

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Грицак Роксолани Володимирівни**

**«Характеристики і параметри плазми в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону»** представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

Останнім часом джерела потужного ультрафіолетового і вакуумно-ультрафіолетового (УФ і ВУФ) випромінювання знаходять широке застосування в різних областях науки і техніки. Найбільш перспективними робочими середовищами таких випромінювачів виявились газові суміші інертних газів з галогенвмісними молекулами та молекулами води, що збуджувались різними типами розрядів. Дослідження екологічно безпечних, безртутних робочих середовищ на основі гідроксилу ОН викликає особливий інтерес. Плазма за участю парів води, яка утворюється за допомогою різного типу електричних розрядів, є перспективним, екологічно чистим і недорогим робочим середовищем для ламп, які випромінюють в спектральному діапазоні 130-325 нм.

Для забезпечення більшого терміну служби і стабільності спектрально-енергетичних характеристик газорозрядних випромінювачів широке поширення набула двобар'ерна конструкція. Наявність двох діелектричних бар'єрів збільшує термін служби і виключає розпорощення електродів в розряді.

Вищевикладене показує актуальність теми дисертаційної роботи Грицак Р.В., яка присвячена дослідженню характеристик, параметрів та фізичних процесів в плазмі імпульсно-періодичних УФ і ВУФ джерел випромінювання на основі емнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів з молекулами води і фреону.

Дисертаційна робота пов'язана з напрямком наукових досліджень Проблемно науково-дослідної лабораторії фізичної електроніки кафедри квантової електроніки ДВНЗ «УжНУ» та з науково-дослідними темами: «Розробка та дослідження екологічно безпечних, газорозрядних ультрафіолетових ламп та дослідження умов синтезу наноструктур у лазерній плазмі» (шифр ДБ-707, 2009-2011 рр., номер державної реєстрації: 0109U000865) та «Фізика плазмових процесів в імпульсних субмікросекундних розрядах на інертних газах, складних галогеноносіях та молекулах води» (шифр ДБ-804, 2012-2014 рр., номер державної реєстрації: 0112U001554).

Результати дисертаційної роботи отримані добре апробованими методами і тому сумнівів в їхній достовірності немає. Такими методами є: спектроскопічний метод дослідження плазми газорозрядних джерел випромінювання з високим просторовим і часовим розділенням; електричний метод вимірювання струму та напруги на електродах з наносекундним часовим розділенням; комп'ютерне моделювання як функцій розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) для використання у розрахунках електронних кінетичних коефіцієнтів (ЕКК), так і плазмової кінетики в розрядах у різних газових сумішах.

Основні результати представлені в 43 наукових працях, з них 21 стаття у фахових наукових журналах, 4 патенти України на винахід і корисну модель, 1 монографія та 17 тез міжнародних наукових конференцій.

Дисертаційна робота Грицак Р.В. являє собою рукопис, який складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 178 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 182 сторінки. Робота містить 88 рисунків та 6 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, визначено завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, відображено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача. Наведено зв'язок дисертаційної роботи з науковими темами. Представлені відомості про апробацію результатів дисертації, публікації та описано структуру роботи.

У **першому розділі** наведено огляд літератури з результатів дослідження плазми електричних розрядів у інертних газах із молекулами води, фреону і хлором ( $Cl_2$ ).

У **другому розділі** представлена експериментальна методика дослідження характеристик випромінювання плазми ємнісного і бар'єрного розрядів в УФ і ВУФ області спектру. Приведено схеми установки, конструкції розрядних трубок для запалювання ємнісного і бар'єрного розрядів, методика вимірювання імпульсів напруги, струму і потужності газового розряду та методика дослідження потужності ВУФ та УФ випромінювання плазми. Також враховано оцінки похибок результатів дослідження.

**Третій розділ** присвячений дослідженню оптичних та електричних характеристик ємнісного та бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів з парами легкої та "важкої" води та результатам розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів газового розряду в сумішах He- $H_2O$ , Ar- $H_2O$ . Встановлено, що заміна легкої води на "важку" приводить до збільшення інтенсивності випромінювання всіх електронно-коливальних смуг в спектрі. Використання пари "важкої" води є в півтора рази більш ефективним, ніж пари легкої води. Встановлено, що для випромінювача в суміші гелію з парами  $D_2O$  оптимальні парціальні тиски гелію складають 1.3 кПа і 5.3 кПа, а оптимальний парціальний тиск пари  $D_2O$  знаходиться в діапазоні 100 - 130 Па. З переходом від суміші на основі пари  $H_2O$  до суміші з  $D_2O$  оптимальний тиск гелію зменшується.

