

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
Ужгородський національний університет

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
Ужгородський національний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Грицак Роксолана Володимирівна

УДК 537.52;621.387

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

01.04.04 – фізична електроніка
10 Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Р.В. Грицак

Науковий керівник Шуаїбов Олександр Камілович, доктор фізико-математичних
наук, професор

Ужгород – 2018

АНОТАЦІЯ

Грицак Р.В. Характеристики і параметри плазми в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.04 «Фізична електроніка». – Ужгородський національний університет, Ужгород, 2018.

Робота присвячена дослідженню характеристик і параметрів плазми в газорозрядних короткохвильових випромінювачах на основі молекул води та фреону.

Представлено короткий огляд експериментальних і теоретичних робіт із дослідження плазми електричних розрядів в інертних газах із молекулами води, фреону та галогеном Cl_2 . Виявлено, що інформація про використання молекули води та фреону як робоче середовище для газорозрядних джерел ультрафіолетового і вакуумно-ультрафіолетового (УФ і ВУФ) випромінювання, які збуджуються наносекундним ємнісним і бар'єрним розрядами, відсутня.

Для експериментального дослідження використовувалися оптичний метод дослідження плазми газорозрядних джерел випромінювання. Також використовувався електричний метод вимірювання струму та напруги на електродах з наносекундним часовим розділенням. Для кращого розуміння фізико-хімічних процесів в газовому розряді застосовувалось комп'ютерне моделювання плазмової кінетики в розрядах у різних газових сумішах.

Вперше досліджено ВУФ- і УФ-випромінювання ємнісного розряду на сумішах $\text{He-H}_2\text{O}$ (D_2O). Дослідження показало, що спектри випромінювання лампи на основі пари води містять смуги радикалів OH (OD): $\lambda=156$ нм, 181 нм, 187.1 нм, 189.1 нм ($\text{C}\rightarrow\text{X}$; $\text{C}\rightarrow\text{A}$), $\lambda \approx 310$ нм ($\text{A}\rightarrow\text{X}$; $0;0$) та менш інтенсивні смуги з максимумами $\lambda=283.7$ нм ($\text{A}\rightarrow\text{X}$; $1;0$), $\lambda=297.6$ нм ($\text{A}\rightarrow\text{X}$; $3;2$). Заміна звичайної води на "важку" воду приводить до збільшення інтенсивності випромінювання всіх смуг у спектрі. Внаслідок проведення оптимізації встановлено, що використання "важкої" води є в півтора рази більш ефективним, ніж пари звичайної води.

Спектри випромінювання плазми імпульсно-періодичного ємнісного розряду в сумішах $\text{Ar-H}_2\text{O}$ (D_2O) за характером є близькими до спектру суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ і відрізняються в основному величиною інтенсивністю випромінювання гідроксилу. Аналіз спектру випромінювання плазми ємнісного розряду в суміші $\text{Ar-H}_2\text{O}$ показав, що основне випромінювання плазми сконцентровано в ВУФ діапазоні спектру $\Delta\lambda=140\text{-}200$ нм. Проведено оптимізацію випромінювання даної суміші. Чим менший парціальний тиск аргону, тим вищою є інтенсивність випромінювання гідроксилу в ВУФ діапазоні спектру. Це може бути зумовлено низькою ефективністю процесу передачі енергії від метастабільних атомів аргону молекулам води.

Вивчено оптичні та електричні характеристики випромінювання газорозрядної плазми бар'єрного розряду в ВУФ і УФ діапазонах спектру в сумішах $\text{He-D}_2\text{O}$ та $\text{Ar-D}_2\text{O}$. Спектри випромінювання плазми в суміші $\text{He-D}_2\text{O}$ містять смуги $\text{C}\rightarrow\text{X}$ та $\text{A}\rightarrow\text{X}$ гідроксилу OD ($\Delta\lambda=140\text{-}315$ нм). Збільшення тиску гелію в бар'єрному розряді в суміші $\text{He-D}_2\text{O}$ приводить до швидкої коливальної релаксації радикалів гідроксилу в нижній коливальний C^2X^+ - стан, який розпадається з випромінюванням вузької смуги з максимумом при $\lambda=144$ нм під час переходу радикала гідроксилу на його вище розташовані коливальні рівні $\text{X}^2\Pi$ - стан.

Дослідження електричних характеристик бар'єрного розряду в суміші $\text{He-D}_2\text{O}$ показали, що збільшення частоти слідування імпульсів струму та напруги розряду приводить до збільшення середньої потужності УФ-випромінювання.

Проведено чисельне моделювання впливу різних параметрів на характеристики випромінювання двобар'єрного розряду в суміші $\text{He-D}_2\text{O}$. Вивчення кінетики утворення радикала OD(A) в плазмі розряду показало, що збільшення тиску гелію веде до зменшення густини OD(A), що обумовлено зменшенням електронної температури і швидкостей реакцій. Збільшення парціального тиску пари "важкої" води приводить до збільшення густини OD(A). Вплив тиску пари "важкої" води на інтенсивність УФ-випромінювання показав немонотонну залежність, причиною якої є конкуренція між двома каналами дезбудження радикала OD(A) в стадії післясвічення. Збільшення напруги живлення веде до збільшення інтенсивностей та густини радикалів OD(A).

Вперше досліджено характеристики випромінювання лампи бар'єрного розряду в сумішах $\text{Ar-CCl}_4\text{-H}_2\text{O}$, Ar-CCl_4 . Основними в спектрах випромінювання у даних сумішах є смуги $\lambda=175$ нм $\text{ArCl(B}\rightarrow\text{X)}$, $\lambda=258$ нм $\text{Cl}_2(\text{D}'\text{-A}')$, $\lambda=309$ нм $\text{OH(A}\rightarrow\text{X)}$ та менш інтенсивні смуги $\lambda=169$ нм $\text{ArCl(D}\rightarrow\text{X)}$ і $\lambda=199$ нм $\text{ArCl(C}\rightarrow\text{A)}$.

Оптимізовано робочі суміші на основі інертного газу з парами фреону. Найбільша потужність випромінювання бар'єрного розряду в суміші Ar-CCl_4 досягається при $p(\text{CCl}_4) - 120 - 215$ Па, $p(\text{Ar}) - 6$ кПа. Результати показують, що ресурс випромінювання смуг $\text{ArCl(B}\rightarrow\text{X)}$ та $\text{Cl}_2(\text{D}'\text{-A}')$ становить $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ імпульсів.

Встановлено, що найбільша середня потужність випромінювання досягається при роботі в частотному режимі $400 - 1000$ Гц, що може бути пов'язано з розпадом молекули CCl_4 в розряді при великій частоті повторення імпульсів накачування. Збільшення парціального тиску аргону ($p(\text{Ar})=24$ кПа) приводить до збільшення енерговнеску.

Встановлені основні процеси, які визначають характеристики плазми бар'єрного розряду в сумішах $\text{Ar-CCl}_4\text{-H}_2\text{O}$, Ar-CCl_4 .

Розрахунки кінетики в бар'єрному розряді в суміші Ar-CCl_4 показують добре узгодження з експериментальним дослідженням.

Вперше встановлено емісійні та електричні характеристики плазми бар'єрного розряду в суміші Ar-Kr-CCl_4 . Спектр випромінювання газорозрядної плазми в потрібній суміші містить смуги з $\lambda=175$ нм $\text{ArCl(B}\rightarrow\text{X)}$, $\lambda=199$ нм $\text{KrCl(D}\rightarrow\text{X)}$, $\lambda=222$ нм $\text{KrCl(B}\rightarrow\text{X)}$, $\lambda=258$ нм $\text{Cl}_2(\text{D}'\text{-A}')$. Збільшення парціального тиску криптонію в розряді в цій суміші до 6.6 кПа приводить до превалування в спектрі випромінювання смуг хлориду криптонію. Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання ексиплексних смуг в бар'єрному розряді є реакція заміщення атомів аргону атомами криптонію при утворенні відповідних хлоридів.

Оптимізація залежностей потужності випромінювання від тиску аргону показала, що потужність випромінювання потрібної суміші в два рази більша від суміші Ar-CCl_4 .

Проведено розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів у діапазоні $E/N=1-300$ Тд для ємнісного розряду в сумішах He-H₂O, Ar-H₂O та в діапазоні величин параметра $E/N=1-1000$ Тд для бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl₄ і Ar-Kr-CCl₄.

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

ABSTRACT

Hrytsak R.V. Characteristics and parameters of plasma in gas-discharge short-wave emitters on the basis of water and freon molecules. – Qualifying (Doctoral) thesis presented as manuscript.

Thesis presented for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 01.04.04 "Physical Electronics". - Uzhhorod National University, Uzhhorod, 2018.

The thesis is devoted to the study of characteristics and parameters of plasma in gas-discharge short-wave emitters based on water and freon molecules.

The thesis presents a brief review of experimental and theoretical work on the study of plasma of electrical discharges in inert gases with water and freon molecules as well as Cl_2 halogen. It is found that there is no information on the use of water and freon molecules as a working environment for gas-discharge sources of ultraviolet and vacuum ultraviolet (UV and VUV) radiation stimulated by nanosecond capacitive and barrier discharges.

Optical method of investigating the plasma of gas-discharge radiation sources was used for experimental study. An electrical method for measuring current and voltage in electrodes with nanosecond time division was also used. Computer simulation of plasma kinetics in discharges in various gas mixtures was used for better understanding of physical and chemical processes in gas discharge.

VUV- and UV-radiation of capacitive discharge in $\text{He-H}_2\text{O}$ (D_2O) mixtures was studied for the first time. The research showed that the radiation spectra of a water vapor lamp contained bands of radicals OH (OD): $\lambda=156$ nm, 181 nm, 187.1 nm, 189.1 nm ($\text{C}\rightarrow\text{X}$; $\text{C}\rightarrow\text{A}$), $\lambda \approx 310$ nm ($\text{A}\rightarrow\text{X}$; 0;0) and less intensive bands with maxima $\lambda=283.7$ nm ($\text{A}\rightarrow\text{X}$; 1;0), $\lambda=297.6$ nm ($\text{A}\rightarrow\text{X}$; 3;2). 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, it was found that the use of "heavy" water is one and a half times more efficient than ordinary water vapor.

Spectra of plasma emission of a pulse-periodic capacitive discharge in $\text{Ar-H}_2\text{O}$ (D_2O) mixtures by nature were close to spectrum of $\text{He-H}_2\text{O}$ mixture and differed mainly

in the intensity of the radiation of hydroxyl. Analysis of radiation spectrum of plasma of capacitive discharge in Ar-H₂O mixture showed that the main plasma emission is concentrated in VUV spectral range $\Delta\lambda=140-200$ nm. Optimization of radiation of this mixture was carried out. The lower the partial pressure of argon, the higher the radiation intensity of hydroxyl in VUV range of the spectrum. This fact may be due to low efficiency of the transfer of energy from metastable argon atoms to water molecules.

Proper attention was paid to the studying 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 $C\rightarrow X$ and $A\rightarrow X$ of hydroxyl OD ($\Delta\lambda=140-315$ 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 C^2X^+ - condition that disintegrated with the radiation of narrow band with a maximum at $\lambda=144$ nm during the transition of hydroxyl radical to its higher positioned vibrational levels $X^2\Pi$ - condition.

Research of the electrical characteristics of barrier discharge in He-D₂O mixture showed that increase in the frequency of current pulses and discharge voltage leads to the increase in the average power of UV radiation.

Numerical simulation of the influence of various parameters on the radiation characteristics of two-barrier discharge on He-D₂O mixture was carried out. 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.

Characteristics of the radiation of a barrier discharge lamp in Ar-CCl₄-H₂O, Ar-CCl₄ mixtures were studied for the first time. The main bands in spectra of radiation in these

mixtures were $\lambda=175$ nm ArCl(B \rightarrow X), $\lambda=258$ nm Cl₂(D'-A'), $\lambda=309$ nm OH (A \rightarrow X) and less intensive bands $\lambda=169$ nm ArCl(D \rightarrow X) i $\lambda=199$ nm ArCl(C \rightarrow 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 $p(\text{CCl}_4) - 120 - 215$ Pa, $p(\text{Ar}) - 6$ kPa. The results show that the resource of radiation of the bands ArCl(B \rightarrow X) and Cl₂(D'-A') made $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ impulses.

It was found that the highest average power of radiation was achieved when operating in the frequency mode of 400 - 1000 Hz, which may be due to the decay of CCl₄ molecule in discharge at high frequency of repetition of pumping pulses. An increase in the partial pressure of argon ($p(\text{Ar}) = 24$ kPa) led to the increase in energy consumption.

The basic processes, which determine the characteristics of the plasma of barrier discharge in the mixtures of Ar-CCl₄-H₂O, Ar-CCl₄ were revealed.

Calculations of the kinetics in the barrier discharge in Ar-CCl₄ mixture showed good matching with experimental studies.

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 $\lambda=175$ nm ArCl(B \rightarrow X), $\lambda=199$ nm KrCl(D \rightarrow X), $\lambda=222$ nm KrCl(B \rightarrow X), $\lambda=258$ nm Cl₂(D'-A'). Increase in partial pressure of krypton in discharge in this mixture to 6.6 kPa led to predominance of krypton chloride bands in the spectrum of radiation. The main process that provides redistribution of the radiation intensity of exisplex bands in barrier discharge is the reaction of substituting argon atoms by krypton atoms when forming corresponding chlorides.

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.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях:

1. 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.
2. Шуаїбов А.К. Ультрафиолетовые источники излучения на парах воды (H_2O , D_2O) / А.К. Шуаибов, 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.
3. Миня О.Й. Короткохвильовий випромінювач ємнісного 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.
4. Шуаибов А.К. Вакуумно-ультрафиолетовый излучатель низкого давления на смеси гелия с парами воды / А.К. Шуаибов, А.Й. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера, Р.В. Грицак // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37, № 3. – С.64–67.
5. Шуаибов А.К. ВУФ-лампа на смесях инертных газов с молекулами воды с накачкой импульсно-периодическим емкостным разрядом / А.К. Шуаибов, А.Й. Миня, А.Н. Малинин, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т.78, №6. – С.932–936.
6. Грицак Р.В. ВУФ-лампа ємнісного розряду на сумішах $He-H_2O$ і $Ar-H_2O$ / Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуаїбов// Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2011. – № 29. – С.227–232.
7. Шуаибов А.К. ВУФ-лампа емкостного разряда на смеси паров воды с аргоном / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера, Р.В. Грицак // Оптический журнал. – 2012. – Т.79, № 8. – С.96–99.
8. Грицак Р.В. Емісійні характеристики наносекундного бар'єрного розряду в суміші аргону та гелію з парами важкої води (D_2O) / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомокі // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. – № 32. – С.73–76.
9. Шуаибов А.К. Импульсно-периодический ВУФ излучатель с накачкой барьерным разрядом в смеси гелия с парами тяжелой воды (D_2O) / А.К. Шуаибов, А.И. Миня,

- Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Квантовая электроника. – 2012. – В.42, №8. – С.747–749.
10. Грицак Р.В. Лампа бар'єрного розряду на сумішах інертних газів з парою важкої води / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.Й. Міня, З.Т. Гомоки // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. с № 31. – С.146–150.
 11. Шуайбов А.К. Оптические характеристики электроразрядного источника ультрафиолетового излучения на смеси аргона с парами «тяжелой» воды D₂O / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114, № 2. – С.42–45.
 12. 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.
 13. Шуайбов А.К. Газоразрядный источник неканцерогенного УФ-излучения на смеси гелия с парами тяжелой воды (D₂O) / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 3. – С.152–154.
 14. 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.
 15. 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. Tsymbaliuk // Journal of Applied Physics. – 2014. – V.116. – P. 113303 (1-6).
 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 // A.K. Shuaibov, R.V. Gritzak // High Volt. – 2017. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 78-81.
23. Патент України №60127, МПК H01S 3/097(2006.01). Вакуумно-ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парі води / Шуайбов 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.
24. Патент України №71686, МПК H01S 3/097 (2006.01). Ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парі важкої води / Шуайбов О.К., Миня О.Й., Грицак Р.В., Гомокі З.Т. // № u201115335; Заявл. 26.12.2011; Опубл. 25.07.2012, Бюл. №14.– 3 с.
25. Патент України №100155 МПК H01J 61/16 (2006.01). Вакуумно-ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парах води / Шуайбов О.К.,

Миня О.Й., Шевера І.В., Грицак Р.В., Гомокі З.Т. // № а201014168; Заявл. 29.11.2010; Опубл. 26.11.2012, Бюл. №22.–3 с.

