

## ВІДЗИВ

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

Дисертаційна робота Грицак Роксолани Володимирівни присвячена встановленню характеристик та закономірностей фізичних процесів, які протікають в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону.

Перспективність досліджень в даному напрямку пов'язана із розробкою багатосмугових джерел ВУФ і УФ випромінювання з недорогими і екологічно чистими газами для застосування у фотомедицині і фотобіології, випромінювання яких зосереджено головним чином в смугах  $\text{OH(OD)}$  ( $\text{A} \rightarrow \text{X}$ ) з максимумом при  $\lambda = 308$  нм і ( $\text{C} \rightarrow \text{X}$ ) –  $\lambda = 144$  нм та на системі дискретних смуг хлоридів аргону і криптону, а також молекули хлору в спектральному діапазоні  $\Delta\lambda = 170 - 260$  нм.

У доступній для аналізу літературі відсутні результати дослідження випромінювання газорозрядною плазмою з водяною парою смуг гідроксилу  $\text{OH}$  в ВУФ діапазоні спектру, де можливий прояв випромінювання радикалів  $\text{OH}$  і  $\text{OD}$ . Також не вивчено порівняльні емісійні характеристики ємнісного і бар'єрного розрядів на сумішах інертних газів з парами звичайної і «важкої» води та з молекулою фреону-10 ( $\text{CCl}_4$ ).

Враховуючи все вищесказане, актуальність теми дисертаційної роботи не викликає ніяких сумнівів.

Структурно дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та одного додатку.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено наукову новизну, практичне значення роботи та одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувачки, представлені відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

У першому розділі наведено огляд літератури з питань по темі дисертації, у якому відображено сучасний стан досліджень плазми електричних розрядів (тліючого, багатоелектродного коронного, поперечного високочастотного, імпульсного) в інертних газах із молекулами води, фреону та хлором ( $\text{Cl}_2$ ). Особливу увагу приділено дослідженням випромінювання „безелектродних” розрядів з діелектричними бар'єрами: ємнісному та бар'єрному. Саме ці розряди в бінарних газових сумішах  $\text{Ar-Cl}_2$ ,  $\text{Kr-Cl}_2$ ,  $\text{He/CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Kr-SF}_6$ ,  $\text{Kr-CCl}_4$  та в багатокомпонентних сумішах  $\text{Ar-Kr-Cl}_2$ ,  $\text{He-}$

Kr(Xe)-CCl<sub>4</sub>, Ar-Kr-Xe-Cl<sub>2</sub> використовуються для збудження ексиламп сьогодні.

У другому розділі описано будову використаних при проведенні досліджень експериментальних установок та методики дослідження електричних характеристик та випромінювання плазми наносекундних ємнісного і бар'єрного розрядів в УФ і ВУФ області спектру. Приведені схеми експериментальної установки, вакуумно-газозмішувальної системи напуску пари води, рідкого фреону та інертних газів, конструкції розрядних трубок для запалювання ємнісного і бар'єрного розрядів, також методика вимірювання усереднених за часом спектрів випромінювання, абсолютної потужності ВУФ та УФ випромінювання радикалів гідроксилу, хлоридів інертних газів і молекул хлору, а також методика вимірювання імпульсів напруги, струму та потужності газового розряду. Наведено оцінки похибок вимірів при дослідженні ємнісного та бар'єрного розрядів.

У третьому розділі наводяться результати досліджень розділі представлені результати дослідження оптичних та електричних характеристик ємнісного та бар'єрного розрядів в сумішах інертних газів (He, Ar) з парами звичайної і "важкої" води.. Виявлено, що використання «важкої води» є в півтора рази більш ефективним, ніж пари звичайної дистильованої води, для генерації випромінювання смуг (1-0) та (3-3) системи А-Х радикалів OH і OD. Для розуміння кінетики процесів генерації гідроксилу в плазмі суміші He-H<sub>2</sub>O було проведено моделювання параметрів плазми OH\*- лампи поздовжнього розряду низького тиску на суміші He/H<sub>2</sub>O при розрядних струмах 10-50 мА, напрузі 1 кВ, коли концентрація He на порядок величини переважає концентрацію молекули води. В результаті була отримана динаміка концентрацій збуджених компонентів газової суміші і концентрації радикала OH(A) і показано, що основним процесом утворення радикалів OH(A) є процес дисоціативного збудження молекули води електронами ( $e + H_2O \rightarrow H + OH(A) + e$ ), а другим за важливістю є процес збудження радикалів гідроксилу з основного електронно-коливного стану електронним ударом. За малих тисків He збудження знімається при зіткненнях з молекулами води, а при збільшенні тиску гелію спонтанним випромінювання.

