

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Грицак Роксолана Володимирівна

УДК 537.52;621.387

**ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ В ГАЗОРОЗРЯДНИХ
КОРОТКОХВИЛЬОВИХ ВИПРОМІНЮВАЧАХ НА ОСНОВІ МОЛЕКУЛ
ВОДИ ТА ФРЕОНУ**

01.04.04 - фізична електроніка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Ужгород – 2018

Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі квантової електроніки і в Проблемній науково-дослідній лабораторії фізичної електроніки в ДВНЗ "Ужгородський національний університет" Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри квантової електроніки

Шуаїбов Олександр Камілович

ДВНЗ „Ужгородський національний університет”

МОН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор

Черняк Валерій Якович,

професор кафедри фізичної електроніки

факультету радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник

Ремета Євген Юрійович,

старший науковий співробітник відділу електронних процесів та
елементарних взаємодій,

Інститут електронної фізики НАН України

Захист дисертації відбудеться 14 грудня 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д.61.051.01 при Ужгородському національному університеті за адресою: 88000, м. Ужгород, вул. Волошина, 54, ауд. 181.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Ужгородського національного університету (м. Ужгород, вул. Університетська, 14).

Автореферат розісланий 07 листопада 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
доктор фіз.-мат. наук, проф.



Грабар О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Застосування ультрафіолетових і вакуумно-ультрафіолетових (УФ і ВУФ) ламп у фотохімії, біофізиці, медицині, мікро-наноелектроніці та інших галузях науки і техніки [1*] стимулювали дослідження фізичних процесів у плазмі відповідних джерел випромінювання та проведення експериментальних і теоретичних досліджень з пошуку оптимального складу робочих газових сумішей екологічно безпечних, безртутних ламп, які випромінюють в спектральному діапазоні 120-360 нм [2*]. Найбільш перспективними робочими середовищами таких випромінювачів виявились газові суміші інертних газів з галогенвмісними молекулами та молекулами води, що збуджувались різними типами тліючих та імпульсних розрядів. Застосування потужних об'ємних розрядів хоча і дозволяло одержувати енергію імпульса випромінювання до 1 Дж [3*], але ресурс роботи цих ламп був низьким, як і в лампах низького тиску із збудженням поздовжнім тліючим розрядом [4*]. Це призвело до розробок та оптимізації різних типів УФ і ВУФ ламп, у яких металеві електроди лампи відокремлені діелектриком від її хімічно активного робочого середовища, що сприяє зростанню ресурсу роботи лампи. Перехід від бар'єрних розрядів змінного струму і мікросекундних бар'єрних розрядів до збудження таких розрядів імпульсами напруги тривалістю 50-150 нс дозволяє збільшити енергію імпульса УФ і ВУФ випромінювання і працювати при невеликих частотах слідування без використання водяного охолодження корпусу лампи.

Раніше вже були проведені систематичні дослідження оптичних характеристик широкосмугових УФ і ВУФ ламп неперервного тліючого розряду низького тиску на переходах радикалів гідроксилу, що випромінювали в спектральному діапазоні 140-310 нм. Але подібні дослідження для сумішей інертних газів з парами води, в тому числі і "важкої" води (D_2O), що збуджувалися б у ємнісному і бар'єрному розрядах наносекундної тривалості, були відсутні.

Систематичне комп'ютерне моделювання функцій розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) і електронних кінетичних коефіцієнтів (ЕКК) у плазмі парів води та кінетики процесів проводилось переважно для парів води [5*], а вплив буферного газу гелію (He) на кінетику процесів та на ЕКК в плазмі низького і підвищеного тиску (суміші He- H_2O) є мало вивченим.

Таким чином, актуальність даної дисертаційної роботи зумовлена перспективністю експериментального і теоретичного дослідження параметрів плазми розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів з парами води і галогенвмісного газу, особливо для ВУФ-області довжин хвиль, де існує невеликий вибір доступних і ефективних джерел випромінювання. Особливістю роботи є використання екологічно безпечних сполук типу парів води і фреону та поєднання експериментальних досліджень характеристик плазми з комп'ютерним моделюванням параметрів плазми газорозрядних випромінювачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Результати даної дисертаційної роботи отримані в Проблемній науково-дослідній лабораторії фізичної електроніки кафедри квантової електроніки ДВНЗ «УжНУ» в межах наукової теми ДБ-707 «Розробка та дослідження екологічно безпечних, газорозрядних ультрафіолетових ламп та дослідження умов синтезу наноструктур у лазерній плазмі» - 2009-2011 рр., номер державної реєстрації: 0109U000865 та ДБ-804 «Фізика плазмових процесів в імпульсних субмікросекундних розрядах на інертних газах, складних галогеноносіях та молекулах води» - 2012-2014 рр., номер державної реєстрації: 0112U001554.

Мета і завдання дослідження.

1. Дослідження емісійних та електричних характеристик плазми газорозрядних випромінювачів у сумішах інертних газів з молекулами води та фреону.

2. Розробка екологічно безпечних УФ і ВУФ джерел випромінювання із збудженням імпульсно-періодичним ємнісним та бар'єрним розрядами тривалістю 50-150 нс та їх оптимізація за складом і тиском.

3. Встановлення фізичних процесів, що відбуваються в ємнісному та бар'єрному розрядах, від яких залежать вихідні характеристики ламп.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні **завдання**:

- розробити експериментальну установку для діагностики плазми ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості;
- дослідити емісійні та електричні характеристики плазми ємнісного та бар'єрного розрядів у сумішах інертних газів з молекулами води та фреону;
- оптимізувати вихідні характеристики цих розрядів у залежності від тиску, складу робочих газових сумішей та параметрів системи збудження розрядів;
- встановити фізичні процеси, що відбуваються у плазмі газового розряду в сумішах інертних газів з молекулами води та фреону.

Об'єкт дослідження: плазма ємнісного та бар'єрного розрядів наносекундної тривалості УФ і ВУФ ламп у сумішах інертних газів з молекулами води та фреону.

Предмет дослідження: характеристики, параметри та фізичні процеси в плазмі імпульсно-періодичних УФ і ВУФ джерел випромінювання на основі ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів з молекулами води і фреону.

Методи дослідження: 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 ФРЕЕ і ЕКК, а також плазмової кінетики в розрядах на основі різних газових сумішах.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше для плазми наносекундного ємнісного розряду в суміші $\text{He-H}_2\text{O}(\text{D}_2\text{O})$ виявлено і оптимізовано два режими роботи OH^* - лампи, зокрема оптимальний тиск пари звичайної води становить 130-150 Па, оптимальні тиски гелію складають 2.6 кПа та 7.5 кПа. Встановлено, що перехід від звичайної до "важкої" води приводить до зростання інтенсивності смуг гідроксилу у півтора

рази. Незалежно від співвідношення між парціальними тисками гелію та пари води основним процесом утворення радикалів $\text{OH}(\text{A})$ є процес дисоціативного збудження молекули води електронами, а другим за важливістю є процес збудження радикалів гідроксилу з основного електронно-коливного стану електронним ударом.

2. Встановлено оптимальні умови отримання ВУФ випромінювання радикала $\text{OH}(\text{OD})$ для суміші $\text{Ar} - \text{H}_2\text{O} (\text{D}_2\text{O})$ наносекундного ємнісного розряду. Чим менший парціальний тиск аргону, тим вищою є інтенсивність випромінювання гідроксилу у ВУФ діапазоні спектру, що може бути зумовлено низькою ефективністю процесу передачі енергії від метастабільних атомів аргону молекулам води.

3. Виявлено, що для бар'єрного розряду наносекундної тривалості в суміші $\text{He}-\text{D}_2\text{O}$ інтенсивне випромінювання смуг $\text{A} \rightarrow \text{X}$, $\text{C} \rightarrow \text{X}$ радикала OD спостерігається при оптимальному тиску гелію 10 - 60 кПа та пари "важкої" води – 0.04 - 0.33 кПа; в суміші $\text{Ar}-\text{D}_2\text{O}$ – при оптимальному тиску аргону 10 - 20 кПа та оптимальному тиску пари "важкої" води – 150 - 250 Па. Збільшення тиску гелію у бар'єрному розряді приводить до швидкої коливальної релаксації гідроксилу в нижній С-стан.

4. Проведено моделювання кінетики утворення радикала $\text{OD}(\text{A})$ в плазмі наносекундного бар'єрного розряду в суміші $\text{He}-\text{D}_2\text{O}$, яке показало, що збільшення тиску гелію веде до зменшення густини $\text{OD}(\text{A})$, що обумовлено зменшенням електронної температури і швидкостей реакцій. Збільшення парціального тиску пари "важкої" води та напруги живлення приводить до збільшення густини радикалів $\text{OD}(\text{A})$.