26. 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.

Матеріали наукових конференцій:

1. 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.
2. Грицак Р.В. ВУФ-лампа ємнісного розряду на сумішах He-H₂O і Ar-H₂O / Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуаїбов // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011», Ужгород, Україна. – 24-27 травня, 2011. – С.183.
3. Hrytsak R.V. Ultraviolet emitter barrier discharge on the molecule of heavy water (D₂O) / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, I.V. Shevera, Z.T. Homoki //The 10th International conference «Atomic and molecular pulsed lasers», Tomsk, Russia. – 12-16 September, 2011. – P.104.
4. 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.
5. Hrytsak R. Emiteer barrier discharge in mixtures of argon and helium wich 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.
6. Грицак Р.В. Коротковолновая лампа с накачкой нансекундным барьерным разрядом на парах тяжелой воды (D₂O) / 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.
7. Грицак Р.В. Ультрафіолетова лампа на парі води з накачкою наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.І. Миня, З.Т. Гомокі, 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.
 8. Hrytsak R.V. Two-band UV-VUF 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.
 9. 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. Миня, З.Т. Гомокі // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013», Ужгород, Україна. – 20-23 травня, 2013. – С.295-296.
 10. Hrytsak R.V. Optical characteristics of nanosecond barrier discharge in a Kr-Ar-CCl₄ mixture / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // Proceedings of the XIIIth International young scientists conference on applied physic, Kyiv, Ukraine. – 12-15 June, 2013. – P. 202-203.
 11. 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.
 12. Hrytsak R.V. Emission and electrical characteristics of a barrier discharge in a Ar-CCl₄ 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.
 13. Hrytsak R.V. The resource and energy characteristics of the multiwavelength UV-VUV lamp barrier discharge in a mixture of Ar - CCl₄ and Kr - Ar - CCl₄ / 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ ДЖЕРЕЛ ВУФ І УФ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СУМІШІ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ З МОЛЕКУЛАМИ ВОДИ ТА ФРЕОНУ.....	27
1.1. Дослідження випромінювання радикала ОН в електричних розрядах.....	27
1.2. Дослідження характеристик випромінювання експлексів та ексимерів у електричних розрядах.....	34
Висновки до розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО І БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДІВ У СУМІШАХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ З МОЛЕКУЛАМИ ВОДИ ТА ФРЕОНУ.....	42
2.1. Схема експериментальної установки для дослідження електричних характеристик та випромінювання плазми.....	42
2.2. Схема вакуумно-газозмішувальної системи напуску пари води, рідкого фреону та інертних газів.....	44
2.3. Конструкції газорозрядних трубок для дослідження ємнісного і бар'єрного розрядів.....	45
2.4. Методика дослідження оптичних та електричних сигналів ємнісного і бар'єрного розрядів.....	47
2.5. Методика вимірювання імпульсів напруги, струму та потужності газового розряду.....	50
2.6. Методика дослідження потужності ВУФ- та УФ-випромінювання.....	51
2.7. Оцінка похибок вимірів при дослідженні ємнісного та бар'єрного розрядів.....	53
Висновки до розділу 2.....	55
РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАРАМЕТРИ І ФІЗИКА ПРОЦЕСІВ В ГАЗОРОЗРЯДНИХ ВАКУУМНО-УЛЬТРАФІОЛЕТОВИХ ТА УЛЬТРАФІОЛЕТОВИХ ДЖЕРЕЛАХ ВИПРОМІНЮВАННЯ У СУМІШАХ	

ІНЕРТНИХ ГАЗІВ (He, Ar) З МОЛЕКУЛАМИ ВОДИ (H ₂ O, D ₂ O).....	56
3.1. Дослідження характеристик лампи імпульсно-періодичного ємнісного розряду в сумішах He-H ₂ O(D ₂ O) і Ar-H ₂ O(D ₂ O).....	57
3.1.1. Дослідження оптичних характеристик збуджених радикалів OH(OD) в імпульсно-періодичному ємнісному розряді в сумішах He-H ₂ O(D ₂ O).....	58
3.1.2. Дослідження джерела ВУФ і УФ випромінювання ємнісного розряду в сумішах Ar-H ₂ O(D ₂ O).....	67
3.1.3. Моделювання параметрів плазми OH*- лампи розряду низького тиску в суміші He/H ₂ O.....	73
3.2. Дослідження характеристик УФ і ВУФ джерел випромінювання з накачуванням наносекундного бар'єрного розряду в сумішах гелію, аргону з парами "важкої" води	79
3.2.1. Оптичні характеристики лампи наносекундного бар'єрного розряду в суміші He-D ₂ O.....	80
3.2.2. Дослідження оптичних характеристик газорозрядної плазми випромінювання радикала OD в суміші Ar - D ₂ O	89
3.2.3. Електричні характеристики плазми бар'єрного розряду в суміші гелію та аргону з парами D ₂ O.....	93
3.3. Чисельні розрахунки параметрів плазми розряду в сумішах інертних газів з молекулою води (H ₂ O).....	98
3.3.1. Розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів ємнісного розряду в суміші He-H ₂ O.....	102
3.3.2. Чисельні розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів плазми газового розряду в суміші аргону з молекулою води.....	106
Висновки до розділу 3.....	113
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ЗБУДЖЕНИХ МОЛЕКУЛ ХЛОРИДУ АРГОНУ, ХЛОРИДУ КРИПТОНУ, МОЛЕКУЛ ХЛОРУ ТА РАДИКАЛІВ ГІДРОКСИЛУ В НАНОСЕКУНДНОМУ БАР'ЄРНОМУ РОЗРЯДІ	116

4.1. Характеристики наносекундного бар'єрного розряду в сумішах інертного газу з парою фреону (CCl_4).....	117
4.1.1. Емісійні характеристики плазми бар'єрного розряду в сумішах $\text{Ar-CCl}_4\text{-H}_2\text{O}$ і Ar-CCl_4	117
4.1.2. Електричні та ресурсні характеристики бар'єрного розряду в суміші аргону з парами CCl_4	126
4.1.3. Кінетика утворення ексимерних молекул ArCl^* , $\text{Cl}_2(\text{D}')$ в бар'єрному розряді в суміші Ar - CCl_4	130
4.2. Випромінювальні характеристики імпульсно-періодичного бар'єрного розряду в суміші криптону, аргону та пари фреону.....	132
4.2.1. Дослідження характеристик джерел випромінювання наносекундного бар'єрного розряду в суміші Ar-Kr-CCl_4	132
4.2.2. Енергетичні та електричні характеристики бар'єрного розряду в суміші криптону, аргону з парою CCl_4	135
4.3. Результати моделювання параметрів плазми бар'єрного розряду в сумішах інертних газів, аргону, криптону та пари фреону.....	138
4.3.1. Результати чисельного моделювання параметрів плазми електричного розряду в суміші аргону та пари CCl_4	141
4.3.2. Розрахунки параметрів плазми газового розряду в суміші Ar-Kr-CCl_4	145
Висновки до розділу 4.....	149
ВИСНОВКИ.....	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154
Додаток А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	174

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ББ – буферний балон;
БЖ – блок живлення;
ВГ – вимірювальна голівка;
ВГЗС – вакуумна газозмішувальна система;
ВМ – вакуумний монохроматор;
ВУФ – вакуумний ультрафіолет;
ДН – дільник напруги;
ЕКК – електронні кінетичні коефіцієнти;
ІДН – імпульсне джерело напруги;
К – колба;
П – підсилювач постійного струму;
ПР – пояс Роговського;
РТ – розрядна трубка;
СП – спектральний прилад;
УФ – ультрафіолет;
ФЕП – фотоелектронний помножувач;
ФН – форвакуумний насос;
ФРЕЕ – функція розподілу електронів за енергією.

ВСТУП

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.

Застосування відкритих металевих електродів веде до зменшення ресурсу роботи газорозрядних випромінювачів. Тому, доцільним є використання бар'єрного і ємнісного розрядів. До того ж було встановлено, що найбільших величин ресурсу можна досягти при збудженні цими двома видами розрядів [5]. Електроди в даних лампах винесені за межі плазмового середовища. Ресурс роботи таких випромінювачів досягає 2-2.5 тисяч годин у відпаяному режимі на одній робочій суміші. Крім того, використання ємнісного і бар'єрного розрядів дає свободу щодо геометричного дизайну ексиламп [6].

Унікальні властивості бар'єрного розряду обумовлюють його широке застосування в різних технологічних процесах, таких як генерація озону, модифікація поверхонь, контроль забруднень, дезинфекцію, ексімерні лампи і плазмові дисплейні поверхні [7].

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 [8], а вплив буферного газу гелію (He) на кінетику процесів та на ЕКК в плазмі низького і підвищеного тиску (суміші He-H₂O) 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 галогеновмісного 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 $\text{He-H}_2\text{O(D}_2\text{O)}$ 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 He(Ar)-H₂O(D₂O) може бути розроблена лампа з екологічно безпечними газами, випромінювання якої зосереджено головним чином у смугах OH(OD) (A→X) з максимумом при 308 нм і (C→X) – 144 нм, для застосування у медицині та біології.

2. Результати дослідження бар'єрного розряду наносекундної тривалості в сумішах Ar-CCl₄ та Kr-Ar-CCl₄ можуть бути використані для розробки багатосмугової ВУФ-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 багаторкратністю 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 у 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 physics (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 physics (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 досліджень, що представлені в цій роботі, опубліковано 43 наукові праці, з них 21 стаття у фахових наукових журналах, 4 патенти України на винахід та корисні моделі, 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.

РОЗДІЛ 1

СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ ДЖЕРЕЛ ВУФ І УФ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СУМІШАХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ З МОЛЕКУЛАМИ ВОДИ ТА ФРЕОНУ

Не лише лазери, але і джерела спонтанного УФ і ВУФ випромінювання знаходять все більш широке застосування в екології, мікроелектроніці, медицині і т.д. Найбільш потужними і ефективними некогерентними випромінювачами в УФ і ВУФ спектральному діапазоні є ексимерні та ексиплексні лампи. Головна перевага цих випромінювачів в порівнянні з випромінювачами, які містять ртуть - відсутність ртуті в робочому середовищі і більш різноманітні спектральні характеристики в УФ і ВУФ діапазоні довжин хвиль.

Як правило, в ексиплексних випромінювачах використовуються суміші інертних газів з галогенвмісними молекулами. Разом з ексилампами все більший інтерес представляють і УФ та ВУФ лампи на парах води, оскільки в них використовується екологічно чисте і дешеве робоче середовище, що робить актуальним дослідження характеристик і параметрів плазми різних типів газового розряду в сумішах з молекулами води.

В даному розділі наведено короткий огляд експериментальних і теоретичних досліджень розрядних джерел УФ і ВУФ випромінювання молекул ОН, ArCl , Cl_2 та KrCl .

1.1. Дослідження випромінювання радикала ОН в електричних розрядах

В ряді праць [9-14] наведені результати дослідження поздовжнього тліючого розряду в суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ (D_2O). Визначено найбільш оптимальні робочі газові суміші для одержання інтенсивного ВУФ і УФ випромінювання.

Дослідження поперечного об'ємного розряду в суміші $\text{He/повітря/H}_2\text{O}$ представлені в [15]. При зміні парціального тиску гелію в діапазоні 10-45 кПа і при $p(\text{повітря}) = 130 \text{ Па}$, $p(\text{H}_2\text{O}) = 50\text{-}100 \text{ Па}$ основне випромінювання плазми сконцентровано в широкій смузі з $\lambda_{\text{max}} = 309.7 \text{ нм}$ в УФ-області довжин хвиль.

В праці [16] в рамках кінетичної нульмірної моделі проводилась оцінка

густини радикалів OH , яка отримана в плазмових струменях атмосферного тиску на основі суміші $\text{He-H}_2\text{O}$. Збільшення вмісту молекул H_2O приводить до насичення концентрації радикалів OH .

Результати експериментів з розсіювання молекулярного пучка при вивченні взаємодії молекул води з атомами He , Ne , Ar , Kr та Xe , наведені в [17, 18]. Для суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ через дуже слабе міжмолекулярне електричне поле, очікується, що міжмолекулярна взаємодія матиме майже чистий характер сили Ван дер Ваальса.

В праці [19] представлена глобальна модель низькотемпературної плазми атмосферного тиску в суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ та результати числового моделювання параметрів плазми. Така глобальна модель використовується переважно для виявлення основних реакцій при низьких температурах плазми. Результати моделювання показали, що процеси Пеннінга є основним механізмом іонізації в цьому розряді (1-3 % води) і є основним механізмом утворення електронів у плазмі, а кластери води визначаються як домінуючі заряджені частинки, коли концентрація води перевищує $\sim 0,01$ %.

Тліючий розряд атмосферного тиску в суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ з різною концентрацією води досліджувався в паралельному металічному пластинчатому реакторі за допомогою мас-спектрометрії [20]. Позитивні та негативні потоки іонів досліджувалися як функція різної концентрації води та потужності розряду. Зі зменшенням потужності розряду та збільшенням концентрації водяної пари при постійній потужності зростає концентрація позитивних і негативних кластерних іонів води. Утворення негативних іонів і кластерів води при більшій концентрації води може сприяти нерівноважності плазми [21]. Утворення збуджених радикалів $\text{OH}(\text{A})$ можливе за рахунок безпосереднього дисоціативного збудження води або дисоціативної рекомбінації H_2O^+ або H_3O^+ [21]. Внаслідок великої енергії метастабільних атомів He (19.8 eV і вище) вони переважно іонізують воду замість утворення $\text{OH}(\text{A})$ [22].

В працях [23-25] експериментально досліджено тліючий розряд в інертних газах He , Ne , Ar , Xe при додаванні в нього молекул OH . Тиск інертних газів змінюється у діапазоні від 400 Па до 4 кПа, а концентрація молекулярної добавки

становить 10^{14} - 10^{16} см⁻³. Додавання молекул ОН в розряд сильно змінює як електричні, так і оптичні властивості плазми. Для досліду використовувалися кварцові розрядні трубки радіусом 0.01 м і довжиною близько 0.1 м. Спектр випромінювання додатнього стовпа розряду в суміші аргону з радикалами ОН представлений смугою 306.4 нм (нижній резонансний стан $^2\Sigma(A)$ радикала ОН з енергією збудження 4.06 еВ, який при спонтанному розпаді дає смугу випромінювання з довжиною хвилі 306.4 нм). При досить високому тиску інертного газу і малих значеннях парціального тиску води можливе утворення змішаних кластерів типу $Ar_n(H_2O)_m$, наявність яких може позитивно позначитися на характеристиках розряду [25].