Також в цьому розділі наведені результати як експериментальних досліджень та характеристик УФ і ВУФ джерел випромінювання з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом в сумішах гелію, аргону з парами «важкої» води, так і чисельного моделювання параметрів плазми ємнісного розряду в сумішах інертних газів з молекулою води (H<sub>2</sub>O) в діапазоні  $E/N = 1 - 300$  Тд при ступені іонізації  $10^{-7}$ , концентрації електронів  $Ne = 10^{11}$  см<sup>-3</sup> і температурі газу – 300 К ( $U=30$  кВ,  $d=20$  см,  $p(Ar(He)) = 2.6$  кПа ).

Виміряні спектри випромінювання газорозрядної плазми бар'єрного розряду на сумішах He-D<sub>2</sub>O, Ar-D<sub>2</sub>O містили головним чином смуги  $C \rightarrow X$  та  $A \rightarrow X$  гідроксилу OD ( $\Delta\lambda = 140 - 315$  нм). Залежності інтенсивності випромінювання плазми бар'єрного розряду на суміші He-D<sub>2</sub>O в спектральному діапазоні  $\lambda = 144 - 160$  нм від парціального тиску як He, так і пари «важкої» води мають немонотонний характер.

Збільшення тиску гелію в бар'єрному розряді, в порівнянні з ємнісним розрядом, приводило до швидкої коливальної релаксації радикалів гідроксилу в нижній коливальний  $C^2X^+$ -стан, який розпадався з випромінюванням вузької смуги з максимумом при  $\lambda = 144$  нм під час переходу радикалу гідроксилу на його вище розміщені коливальні рівні  $X^2\Pi$ -стан.

Встановлено, що залежність інтенсивності випромінювання смуги 309 нм характеризувалася різними діапазонами парціального тиску пари D<sub>2</sub>O. При найбільш низькому тиску пари D<sub>2</sub>O (1 – 100 Па) утворення радикалів OD(A, X) може відбуватися в результаті процесу дисоціативного збудження молекул D<sub>2</sub>O електронним ударом. При підвищенні тиску пари D<sub>2</sub>O до 150 - 200 Па в гелієвій суміші можливим стає збудження радикалів гідроксилу OD(X) електронним ударом з утворенням OD(A). При  $p(D_2O) = 150$  Па інтенсивність смуги OD ( $A \rightarrow X$ ) різко зменшується, ймовірно, із-за гасіння радикалів OD(A) молекулами D<sub>2</sub>O.

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень емісійних та електричних характеристик наносекундного розряду з двома бар'єрами на сумішах Ar-CCl<sub>4</sub>, Ar - Kr - CCl<sub>4</sub> та результатам проведених розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl<sub>4</sub>, Kr-Ar-CCl<sub>4</sub>.