5. Показано, що в результаті оптимізації залежності потужності випромінювання плазми бар'єрного розряду від парціального тиску аргону інтенсивність випромінювання суміші $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{CCl}_4$ у два рази більша від суміші $\text{Ar}-\text{CCl}_4$. Вперше запропоновано спрощену кінетичну модель процесів, які протікають в наносекундному бар'єрному розряді в суміші $\text{Ar}-\text{CCl}_4$.

Практичне значення отриманих результатів:

1. На основі проведених досліджень імпульсно-періодичних ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах $\text{He}(\text{Ar})-\text{H}_2\text{O}(\text{D}_2\text{O})$ може бути розроблена лампа з екологічно безпечними газами, випромінювання якої зосереджено головним чином у смугах $\text{OH}(\text{OD}) (\text{A} \rightarrow \text{X})$ з максимумом при 308 нм і $(\text{C} \rightarrow \text{X}) - 144$ нм, для застосування у медицині та біології.

2. Результати дослідження бар'єрного розряду наносекундної тривалості в сумішах $\text{Ar}-\text{CCl}_4$ та $\text{Kr}-\text{Ar}-\text{CCl}_4$ можуть бути використані для розробки багатосмугової ВУФ і УФ лампи, що випромінює на системі дискретних смуг хлоридів аргону і криптону, а також молекули хлору в спектральному діапазоні 170 - 260 нм.

3. Отримані параметри плазми при чисельному моделюванні електричних розрядів у сумішах інертних газів з молекулами води та фреону можуть бути використані при розрахунках кінетики процесів ВУФ і УФ лампи на основі буферного газу – аргону.

Достовірність одержаних результатів підтверджується результатами проведених досліджень, їх відтворюваністю і багатократністю вимірів.

Особистий внесок здобувача. Автор приймала активну участь у розробці конструкцій і виготовленні розрядних кювет для запалювання ємнісного та бар'єрного розрядів наносекундної тривалості, підготовці експериментальних стендів до роботи і проведенню експериментів з дослідження плазми ємнісного і бар'єрного розрядів. Вона самостійно підготувала у вигляді окремих розділів дисертації критичний огляд літературних першоджерел по темі дисертації та методиці і техніці дослідження ємнісного та бар'єрного розрядів наносекундної тривалості.

Експериментальні дослідження проводились спільно з науковими співробітниками Проблемної науково-дослідної лабораторії фізичної електроніки і викладачами кафедри квантової електроніки (Миня О.Й., Гомокі З.Т., Шевера І.В.). Їй належить основна роль в обробці результатів експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів та у формулюванні наукових висновків.

Вона здійснила пошук і відбір ефективних перерізів пружної та непружної взаємодії електронів низьких енергій з молекулами води і фреону, внесення їх у базу даних програми BOLSIG+ та проведення тестових числових розрахунків ФРЕЕ і ЕКК у відомих плазмових середовищах (пари води і фреону). Самостійно провела всі комп'ютерні розрахунки ФРЕЕ, ЕКК, а також обробку і аналіз одержаних результатів. Автор приймала участь у створенні кінетичних моделей процесів у плазмі бар'єрного розряду наносекундної тривалості в сумішах He-H₂O і Ar-CCl₄ та поздовжньому електричному розряді низького тиску в суміші He-H₂O, а також в обробці результатів числового моделювання параметрів плазми.

Дисертантці також належить основна роль у написанні наукових статей, патентів та тез міжнародних конференцій.

Апробація результатів роботи. Основні результати досліджень, що представлені в цій роботі, доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях: Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2009» (Ужгород, Україна, 25-27 травня, 2009 р.); Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011» (Ужгород, Україна, 24-27 травня, 2011 р.); The 10th International conference «Atomic and molecular pulsed lasers» (Tomsk, Russia, 12-16 September, 2011); XIIth International young scientists conference on applied physics (Kyiv, Ukraine, 23-26 May, 2012); 25th Symposium on plasma physics and technology (Prague, Czech Republic, 18-21 June, 2012); Международная молодежная конференция «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия» (Томск, Россия, 17-18 сентября, 2012); Міжнародна конференція «Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії» (Ужгород, Україна, 20-22 вересня, 2012); VIII International conference «Electronics and applied physics» (Kyiv, Ukraine, 24-27 October, 2012); Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013» (Ужгород, Україна, 20-23 травня, 2013); XIIIth International young scientists conference on applied physics (Kyiv, Ukraine, 12-15 June, 2013); XI International conference «Atomic and molecular

pulsed lasers» (Tomsk, Russia, 16-20 September, 2013); IX International conference «Electronics and applied physics» (Kyiv, Ukraine, 23-26 October, 2013); XIIth International young scientists conference on applied physic (Kyiv, Ukraine, 11-14 June, 2014); 26th Symposium on plasma physics and technology (Prague, Czech Republic, 16-19 June, 2014); X International young scientists conference on applied physic (Kyiv, Ukraine, 22-25 October, 2014); Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2015» (Ужгород, Україна, 18-22 травня, 2015); XIII International scientific conference «Electronics and applied physics» (Kyiv, Ukraine, 24-27 October, 2017).

Публікації. За результатами експериментальних і теоретичних досліджень, що представлені в цій роботі, опубліковано 43 наукові праці, з них 21 стаття у фахових наукових журналах, 4 патенти України на винахід і корисну модель, 1 монографія та 17 тез міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 178 найменувань, містить 88 рисунків та 6 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 182 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, сформульовану мету і задачі дисертаційної роботи, наукову новизну, практичне значення та достовірність отриманих результатів. Відзначено особистий внесок здобувача, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Надано інформацію про апробацію результатів роботи і публікації наукових праць. Наведено дані про структуру та обсяг дисертації.

У **першому розділі** приведено короткий огляд експериментальних і теоретичних робіт із дослідження плазми електричних розрядів у інертних газах із молекулами води, фреону і хлором (Cl_2). Випромінювання смуг гідроксилу ОН спостерігалось у тліючому, об'ємному, ємнісному та бар'єрному розрядах, де одним з компонент були пари води. Смути гідроксилу ОН також спостерігалися при дослідженні високовольтного імпульсного розряду в повітряно-крапельному середовищі. Оскільки основна частина випромінювання гідроксилу ОН у досліджуваних газових розрядах знаходилася в діапазоні 305-325 нм, то малодослідженим залишається ВУФ діапазон спектру, де теж можливий прояв випромінювання радикалу ОН.

Випромінювання смуг з максимумами 175 нм ArCl (B-X), 199 нм KrCl (D-X), 222 нм KrCl (B-X), 258 нм Cl_2 (D'-A') спостерігалось при дослідженні бар'єрного, тліючого, багатоелектродного коронного, поперечного високочастотного, та імпульсного розрядів у бінарних газових сумішах Ar-Cl_2 , Kr-Cl_2 , $\text{He/CF}_2\text{Cl}_2$, Kr-SF_6 , Kr-CCl_4 та у багатокомпонентних сумішах Ar-Kr-Cl_2 , He-Kr(Xe)-CCl_4 , Ar-Kr-Xe-Cl_2 . Значно менше уваги приділяється отриманню інтенсивного ВУФ випромінювання на смузі 175 нм ArCl (B→X).

З проведеного аналітичного огляду наукової літератури випливає, що на даний час відсутні порівняльні емісійні характеристики ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів з парами звичайної і "важкої" води та з молекулою тетрахлорметану (CCl_4).

У **другому розділі** представлена методика дослідження електричних характеристик та випромінювання ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в УФ і ВУФ області спектру. Приведено схеми експериментальної установки, вакуумно-газозмішувальної системи напуску пари води, рідкого фреону та інертних газів, конструкція розрядних трубок для запалювання ємнісного і бар'єрного розрядів, методика вимірювання імпульсів напруги, струму та потужності газового розряду та методика дослідження потужності ВУФ та УФ випромінювання плазми. Вакуумно-газозмішувальна система була розроблена таким чином, що дозволяє застосовувати для дослідження суміші в досить широкому діапазоні парціальних тисків і відкачувати розрядні трубки до залишкового тиску 13.33...0.06 Па.

Для дослідження збуджених частинок, які визначають склад випромінювання плазми газового розряду, в роботі використано метод емісійної спектроскопії з високим часовим розділенням. Дослідження спектрів випромінювання плазми ємнісного та бар'єрного розрядів в УФ і ВУФ спектральному діапазоні 130 - 350 нм проводилось за допомогою фотопомножувача ФЭУ-142 з LiF-віконцем і вакуумного монохроматора, який був побудований за схемою Сейя-Наміока. Випромінювання в діапазоні 200 - 400 нм реєструвалось за допомогою монохроматора МДР-2 з дифракційною решіткою 1200 штр./мм і фотопомножувача ФЭУ-106. Спектри в кінцевому вигляді представлені з врахуванням відносної чутливості системи «монохроматор-фотопомножувач».