В [8, 26-31] проводилось вивчення характеристик ємнісного, бар'єрного, поздовжнього імпульсно-періодичного розрядів на сумішах, де одним з компонентів були пари води, перекис водню, водний розчин аміаку. У спектрах випромінювання цих розрядів спостерігається випромінювання смуги гідроксилу $OH(A \rightarrow X)$. Результати моделювання характеристик і параметрів ємнісного розряду в парах води показали, що швидкість утворення збуджених радикалів OH^* у розряді істотно вище швидкості утворення випромінюючих станів атомів водню і кисню [30].

Результати дослідження низькотемпературної плазми бар'єрного розряду в суміші $Ar-H_2O$ в ультрафіолетовій (УФ) області спектру представлені в [31]. Основна частина випромінювання плазми знаходиться в діапазоні 305-325 нм. Додавання аргону ($p(Ar) = 24$ кПа) в робоче середовище приводить до збільшення потужності УФ випромінювання збуджених молекул гідроксилу в 9 разів при тиску парів води ~ 0.1 кПа

В праці [32] наведено результати вимірювання розподілу інтенсивностей обертальних ліній переходу $^2\Sigma^+ - ^2\Pi$ ОН та OD у височастотному безелектродному розряді. Оптимальний тиск пари води складає – від 3.33 Па до 426 Па, а аргону, гелію, азоту та кисню – до 1.3 кПа. Встановлено, що аргон впливає на збільшення інтенсивності (0;0) смуги $^2\Sigma^+ - ^2\Pi$ ОН та OD більш ніж у десять разів.

Плазмовий струмінь атмосферного тиску, який утворюється в сумішах Ar /пари води та вплив вмісту води на властивості плазми вивчено в [33]. Плазма, що

утворюється в суміші (0.05%) Ar/пари вода, має більш високу інтенсивність випромінювання радикалів OH у спектрах, ніж у чистому аргоні. Густина плазми становить близько $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. У чистому аргоні електронна температура оцінюється на рівні $- 0.97 \text{ eV}$ і зменшується зі збільшенням вмісту пари води в плазмі. Виміряна температура газу зростає з додаванням пари води до аргону від 625 до 1125 K.

Струменева плазма бар'єрного розряду є ефективним джерелом для утворення радикалів OH, де вихідний коефіцієнт радикалів можна регулювати шляхом зміни вмісту водяної пари [34]. Авторами виявлено, що цей тип плазми підтримується за допомогою фотоіонізації, а мольна частка гелію відіграє ключову роль у підтримці розряду.

В [35] досліджено плазмовий струмінь атмосферного тиску, що утворюється в суміші Ar з водяною парою. Збільшення вмісту води приводить до зменшення вихідної потужності та асиметрії сили струму. Також виявлено, що температура розряду збільшується з 450 K (Ar) до 850 K із збільшенням вмісту води до 7.6 %. Максимальне випромінювання радикалів OH виявляється при вмісті пари води 0,035 % у плазмі, коли температура струменя близька до 450 K.

Вивчено спектральні та електричні характеристики розряду постійного струму низького тиску в сумішах інертних газів Ne, Ar або Kr з парою води [36, 37]. Спектри розряду в сумішах інертного газу (Ne, Ar і Kr) та водяної пари досліджувалися в діапазоні 220-940 нм при різних температурах стінки газорозрядних трубок та різного тиску інертного газу. В суміші Ar-H₂O спостерігається максимальне випромінювання смуги з максимумом 306.4 нм радикала OH. Молекули води і молекули гідроксилу можуть утворювати такі комплекси, як (H₂O)_{n+1}, (OH)_{m+1}, (OH)_n (H₂O)_m, A_k(H₂O)_l, A_k(OH)_l та ін. (k, l, m, n ≥ 1). В спектрах сумішей інших інертних газів з парою води спостерігається менш інтенсивне випромінювання радикала OH. Ефективність Ar+H₂O - розряду становить 20-22%. Коефіцієнт корисної дії лампи (Ar + H₂O) становить близько 20-22 лмВт⁻¹. Також, результати показали, що додавання водяної пари до аргону сильно впливає на електричні характеристики розряду.

В праці [38] вивчалася плазма струменя атмосферного тиску в суміші Ar-H₂O. Зі збільшенням співвідношення H₂O/Ar від 0.0 до 1.9%, довжина плазмового струменя зменшується з 0.011 до 0.004 м, а коли співвідношення вище ніж 1.9%, то плазмовий струмінь стає нестабільним. В спектрі випромінювання мікрохвильової плазми зі збільшенням концентрації води спостерігається смуга ОН (А→Х). Отже, збільшення концентрації молекул H₂O у плазмі приводить до нестабільності плазми та зменшення довжини струменя. Збільшення вмісту пари води приводить до більш швидкого "гасіння" радикалів ОН уздовж осі струменя. З огляду на низьку температуру газу 420-910 К та низьку температуру електронів 0.5-5 еВ вздовж осі струменя, утворення радикала ОН відбувається переважно через вимушену дисоціацією H₂O електронним ударом (коли енергія електронів висока 1-5 еВ) та дисоціативну рекомбінацію H₂O, що виникає в процесі іонізації Пеннінга (енергія електронів нижче 2 еВ).

Моделювання спектрів випромінювання ОН, N₂ та N₂⁺ в спектральному діапазоні 200-450 нм дозволяє визначити електронну температуру збудження (T_{збудж}), яка рівна 8000-9000 К, а коливальна температура (T_{колив}), температура обертання (T_{обер}) і температура газу (T_{газу}) в різних місцях вздовж осі плазмового стовпа знаходиться в межах 1800-2200 К [39].

Спектроскопічне вивчення електричного розряду в суміші Ar-H₂O в діапазоні 215-950 нм проводилось в [40]. Плазма Ar-H₂O при загальному тиску 266 Па збуджувалася в спіральній порожнині. Частота збудження складає 27 МГц. Потужність становить – 30 Вт. Концентрація аргону в суміші варіюється в діапазоні від 0 до 100%, а парціальний тиск пари води підтримується на рівні ~ 2 кПа. Інтенсивність випромінювання гідроксилу ОН зростає з додаванням аргону. Проте максимальна емісія досягається в суміші 5% H₂O/95% Ar, тоді як в чистому аргоні інтенсивність трохи зменшується. Крім того, в розряді спостерігаються атомні спектральні лінії водню (лінії з серії Бальмера при 656, 486, 434, 410 і 397 нм) та спектральні лінії атома кисню і смуги молекули азоту.

В праці [41] приведені результати вимірювання густини радикалів ОН в основному стані для плазми високого тиску шляхом люмінесценції під дією

лазерного збудження. Встановлено, що абсолютна густина ОН становить $2.5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ на відстані 0.001 м від струменевого сопла. В даній роботі аналізуються та обговорюються різні механізми утворення ОН(X) в ядрі плазмового струменя. Авторами встановлено, що в утворенні гідроксилу ОН переважає процес дисоціації H_2O викликаний електронними зіткненнями в розряді.

Дослідження бар'єрного розряду у вологому аргоні ($[\text{H}_2\text{O}]=220 \text{ млн}^{-1}$) методом крос-кореляційної спектроскопії розглядається в [42]. У отриманому спектрі бар'єрного розряду у вологому аргоні в діапазоні 200 – 850 нм спостерігаються крім спектральних ліній аргону і смуги радикала ОН*, а також смуги другої позитивної системи молекули азоту.

Про створення УФ -лампи мікросекундного бар'єрного розряду на парах води з максимумом випромінювання при $\lambda=309.2 \text{ нм}$ $\text{A}^2\Sigma \rightarrow \text{X}^2\Pi$ гідроксилу ОН та деяких її характеристиках повідомлялось в [43]. Площа поверхні, що випромінює і густина середньої потужності цієї лампи складають $\sim 700 \text{ см}^2$ і 1.5 мВт/см^2 , відповідно; повна середня потужність дорівнює 1.1 Вт; ефективність пристрою становить близько 0.4 %. Як вже відмічалось, для збудження робочої суміші автори використовували бар'єрний розряд, протікання струму в якому обмежено хоча б одним шаром діелектрика, а розміри електродів істотно перевищують міжелектродний проміжок [43].

На рис. 1.1 наведені середня потужність і ефективність випромінювання А-Х - смуги радикала ОН при різних тисках Ar і тиску пари води близько 173.30 Па. При низькому тиску пари води ($< 66.6 \text{ Па}$) і тисках аргону ($< 24 \text{ кПа}$) розряд є дифузним. З підвищенням тиску води і аргону розряд повністю або частково переходить в філаментарну форму.

Для збудження газової суміші Ar- H_2O використовувався низькоенергетичний пучок електронів (15 кеВ) [44]. У спектральному діапазоні 120-450 нм авторами отримане випромінювання гідроксилу ОН з максимумом 310 нм. Найбільша інтенсивність випромінювання ОН спостерігається при найнижчому тиску Ar та концентрації водяної пари близько 0.02%. Основним каналом утворення ОН (А) в

суміші водяної пари та аргону є передача енергії з чотирьох станів $4s \text{ Ar}^*$ до H_2O з наступною дисоціацією.

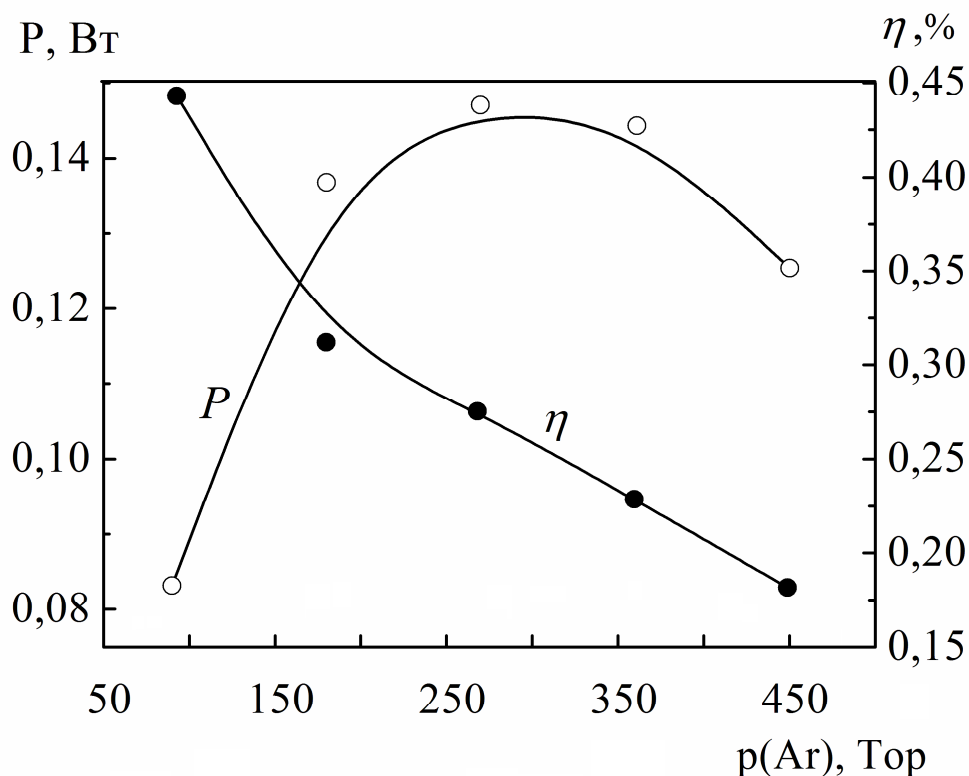


Рис.1.1. Середня потужність і ефективність випромінювання А-Х - смуги ОН при різних тисках Ar і тиску H_2O близько 1.3 Тор [43].

В праці [45] проаналізована антимікробна дія наносекундного і мікросекундного імпульсного бар'єрного розряду. Показано, що наносекундний бар'єрний розряд інактивує бактерії *Escherichia coli* над більшою поверхнею і може проникати у більш заглиблені ділянки ніж мікросекундний розряд. Також, наносекундний бар'єрний розряд вбиває бактерії швидше ніж його аналог.

Емісійний спектр плазми бар'єрного розряду в суміші пари води-повітря в спектральному діапазоні 200-800 нм вивчався в [46, 47]. В цій області спектру спостерігаються смуги випромінювання радикала ОН і молекулярного азоту. Інтенсивність цих смуг випромінювання зростає при збільшенні концентрації пари води в повітрі, а при вологості 60% спостерігається насичення. Автори наголошують, що високий окислювальний потенціал ОН-радикалів робить електророзрядну обробку води перспективним напрямком [47].

Випромінювання смуги ОН також спостерігаються в спектральному діапазоні 200-1100 нм при вивченні високовольтного імпульсного розряду у повітряно-капельному середовищі [48].

В праці [49] було запропоновано новий спосіб вимірювання концентрацій молекул H_2O в плазмі для суміші інертних газів з молекулами води. Для вимірювання концентрації молекул води в плазмі авторами було використано дані про абсолютні інтенсивності в спектрах спеціально обраних фрагментів обертальної структури електронно-коливальних смуг ОН в сукупності з даними про концентрації електронів і розподілів електронів за швидкостями (енергіями). Для сумішей $\text{He-H}_2\text{O}=\text{x}:(\text{x}-1)$ при $\text{x} = (0; 0.075; 0.15)$ отримані ФРЕЕ. Загальний тиск сумішей складає 100 Па.

Дослідження тліючого розряду в інертних газах з парами води проводились в [50]. Авторами в даній статті вивчалась поведінка концентрації пари води та її фрагментів у плазмі вологого повітря. Розрахунки, які представлені в цій праці, виконувались для суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ (99-148) при тискові 50 Па у кварцовій трубці з внутрішнім діаметром 0.02 мм.

1.2. Дослідження характеристик випромінювання ексіплексів та ексимерів у електричних розрядах

Ексилампи – джерела спонтанного випромінювання, в яких використовується нерівноважне випромінювання ексимерних або ексіплексних молекул, особливістю яких є їх стійкість в електронно збуджених станах та відсутність міцного зв'язку в основному електронному стані [51]. Перевагами ексиламп з точки зору їх застосування є велика енергія фотонів (3.5-10 eV), відносно висока питома потужність випромінювання, вузька смуга випромінювання і відсутність ртуті в робочому середовищі лампи.

Принцип дії електророзрядних ексиламп заснований на збудженні робочого середовища, що міститься в кварцовій колбі випромінювача, при проходженні електричного струму [51]. Далі в розрядній плазмі утворюються ексимерні або ексіплексні молекули, які випромінюють в УФ або ВУФ області спектру.

Одними з різновидів безелектродного розряду з діелектричними бар'єрами є ємнісний та бар'єрний розряди [51]. Чим відрізняється ємнісний розряд від бар'єрного? Це низьким тиском робочої суміші (до десятків Торр) і великою міжелектродною відстанню (десятки сантиметрів). Ємнісний і бар'єрний розряди, які використовуються для збудження ексіламп, відносяться до типу самостійних розрядів [51]. Для збільшення ресурсу роботи випромінювача, як правило, використовуються безелектродні розряди. При використанні таких розрядів плазма не контактує з електродами, що забезпечує більший ресурс роботи випромінювача.