Одержаний спектр випромінювання плазми ємнісного розряду в суміші Ar- $H_2O$  показав, що основне випромінювання плазми сконцентровано у ВУФ, 140-200 нм, діапазоні спектру. Для отримання максимальної інтенсивності смуг в цьому діапазоні оптимальний тиск пари води має знаходитись в межах 0.06 – 0.16 кПа, а оптимальний тиск аргону має бути в діапазоні 0.1 - 0.5 кПа. Встановлено, що максимум інтенсивності випромінювання смуги 308.9 нм радикалу ОН спостерігається при оптимальному тиску аргону в діапазоні 1.33 - 2.6 кПа та тиску пари води 0.13 - 0.20 кПа.

Дуже важливою науковою рисою роботи є проведення теоретичних розрахунків ФРЕЕ та застосування кінетичних рівнянь, що було використано для аналізу впливу різноманітних фізичних процесів на характеристики досліджуваних плазмових середовищ. Для цього розглянута велика кількість

елементарних процесів і реакцій та їх перерізів для сумішей He-H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O і Ar-H<sub>2</sub>O.

Так, проведені автором розрахунки кінетики процесів та вихідних характеристик OH\*-лампи на основі розряду низького тиску встановили, що основним процесом утворення збуджених радикалів OH(A) є процес дисоціативного збудження молекули води електронами. Другим за важливістю є процес збудження радикалів OH з основного стану електронним ударом.

Проведена оптимізація інтенсивності смуг випромінювання бар'єрного розряду в спектральному діапазоні 144 - 160 нм шляхом зміни тисків води та гелію показала, що найбільш інтенсивне випромінювання радикалу OD спостерігається при оптимальних тисках пари "важкої" води 0.06 - 0.2 кПа та гелію 20 - 46.6 кПа. Встановлено, що залежність максимумів інтенсивності випромінювання смуги 309 нм характеризується різними діапазонами парціального тиску пари D<sub>2</sub>O. Вказано процеси та реакції, що відповідають за таку поведінку випромінювання.

Вивчення кінетики утворення радикала OD(A) в плазмі розряду в суміші He-D<sub>2</sub>O показало, що збільшення тиску гелію веде до зменшення густини OD(A). Це обумовлено зменшенням величин електронної температури і швидкостей реакцій. Збільшення парціального тиску пари "важкої" води приводить до збільшення густини OD(A). Внаслідок проведених розрахунків ЕКК електричного розряду в сумішах He-H<sub>2</sub>O та Ar-H<sub>2</sub>O встановлено: плазма на суміші He-H<sub>2</sub>O є електропозитивною, а плазма на суміші Ar-H<sub>2</sub>O електронегативна при E/N < 145 Тд та електропозитивна при E/N > 145 Тд.

**Четвертий розділ** містить результати дослідження емісійних та електричних характеристик наносекундного розряду з двома бар'єрами в сумішах Ar-CCl<sub>4</sub>, Ar-Kr-CCl<sub>4</sub>. Також в даному розділі представлені результати проведених розрахунків ЕКК бар'єрного розряду в цих сумішах. Для цього розглянута велика кількість електронних процесів та їх перерізів для вказаних сумішей.

Проведена автором оптимізація інтенсивності смуг випромінювання 175 нм ArCl (B → X), 258 нм Cl<sub>2</sub> (D'-A') від парціального тиску пари CCl<sub>4</sub> при p(Ar) = 24 кПа показала, що для отримання максимальної інтенсивності цих смуг тиск пари CCl<sub>4</sub> повинен знаходитися у діапазоні 10-20 Па. Встановлено, що збільшення парціального тиску аргону в бар'єрному розряді з 10 до 50 кПа приводить до зменшення інтенсивності випромінювання смуги 175 нм на три порядки, а смуги 258 нм тільки в три рази.

В результаті досліджень встановлено, що найбільша середня потужність випромінювання досягається при роботі в частотному режимі 400-1000 Гц, а ресурс випромінювання смуг ArCl (B → X) та Cl<sub>2</sub>(D' - A') становить  $p > (2.5 - 5) \cdot 10^5$  імпульсів.

Розрахунки кінетики утворення збуджених молекул ArCl\* і Cl<sub>2</sub>(D') в бар'єрному розряді на суміші Ar-CCl<sub>4</sub> показали добре узгодження з експериментальними спектрами випромінювання. Приведено основні процеси та реакції, які визначають характеристики плазми бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl<sub>4</sub>.

В дисертаційній роботі вперше встановлено емісійні та електричні характеристики плазми бар'єрного розряду на суміші Ar-Kr-CCl<sub>4</sub>. Оптимізація залежностей потужності випромінювання від тиску аргону показала, що потужність випромінювання такої потрібної суміші у два рази більша від більш простої суміші Ar-CCl<sub>4</sub>. Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання ексиплексних смуг в бар'єрному розряді є реакція заміщення атомів аргону атомами криптону при утворенні відповідних хлоридів.