В **третьому розділі** представлено результати дослідження оптичних та електричних характеристик ємнісного та бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів (He, Ar) з парами звичайної і "важкої" води та результати розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів газового розряду в сумішах He- H_2O , Ar- H_2O [1-14, 22, 26-29, 33, 40-43].

У спектрах випромінювання ємнісного розряду лампи на основі суміші He- H_2O (D_2O) виявлено смуги 181.0, 187.1, 189.1 нм, які належать до електронно-коливальних переходів радикалів OH та OD ($\text{C} \rightarrow \text{A}$) та смуги з максимумом при 310 нм, які корелюють з смугою OH (OD) ($\text{A}^2\Sigma^+ - \text{X}^2\Pi; 0,0$). Спостерігаються також менш інтенсивні смуги з максимумами при 283.7 нм OH(OD) ($\text{A} \rightarrow \text{X}; 1,0$) та 297.6 нм OH (OD) ($\text{A} \rightarrow \text{X}; 3,2$). Як випливає з цих результатів, використання "важкої" води є в півтора рази більш ефективним, ніж парів звичайної дистильованої води. При збільшенні парціального тиску води інтенсивність смуги випромінювання радикала OH зменшується. Встановлено, що для випромінювача в суміші гелію з парами D_2O оптимальні парціальні тиски гелію складають $p_1=1.3$ кПа і $p_2=5.3$ кПа. При цьому, оптимальний парціальний тиск пари D_2O знаходиться в діапазоні 100 - 130 Па. З переходом від суміші на основі пари H_2O до суміші D_2O оптимальний тиск гелію зменшується. Подальше збільшення парціального тиску гелію приводить

до зменшення інтенсивності випромінювання радикалів $\text{OH}^*(\text{OD}^*)$, що може бути зумовлено тим, що молекули води "гасять" радикали $\text{OH}^*(\text{OD}^*)$.

Додаткове дослідження характеристик емнісного розряду наносекундної тривалості в суміші $\text{He} - \text{H}_2\text{O}$ показало, що зменшення тиску гелію з 21.3 кПа до 5 кПа приводить до перерозподілу інтенсивності ВУФ і УФ-випромінювання в спектрі емнісного розряду. При зростанні парціального тиску пари води інтенсивність ВУФ-випромінювання є максимальною для смуг з довжиною хвилі при 184.5-198 нм. Результати оптимізації інтенсивності смуг випромінювання в спектральних діапазонах 176.0 - 183.9 нм і 184.5 - 198.0 нм залежно від парціального тиску гелію при $p(\text{H}_2\text{O}) = 106.6$ Па показали, що оптимальний тиск гелію складає $p(\text{He}) = 1$ і 11 кПа.

Спектри випромінювання плазми імпульсно-періодичного емнісного розряду в сумішах $\text{Ar}-\text{H}_2\text{O}$ (D_2O) за характером є близькими до спектру плазми в суміші $\text{He}-\text{H}_2\text{O}$ і відрізняються, в основному, величиною інтенсивності випромінювання гідроксилу (рис.1, а). В спектрі випромінювання емнісного розряду в суміші $\text{Ar}-\text{H}_2\text{O}$ також спостерігається випромінювання радикала NO γ -системи $A \rightarrow X$ (0;3) переходу.

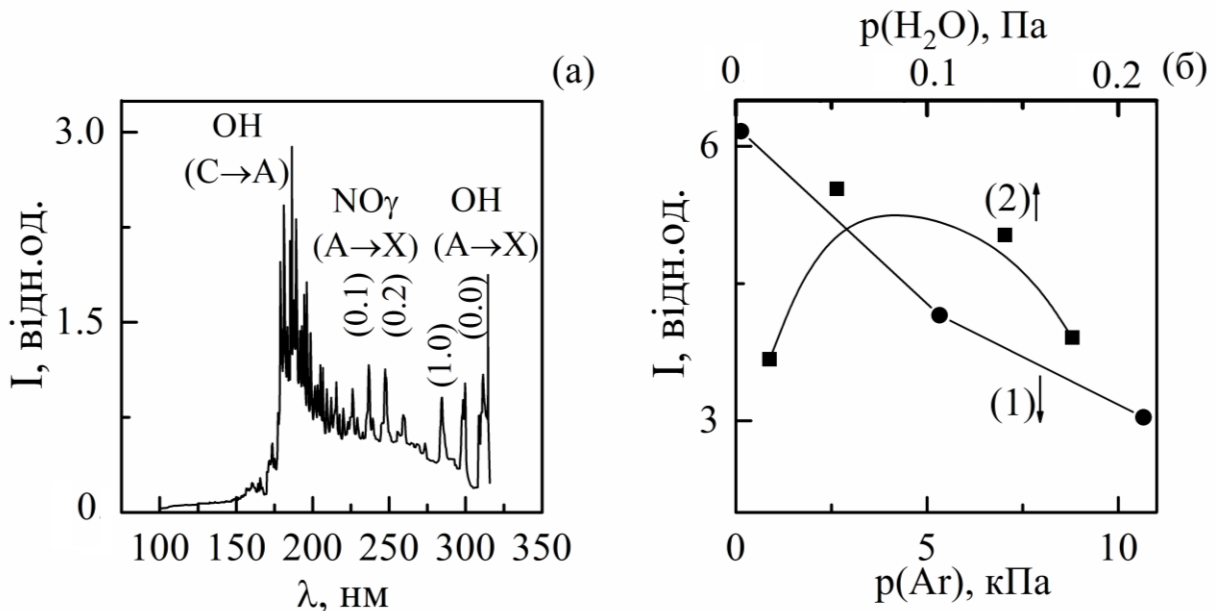


Рис.1. Спектр випромінювання емнісного розряду наносекундної тривалості в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 1.33 - 0.133$ кПа (а); залежність відносної інтенсивності випромінювання характеристичної смуги (150 - 200 нм) газорозрядної плазми в суміші $\text{Ar} - \text{H}_2\text{O}$ від величини парціального тиску аргону при постійному тискові $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13$ кПа (крива 1) та від величини парціального тиску пари води при постійному тискові $p(\text{Ar}) = 2.66$ кПа (крива 2), (б) [6, 22].

Аналіз спектру випромінювання плазми емнісного розряду в суміші $\text{Ar}-\text{H}_2\text{O}$ показав, що основне випромінювання плазми сконцентровано у ВУФ діапазоні спектру 140-200 нм.

Оптимізація інтенсивності випромінювання смуги 308.9 нм показала, що максимум інтенсивності випромінювання радикалу OH спостерігається при

оптимальному тиску пари води $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13 - 0.20$ кПа та тиску аргону в діапазоні 1.33 - 2.6 кПа. Результати оптимізації інтенсивності смуг випромінювання ОН у спектральному діапазоні 150 - 200 нм (рис.1., б) показали, що для отримання максимальної інтенсивності смуг в діапазоні 150-200 нм оптимальний тиск пари води має знаходитись в межах 0.06 – 0.16 кПа, оптимальний тиск аргону має бути в діапазоні 0.1 - 0.5 кПа. Зменшення інтенсивності випромінювання смуги ОН може відбуватися через реакцію "гасіння" радикала ОН(А) та зменшення температури електронів.

Із розрахунків кінетики процесів та вихідних характеристик ОН*-лампи на основі розряду низького тиску слідує, що найбільшою є концентрація He^* . Збільшення парціального тиску гелію при постійній різниці потенціалів між електродами приводить до зменшення кількості електронів в "хвості" ФРЕЕ, що приводить до зменшення середньої енергії і температури електронів. Збільшення парціального тиску парів води – $p(\text{H}_2\text{O})$ приводить до зменшення долі електронів в "хвості" ФРЕЕ, а збільшення величини струму приводить до лінійного збільшення концентрацій всіх компонентів плазми. Це пов'язано з тим, що збільшення струму приводить до лінійного збільшення потужності, яка вноситься в розряд, що приводить до лінійного збільшення густини електронів. Незалежно від співвідношення між парціальними тисками гелію та пари води основним процесом утворення радикалів ОН(А) є процес дисоціативного збудження молекули води електронами, а другим за важливістю є процес збудження радикалів гідроксилу з основного стану електронним ударом.

Спектри випромінювання газорозрядної плазми бар'єрного розряду в сумішах $\text{He}-\text{D}_2\text{O}$, $\text{Ar}-\text{D}_2\text{O}$ містять головним чином смуги $\text{C} \rightarrow \text{X}$ та $\text{A} \rightarrow \text{X}$ гідроксилу OD (140 - 315 нм). Залежності інтенсивності випромінювання плазми бар'єрного розряду в суміші $\text{He}-\text{D}_2\text{O}$ в спектральному діапазоні 144 - 160 нм від парціального тиску пари "важкої" води приведені на рис. 2.