Бар'єрним називають розряд, протікання струму в якому обмежено, принаймні, одним шаром діелектрика, а характерні розміри електродів істотно перевищують величину міжелектродного проміжку [2]. Плазма бар'єрного розряду має ряд характерних особливостей, таких як порівняно високий тиск (сотні Торр і вище); просторова неоднорідність і мінімальна тривалість протікання різних фізико-хімічних процесів; сильна нерівноважність плазми; можливість варіації приведеної напруги електричного поля E/p ; можливість масштабування і завдання довільної геометрії поверхні, що випромінює лампа. Бар'єрний розряд іноді ще називають "тихим" [2].

"Тихий" розряд – це нерівноважний розряд, який може працювати до тиску декількох бар [52, 53]. Основна характеристика "тихого" розряду полягає в тому, що використовуються вузькі розрядні проміжки величиною в кілька міліметрів і щонайменше один з електродів має бути покритим ізолюючим шаром. З цієї причини "тихий" розряд також називають діелектричним бар'єрним розрядом або просто бар'єрним розрядом. Цей розряд широко використовується в промисловості для отримання озону з повітря або кисню. Тому в літературі можна знайти і іншу назву озонаторний розряд [54].

Потрібно відмітити те, що у міжелектродному просторі здійснюється специфічна форма розряду, що складається з великої кількості мікророзрядів з густиною струму в них від 0.1 до 1 кА/см² і часом протікання струму через них близько 10-50 нс [2]. Мікророзряди – це зони з підвищеною густиною струму, що мають форму циліндра або двох конусів, звернених один до одного вершинами і

основами, які формуються при тисках газу більше кількох Торр і розміщені на поверхні діелектрика [2].

Всередині мікророзрядних ниток енергетичні електрони можуть збуджувати атоми інертного газу (Rg), які при відповідних умовах реагують на утворення димерів Rg/Rg або димерів Rg/галогену. Можна отримати ряд вузькосмугових джерел УФ в області довжин хвиль від 120 нм до 360 нм: з чистими Rg димерами Ar_2^* , Kr_2^* , Xe_2^* , їх хлоридами ArCl^* , KrCl^* , XeCl^* та їх фторидами ArF^* , KrF^* , XeF^* [53]. На рис. 1.2 показані три хлоридних спектри аргону, криптону і ксенону, що забезпечує інтенсивне вузькосмугове випромінювання відповідно 175, 222 і 308 нм [52-56].

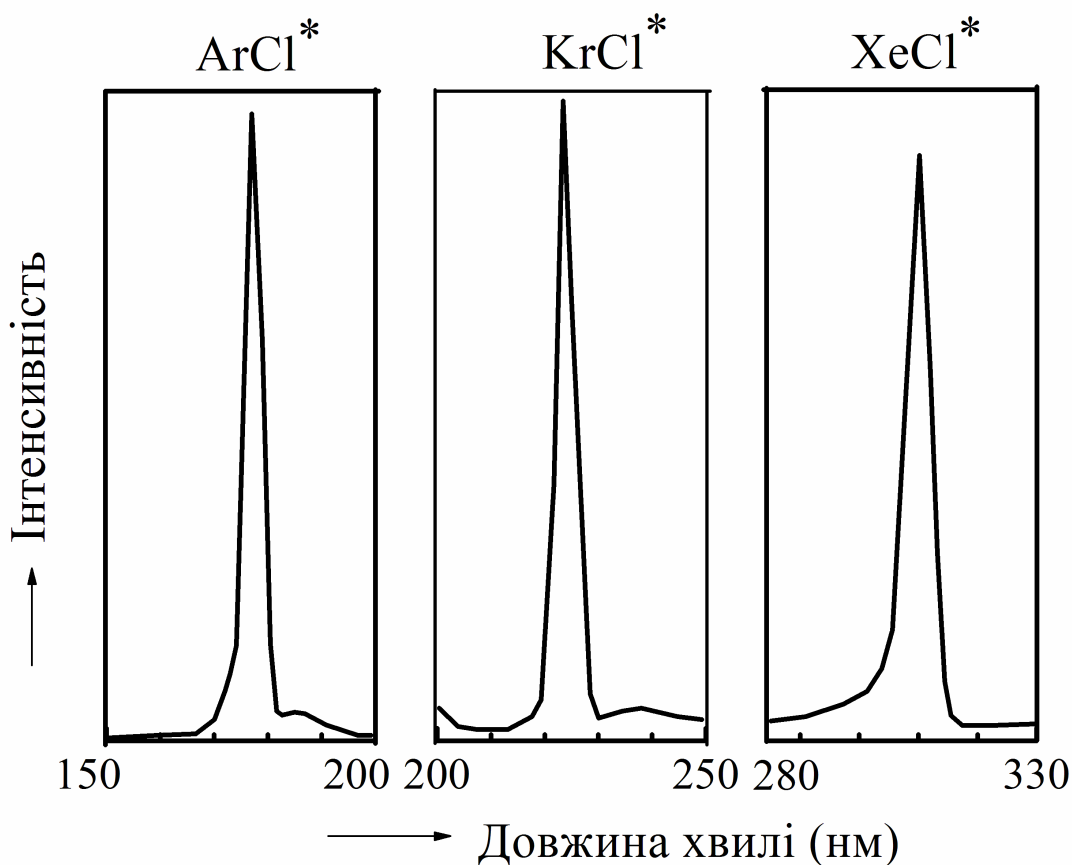


Рис.1.2. Ексімерне випромінювання хлоридів інертного газу [52-56].

Шляхом зміни геометрії розрядного проміжку, типу використовуваного діелектрика можна керувати величиною середньої енергії електронів та їх концентрацію [2].

Таблиця 1.1

Характеристики ексиламп ємнісного, бар'єрного розрядів, для яких проводилася реєстрація спектрів [51].

Характеристика	Типи розряду					
	Ємнісний				Бар'єрний	
Робоча суміш	Xe-Cl ₂	Kr-Cl ₂	Xe-Br ₂	Xe-I ₂	Xe-Cl ₂	Kr-Cl ₂
Тиск робочої суміші, кПа	0.8	0.8	0.6	0.2	15.9	26.6
Міжелектродний проміжок, м	0.2	0.2	0.2	0.5	0.008	0.008
Зовнішній діаметр трубки, м	0.038	0.042	0.042	0.035	0.065	0.065
Довжина хвилі максимуму спектрального розподілу, нм	308	222	282	206	308	222

Тривалість функціонування УФ ексиплексних ламп в газостатичних умовах роботи обмежує деградація робочого середовища внаслідок протікання хімічної реакції галогену з електродами або з кварцом колби лампи.

Ексилампи, для збудження яких використано безелектродний ємнісний розряд, мають певну перевагу відносно ексиламп бар'єрного розряду, оскільки питома потужність збудження і, відповідно, теплова потужність в цьому випадку менша, що приводить до збільшення ресурсу роботи випромінювача [51].

В праці [57] авторами вперше одержані спектральні і енергетичні характеристики ексиламп бар'єрного розряду в сумішах Ar-Kr-Cl₂ та Ar-Kr-Br₂.

Щоб отримати максимальні енергетичні характеристики випромінювання експериментально досліджували бінарні суміші Kr-Cl₂=(100-500)-1 та Ar-Cl₂=(100-500)-1. Встановлено оптимальне співвідношення тисків робочої суміші – 250 -1. При переході від бінарної суміші до потрійної Ar-Kr-Cl₂, в спектрі, аналогічно до спектрів у суміші Kr-Cl₂, переважає смуга B→X KrCl* λ=222 нм. Менш інтенсивною є смуга D'-A' Cl₂* λ=258 нм. Основними каналами утворення збуджених молекул дигалогенів є процеси [57]:



де RX^* -ексиплексна молекула, R – атом інертного газу, X^* - збуджений атом галогену, X_2^* - збуджена молекула галогену.

Встановлено, що зі зменшенням парціального тиску криптону в робочій суміші значення потужності і ефективності випромінювання потрібної суміші Ar-Kr-Cl₂ подібні за величиною до енергетичних характеристик випромінювання бінарної суміші Ar-Cl₂. Ефективність випромінювання багатосмугових ексиламп не перевищує 1.7% при потужності 1.8 Вт.

Бар'єрний розряд у суміші Ar-Cl₂ досліджувався в працях [58-60]. В спектрі даного розряду спостерігаються випромінювання смуги $^3P_{2g} - ^3P_{2u}$ молекули Cl₂ з потужністю і ефективністю 1.3 Вт і 0.76 % відповідно. Діапазон тисків суміші Ar-Cl₂ = 400-1 варіюється від десятків Тор до 100 кПа.

Поперечний високочастотний розряд частотою $f=1.76$ мГц використовувався для збудження суміші Ar-Cl₂ [61]. Відстань між електродами складає 0.022 м. Парціальний тиск аргону змінюється в діапазоні 50-800 Па, а хлору – 40 - 200 Па. Спектр випромінювання плазми даного розряду представлений смугами 257 нм Cl₂(D'-A'), 200 нм Cl₂^{**} і 175 нм ArCl(B-X). Середня потужність УФ-ВУФ випромінювання збільшується зі збільшенням тиску аргону з 50 до 400 Па і її найбільший вихід спостерігається для суміші $p(\text{Ar})-p(\text{Cl}_2)=400-(30-40)$ Па.

У роботі [62] представлені результати дослідження УФ і ВУФ випромінювання плазми поздовжнього розряду в суміші He/CF₂Cl₂ низького тиску в спектральному діапазоні 130-300 нм, який запалювався в кварцовій трубці з міжелектродною відстанню 100 мм і внутрішнім діаметром 0.05 м. Оптимальний тиск фреону-12 для даної суміші знаходиться в діапазоні 0.3-0.5 кПа, гелію – 5-6 кПа. Зі збільшенням тиску фреону-12 спостерігається спад інтенсивності смуг. До зростання інтенсивності смуг та інтенсивності випромінювання смуги іонів хлору приводить збільшення струму в діапазоні 2-30 мА. Сумарна потужність випромінювання досягає 1.5 Вт при ККД ≤ 3 %.

В спектрі піднормального тліючого розряду основним є випромінювання смуг з $\lambda=175$ нм (ArCl (B-X)) і 180-195 нм (Cl₂ ($^1\Sigma-^1P_4$)) [4]. Також виділяється максимум континууму молекули Cl₂ при $\lambda=200$ нм, а також смуга з $\lambda=258$ нм (Cl₂ (D'- A')). При

тиску суміші Ar-Cl_2 більшому 5 кПа отриманий стійкий контрагований розряд. Цей розряд представляє інтерес для збільшення ресурсу роботи, так як не дотичний з внутрішньою поверхнею розрядної трубки.

Результати дослідження характеристик багатоелектродного коронного розряду, який вивчався в системі електродів голка-сітка, в сумішах He-Kr(Xe)-CCl_4 представлені в роботі [63]. В УФ області спектру коронного розряду спостерігається утворення молекул Cl_2 з максимумом $\lambda=258$ нм і радикалів CCl^* з максимумом $\lambda=278$ нм. Низька інтенсивність випромінювання смуги CCl^* пов'язана з швидкими реакціями його гибелі в зіткненнях з іншими радикалами або молекулами Cl_2^* .

Характеристики і параметри плазми тліючого розряду в сумішах Ar-Kr-Cl_2 і Kr-Xe-Cl_2 представлені в [64]. В спектральному діапазоні 170-310 нм спостерігаються смуги випромінювання з максимумами при 175 нм ArCl (B-X), 199 нм KrCl (D-X), 200 нм Cl_2^{**} , 222 нм KrCl (B-X), 236 нм XeCl (D-X), 258 нм Cl_2 (D'-A') і 308 нм XeCl (B-X). Оптимальний парціальний тиск хлору для всіх сумішей знаходиться в діапазоні 150-300 Па, а оптимальні парціальні тиски важких інертних газів — $p(\text{Ar})-p(\text{Kr,Xe})=(30-40)\cdot 10^{-1}$, $p(\text{Kr})-p(\text{Xe})=(10-15)\cdot (3-4)\cdot 10^{-1}$. За утворення ексиплексних молекул відповідають "гарпунні" реакції, реакції заміщення важких інертних газів і процеси коливальної релаксації.

В праці [65] досліджувався імпульсний поперечний розряд в суміші Ar-Kr-Xe-Cl_2 ($p=2-30$ кПа). Розряд запалювався в середовищі розміром $0.18 \times 0.022 \times 0.01$ м при міжелектродній відстані 0.022 м і є багатохвильовим джерелом ВУФ і УФ випромінювання з $\lambda=175, 222, 236, 258$ и 308 нм (ArCl (B-X), KrCl (B-X), XeCl (D-X), Cl_2 (D'-A'), XeCl (B — X)). Оптимальний тиск газової суміші складає 15-20 кПа. Парціальний тиск хлору становить 0.2-0.4 кПа, а парціальний тиск Kr, Xe - 0.2-0.5 кПа. Розподіл інтенсивності випромінювання в досліджуваному розряді в значній мірі визначається заміщенням атомів Ar і Kr атомами Xe при утворенні ексимерних молекул.

Емісійні характеристики імпульсно-періодичної ексилампи з трьома діелектричними бар'єрами в суміші Kr-SF_6 та Kr-CCl_4 представлено в [66]. Спектр випромінювання даного розряду представлений смугами 222 нм KrCl(X-B) і 248 нм

KrF(X–B). Використання двох незалежних об'ємів із сумішами Kr-SF₆ і Kr-CCl₄ є більш ефективним, ніж застосування потрібної суміші Kr-SF₆-CCl₄ [67].

В праці [68] представлені результати дослідження люмінесцентних і електричних характеристик лампи бар'єрного розряду в суміші Kr-CCl₄=150-1. В спектрі випромінювання розряду в суміші Kr-CCl₄ спостерігаються випромінювання експлексу KrCl* ($\lambda=222$ нм; B→X) та молекули Cl₂* ($\lambda=258$ нм). Експерименти проводились для чотирьох значень добутків pd (7.6, 9, 12 та 14) · 10³ Па·см (де p – тиск газу, d – відстань між електродами). Максимальна потужність УФ-випромінювання складає 0.23 Вт. Також, в даній роботі авторами приведено основні плазмохімічні процеси, які відбуваються в суміші Kr-CCl₄.

Результати дослідження емісійних характеристик збудження α -частинками ²¹⁰Po сумішей інертних газів з CCl₄ та NF₃ представлені в [69]. У спектрах випромінювання плазми на основі газової суміші Ar-Kr-CCl₄ спостерігається смуга Cl₂ (~257 нм).

Результати моделювання діелектричного бар'єрного розряду в суміші Ar-Cl₂=90%-10% представлені в праці [70]. Для розрахунку застосовувалась одновимірний модель рідини, яка дозволяє дослідити вплив таких параметрів, як амплітуда і частота напруги на характеристики плазми в суміші інертного газу з добавкою галогену.

Висновки до розділу 1

1. Випромінювання радикала OH ($\text{A} \rightarrow \text{X}$) спостерігається у тліючому, об'ємному, ємнісному, високочастотному безелектродному та у мікросекундному бар'єрному розрядах. Також випромінювання гідроксилу OH спостерігається в дослідах з використанням плазмового струменя атмосферного тиску на сумішах інертних газів з додаванням молекул води. Наразі характеристики і параметри наносекундних бар'єрного і ємнісного розрядів, які використовуються для збудження робочих інертних газів сумішей з парою води, вивчено недостатньо.

