досягала 400-450 нс, а сам імпульс напруги складався з затухаючих у часі осциляцій тривалістю близько 20-30 нс.

Максимальна величина спаду напруги на розрядному проміжку складала 40-45 кВ. Найбільша амплітуда імпульсу струму досягала 100 А. Найбільша величина імпульсної потужності розряду досягалася в перші 100 нс з моменту його запалювання і складала близько 3 МВт. Енергія окремого електричного імпульсу складала близько 77 мДж (рис.2).

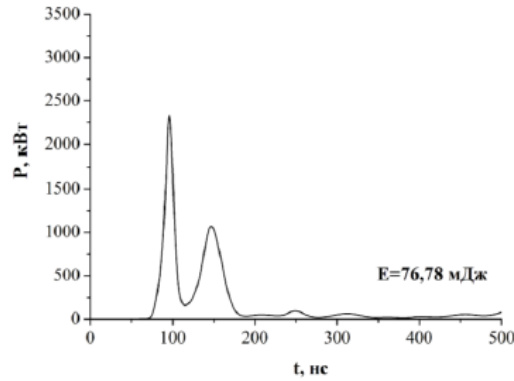


Рис.2. Імпульсна потужність перенапруженого наносекундного розряду в повітрі при тиску $p = 101$ кПа і $f = 1000$ Гц.

На рис.3 наведено спектр випромінювання розряду в УФ-області довжин хвиль, де і була зосереджена основна потужність випромінювання плазми розряду.

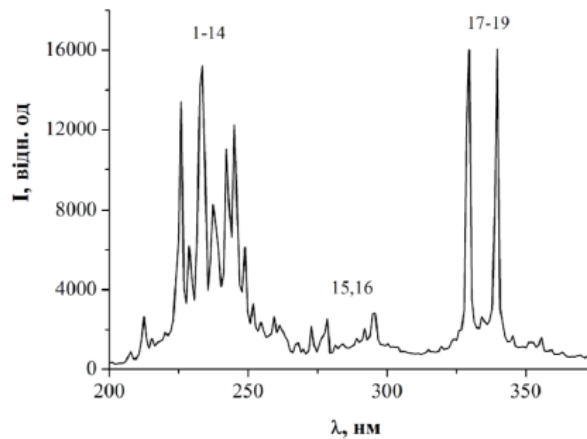


Рис. 3. Спектр випромінювання перенапруженого наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску.

Плазма, що досліджувалась, інтенсивно випромінювала в спектральному діапазоні 200-350 нм. Основними джерелами випромінювання в короткохвильовому спектральному діапазоні 200-350 нм були однозарядні іони срібла (спектральні лінії 1-16; рис.3) та атоми срібла (лінії 17-19; рис.3). Наявність інтенсивного УФ-випромінювання плазми розряду в парах сполуки Ag_2S перспективна для синтезу тонких суперіонних плівок при автоматичному асистуванні УФ-випромінюванням, які можуть мати ряд переваг у характеристиках (менший опір, тощо). В потужних імпульсних розрядах

атмосферного тиску з густиною електронів на рівні 10^{15} - 10^{17} cm^{-3} утворення збуджених іонів металів відбувається переважно у процесах збудження однозарядного іона металу, який знаходиться в основному енергетичному стані, електронами [5,6], в тому числі і «електронами -втікачами», які можуть бути наявні в плазмі [7,8].

Раманівський спектр розсіювання світла плівкою, синтезованою з продуктів деструкції електродів перенапруженого наносекундного розряду між електродами з суперіонного провідника, при атмосферному тиску повітря наведено на рис.4.