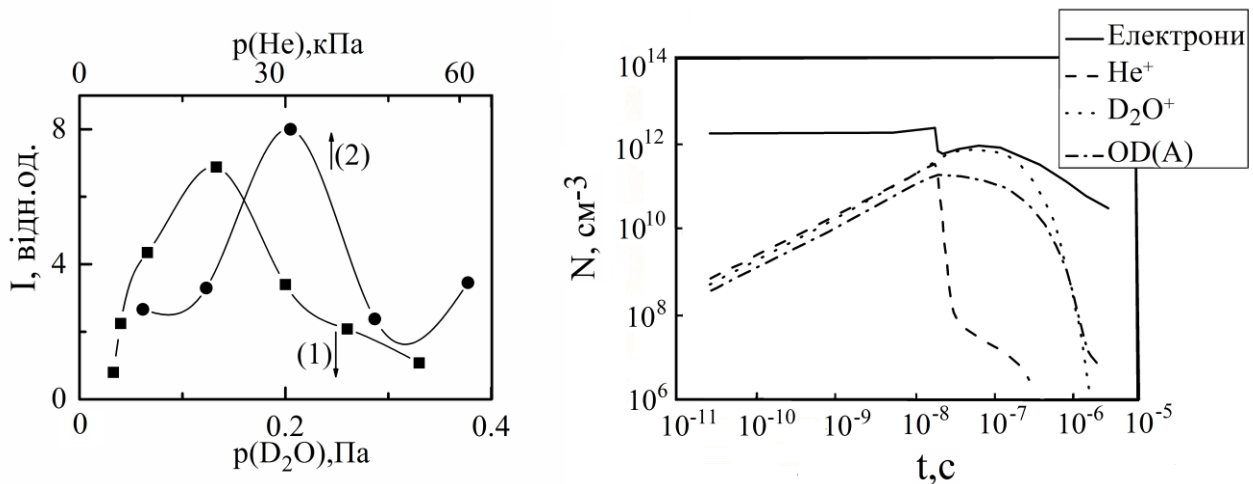


Рис. 2. Залежності інтенсивності смуги випромінювання OD ($\text{C} \rightarrow \text{X}$) плазми бар'єрного розряду в суміші $\text{He} - \text{D}_2\text{O}$ від парціального тиску пари "важкої" води при $p(\text{He}) = 20$ кПа (крива 1) і від парціального тиску гелію при $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.2$ кПа (крива 2) (а); часова еволюція густини електронів, іонів He^+ , D_2O^+ , густини радикалу $\text{OD}(\text{A})$ ($U_d = 20$ кВ, $W_d = 1 \times 10^5$ Вт, $\tau = 20$ нс) (б) [8,10, 13, 26].

Найбільш інтенсивне випромінювання радикалу OD спостерігається при оптимальному тиску пари "важкої" води 0.06 - 0.2 кПа (рис. 2, а, крива 1). Оптимальний парціальний тиск гелію, необхідний для отримання максимальної інтенсивності смуг $C \rightarrow X$ в розряді в суміші He - D₂O, складає 20 - 46.6 кПа (рис.2, а, крива 2).

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

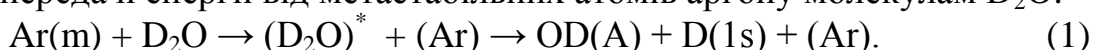
Встановлено, що залежність інтенсивності випромінювання смуги 309 нм характеризується різними діапазонами парціального тиску пари D₂O. При найбільш низькому тиску пари D₂O (1 – 100 Па) утворення радикалів OD(A, X) може відбуватися в результаті процесу дисоціативного збудження молекул D₂O електронним ударом. При підвищенні тиску пари D₂O до 150 - 200 Па в гелієвій суміші можливим стає збудження радикалів гідроксилу OD(X) електронним ударом з утворенням OD(A). При $p(D_2O) = 200$ Па інтенсивність смуги OD (A \rightarrow X) різко зменшується, ймовірно, із-за "гасіння" радикалів OD(A) молекулами D₂O.

Оптимальний тиск гелію, який необхідний для отримання максимальної інтенсивності смуг радикалу OD в газовій суміші знаходиться в діапазоні 10 - 20 кПа.

Проведене комп'ютерне моделювання впливу різних параметрів на характеристики випромінювання двобар'єрного розряду для суміші He-D₂O показало, що зі збільшенням тиску води зменшується число електронів у високоенергетичному "хвості" ФРЕЕ, що приводить до зниження температури електронів (T_e). Зменшення тиску гелію веде до збільшення кількості електронів з високою енергією, що приводить до збільшення T_e та швидкостей реакцій зіткнення електронів з нейтральними частинками. Збільшення напруги розряду веде до збільшення температури електронів. Із розрахованої часової еволюції густини електронів, He⁺, D₂O⁺ і OD (A) під час одного розряду і подальшого післясвічення (рис. 2, б) слідує, що густина гелію зменшується після припинення горіння розряду, а густина D₂O продовжує зростати. Густина електронів істотно не змінюється під час розряду, але зменшується після згасання розряду та зростає в стадії післясвічення, а потім зменшується. Збільшення густини електронів у післясвіченні обумовлено відривом електронів від негативних іонів (O⁻, OH⁻, D⁻), які ефективно генеруються у розряді. Густина іонів He⁺ зменшується, коли розряд вимикається, в той час як густина D₂O⁺ продовжує зростати. Зниження густини іонів He⁺ обумовлене електрон-іонною рекомбінацією і зіткненнями з перезарядкою.

Вплив тиску "важкої" води на інтенсивність УФ випромінювання плазми показав немонотонну залежність, причиною якої є конкуренція між реакціями дезбудження радикалу OD(A) в стадії післясвічення, коли генерується УФ випромінювання і збільшенням густини радикалів OD(A) при зростанні густини радикалів OD(A).

Спектри випромінювання бар'єрного розряду наносекундної тривалості в суміші Ar з парами "важкої" води містять як смуги у ВУФ, так і смуги в УФ - діапазоні спектру. Результати оптимізації інтенсивності показали, що оптимальний тиск аргону, який необхідний для отримання максимальної інтенсивності смуг радикалу OD, як у ВУФ, так і в УФ області спектру в бар'єрному розряді в суміші Ar - D₂O знаходиться в діапазоні 10 - 20 кПа. Оптимальний тиск пари "важкої" води для випромінювача на основі C→X смуги з максимумом при 144 - 160 нм OD(C→X) та 309 нм OD(A→X) в суміші Ar - D₂O знаходиться в діапазоні 150 - 400 Па. Інтенсивність випромінювання смуги 309 нм в діапазоні 150 - 200 Па парціального тиску пари D₂O в суміші на основі аргону приблизно в 1.5 рази більша, ніж в гелієвій, що може бути пов'язано з підключенням додаткового механізму утворення радикалів OD(A) за рахунок передачі енергії від метастабільних атомів аргону молекулам D₂O:



Залежності інтенсивності випромінювання смуги OD 309 нм від частоти слідування імпульсів струму вказують на можливість збільшення середньої потужності УФ-випромінювання лампи при частотах $f > 1$ кГц.

Проведені розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів електричного розряду в суміші He-H₂O з використанням програми BOLSIG+ показали, що швидкість дрейфу електронів не є строго лінійною. З цього випливає, що енергія і приведена рухливість залежать від електричного поля і зростають зі збільшенням величини приведеної напруженості електричного поля E/N. Найбільшими є константи швидкості процесу пружного розсіювання електронів на молекулах води, а найменшими - константи швидкостей утворення позитивних іонів H₂⁺, O⁺⁺.

З проведених розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів плазми ємнісного розряду в суміші Ar-H₂O випливає, що заміна гелію на аргон приводить до зменшення швидкості дрейфу електронів.

Найбільшими є константи швидкості процесу пружного розсіювання електронів на молекулі води, на атомах аргону і процесу збудження обертальних рівнів молекули води. Така ж закономірність спостерігається і для отриманих залежностей констант швидкості процесів взаємодії електронів з молекулами води (при E/N = 250 Тд) від тиску пари води. Встановлено, що зі збільшенням парціального тиску пари води середня енергія електронів зменшується, а приведена рухливість електронів зростає.

Оскільки сума констант швидкостей утворення позитивних іонів переважає суму констант швидкостей утворення негативних іонів, то плазма в розряді на суміші He-H₂O є електропозитивною. При значеннях параметру E/N < 145 Тд плазма в розряді на суміші Ar-H₂O є електронегативною, а при E/N > 145 Тд – електропозитивною.

Четвертий розділ присвячений дослідженню емісійних та електричних характеристик наносекундного розряду з двома бар'єрами в сумішах Ar-CCl₄, Ar - Kr - CCl₄ і результатам проведених розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl₄, Kr-Ar-CCl₄ [8, 15-18, 20, 21, 30-32, 34-39].