2. Емісійні характеристики плазми на суміші Ar-CCl_4 , Ar-Kr-CCl_4 є мало дослідженими. Тому актуальним є дослідження характеристик плазми бар'єрного розряду в сумішах інертних газів з молекулою фреону.

3. Встановлені фізичні процеси внаслідок моделювання електричних розрядів на сумішах інертних газів з молекулою води, фреону та галогеном Cl_2 можуть бути використані для аналізу процесів в даній дисертаційній роботі; актуальним залишається питання використання робочих середовищ, які б були екологічно чистими і дешевими типу сумішей інертних газів з молекулами води та галогенвмісними сполуками.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО І БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДІВ У СУМІШАХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ З МОЛЕКУЛАМИ ВОДИ ТА ФРЕОНУ

Дослідження оптичних і електричних характеристик газорозрядної плазми дають можливість виявити основні фізико-хімічні процеси, які відбуваються в плазмі газового розряду.

В даному розділі представлена методика дослідження електричних характеристик та випромінювання плазми 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, конструкція розрядних трубок для запалювання ємнісного і бар'єрного розрядів, а також методика вимірювання абсолютної потужності ВУФ та УФ випромінювання радикалів гідроксилу, хлоридів інертних газів і молекул хлору. Результати цих досліджень опубліковано в працях [71-112].

2.1. Схема експериментальної установки для дослідження електричних характеристик та випромінювання плазми

Експерименти з дослідження оптичних і електричних характеристик плазми ємнісного та бар'єрного розрядів у суміші інертних газів з молекулами води (H_2O , D_2O) та фреону (CCl_4) проводились на експериментальній установці, загальна схема якої приведена на рис. 2.1.

До основних вузлів експериментальної установки відносяться: газорозрядні трубки на основі ємнісного та бар'єрного розрядів, вакуумна газозмішувальна система, вакуумний монохроматор або монохроматор МДР-2, високовольтне джерело живлення, а також система реєстрації електричних і оптичних характеристик наносекундних ємнісного і бар'єрного розрядів.

Імпульсний бар'єрний розряд запалювався за допомогою джерела імпульсів високої напруги з резонансною перезарядкою накопичувальної імпульсної ємності,

виготовленої з конденсаторів КВИ-3. Сумарна ємність модулятора становила 1.54 нФ, а в якості комутатора використовувався водневий тиратрон ТГИ-I-1000/25.

Генератор наносекундних імпульсів формував два імпульсних сигнали: один без затримки, для запуску тиристора перетворювача напруги, а другий з часовою затримкою, для запуску комутатора випромінювача.

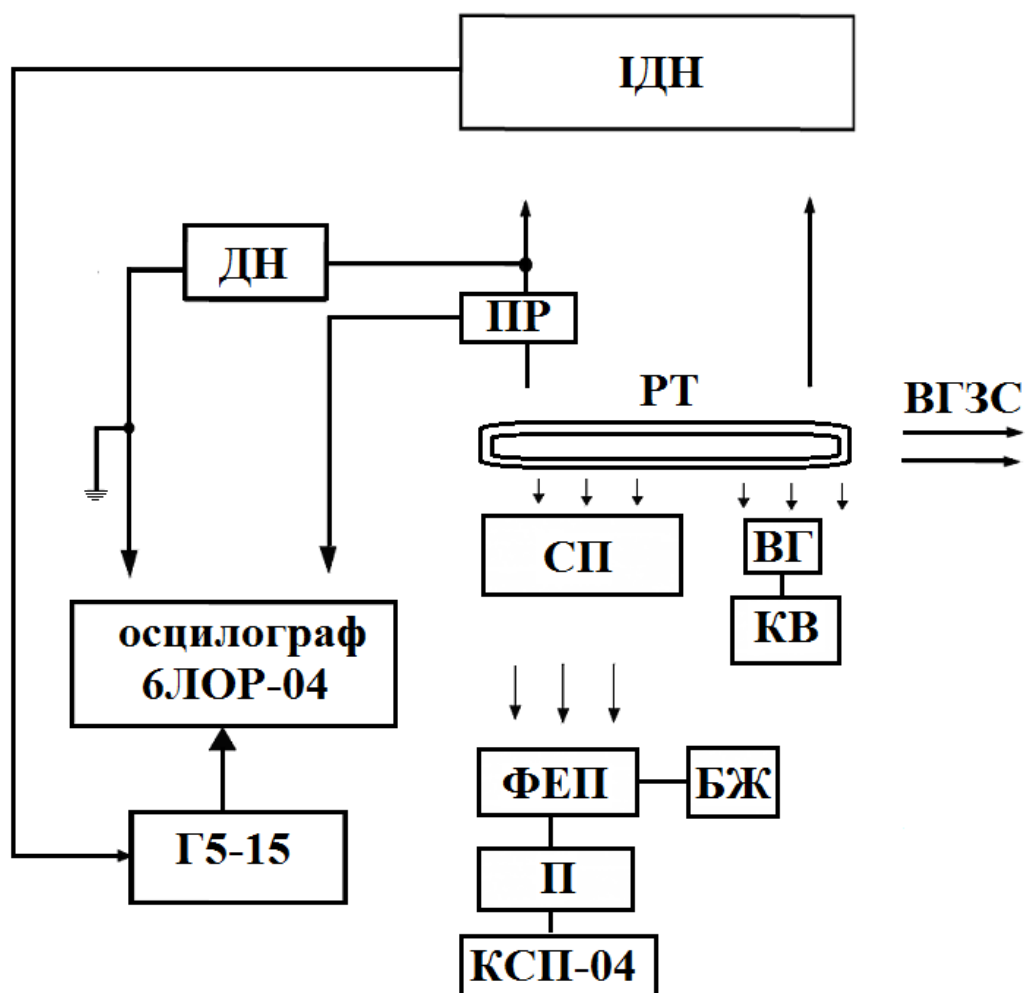


Рис. 2.1. Загальна схема експериментальної установки: ІДН – імпульсне джерело напруги; ВМ – вакуумний монохроматор; ВГЗС – вакуумна газозмішувальна система; ФЕП – фотоелектронний помножувач; БЖ – блок живлення; П – підсилювач постійного струму, КСП-4 – електронний потенціометр; ПР – пояс Роговського; ДН – дільник напруги; Г5-15 – генератор імпульсів; СП – спектральний прилад.

2.2. Схема вакуумно-газозмішувальної системи напуску пари води, рідкого фреону та інертних газів

Для проведення дослідження плазми випромінювачів з ємнісним та бар'єрним розрядом була використана вакуумно-газозмішувальна система (рис. 2.2.). Ця система складалась з об'єму, де відбувається змішування газів, форвакуумного насосу, балонів з газами, вакуумметра і манометра.

Вакуумно-газозмішувальна система була розроблена таким чином, що дозволяла застосовувати для дослідження газові суміші в досить широкому діапазоні парціальних тисків і відкачувати розрядні трубки до залишкового тиску $13.33 \dots 0.06$ Па.

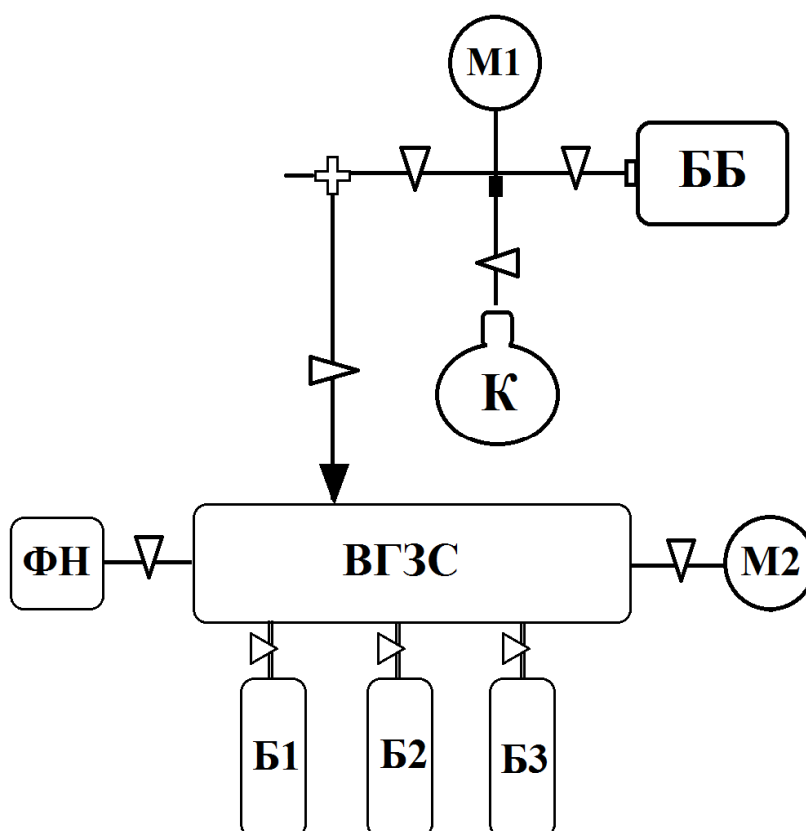


Рис. 2.2. Вакуумно-газозмішувальна система: ВГЗС – вакуумна газозмішувальна система М1–вакуумметр; М2 – манометр; ФН – форвакуумний насос; ББ – буферний балон; Б1, Б2, Б3 – балони з газами; К – колба.

До газорозрядної трубки була приєднана система приготування та напуску пари звичайної (або "важкої") води та рідкого фреону (CCl_4). Ця система забезпечувала як дозування пари води, так і пари фреону.

У попередньо відкачану спеціальну колбу від газів при випаровуванні H_2O , D_2O одержували пари води, яка була насичена при кімнатній температурі. Із двох компонентів суміші першими напускалися насичені пари води чи фреону, а потім напускався інертний газ (гелій, аргон).

2.3. Конструкції газорозрядних трубок для дослідження ємнісного і бар'єрного розрядів

Дослідження ємнісного імпульсно-періодичного розряду малої тривалості проводилось з використанням газорозрядної трубки, конструкція якої наведена на рис. 2.3.

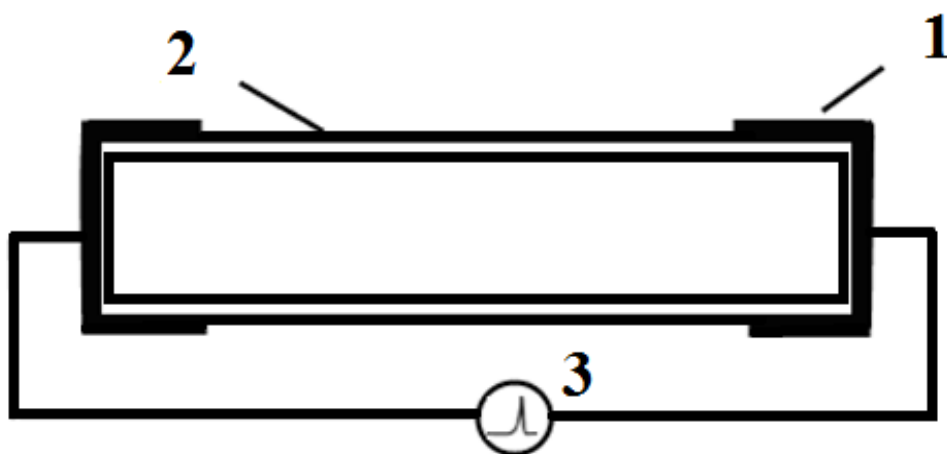


Рис. 2.3. Конструкція лампи з ємнісним наносекундним розрядом: 1 – система електродів, 2 – кварцова розрядна трубка; 3 – генератор високовольтних імпульсів [77, 78].

Газорозрядна трубка складалась з циліндричної кварцової трубки довжиною 50 см з внутрішнім діаметром 7 мм і зовнішніх електродів. Анод і катод виготовлені з нікелевої фольги шириною 2 см і розташовувалися на зовнішній поверхні трубки. Відстань між катодом і анодом змінювалася в діапазоні 6 – 18 см. Охолодження лампи здійснювалось за допомогою вентилятора.

Для експериментів з дослідження емісійних характеристик бар'єрного розряду в сумішах інертних газів з парою води та фреону використовувалася двобар'ерна розрядна трубка, схема якої приведена на рис. 2.4.

Розрядна колба виготовлена у вигляді двох циліндричних коаксіальних кварцових трубок (марки КУ-1 (5, 6)). Довжина колби складає 20 см, її зовнішній діаметр рівним – 24 мм. Зовнішній діаметр внутрішньої розрядної трубки (6) складає 12 мм. Для другої серії експериментів діаметр зовнішньої трубки з товщиною стінки 1.5 мм складає 26 мм, діаметр внутрішньої трубки з товщиною стінки 1.5 мм – 14 мм.

Електродна система складається з двох електродів, відстань між якими складає 4.5 мм. Зовнішній електрод, довжиною 160 мм, виготовлений з нікелевого дроту діаметром 0.3 мм, який намотаний на зовнішню кварцову трубку з кроком 2 мм. У внутрішній кварцовій трубці розташований суцільний алюмінієвий електрод довжиною 250 мм.

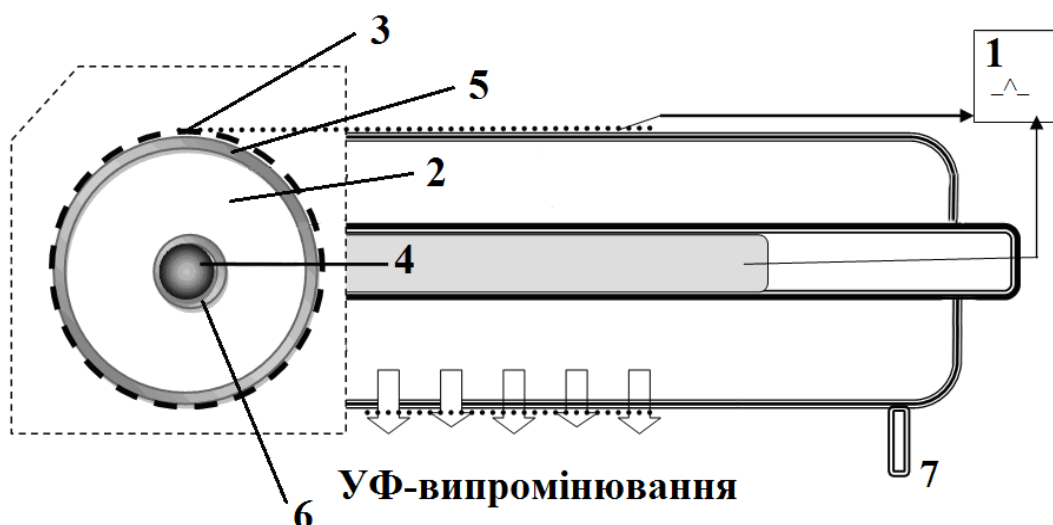


Рис. 2.4. Конструкція лампи з наносекундним бар'єрним розрядом: 1 – генератор наносекундних імпульсів високої напруги; 2 – розрядний проміжок; 3 – зовнішній електрод у вигляді спіралі з нікелевого дроту; 4 – внутрішній електрод у вигляді суцільного циліндру з алюмінію; 5 і 6 – дві коаксіальні кварцові трубки марки КУ-1; 7 – патрубок для запуску робочої суміші [90, 95].