В спектрах випромінювання бар'єрного розряду на суміші Ar - CCl<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O спостерігалися смуги ArCl\*, Cl<sub>2</sub>\*, OH\* у спектральному діапазоні 140 - 350 нм. Виявлено, що залежності інтенсивності випромінювання смуг з максимумами при  $\lambda=175$  нм ArCl ( $B \rightarrow X$ ) (а) і при  $\lambda=309$  нм OH ( $A \rightarrow X$ ) парціального тиску CCl<sub>4</sub> при  $p(Ar) = 24$  кПа мають немонотонний характер, а смуга з максимумом при  $\lambda=258$  нм Cl<sub>2</sub> ( $D'-A'$ ) монотонно зростає майже за лінійним законом. Збільшення парціального тиску аргону в бар'єрному розряді з 10 до 50 кПа приводило до зменшення інтенсивності випромінювання смуги з  $\lambda \approx 175$  нм на три порядки, а смуги з  $\lambda \approx 258$  нм тільки в три рази. Оптимальне значення тиску аргону для утворення радикала OH складало 5 - 10 кПа. Найбільша середня потужність випромінювання досягалась при роботі в частотному режимі 400-1000 Гц, що аавтор пов'язує з розпадом молекул CCl<sub>4</sub> в розряді при великій частоті повторення імпульсів накачування. Ресурс випромінювання смуг ArCl ( $B \rightarrow X$ ) та Cl<sub>2</sub>( $D' - A'$ ) становив  $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$  імпульсів

Розрахунки кінетики в бар'єрному розряді на суміші Ar-CCl<sub>4</sub> показали добре узгодження з експериментом по співвідношенню інтенсивностей смуг

ArCl ( $B \rightarrow X$ ) та Cl<sub>2</sub>( $D' - A'$ ).

В підрозділі присвяченому випромінювальним характеристикам імпульсно-періодичного бар'єрного розряду в потрійній суміші криптону аргону та пари фреону наведені спектри випромінювання наносекундного розряду з двома бар'єрами в суміші Kr - Ar - CCl<sub>4</sub>, залежності інтенсивності спектральних смуг ArCl ( $B \rightarrow X$ ), KrCl ( $D \rightarrow X$ ), KrCl ( $B \rightarrow X$ ) і Cl<sub>2</sub> ( $D' \rightarrow A'$ ) і середньої потужності випромінювання від тиску інертних газів (криптону, аргону) та осцилограми напруги, струму і потужності випромінювання, що вносились в розряд.

В спектрах спостерігалися смуги з  $\lambda = 175$  нм ArCl ( $B \rightarrow X$ ), 199 нм KrCl ( $D \rightarrow X$ ), 222 нм KrCl ( $B \rightarrow X$ ) і 258 нм Cl<sub>2</sub> ( $D' \rightarrow A'$ ). Найбільш чутливим розподіл інтенсивності в спектрі був до парціального тиску криптону, оскільки у атома криптону найменша енергія нижніх метастабільних рівнів. В той же час, введення криптону в подвійну суміш ( $p(\text{Kr}) = 1.3$  кПа) не приводило до сильного спаду і зростання сумарної інтенсивності УФ-ВУФ випромінювання молекулярних смуг, а тільки до перерозподілу їх інтенсивності між собою.

Основним процесом, що забезпечував перерозподіл інтенсивності випромінювання ексиплексних смуг в бар'єрному розряді, на думку дисертанта, є реакція заміщення атомів аргону атомами криптону при утворенні відповідних хлоридів:  $\text{ArCl}(B) + \text{Kr} \rightarrow \text{KrCl}(B) + \text{Ar}$ .

Розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів для сумішей Ar-CCl<sub>4</sub> та Ar-Kr-CCl<sub>4</sub> показали, що найбільшими були константи швидкості утворення від'ємного іона Cl<sup>-</sup>, константи швидкості процесів пружного розсіювання електронів на атомі Ar, на молекулі CCl<sub>4</sub>, процесів утворення додатніх іонів Ar<sup>+</sup>, Kr<sup>+</sup>, CCl<sub>4</sub><sup>+</sup>, CCl<sub>3</sub><sup>+</sup>; найменшими – швидкості утворення від'ємного іону Cl<sup>-2</sup>. Оскільки сума констант швидкостей утворення від'ємних іонів переважає суму констант швидкостей утворення додатніх іонів, то плазма в розряді на суміші Ar-CCl<sub>4</sub> є електровід'ємною. При значеннях параметру  $E/N < 80$  Тд плазма в розряді на суміші Ar-Kr-CCl<sub>4</sub> є електрододатньою, а при  $E/N > 80$  Тд – електровід'ємною.