В спектрах випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ у спектральному діапазоні 140 - 350 нм спостерігаються смуги 175 нм $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$, 258 нм $\text{Cl}_2 (D' - A')$, $\text{OH} (A \rightarrow X)$. Менш інтенсивним було випромінювання смуг ексиплексної молекули ArCl^* з максимумом при 169 нм $\text{ArCl} (D \rightarrow X)$ і 199 нм $\text{ArCl} (C \rightarrow A)$, яке проявляється лише при низькому тиску робочої суміші.

З результатів оптимізації інтенсивності смуг випромінювання 175 нм $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$, 258 нм $\text{Cl}_2 (D' - A')$ і 309 нм $\text{OH} (A \rightarrow X)$ від парціального тиску пари CCl_4 при $p(\text{Ar}) = 24$ кПа впливає, що для отримання максимальної інтенсивності цих смуг оптимальний тиск пари CCl_4 повинен знаходитися у діапазоні 10-20 Па. Збільшення парціального тиску аргону від 10 до 55 кПа в бар'єрному розряді в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ показало, що інтенсивності смуг $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$ і $\text{Cl}_2 (D' - A')$ зменшуються: смуги 258 нм – приблизно в три рази, а смуги 175 нм на два порядки. Збільшення парціального тиску пари фреону до 200 Па приводить до сильного гасіння інтенсивності смуги випромінювання з максимумом при 175 нм $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$ і збільшення інтенсивності смуги з максимумом при 258 нм $\text{Cl}_2 (D' - A')$ в чотири рази

Збільшення парціального тиску аргону в бар'єрному розряді з 10 до 50 кПа приводить до зменшення інтенсивності випромінювання смуги з 175 нм на три порядки, а смуги з 258 нм тільки в три рази. Оптимальне значення тиску аргону для утворення радикала OH складає 5 - 10 кПа.

Найбільша середня потужність випромінювання досягається при роботі в частотному режимі 400-1000 Гц, що може бути пов'язано з розпадом молекул CCl_4 в розряді при великій частоті повторення імпульсів накачування.

Ресурс випромінювання смуг $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$ та $\text{Cl}_2 (D' - A')$ становить $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ імпульсів.

Найбільша потужність випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ досягається при $p(\text{CCl}_4) - 120 - 215$ Па, $p(\text{Ar}) - 6$ кПа. Амплітуда основного максимуму імпульсу струму для суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 6.6$ кПа-133 Па складає 33 А при його тривалості 20-35 нс. Зростання тиску аргону $p(\text{Ar}) = 24$ кПа приводить до зростання імпульсу струму 50 - 60 А (при тривалості – 25-35 нс) та до збільшення кількості реакцій заряджених частинок, що у свою чергу приводить до зростання струму. Амплітуда імпульсів напруги досягає 16 кВ для суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 6.6$ кПа-133 Па та 22 кВ для суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 24$ кПа-133 Па при тривалості окремого викиду 8 нс.

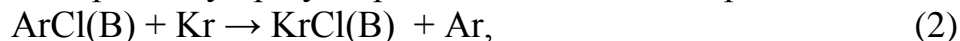
Максимум енергії в бар'єрний розряд вноситься в часовому діапазоні 50 нс. Збільшення парціального тиску аргону ($p(\text{Ar}) = 24$ кПа) приводить до збільшення енерговнеску.

Розрахунки кінетики в бар'єрному розряді на суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ показали добре узгодження з експериментом.

Спектр випромінювання бар'єрного розряду наносекундної тривалості в потрійній суміші $\text{Ar} - \text{Kr} - \text{CCl}_4$ складається з смуг з максимумом при 175 нм $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$, 199 нм $\text{KrCl} (D \rightarrow X)$, 222 нм $\text{KrCl} (B \rightarrow X)$ і 258 нм $\text{Cl}_2 (D' \rightarrow A')$ (рис.3, а).

Особливістю застосування як хлорносія молекули CCl_4 в порівнянні з простішими молекулами є вища інтенсивність випромінювання смуги 258 нм Cl_2 ($D' - A'$) в порівнянні із смугами хлоридів аргону і кріптонію.

Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання ексиплексних смуг в бар'єрному розряді є реакція заміщення атомів аргону атомами кріптонію при утворенні відповідних хлоридів:



Результати оптимізації смуг випромінювання ексиплексних молекул і молекули хлору від величини парціального тиску важких інертних газів при фіксованому $p(\text{CCl}_4)$ показали, що збільшення парціального тиску аргону (при $p(\text{Kr}) = \text{const}$) в діапазоні 6.5 - 13.5 кПа приводить до значного спаду інтенсивності випромінювання смуг $\text{KrCl}(B \rightarrow X; D \rightarrow X)$, $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$ і практично не впливає на інтенсивність смуги 258 нм Cl_2 ($D' - A'$).

Збільшення ж парціального тиску кріптонію від 1.2 до 6.6 кПа (при $p(\text{Ar}) = \text{const}$) приводить до значного зменшення інтенсивності смуги 175 нм із-за реакції заміщення атомів аргону атомами кріптонію при утворенні хлоридів аргону і кріптонію. Для отримання максимальної інтенсивності смуг $\text{KrCl}(B \rightarrow X; D \rightarrow X)$ оптимальний парціальний тиск кріптонію в потрійній суміші знаходиться в діапазоні 6 – 8 кПа.

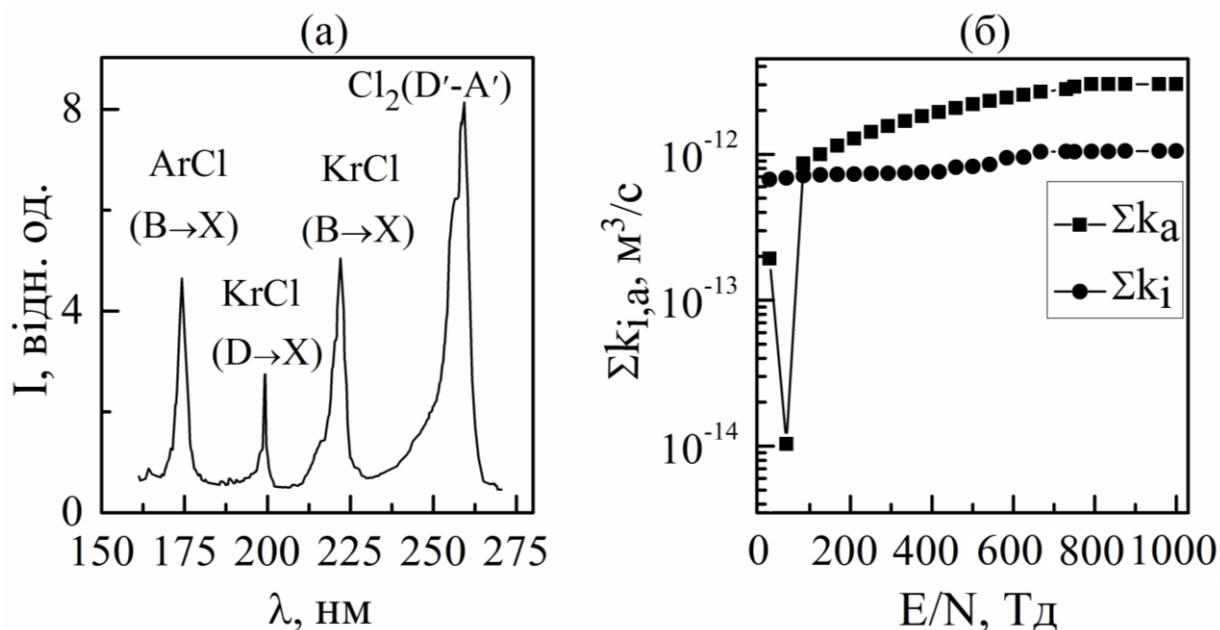


Рис.3. Спектр випромінювання плазми бар'єрного розряду в суміші Ar-Kr-CCl_4 : 1.33 - 6.6 - 0.13 кПа при $f = 80$ Гц (а); сумарні константи швидкості іонізації $\sum k_i$ з утворенням позитивних іонів CCl_3^+ , CCl^+ , CCl_2^+ , Cl^+ , C^+ , CCl_3^{2+} , Cl_2^+ , CCl_4^+ і дисоціативного прилипання електронів $\sum k_a$ з утворенням негативних іонів CCl_4^- , Cl^- , Cl_2^- (б) [8, 19, 30, 32, 38].

При низьких парціальних тисках інертних газів (на початку горіння бар'єрного розряду) утворення ексиплексних молекул також можливе внаслідок "гарпунної" реакції, а при більш високих тисках ($p \approx 24$ кПа) – реакції іон-іонної рекомбінації.

Оптимум середньої потужності випромінювання знаходиться при тиску криптону 6.6 кПа і тиску аргону - 1.3 кПа. Оптимізація залежностей потужності випромінювання від тиску аргону показала, що потужність випромінювання потрібної суміші у два рази більша ніж з розряду на суміші Ar - CCl₄.