Прозорість конструкції лампи складала 70 - 80%. Потрібно відмітити, що газорозрядна трубка дозволяє досліджувати випромінювання з $\lambda > 200$ нм. Для емісійних характеристик ВУФ випромінювання ($\lambda < 200$ нм) до вакуумного монохроматора приєднана зовнішня трубка через LiF-віконце. Також потрібно відмітити переваги використання ємнісного і бар'єрного розрядів, які полягають в тому, що плазма не контактує з електродами. А це у свою чергу приводить до збільшення ресурсу роботи лампи в газостатичному режимі.

2.4. Методика дослідження оптичних та електричних сигналів ємнісного і бар'єрного розрядів

Для проведення дослідження збуджених частинок, які визначають склад випромінювання плазми газового розряду в роботі використано метод емісійної спектроскопії з високим часовим розділенням, який полягає у вимірюванні інтенсивності випромінювання відповідної довжини хвилі та часових характеристик цього випромінювання.

Для реєстрації випромінювання наносекундних ємнісного і бар'єрного розрядів в сумішах інертних газів з парою води чи фреону в спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 140 - 315$ нм використовувалась експериментальна установка, схема якої наведена на рис. 2.5.

Дослідження спектрів випромінювання плазми ємнісного та бар'єрного розрядів в УФ і ВУФ діапазоні $\Delta\lambda = 130 - 350$ нм проводилось за допомогою фотопомножувача ФЭУ-142 з LiF-віконцем і однометрового вакуумного монохроматора, який був побудований за схемою Сейя-Наміюки. Випромінювання в спектральному діапазоні $\lambda = 200 - 400$ нм реєструвалось за допомогою монохроматора МДР-2 з дифракційною решіткою 1200 штр/мм і фотопомножувача ФЭУ-106. За допомогою монохроматора випромінювання розрядної плазми розкладається на окремі спектральні лінії чи смуги. Свічення плазми з центральної частини розрядної трубки надходило через LiF віконце у вакуумний монохроматор з оберненою лінійною дисперсією 0.7 нм/мм.

Спектри в кінцевому вигляді представлені з врахуванням відносної чутливості системи «монохроматор-фотопомножувач». Інтенсивність випромінювання визначається як площа під відповідною спектральною кривою.

Для реєстрації імпульсів струму на розрядному проміжку використовується пояс Роговського, який представляє собою котушку, яку застосовують для вимірювання в часі струмів або їх похідних [113].

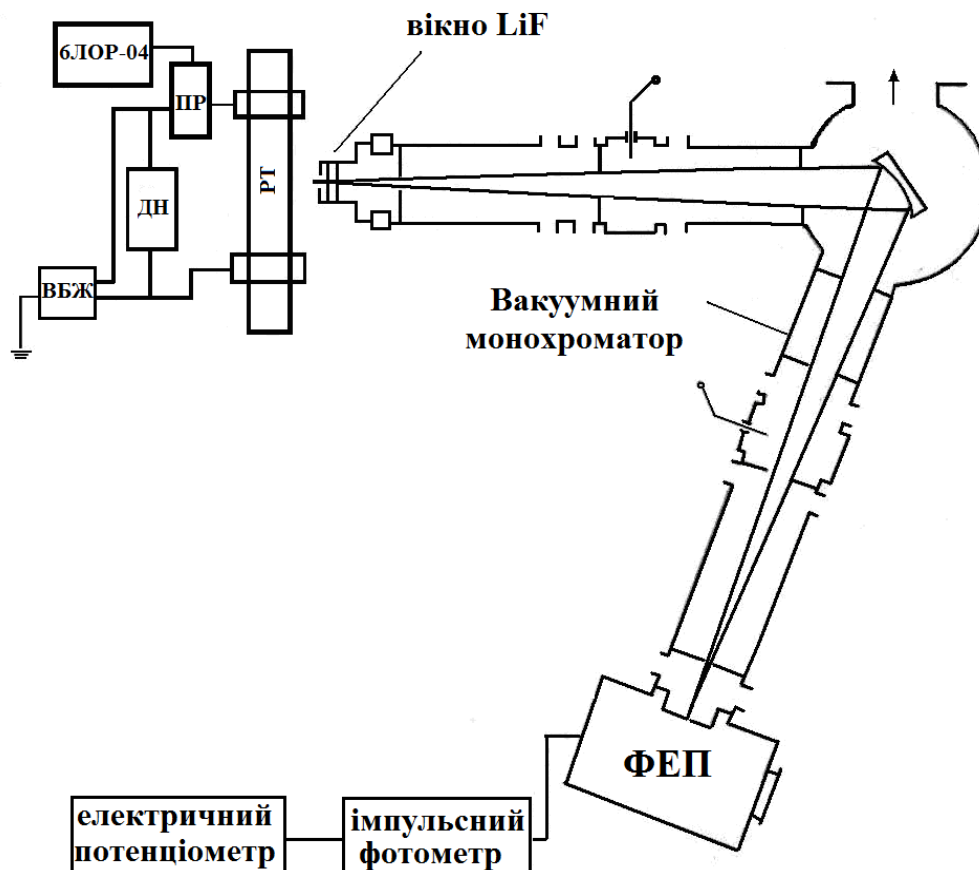


Рис. 2.5. Схема експериментальної установки: вакуумний монохроматор (ВМ); система реєстрації; РТ – розрядна трубка; 6ЛОР-04 – імпульсний широкосмуговий осцилограф; ДН – дільник напруги, ПР – пояс Роговського; ВБЖ – високовольтний блок живлення; ФЕП – фотоелектронний помножувач.

Реєстрація напруги проводилась з використанням малоіндуктивного ємнісного дільника. Сигнали, які надходили від пояса Роговського і дільника напруги

подавалися на вхід імпульсного осцилографа 6ЛОР-04, який мав часове розділення близько 1 нс.

Спектри випромінювання ємнісного і бар'єрного розрядів в сумішах інертних газів з парами води та фреону приводились до реального вигляду з врахуванням відносної спектральної чутливості системи реєстрації випромінювання (рис. 2.6).

Так, для дослідження ВУФ спектрального діапазону застосовувалась система «ФЭУ-142 + вакуумний монохроматор», спектральна чутливість якої наведена на рис. 2.6. (крива 1). Дослідження УФ діапазону спектру проводилось з врахуванням спектральної чутливості системи «ФЭУ-106 + МДР-2» (крива 2, рис. 2.6).

Для ідентифікації смуг випромінювання $\text{OH}(\text{OD})$ використовувались довідники [23,114], а для ідентифікації смуг ArCl^* , KrCl^* , Cl_2^* – праці [2, 54, 115].

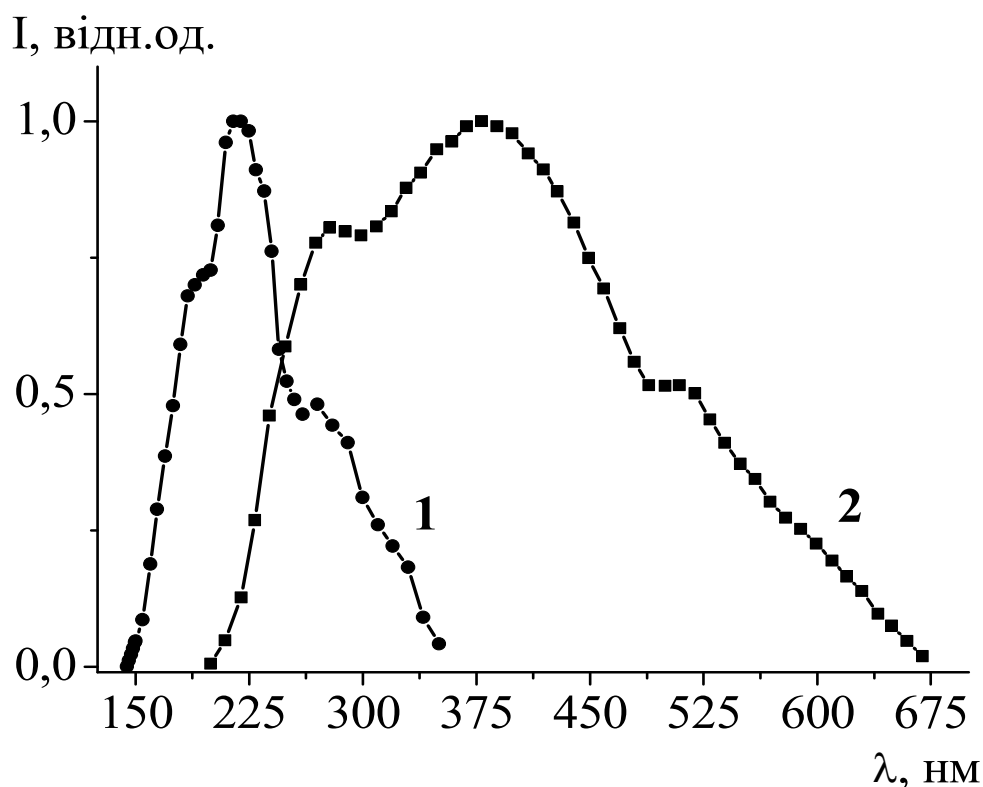


Рис. 2.6. Спектральна чутливість системи реєстрації системи «ФЭУ-142 + вакуумний монохроматор» (1) та «ФЭУ-106 + МДР-2» (2).

2.5. Методика вимірювання імпульсів напруги, струму та потужності газового розряду

Для того, щоб отримати інформацію про часовий хід величини падіння напруги на газорозрядному проміжку і потужність збудження було використано методику, яка представлена в [2]. Ця методика полягає у розв'язку рівняння Кірхгофа для електричного кола ексилампи. Падіння напруги на розрядному проміжку $U_G(t)$ залежить від часу протягом активної фази і змінюється від напруги пробую до напруги згасання. Оскільки в більшості випадків ємність діелектричних бар'єрів C_D набагато більша від ємності газового проміжку C_G , то основна частка напруги прикладена до ємності C_G і до газового проміжку.

Для розрахунку потужності $P(t)$, яка вводиться в плазму достатньо знати падіння напруги $U_G(t)$ і величину активної складової струму в розрядному проміжку $I_A(t)$ [2]:

$$P(t) = U_G(t) \cdot I_A(t). \quad (2.1)$$

Величина $U_G(t)$ може бути знайдена за другим правилом Кірхгофа з використанням вимірної величини часового ходу напруги на розрядній комірці $U(t)$ та падіння напруги на ємності діелектрика $U_D(t)$ [2]:

$$U_G(t) = U(t) - U_D(t). \quad (2.2)$$

Величину $U_D(t)$ можна обчислити знаючи величини заряду $Q(t)$ і ємність C_D :

$$U_D(t) = \frac{Q(t)}{C_D}. \quad (2.3)$$

Заряд в колі можна визначити або інтегруванням струму

$$Q(t) = \int_0^t I(t') dt' + Q_0, \quad (2.4)$$

або вимірюючи падіння напруги $U_{ADD}(t)$ на додатковій ємності C_{ADD} :

$$Q(t) = \frac{U_{ADD}(t)}{C_{ADD}}. \quad (2.5)$$

Величина C_D визначається з геометричних розмірів комірки і діелектричної проникності діелектрика. Тоді величину $U_G(t)$ можна записати як

$$U_G(t) = U(t) - \frac{Q(t)}{C_D}. \quad (2.6)$$

Величина активної складової струму $I_A(t)$ може бути визначена з використанням повного струму $I(t)$:

$$I_A(t) = I(t) \cdot \frac{C_G + C_D}{C_D} - C_G \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = I(t) - C_G \cdot \frac{\partial U_G}{\partial t}. \quad (2.7)$$

Потужність $P(t)$, що вводиться в плазму, знаходиться за наступним виразом:

$$P(t) = \left(U(t) - \frac{Q(t)}{C_D} \right) \cdot I_A(t). \quad (2.8)$$

2.6. Методика вимірювання абсолютної потужності ВУФ- та УФ- випромінювання розряду

Ефективність джерел випромінювання газових розрядів визначається потужністю випромінювання і електричною потужністю газового розряду. Електрична потужність розряду може бути розрахована як добуток значень імпульсів струму розряду на значення напруги на проміжку між двома електродами [116].

Виміри абсолютної потужності випромінювання плазми бар'єрного розряду з відносно вузької спектральної ділянки діаметром 0.3 см проводились за допомогою каліброваного приладу «Кварц 01». Спектральна вузька ділянка, з якої відбиралося випромінювання розряду, знаходилась на віддалі $L=60$ см від голівки приймача (рис. 2.7.).

Якщо $L > 10 \cdot d$, то спектральну вузьку ділянку можна розглядати як точкове джерело випромінювання [116].

Для виділення з усієї поверхні розряду випромінювання визначеної спектральної ділянки використовувався світофільтр УФС-5 з відомим коефіцієнтом пропускання $k_\phi = 0.98$ в спектральній ділянці 280 - 350 нм.

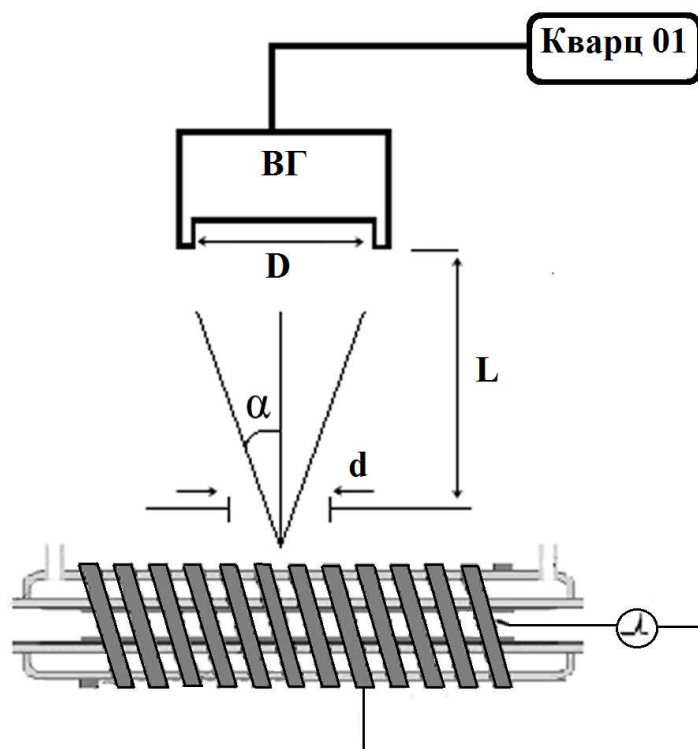


Рис. 2.7. Схема дослідження потужності випромінювання ексилампи: ВГ – вимірювальна голівка; D – діаметр голівки приймача; d – діаметр діафрагми; L – довжина від діафрагми до вимірювальної голівки.