У висновках чітко сформульовано головні результати дисертаційної роботи. Вони впливають з результатів експериментальних досліджень із залученням сучасних методів оптичної емісійної спектроскопії та спектрофотометрії і результатів моделювання кінетики. а отже, їх можна вважати достовірними і в достатній мірі аргументованими.

Новизна основних положень дисертаційної роботи полягає в тому, що в ній:

1. Вперше встановлено для імпульсно-періодичного наносекундного ємнісного розряду на сумішах He-H<sub>2</sub>O (D<sub>2</sub>O), що перехід від звичайної до важкої води призводить до зростання інтенсивності смуг гідроксиду у півтора раза.



2. Вперше отримано інтенсивне ВУФ випромінювання смуги OD ( $C \rightarrow X$ ) в діапазоні спектру  $\Delta\lambda = 144-160$  нм в бар'єрному розряді на суміші He-D<sub>2</sub>O і Ar-D<sub>2</sub>O.
3. Вперше отримані результати дослідження просторових електричних та оптичних характеристик випромінювання експлексних молекул та молекул хлору для сумішей Ar-Kr-CCl<sub>4</sub> в наносекундному бар'єрному розряді.
4. Вперше запропонована фізика процесів в плазмі бар'єрного розряду на суміші Ar-CCl<sub>4</sub>.

Матеріали дисертації з достатньою повнотою опубліковані у 21 статті, 4 патентах України на винахід та корисну модель, 1 монографії зазначених в дисертації. Науковці, що працюють у цій галузі досить в повній мірі могли ознайомитися з ними з 17-и доповідей на відповідних міжнародних та вітчизняних наукових конференціях.

В авторефераті повністю розкрито основні результати й положення, що виносяться на захист, та вірно відображено зміст дисертаційної роботи.

Разом із цікавими фізичними результатами робота має і деякі недоліки, а саме:

1. По оформленню: В дисертації вжито декілька неправильних термінів: замість „час розпаду плазми” – „термін служби плазми”; замість фреон-10 до речовини CCl<sub>4</sub> застосовано назву фреон CCl<sub>4</sub>, хоча фреонами називають фторвмісні вуглеводні, в які крім атомів фтору можуть входити атоми хлору та бром; в ряді слів є неправильні закінчення.
2. Дуже стисло описана основна експериментальна методика, а саме спектрометрична. На загальній схемі експериментальної установки є помилки.
3. Відсутнє чітке пояснення експериментально виявлених особливостей плазми наносекундного бар'єрного розряду в суміші аргону з парами «важкої» води: більшій ефективності утворення радикалу OD в станах з меншим часом життя (С. 82).
4. Детальний опис впливу іонізації Пеннінга на утворення OH(A) відсутній (С. 67).
5. В дисертації наведені спектри випромінювання, в яких співвідношення між інтенсивностями слабких смуг OH(A-X) (2-1) та (3-2) на Рис. 3.1 та 3.2 при відсутності Cl принципово відрізняються від співвідношень як відомих ([117] в списку використаних джерел), так і в наведених на Рис. 4.1 та 4.5 спектрах для випадку потрібної суміші Ar - CCl<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O. На жаль, дисертант не взяв це до уваги.

Зроблені зауваження не ставлять під сумнів правильність, цінність та новизну основних положень та висновків дисертаційної роботи.

Аналіз виконаної Грицак Р. В. дисертаційної роботи вказує, що вона є самостійним завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові актуальні, оригінальні та ретельно обґрунтовані експериментальні дані в області фізичної електроніки.

Вважаю, що дисертаційна робота Грицак Роксолани Володимирівни "Характеристики і параметри плазми в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону" повністю відповідає вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року, які висуваються до кандидатських дисертацій, а її авторка - безперечно заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка.

Офіційний опонент,  
професор кафедри фізичної електроніки  
факультету радіофізики, електроніки  
та комп'ютерних систем  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
доктор фізико-математичних наук, професор



В.Я.Черняк

Підпис офіційного опонента Черняка В.Я. засвідчую

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР НДЧ  
КАРСУЛЬНА Н.В.  
30.11.2018р.