Основний енергетичний внесок у бар'єрний розряд в суміші Ar-Kr-CCl₄ відбувався при амплітуді імпульсів напруги 22 кВ і амплітуді імпульсів струму 25 - 50 А. Знайдені значення середньої енергії електронів показали, що середня енергія електронів для суміші Ar-CCl₄ є більшою від потрібної суміші Ar-Kr-CCl₄.

Розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів для сумішей Ar-CCl₄ та Ar-Kr-CCl₄ показали, що найбільшими були константи швидкості утворення негативного іона Cl⁻, константи швидкості процесів пружного розсіювання електронів на атомі Ar, на молекулі CCl₄, процесів утворення позитивних іонів Ar⁺, Kr⁺, CCl₄⁺, CCl₃⁺; найменшими – константи швидкості утворення негативного іону Cl₂⁻.

Оскільки сума констант швидкостей утворення негативних іонів переважає суму констант швидкостей утворення позитивних іонів, то плазма розряду на основі суміші Ar-CCl₄ є електронегативною. При значеннях величини приведеної напруженості електричного поля E/N < 80 Тд плазма в розряді на суміші Ar-Kr-CCl₄ є електропозитивною, а при E/N > 80 Тд – електронегативною (рис.3, б).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вперше встановлено, що ємнісний розряд у сумішах He-H₂O(D₂O) та Ar-H₂O(D₂O) характеризується наявністю УФ і ВУФ смуг випромінювання; оптимальний тиск пари звичайної води становить 130-150 Па, оптимальні тиски гелію склали 2.6 кПа та 7.5 кПа, а оптимальний тиск аргону – 0.1 - 0.5 кПа. Заміна пари звичайної води на пару "важкої" води приводить до зростання інтенсивності смуг гідроксилу у півтора рази. Моделювання кінетики процесів в плазмі газового розряду низького тиску показало, що основним процесом утворення радикалів OH(A) є процес дисоціативного збудження молекули води електронами, а другим за важливістю є процес збудження радикалів гідроксилу з основного стану електронним ударом.

2. Дослідження бар'єрного розряду показало, що найбільш інтенсивне випромінювання смуг A → X, C → X радикалу OD спостерігається при оптимальному тиску гелію 10 – 60 кПа та пари "важкої" води в діапазоні 0.04 – 0.33 кПа. Збільшення тиску гелію в бар'єрному розряді приводить до швидкої коливальної релаксації радикалу гідроксилу в нижній C-стан. Максимальна інтенсивність смуг випромінювання радикалу OD в суміші Ar - D₂O спостерігається при p(Ar)=10- 20 кПа; p(D₂O) = 150 - 250 Па. На основі проведених досліджень може бути розроблена УФ і ВУФ лампа з екологічно безпечним робочим середовищем. Моделювання кінетики утворення радикалу OD(A) в плазмі показало, що збільшення тиску He веде до зменшення густини OD(A), що обумовлено зменшенням електронної температури і швидкостей реакцій.

3. Проведені розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів електричного розряду в сумішах He-H₂O показали, що плазма в суміші He-H₂O є електропозитивною. При значеннях величини приведеної напруженості електричного поля $E/N < 145$ Тд плазма в суміші Ar-H₂O є електронегативною, а при $E/N > 145$ Тд – електропозитивною.

4. Вперше досліджено оптичні характеристики бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl₄, Ar - Kr - CCl₄, придатного до розробки широкосмугових УФ-ВУФ випромінювачів на хлоридах важких інертних газів. Найбільша потужність випромінювання розряду в суміші Ar - CCl₄ досягається при $p(\text{CCl}_4) - 120 - 215$ Па, $p(\text{Ar}) - 6$ кПа. Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання ексиплексних смуг є реакція заміщення атомів аргону атомами криптону при утворенні відповідних хлоридів важких інертних газів.

5. Розрахунки кінетики процесів у бар'єрному розряді в суміші Ar-CCl₄ показали добре узгодження з експериментом. Середня енергія електронів для розряду в суміші Ar-CCl₄ є більшою ніж для розряду в потрійній суміші Ar-Kr-CCl₄. Оскільки сума констант швидкостей утворення негативних іонів переважає суму констант швидкостей утворення позитивних іонів, то плазма в розряді в суміші Ar-CCl₄ є електронегативною. При значеннях параметра $E/N < 80$ Тд плазма на суміші Ar-Kr-CCl₄ є електропозитивною, а при $E/N > 80$ Тд – електронегативною.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Шуайбов О.К. Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка та застосування / О.К. Шуайбов, І.В. Шевера, Л.Л. Шимон, Е.А. Соснін – Ужгород: «Говерла», – 222 с.
- 2*. Бойченко А.М. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения / А.М. Бойченко, М.М. Ломаев, А.Н. Панченко и др. – Томск: SST, 2011. – 512 с.
- 3*. Панченко А.Н. Планарная эксилампа на хлоридах инертных газов с накачкой поперечным самостоятельным разрядом / А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко // Квантовая электроника – 2006. – Т.36, № 2. – 169-173.
- 4*. Шуайбов А.К. УФ-ВУФ эксимерный излучатель с накачкой поднормальным тлеющим разрядом / А.К. Шуайбов, А.И. Дащенко, И.В. Шевера // Квантовая электроника. – 2001. – Т.31, № 4. – С.371–372.
- 5*. Avtaeva S.V. Kinetic model for low-density non-stationary gas discharge in water vapour / S. V. Avtaeva, A. A. General, V. A. Kel'man // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – №43. – P. 315201 (13 pp).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шуайбов А.К. Ультрафиолетовые источники излучения на парах воды (H₂O, D₂O) / А.К. Шуайбов, А.А. Генерал, Ю.О. Шпеник, В.Ю. Жменяк, И.В.

- Шевера, Р.В. Грицак // Журнал технической физики. – 2009. – Т.79, Вып. 8. – С.153–155.
2. Миня О.Й. Короткохвильовий випромінювач емнісного розряду на парі води / О.Й. Миня, О.К. Шуаїбов, І.В. Шевера, Р.В. Грицак, З.Т. Гомокі // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2010. – № 28. – С.135–139.
 3. Шуаїбов А.К. Вакуумно-ультрафіолетовый излучатель низкого давления на смеси гелия с парами воды / А.К. Шуаїбов, А.Й. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера, Р.В. Грицак // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37, № 3. – С.64–67.
 4. Шуаїбов А.К. ВУФ-лампа на смесях инертных газов с молекулами воды с накачкой импульсно-периодическим емкостным разрядом / А.К. Шуаїбов, А.Й. Миня, А.Н. Малинин, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т.78, №6. – С.932–936.
 5. Грицак Р.В. ВУФ-лампа емнісного розряду на сумішах He-H₂O і Ar-H₂O / Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуаїбов// Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2011. – № 29. – С.227–232.
 6. Шуаїбов А.К. ВУФ-лампа емкостного розряду на смеси паров воды с аргоном / А.К. Шуаїбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера, Р.В. Грицак // Оптический журнал. – 2012. – Т.79, № 8. – С.96–99.
 7. Levko D. Use of a low pressure helium/water vapor discharge as a mercury-free source of ultraviolet emission / D. Levko, A. Shuaibov, I. Shevera, R. Gritzak, A. Tsybaliuk // Journal of Applied Physics. – 2014. – V.116. – P. 113303 (1-6).
 8. Шуаїбов О.К. Ультрафіолетові лампи на радикалах гідроксилу та експлексних молекулах з накачуванням бар'єрним наносекундним розрядом: монографія. / Шуаїбов О.К., Грицак Р.В. - Ужгород: Видавництво «Говерла», 2018 р. – 114 с. – ISBN 978-617-7333-63-9.
 9. Грицак Р.В. Емісійні характеристики наносекундного бар'єрного розряду в суміші аргону та гелію з парами важкої води (D₂O) / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомокі // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. – № 32. – С.73–76.
 10. Шуаїбов А.К. Импульсно-периодический ВУФ излучатель с накачкой барьерным разрядом в смеси гелия с парами тяжелой воды (D₂O) / А.К. Шуаїбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Квантовая электроника. – 2012. – В.42, №8. – С.747–749.
 11. Грицак Р.В. Лампа бар'єрного розряду на сумішах інертних газів з парою важкої води / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомокі // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. – № 31. – С.146–150.
 12. Шуаїбов А.К. Оптические характеристики электроразрядного источника ультрафиолетового излучения на смеси аргона с парами «тяжелой» воды D₂O / А.К. Шуаїбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114, № 2. – С.42–45.
 13. Levko D. Physical processes in barrier discharge lamp working in He/D₂O mixture / D. Levko, A. Shuaibov, R. Gritzak, A. Minya, Z. Homoki // High Voltage Engineering. – 2013. – V.39, №9. – P.30505 – 30512.
 14. Шуаїбов А.К. Газоразрядный источник неканцерогенного УФ-излучения на смеси гелия с парами тяжелой воды (D₂O) / А.К. Шуаїбов, А.И. Миня, Р.В.

- Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 3. – С.152–154.
15. Шуайбов А.К. Эмиссионные характеристики барьерного разряда на смеси аргона с парами фреона и воды в УФ-ВУФ области / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т.114, № 5. – С.30–32.
16. Грицак Р.В. Лампа на смугі 175 нм ArCl (В-Х) з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.Й. Міня, З.Т. Гомоки, Т.І. Варга // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2014. – № 35. – С.113–117.
17. Шуайбов А.К. Коротковолновой излучатель на системе полос молекул хлорида аргона (175 nm) и хлора (258 nm) с накачкой наносекундным барьерным разрядом / А. К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки // Журнал технической физики. – 2014. – Т.84, № 1. – С.155–157.
18. Shuaibov A. The formation of excited molecules chloride argon, chlorine and hydroxyl radicals in the nanosecond barrier discharge / A. Shuaibov, A. Minya, Z. Gomoki, R. Gritzak, G. Laslov, I. Shevera // Journal of electrical engineering. – 2014.– №2. –P. 105-109.
19. Шуайбов А.К. Излучательные характеристики плазмы импульсно-периодического барьерного разряда в смеси криптона, аргона и паров «жидкого» фреона / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т.116, № 2. – С.230–233.
20. Шуайбов А.К. Характеристики многоволновой УФ-ВУФ лампы на смеси аргона, криптона и паров фреона с накачкой наносекундным барьерным разрядом / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки // Квантовая электроника. – 2015. – В.45, №2. – С.185–188.
21. Шуайбов А.К. Характеристики и параметры плазмы газоразрядной УФ-ВУФ лампы на системе полос молекул хлорида аргона и хлора / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки // Теплофизика высоких температур.– 2015.– Т.53, № 3. –С.500–505.
22. Shuaibov A.K. Optical characteristics of UV–VUV lamps on the electronic-vibrational transitions of the hydroxyl radical pumped by a nanosecond capacitive discharge // А.К. Shuaibov, R.V. Gritzak // High Volt. – 2017. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 78-81.
23. Грицак Р. Емісійні характеристики та параметри плазми газорозрядної лампи на парах води / Р. Грицак, А. Малініна, А. Генерал, І. Шевера // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2009», Ужгород, Україна. – 25-27 травня, 2009 р. – С.79.
24. Грицак Р.В. ВУФ-лампа ємнісного розряду на сумішах He-H₂O і Ar-H₂O / Р.В. Грицак , Н.С. Ілавська, О.К. Шуайбов // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011», Ужгород, Україна. – 24-27 травня, 2011. – С.183.
25. Hrytsak R.V. Ultraviolet emitter barrier discharge on the molecule of heavy water (D₂O) / R.V. Hrytsak, А.К. Shuaibov, А.І. Minya, І.В. Shevera, Z.Т. Homoki //

- The 10th International conference «Atomic and molecular pulsed lasers», Tomsk, Russia. – 12-16 September, 2011. – P.104.
26. Hrytsak R.V. Spectroscopic studies on hydroxyl molecules formation in nanosecond capacitive and barrier discharges / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov // XIIth International young scientists conference on applied physics, Kyiv, Ukraine. – 23-26 May, 2012.– P. 155-156.
 27. Hrytsak R. Emitter barrier discharge in mixtures of argon and helium with vapour of heavy water / R. Hrytsak, A. Shuaibov, A. Minya, I. Shevera, Z. Homoki // 25th Symposium on plasma physics and technology, Prague, Czech Republic. – 18-21 June, 2012. – P. 39.
 28. Грицак Р.В. Коротковолновая лампа с накачкой наносекундным барьерным разрядом на парах тяжелой воды (D_2O) / Р.В. Грицак, А.К. Шуаибов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки // Материалы Международной молодежной конференции «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия», Томск, Россия. –17-18 сентября, 2012.– P.28-31.
 29. Грицак Р.В. Ультрафиолетовая лампа на паре воды с накачкой наносекундным барьерным разрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуаибов, О.И. Миня, З.Т. Гомоки, І.В. Шевера // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції «Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії», Ужгород, Україна. – 20-22 вересня, 2012. – С. 61.
 30. Hrytsak R.V. Two-band UV-VUV lamp with pumping nanosecond barrier discharge / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, I.V. Shevera, Z.T. Homoki // Proceedings of the VIII International conference «Electronics and applied physics», Kyiv, Ukraine. – 24-27 October, 2012. - P. 144-145.
 31. Грицак Р.В. Лампа на смугі 175 нм ArCl (B-X) з накачуванням наносекундним барьерним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуаибов, О.І. Миня, З.Т. Гомоки // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013», Ужгород, Україна. – 20-23 травня, 2013. – С.295-296.
 32. Hrytsak R.V. Optical characteristics of nanosecond barrier discharge in a Kr-Ar- CCl_4 mixture / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // Proceedings of the XIIIth International young scientists conference on applied physics, Kyiv, Ukraine. – 12-15 June, 2013. – P. 202-203.
 33. Hrytsak R.V. Gas-discharge UV-VUV emitter on the vapour of "heavy water" / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, D.S. Levko, A.I. Minya, Z.T. Homoki, A.A. Sani // XI International conference «Atomic and molecular pulsed lasers», Tomsk, Russia. – 16-20 September, 2013.– P.20.
 34. Hrytsak R.V. Emission and electrical characteristics of a barrier discharge in a Ar- CCl_4 mixture // R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki, G.E. Laslov // IX International conference «Electronics and applied physics», Kyiv, Ukraine. – 23-26 October, 2013.– P.106-107.
 35. Hrytsak R.V. The resource and energy characteristics of the multiwavelength UV-VUV lamp barrier discharge in a mixture of Ar - CCl_4 and Kr - Ar - CCl_4 / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // Proceedings of the XIIth

- International young scientists conference on applied physic, Kyiv, Ukraine. – 11-14 June, 2014. – P. 234-235.
36. Hrytsak R.V. The characteristics of the lamp the barrier discharge in mixtures of Ar- CCl₄-H₂O and Ar-Kr-CCl₄ / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // 26th Symposium on plasma physics and technology, Prague, Czech Republic.– 16-19 June, 2014.– P. 30.
37. Hrytsak R.V. Modeling of electron kinetic coefficients for the discharge in the working mixtures of exciplex lamp at of bands system of 258 nm Cl₂ (D'—A')/ 175 nm ArCl (B→X) / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, L.L. Shimon // Proceedings of the X International young scientists conference on applied physic, Kyiv, Ukraine. – 22-25 October, 2014. – P. 128-129.
38. Грицак Р.В. Числове моделювання електронних кінетичних коефіцієнтів для розряду в робочій суміші Ar-Kr-CCl₄ / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, Л.Л. Шимон // Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2015», Ужгород, Україна. – 18-22 травня, 2015. – С.96-97.
39. Hrytsak R.V. Experimental and calculated characteristics and parameters of the plasma of nanosecond barrier discharge in a mixture of argon-freon // R.V. Hrytsak A.H. Kaliuzhna, O.K. Shuaibov // XIII International scientific conference «Electronics and applied physics», Kyiv, Ukraine. – 24-27 October, 2017.– P.157-158.
40. Патент України №60127, МПК H01S 3/097(2006.01). Вакуумно-ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парі води / Шуаїбов О.К., Миня О.Й., Шевера І.В., Грицак Р.В., Гомокі З.Т. // № u201014165; Заявл. 29.11.2010; Опубл. 10.06.2011, Бюл. №11.–6 с.
41. Патент України №71686, МПК H01S 3/097 (2006.01). Ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парі важкої води / Шуаїбов О.К., Миня О.Й., Грицак Р.В., Гомокі З.Т. // № u201115335; Заявл. 26.12.2011; Опубл. 25.07.2012, Бюл. №14.– 3 с.
42. Патент України №100155 МПК H01J 61/16 (2006.01). Вакуумно-ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парах води / Шуаїбов О.К., Миня О.Й., Шевера І.В., Грицак Р.В., Гомокі З.Т. // № a201014168; Заявл. 29.11.2010; Опубл. 26.11.2012, Бюл. №22.–3 с.
43. Патент України №76500, МПК H01S 3/097 (2006.01). Ультрафіолетова імпульсно- періодична лампа бар'єрного розряду на суміші гелію з парами води / Шуаїбов О.К., Грицак Р.В., Миня О.Й., Шевера І.В., Гомокі З.Т. // № u201206294; Заявл. 24.05.2012; Опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.–5 с.