Випромінювання точкового джерела, яке реєструє голівка приймача діаметром $D=1.2$ см складає $4\sin^2\alpha$, де $\alpha=\arctg(D/2L)$. Для обчислення абсолютної потужності випромінювання потрібно ввести коефіцієнт спектральної чутливості K_1 , який враховує реєстрацію випромінювання приладом «Кварц 01» в спектральному діапазоні 240-350 нм та коефіцієнт K_2 , який враховує поправку на чутливість в діапазоні 150-350 нм. Тоді формула для визначення потужності випромінювання приймає вигляд [116]:

$$P = \frac{S}{\pi d^2} \cdot 4 \cdot \frac{2}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{k_\phi} \cdot K_1 K_2 W, \quad (2.9)$$

де $S=\pi dL$ – площа усієї поверхні джерела випромінювання; πd^2 – площа діафрагми; W – потужність зареєстрована приладом «Кварц 01».

2.7. Оцінка похибок вимірів при дослідженні ємнісного та бар'єрного розрядів

Оскільки при дослідженні характеристик ємнісного і бар'єрного розрядів проводяться різні вимірювання характеристик розрядної плазми, то виникає питання достовірності отриманих значень. Тому при обробці результатів дослідження ми врахували похибки експериментальних вимірів та похибки приладів.

Із теорії похибок відомо, що абсолютна похибка окремого прямого вимірювання визначається за формулою [117, 118]

$$\Delta x_n = S_{<x>} \cdot t_{\alpha}, \quad (2.10)$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, а $S_{<x>}$ – середня квадратична похибка, яка для оцінки точності вимірювання є найкращим критерієм:

$$S_{<x>} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}. \quad (2.11)$$

Середнє арифметичне значення абсолютної похибки окремих вимірювань обчислюється за формулою

$$<\Delta x> = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (2.12)$$

Відносна похибка прямих вимірювань визначається:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{<x>} \cdot 100\%. \quad (2.13)$$

При непрямих вимірюваннях абсолютна похибка визначається за виразом:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2}. \quad (2.14)$$

Спектральна роздільна здатність вакуумного монохроматора не перевищує 0.7 нм, а монохроматора МДР-2 становить 0.2 нм.

Точність вимірювання відносної інтенсивності УФ і ВУФ випромінювання лампи становить 5-7%. Точність вимірювання парціального тиску парів води становить 10 Па, а тиску інертних газів – 250 Па.

Також враховані похибки експериментальних приладів: системи реєстрації УФ випромінювання, яка складає 10 – 15%, системи реєстрації ВУФ

випромінювання – 10%; осцилографічні виміри – 10-15%; похибка показів величини потужності випромінювання приладу «Кварц 01» – 7-8%.

Висновки до розділу 2

1. Для дослідження емісійних і електричних характеристик плазми ємнісного та бар'єрного наносекундних розрядів розроблена методика дослідження розряду в сумішах інертних газів з парами води та рідкого фреону, яка дозволяє на основі отриманих даних зрозуміти фізичні процеси, які проходять в плазмі.
2. Розроблені конструкції і виготовлені газорозрядні трубки для одержання ємнісного і бар'єрного наносекундних розрядів, які є перспективними для використання в УФ і ВУФ лампах.
3. За допомогою експериментальної установки проведені ретельні систематичні дослідження емісійних та електричних характеристик ємнісного і бар'єрного розрядів наносекундної тривалості в сумішах інертних газів з парою води та фреону.

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАРАМЕТРИ І ФІЗИКА ПРОЦЕСІВ В ГАЗОРОЗРЯДНИХ ВАКУУМНО-УЛЬТРАФІОЛЕТОВИХ ТА УЛЬТРАФІОЛЕТОВИХ ДЖЕРЕЛАХ ВИПРОМІНЮВАННЯ У СУМІШАХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ (He, Ar) З МОЛЕКУЛАМИ ВОДИ (H₂O, D₂O)

В наш час інтенсивно досліджуються оптичні характеристики газорозрядної плазми на основі молекул води та фізичні процеси утворення і розпаду радикала ОН (А, В, С). Спектральний діапазон 160 – 310 нм представляє інтерес з точки зору розробки селективних джерел випромінювання для різних застосувань як в техніці, електроніці, медицині та біології. УФ-випромінювання застосовується в якості антимікробного агента для дезинфекції води та повітря, стерилізації пакувальних матеріалів для харчових продуктів [119]. Оскільки радикал ОН є сильним окислювачем, має невеликий час життя і реагує з усіма органічними речовинами, то його використовують також і для стерилізації медичних інструментів [120-122].

На сьогодні відомим хімічними методами для знезараження води є використання озону і хлору. Проте ці методи мають ряд недоліків. Для руйнування шкідливих мікроорганізмів у воді потрібна доза порядку 10 мг/дм³ хлору чи озону. Така доза хоча і знезаразить воду, але підвищує її токсичність [123]. Метод хлорування є небезпечним, оскільки може викликати різні алергічні реакції. Крім цього, він має мутагенні і канцерогенні властивості [124, 125].

Недоліком методу озонування є те, що озон швидко випаровується з води, а висока концентрація озону є шкідливою для організму людини. Перевагою використання УФ - випромінювання в порівнянні з хімічними методами є те, що даний метод не викликає мутагенних побічних продуктів. До переваг також відносяться малі енерговитрати (в 4 - 8 разів менше від озонаторів) [123]. Антимікробна дія УФ-випромінювання є найбільшою в діапазоні $\Delta\lambda = 200 - 300$ нм, а максимальний спектр дії, що приводить до загибелі мікроорганізмів – 260 - 265 нм. При довжині $\lambda < 200$ нм ефективність інактивації зростає [119, 125, 126].

Одним з представником для знезаражування води УФ - випромінюванням є ртутні лампи низького тиску (185 нм, 258 нм), але поряд з їх високою ефективністю, недоліком є висока токсичність пари ртуті, що приводить до додаткових витрат на їх утилізацію.

Отже, пошук альтернативних джерел УФ і ВУФ випромінювання, які б забезпечували високу ефективність дезинфекції, стерилізації і разом з тим були б недорогими і нетоксичними є актуальним. Саме такими критеріям відповідає використання молекул води. Для одержання плазми пари води перспективним є використання ємнісного і бар'єрного розрядів. Дані типи розрядів дозволяють уникнути контакту електродів з агресивною плазмою. Імпульсний бар'єрний розряд є досить ефективним при знищенні бактерій та грибків [45, 127]. Більше того, дослідження показало, що використання наносекундного бар'єрного розряду має більш високу антимікробну дію, ніж бар'єрний розряд мікросекундної тривалості [128].

В даному 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 та результати розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів газового розряду в даних сумішах.

Результати досліджень опубліковані в працях [71-97] та захищені патентами [77, 78, 90, 95].

3.1. Дослідження характеристик наносекундного ємнісного розряду в сумішах He-H₂O(D₂O) і Ar-H₂O(D₂O)

Представлено результати дослідження емісійних характеристик плазми ($\lambda = 150 - 315$ нм) імпульсно-періодичного наносекундного ємнісного розряду в сумішах пари води з гелієм та аргоном. Наведено результати оптимізації інтенсивності випромінювання даних газових сумішей у ВУФ та УФ діапазонах спектру ємнісного розряду як від тиску аргону, так і від тиску пари води та розглянуто механізм утворення радикала OH (OD).

Результати дослідження імпульсно-періодичного ємнісного розряду в газових сумішах $\text{He-H}_2\text{O(D}_2\text{O)}$, $\text{Ar-H}_2\text{O(D}_2\text{O)}$ опубліковані в наших працях [71-76, 79, 80, 81] та захищені патентами [77, 78].

3.1.1. Дослідження оптичних характеристик збуджених радикалів OH(OD) в імпульсно-періодичному ємнісному розряді в сумішах $\text{He-H}_2\text{O(D}_2\text{O)}$

В даному пункті наведені результати оптимізації емісійних характеристик ємнісного імпульсно-періодичного розряду наносекундної тривалості в сумішах гелію з парами звичайної та "важкої" води. Результати дослідження опубліковані в працях [71-76, 79] та захищені патентами [77, 78].

Для дослідження ємнісного наносекундного розряду використовувалась кварцева циліндрична трубка, параметри якої описані в розділі 2, на електроди якої подавались імпульси напруги амплітудою 25-40 кВ. Частота слідування імпульсів напруги змінювалась в діапазоні 50-1000 Гц. Ємнісний розряд наносекундної тривалості в сумішах $\text{He - H}_2\text{O (D}_2\text{O)}$ однорідно заповнював весь внутрішній об'єм розрядної трубки і був білого кольору. Перша серія експериментів з дослідження характеристик наносекундного ємнісного розряду в суміші $\text{He - H}_2\text{O (D}_2\text{O)}$ [71-74] показала наступні результати.

На рис. 3.1 та рис. 3.2 наведені характерні спектри випромінювання наносекундного ємнісного розряду в сумішах $\text{He - H}_2\text{O}$ та $\text{He - D}_2\text{O}$.

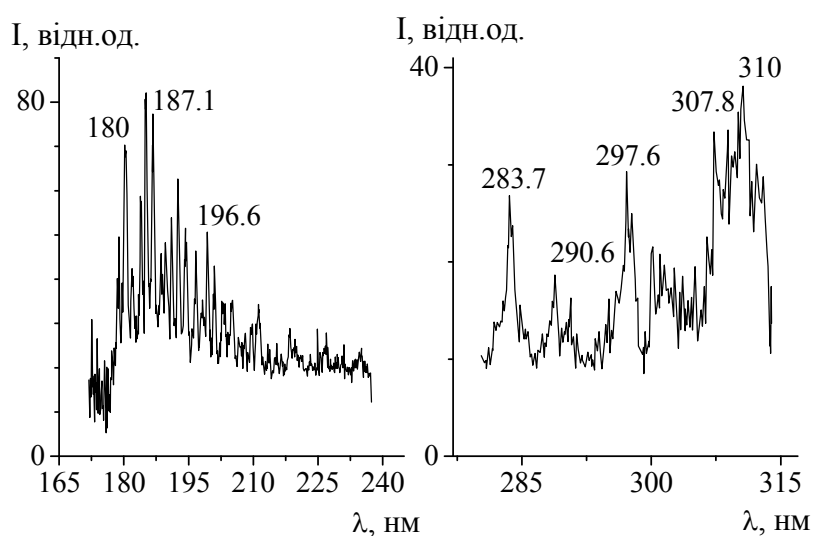


Рис. 3.1. Спектри випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду в суміші $p(\text{He}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 8 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$ [72].

Спектри випромінювання плазми на основі пари води містять смуги радикалів ОН чи ОД. В спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 175 - 225$ нм це смуги 181.0, 187.1, 189.1 нм. Смуги з даними максимумами належать до збуджених електронно-коливальних станів радикалів ОН(C) та ОД(C). Збільшення парціального тиску пари як звичайної води, так і "важкої" води в діапазоні 130 - 150 Па приводить до зменшення інтенсивності випромінювання ВУФ-смуг ОН (ОД). Аналогічне спостерігалось і в тліючому розряді [9], коли збільшення тиску пари води до 2.0 – 2.5 кПа приводить до зменшення інтенсивності випромінювання у ВУФ області спектру, що зумовлено близькими механізмами запалювання тліючого та ємнісного розрядів.

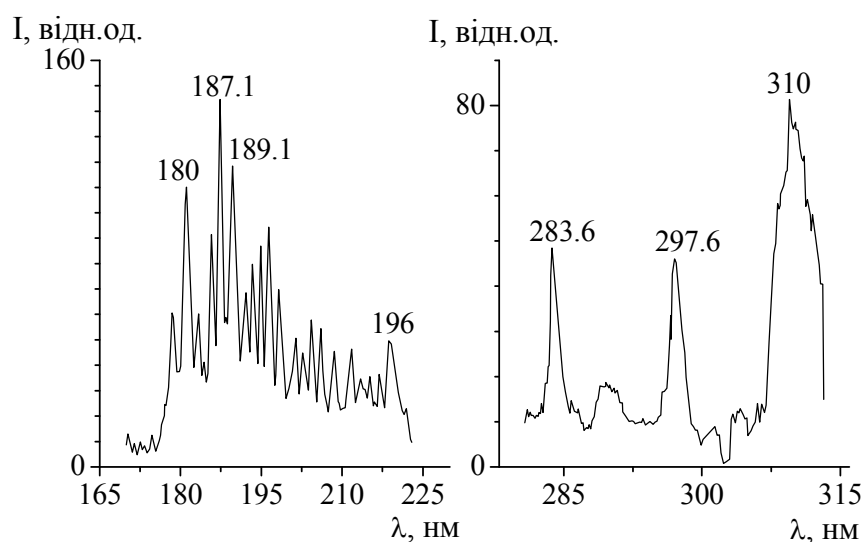


Рис. 3.2. Спектри випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду в суміші $p(\text{He}) - p(\text{D}_2\text{O}) = 8$ кПа - 133 Па.

Випромінювання радикалів ОН чи ОД крім ВУФ спектрального діапазону можна спостерігати і в УФ діапазоні спектру. В нашому випадку можливості експериментальної установки дозволяють спостерігати як ВУФ, так і УФ- смуги випромінювання. Найбільш інтенсивною в УФ спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 270 - 315$ нм є смуга з максимумом при $\lambda \approx 310$ нм, яка корелює з смугою ОН (ОД) ($A^2\Sigma^+ - X^2\Pi; 0,0$). Також спостерігаються менш інтенсивні смуги з максимумами при $\lambda = 283.7$ нм ОН(ОД) ($A \rightarrow X; 1,0$) та $\lambda = 297.6$ нм ОН (ОД) ($A \rightarrow X; 3,2$) [113].

Якщо порівняти УФ і ВУФ спектри випромінювання, представлені на рис. 3.1, то можна побачити, що заміна звичайної води на "важку" приводить до збільшення інтенсивності випромінювання всіх електронно-коливальних смуг в спектрі. Також це підтверджують отримані нами дані з оптимізації інтенсивності випромінювання для смуг УФ - спектрального діапазону. В праці [10] вже йшла мова про перспективність використання пари "важкої" води.

На рис. 3.3, 3.4 приведено результати оптимізації інтенсивності смуг випромінювання радикалів OH ($A \rightarrow X$) і OD ($A \rightarrow X$) в залежності від парціального тиску гелію і пари звичайної та "важкої" води.

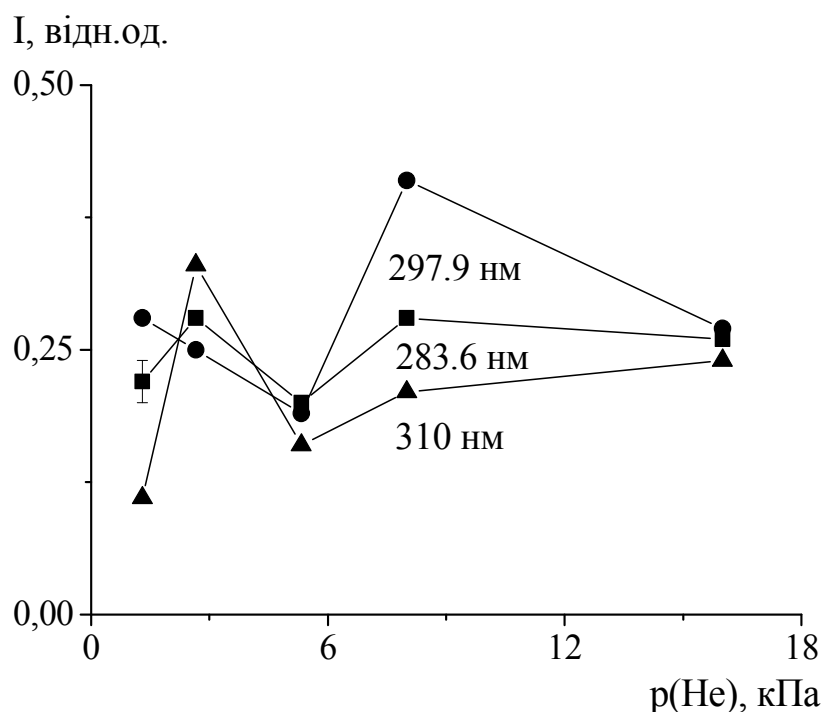


Рис. 3.3. Залежності відносної інтенсивності випромінювання газорозрядної плазми ємнісного розряду в суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ від величини парціального тиску гелію при $p(\text{H}_2\text{O}) = 130 \text{ Па}$ [71, 72].