Проведене моделювання параметрів плазми та розрахунки ЕКК для електричного розряду в сумішах Ar-CCl<sub>4</sub>, Kr-Ar-CCl<sub>4</sub>. Вони показали, що плазма на суміші Ar-CCl<sub>4</sub> є електронегативною, плазма на суміші Ar-Kr-CCl<sub>4</sub> є електропозитивною при значеннях величини приведенної напруженості електричного поля  $E/N < 80$  Тд та електронегативною при  $E/N > 80$  Тд.

У висновках автор підсумовує основні результати дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи мають наукову новизну і науково цінні. Наукова новизна результатів дослідження дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Дослідження характеристик і параметрів імпульсно-періодичного наносекундного ємнісного розряду в суміші He-H<sub>2</sub>O (D<sub>2</sub>O) дозволили вперше встановити, що перехід від легкої до "важкої" води приводить до зростання інтенсивності смуг гідроксилу у півтора рази.

2. Встановлені оптимальні умови отримання ВУФ випромінювання радикала OH (OD) для сумішей Ar - H<sub>2</sub>O (D<sub>2</sub>O) наносекундного ємнісного розряду – менший парціальний тиск аргону приводить до вищої інтенсивності випромінювання у ВУФ діапазоні спектру.

3. Виявлено, що інтенсивне випромінювання смуг  $A \rightarrow X$ ,  $C \rightarrow X$  радикала OD у бар'єрному розряді наносекундної тривалості спостерігається: в суміші He-D<sub>2</sub>O при оптимальних тисках гелію 10 - 60 кПа та пари "важкої" води 0.04 - 0.33 кПа; в суміші Ar-D<sub>2</sub>O при оптимальних тисках – аргону 10 - 20 кПа та пари "важкої" води 150 - 250 Па.

4. Вперше запропоновано спрощену кінетичну модель процесів, які протікають у плазмі наносекундного бар'єрного розряду в суміші Ar-CCl<sub>4</sub> та проведено моделювання кінетики утворення збудженого радикала OD(A) в плазмі такого розряду у суміші He-D<sub>2</sub>O.

5. Показано, що оптимізація залежності потужності випромінювання плазми бар'єрного розряду від парціального тиску аргону приводить до більшої, у два рази, інтенсивності випромінювання складної суміші Ar-Kr-CCl<sub>4</sub> ніж у випадку простої суміші Ar-CCl<sub>4</sub>.

Результати, приведені в дисертаційній роботі Грицак Р.В., містять важливе перспективне практичне значення. Внаслідок проведених досліджень ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах He(Ar)-H<sub>2</sub>O(D<sub>2</sub>O), Ar-CCl<sub>4</sub> та Kr-Ar-CCl<sub>4</sub> можуть бути розроблені лампи для застосування в біології та медицині. Отже, зроблені автором висновки разом з приведеними в дисертації результатами підтверджують наукову та практичну цінність роботи, а також її новизну.

Загалом дисертаційна робота Грицак Р.В. є завершеним науковим дослідженням, яка містить важливі результати, наукову новизну. Автореферат

розкриває основні результати і положення, що захищаються та вірно відображає зміст дисертаційної роботи.

До дисертаційної роботи Грицак Р.В. слід зробити, на мою думку, наступні зауваження і побажання:

- доцільно було б у розділі 2 навести, як використану теоретичну методичку, рівняння Больцмана з відповідними поясненнями застосованих наближень та моделей;
- формули для електронних кінетичних коефіцієнтів можна було б навести у розділі 2, як важливі досліджувані характеристики;
- добре було б порівняти розраховану функцію розподілу електронів за енергіями з максвелівською, це дало б більшої методичної повноти розрахункам та показало б суттєву нерівноважність досліджуваної плазми;
- деякі процеси та реакції у таблицях написано не повністю;
- у тексті дисертації зустрічаються сленгові наукові вирази.

Як бачимо, ці зауваження та побажання носять, в основному, методичний характер та не ставлять під сумнів цінність, новизну і правильність результатів дисертаційної роботи та не впливають на хороше враження від неї.

Вважаю, що дисертаційна робота Грицак Р. В. на тему «Характеристики і параметри плазми в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону» за значенням і новизною отриманих наукових результатів в повній мірі відповідає вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а її авторка Грицак Роксолана Володимирівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент,  
старший науковий співробітник відділу  
електронних процесів і елементарних взаємодій  
Інституту електронної фізики НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник



Є.Ю. Ремета

Підпис Ремети Є.Ю. засвідчую

Вчений секретар ІЕФ НАН України,  
кандидат хімічних наук



Л.Г. Романова