АНОТАЦІЯ

Грицак Р.В. Характеристики і параметри плазми в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка. – ДВНЗ „Ужгородський національний університет” Міністерства освіти і науки України, Ужгород, 2018.

Робота присвячена дослідженню характеристик і параметрів газорозрядної плазми в сумішах інертних газів з молекулою води та фреону.

Вперше досліджено ВУФ- і УФ-випромінювання наносекундного емнісного розряду в сумішах He-H₂O (D₂O), Ar-H₂O (D₂O). Внаслідок проведення оптимізації робочих сумішей He-H₂O (D₂O) було встановлено, що використання "важкої" води є в півтора рази більш ефективним, ніж парів звичайної води.

Вивчено та встановлено оптичні характеристики випромінювання газорозрядної плазми бар'єрного розряду у ВУФ і УФ діапазонах спектру на суміші He-D₂O та Ar-D₂O.

Проведено дослідження емісійних характеристик випромінювання лампи бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl₄-H₂O, Ar-CCl₄. Найбільша потужність випромінювання бар'єрного розряду в суміші Ar-CCl₄ досягається при $p(\text{CCl}_4) - 120 - 215 \text{ Па}$, $p(\text{Ar}) - 6 \text{ кПа}$. Результати показують, що ресурс випромінювання смуг ArCl(B→X) та Cl₂(D'-A') становить $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ імпульсів.

Одержані емісійні та електричні характеристики плазми бар'єрного розряду на суміші Ar-Kr-CCl₄ показали, що потужність випромінювання потрійної суміші у два рази більша від суміші Ar-CCl₄.

Встановлені основні процеси, які визначають характеристики плазми емнісного та бар'єрного розряду в сумішах інертних газів з молекулою води та фреону. Проведено розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів в діапазоні величини приведеної напруженості електричного поля $E/N=1-300 \text{ Тд}$ для емнісного розряду в суміші He-H₂O, Ar-H₂O та в діапазоні $E/N=1-1000 \text{ Тд}$ для бар'єрного розряду в суміші Ar-CCl₄ і Ar-Kr-CCl₄. Розрахунки кінетики в бар'єрному розряді на суміші He-D₂O та Ar-CCl₄ показали добре узгодження з експериментальним дослідженням.

Ключові слова: емнісний розряд, бар'єрний розряд, УФ і ВУФ випромінювання, інтенсивність випромінювання, "важка" вода, хлориди аргону і криптону, молекули фреону і хлору.

АННОТАЦИЯ

Грицак Р.В. Характеристики и параметры плазмы в газоразрядных коротковолновых излучателях на основе молекул воды и фреона. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника. - ДВНЗ "Ужгородский национальный университет" Министерства образования и науки Украины, Ужгород, 2018.

Работа посвящена исследованию характеристик и параметров газоразрядной плазмы в смесях инертных газов с молекулой воды и фреона.

Впервые исследовано ВУФ- и УФ-излучение наносекундного емкостного разряда в смесях He-H₂O (D₂O), Ar-H₂O (D₂O). В результате проведения оптимизации рабочих смесей He-H₂O (D₂O) было установлено, что использование «тяжелой» воды в полтора раза более эффективно, чем паров обычной воды.

Изучены и установлены оптические и электрические характеристики излучения газоразрядной плазмы наносекундного барьерного разряда в ВУФ и УФ диапазонах спектра на смеси He-D₂O и Ar-D₂O.

Проведено исследование эмиссионных характеристик излучения лампы наносекундного барьерного разряда на смесях Ar-CCl₄-H₂O, Ar-CCl₄. Максимальная мощность излучения барьерного разряда в смеси Ar-CCl₄ достигается при $p(\text{CCl}_4) - 120 - 215 \text{ Па}$, $p(\text{Ar}) - 6 \text{ кПа}$. Результаты показывают, что ресурс излучения полос ArCl(B → X) и Cl₂(D'-A ') составляет $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ импульсов.

Полученные эмиссионные и электрические характеристики плазмы барьерного разряда на смеси Ar-Kr-CCl₄ показали, что мощность излучения разряда на основе тройной смеси в два раза больше чем разряда на смеси Ar-CCl₄.

Установлены основные процессы, которые определяют характеристики плазмы емкостного и барьерного разрядов в смесях инертных газов с молекулой воды и фреона. Проведены расчеты электронных кинетических коэффициентов в диапазоне величины приведенной напряженности электрического поля $E/N = 1-300 \text{ Тд}$ для емкостного разряда в смеси He-H₂O, Ar-H₂O и в диапазоне $E/N = 1-1000 \text{ Тд}$ для барьерного разряда в смеси Ar-CCl₄ и Ar-Kr-CCl₄. Расчеты кинетики в барьерном разряде на смеси He-D₂O и Ar-CCl₄ показали хорошее согласование с экспериментальным исследованием.

Ключевые слова: емкостный разряд, барьерный разряд, УФ и ВУФ излучение, интенсивность излучения, "тяжелая" вода, хлориды аргона и криптона, молекулы фреона и хлора.

SUMMARY

Hrytsak R.V. Characteristics and parameters of plasma in gas-discharge short-wave emitters on the basis of water and freon molecules. – Manuscript.

Thesis presented for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 01.04.04 "Physical Electronics". – State

University «Uzhhorod National University» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Uzhhorod, 2018.

The thesis is devoted to the study of characteristics and parameters of gas-discharge plasma based on mixtures of inert gases with water and freon molecules.

VUV- and UV-radiation of capacitive discharge in He-H₂O (D₂O) mixtures was studied for the first time. Replacing ordinary water with "heavy" water leads to increase in the intensity of radiation of all the bands in spectrum. As a result of optimization of He-H₂O (D₂O) working mixtures, it was found that the use of "heavy" water is one and a half times more efficient than ordinary water vapor.

Proper attention was paid to the studying and examining of optical and electrical characteristics of the radiation of gas-discharge plasma of barrier discharge in VUV and UV ranges of spectrum in He-D₂O and Ar-D₂O mixtures. Spectra of plasma emission in He-D₂O mixture contained bands C→X and A→X of hydroxyl OD (Δ 140-315 nm). Increasing the pressure of helium in barrier discharge in He-D₂O mixture led to a rapid vibrational relaxation of hydroxyl radicals in lower vibrational C²X⁺- condition that disintegrated with the radiation of narrow band with a maximum at 144 nm during the transition of hydroxyl radical to its higher positioned vibrational levels X²II- condition.

Pioneer study of radiation characteristics of barrier discharge lamp based on Ar-CCl₄-H₂O, Ar-CCl₄ mixtures showed that the main bands in radiating spectra of these mixtures were the bands 175 nm ArCl(B→X), 258 nm Cl₂(D'-A'), 309 nm OH (A→X) and less intensive bands 169 nm ArCl(D→X) and 199 nm ArCl(C→A). Working mixtures based on inert gas with freon vapour were optimized. The greatest radiation power of barrier discharge in Ar-CCl₄ mixture was reached at p(CCl₄) – 120 - 215 Pa, p(Ar) – 6 kPa. The results show that the resource of radiation of the bands ArCl(B→X) and Cl₂(D'-A') made $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ impulses. The basic processes, which determine the characteristics of the plasma of barrier discharge in the mixtures of Ar-CCl₄-H₂O, Ar-CCl₄ were revealed.

For the first time, the emission and electrical characteristics of the plasma of barrier discharge in Ar-Kr-CCl₄ mixture were established. The radiation spectrum of gas-discharge plasma in a triple mixture contained band with 175 nm ArCl(B→X), 199 nm KrCl(D→X), 222 nm KrCl(B→X), 258 nm Cl₂(D'-A'). Optimization of the dependence of radiation power on the pressure of argon showed that the radiation power of the triple mixture is twice that of the Ar-CCl₄ mixture.

Calculations of electronic kinetic coefficients in the range E/N=1-300 Td for capacitive discharge in He-H₂O, Ar-H₂O mixtures and in the range of parameter values E/N=1-1000 Td for capacitive discharge in Ar-CCl₄ and Ar-Kr-CCl₄ mixtures were carried out.

Calculations of the kinetics in the barrier discharge in He-H₂O and Ar-CCl₄ mixtures showed good matching with experimental studies. The study of the kinetics of formation of OD(A) radical in the discharge plasma showed that increasing the pressure of helium leads to decrease in the density of OD(A) due to the decrease in the electron temperature and reaction rapidity; increase in the partial pressure of "heavy" water vapor leads to the increase in the density of OD(A); the effect of the pressure of "heavy" water vapor on the intensity of UV radiation showed non-

monotonic dependence, the cause of which is the competition between two channels of deexcitation of OD(A) radical in post-illumination stage; increasing the power supply voltage leads to the increase in intensity and density of OD(A) radicals.

Keywords: capacitive discharge, barrier discharge, UV and VUV radiation, intensity of radiation, "heavy" water, argon and krypton chlorides, freon and chlorine molecules.