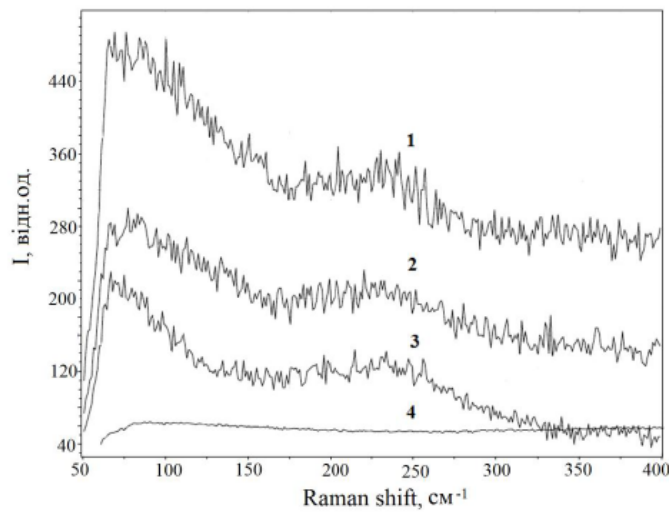


Рис.4. Раманівські спектри випромінювання: 1, 3 – Раманівські спектри, отримані з різних ділянок синтезованої тонкої плівки на основі суперіонного провідника Ag_2S , 2 – Раманівський спектр масивного полікристалічного зразка зі сполуки Ag_2S , з якої виготовлені електроди, 4 – Раманівський спектр скляної підкладки.

З цього рисунку випливає, що спектри комбінаційного розсіювання тонкою плівкою ідентичні спектрам вихідного матеріалу, з якого виготовлені електроди. Таким чином, синтезована тонка плівка повинна характеризуватися властивостями суперіонного провідника.

Одержанні з використання оптичного мікроскопа світлинні поверхні тонких плівок на основі сполуки Ag_2S показали, що їх поверхня досить однорідна. На ній спостерігались лише окремі неоднорідності з розмірами порядку декілька мікрометрів, які можуть бути зумовлені руйнуванням полікристалічних електродів у перенапруженому наносекундному розряді.

Для покращення однорідності синтезованих плівок і зменшення часу їх синтезу необхідно зменшення енергії в електричному імпульсі, яке може бути

досягнуто зменшення тривалості енергетичного внеску в плазму, збільшення частоти слідування імпульсів, а також переходом до використання інших буферних газів при менших тисках, ніж повітря атмосферного тиску.

Таким чином, дослідження синтезу тонких плівок суперіонного провідника (Ag_2S) з продуктів деструкції електродів перенапруженого наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску виявило наступне:

– при віддалі між електродами 2 мм запалювався просторово-однорідний розряд, форма якого визначалась енергетичним внеском у плазму і частотою повторення імпульсів, що імовірно зумовлено утворенням у розряді «електронів-втікачів» і супутнього рентгенівського випромінювання, які виконували роль автоматичної системи передіонізації розрядного проміжку;

– величина імпульсної електричної потужності розряду досягала 3 МВт при енергії в окремому імпульсі – 77 мДж;

– у спектрі випромінювання плазми розряду переважало випромінювання однозарядних іонів срібла в спектральному діапазоні 200-300 нм і атомів срібла в спектральному інтервалі 300-340 нм, що перспективно для розробки точкової УФ-лампи на парах сполуки Ag_2S для застосувань у нанотехнологіях, медицині та біології;

– дослідження спектрів Раманівського розсіювання світла тонкими плівками, синтезованими в експерименті, показало, що вони ідентичні до відповідних спектрів для макроскопічних полікристалічних зразків, з яких виготовлені електроди; дослідження поверхні синтезованих плівок за допомогою оптичного мікроскопа виявило досить високу їх однорідність.

- [1] O. K. Shuaibov, O. Y. Minya, A. O. Malinina, O. M. Malinin, I. V. Shevera, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii* 19, 1 (2021).
- [2] A. K. Shuaibov, A. O. Malinina, *Progress in Physics of Metals* 22, 3 (2021).
- [3] O.K. Шуайбов, Р.В. Грицак, Р. П. Романець, Емісійні характеристики плазми наносекундного розряду в повітрі між електродами з суперіонного провідника (Ag_2S). *Modern challenges to science and practice: Abstracts of III International Scientific and Practical Conference*. Varna, Bulgaria. 483 (2022).
- [4] G. A. Mesyats, *Usp. Fizich. Nauk* 165, 6 (1995).
- [5] D. Levko, L. L. Raja, *Physics of Plasmas* 22 (2016).
- [6] A.N. Gomoni, *Journal of Applied Spectroscopy* 82, 1 (2015).
- [7] V. F. Tarasenko, *Runaway electrons preionized diffuse discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc., 2014).
- [8] D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, *Journal of Physics: Conference Series* 1393 (2019).