Як впливає з цих результатів, використання пари "важкої" води є в півтора рази більш ефективним, ніж пари звичайної дистильованої води. У залежності від вмісту гелію в розряді видно, що при низькому парціальному тиску гелію спостерігається перший максимум УФ-випромінювання OH ($p_1=0.7\text{-}3.5 \text{ кПа}$), коли

розряд однорідний за радіусом трубки, і другий максимум ($p_2=5-15$ кПа), коли більш яскраво випромінює плазма в центральній частині трубки.

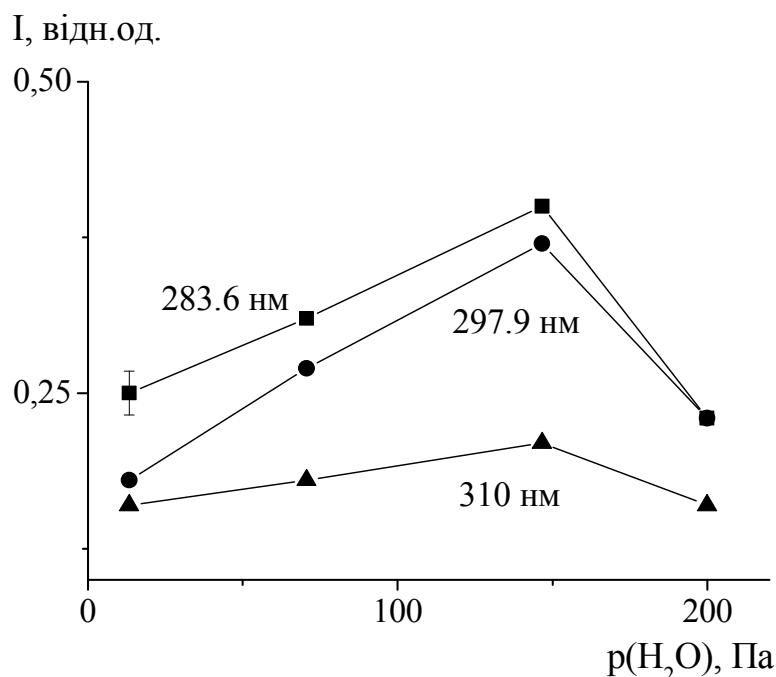


Рис. 3.4. Залежності відносної інтенсивності випромінювання характеристичних смуг газорозрядної плазми ємнісного розряду в суміші He - H_2O від величини парціального тиску пари води при $p(\text{He}) = 2.6$ кПа [71, 72].

З рис. 3.4 випливає, що при збільшенні парціального тиску води, інтенсивність смуги радикала ОН зменшується. Це може бути пов'язано з процесом "гасіння" радикалів ОН(А) молекулами води.

Оптимальний тиск пари звичайної води становить 130-150 Па, а оптимальні парціальні тиски гелію в цьому випадку складають $p_1 = 2.6$ кПа і $p_2 = 7.5$ кПа. В тліючому розряді для одержання максимальної інтенсивності випромінювання смуги 309.6 нм оптимальний тиск гелію в суміші He- H_2O складає 8 кПа, а оптимальний тиск пари води є більшим від оптимального тиску в ємнісному розряді і складає 2.5 кПа [14].

Для розряду в суміші гелію з парою D_2O оптимальні парціальні тиски гелію становлять $p_1=1.3$ кПа і $p_2=5.3$ кПа (рис.3.5). 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.

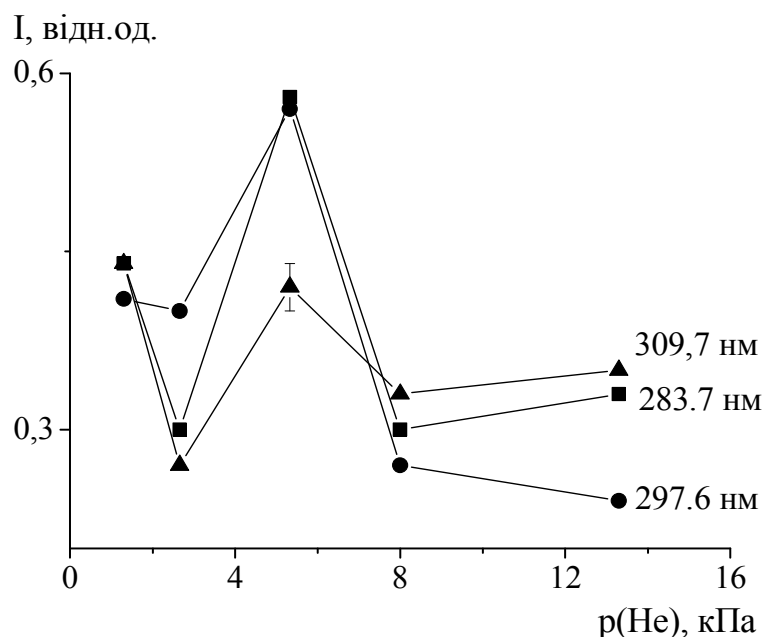


Рис. 3.5. Залежності відносної інтенсивності випромінювання характеристичних смуг плазми розряду в суміші $\text{He} - \text{D}_2\text{O}$ в УФ діапазоні спектру від величини парціального тиску гелію при $p(\text{D}_2\text{O}) = 130 \text{ Па}$ [71, 72].

Подальше збільшення парціального тиску гелію (рис. 3.3, рис. 3.5) приводить до зменшення інтенсивності випромінювання радикалів $\text{OH}^*(\text{OD}^*)$, що зумовлено контрагуванням розряду та процесом "гасіння" збуджених радикалів $\text{OH}^*(\text{OD}^*)$ атомами He .

В наступному експерименті ми продовжили досліджувати емісійні характеристики розряду в суміші $\text{He} - \text{H}_2\text{O}$, розширивши спектральний діапазон випромінювання, що досліджувався, до 140 нм. Параметри газорозрядної трубки не змінювалися і залишалися такими самими як в попередньому експерименті.

Наносекундний ємнісний розряд в суміші $\text{He} - \text{H}_2\text{O}$ однорідно заповнював увесь об'єм між електродами газорозрядної трубки і мав білий з рожевим відтінком колір. Спектри випромінювання імпульсно-періодичного розряду даної суміші представлені на рис. 3.6 (а), (б) [72, 76-78]. У спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 300\text{-}315 \text{ нм}$ спостерігаються електронно-коливальні смуги з максимумами

випромінювання при $\lambda = 312.1$ нм, $\lambda = 313.4$ нм, характерні для плазми пари води. Ці смуги можуть бути ототожені з електронно-коливальними смугами гідроксилу OH ($A \rightarrow X$).

Також плазма на основі газової суміші He-H₂O характеризується смугами випромінювання у ВУФ-області спектру на $\lambda = 156, 180.3, 186$ нм, які ототожнюються з випромінюванням радикалів OH ($C \rightarrow X$; $C \rightarrow A$).

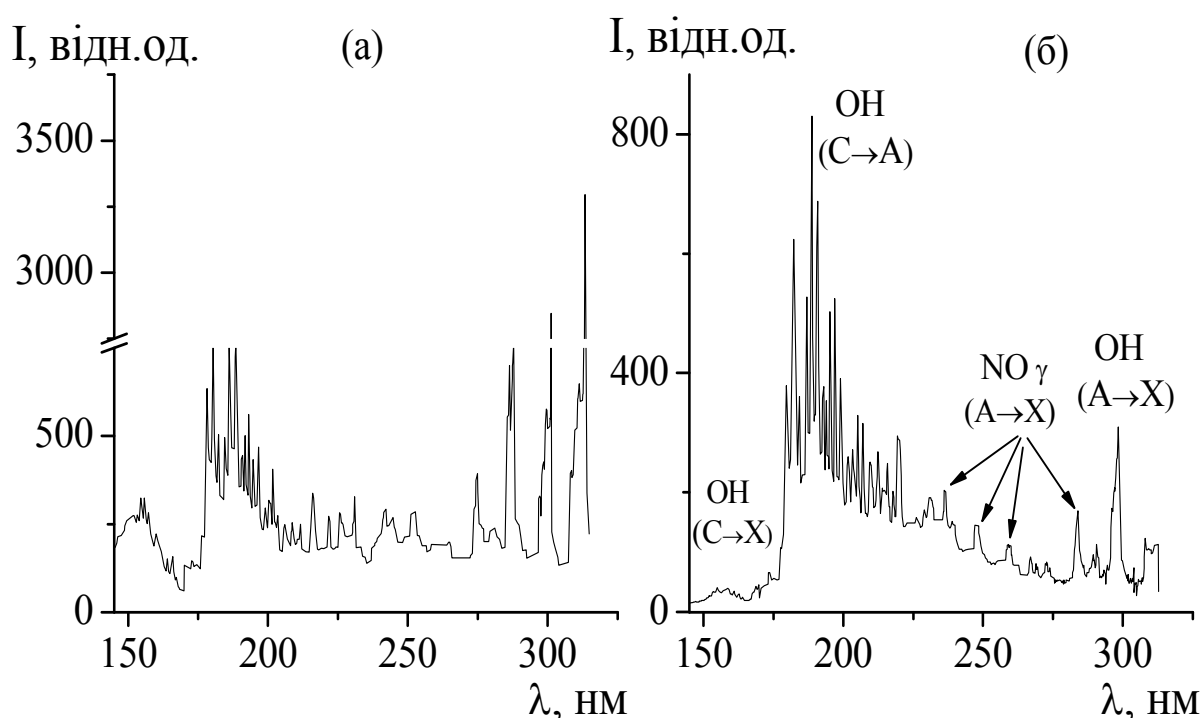


Рис. 3.6. УФ і ВУФ спектри випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду в сумішах p(He) - p(H₂O): 21.3 - 0.11 кПа (а) та 5 - 0.11 кПа (б) [72, 76-78].

Смугу з максимумом випромінювання при $\lambda = 273$ нм можна віднести до випромінювання радикала NO (γ -системи) ($A \rightarrow X(0;4)$) [114]. В спектрі також присутні менш інтенсивні смуги з максимумами в спектральному інтервалі $\Delta\lambda = 215 - 255$ нм: 225 нм OH ($C \rightarrow A$), 248 нм NO γ $A \rightarrow X(0,2)$.

Зменшення парціального тиску гелію з 21.3 кПа до 5 кПа приводить до перерозподілу інтенсивності ВУФ та УФ-випромінювання в спектрі випромінювання наносекундного ємнісного розряду в суміші He - H₂O. В тліючому розряді в суміші He - H₂O навпаки, зменшення концентрації пари води приводить до

того, що максимальна інтенсивність смуг в спектрі зосереджена у ВУФ області ($\Delta\lambda = 140 - 190$ нм) [11].

На рис. 3.7 наведені залежності відносних величин інтенсивності випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду на основі газової суміші He - H₂O від парціального тиску пари води при $p(\text{He}) = 2.6$ кПа.

При $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.04-0.11$ кПа спостерігається максимум, коли наносекундний ємнісний розряд є порівняно однорідним за радіусом трубки.

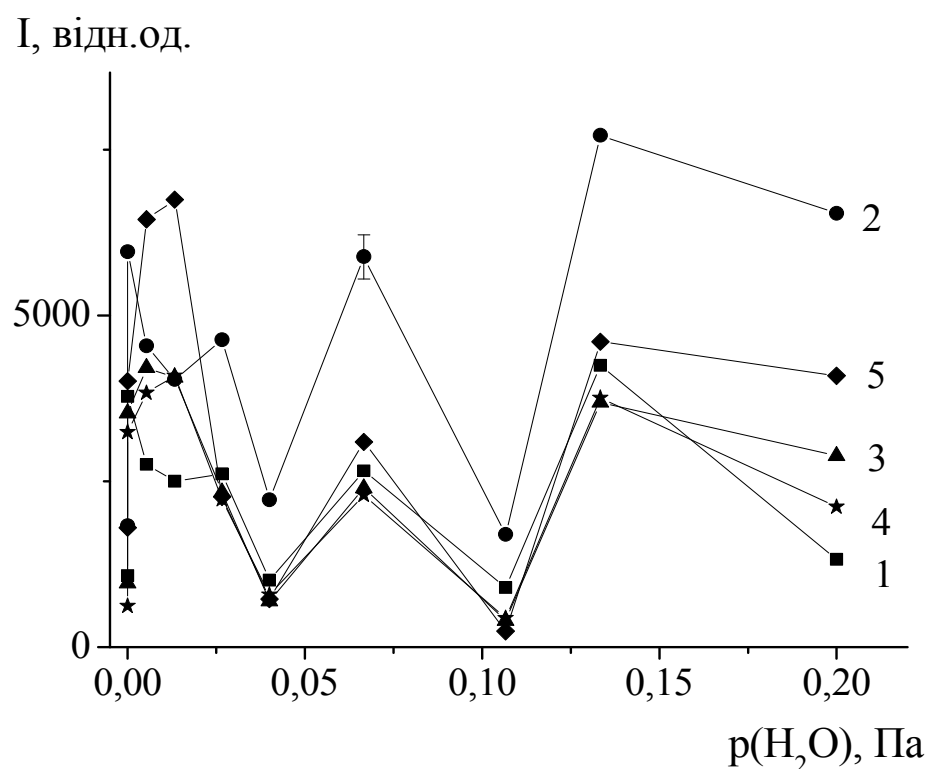


Рис. 3.7. Залежності відносної інтенсивності спектральних смуг випромінювання радикала ОН від парціального тиску пари води в наносекундному ємнісному розряді в суміші He-H₂O при $p(\text{He}) = 2.6$ кПа: (1) – $\Delta\lambda = 176 - 183.9$ нм, (2) – $\Delta\lambda = 184.5 - 198$ нм, (3) – $\Delta\lambda = 284.8 - 293$ нм, (4) – $\Delta\lambda = 296.7 - 301.6$ нм, (5) – $\Delta\lambda = 307.5 - 314.5$ нм [76-78].

При $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.11-0.20$ кПа цей максимум спостерігається, коли плазма випромінює більш інтенсивно з центральної частини газорозрядної трубки (режим контрагування розряду). При зростанні парціального тиску пари води інтенсивність

ВУФ-випромінювання є максимальною для смуг з довжиною хвилі при $\lambda_{\max} = 184.5$ -198 нм.

Результати оптимізації інтенсивності смуг випромінювання в спектральних діапазонах $\Delta\lambda = 176.0 - 183.9$ нм і $\Delta\lambda = 184.5 - 198.0$ нм залежно від парціального тиску гелію при $p(\text{H}_2\text{O}) = 106.6$ Па (рис. 3.8 (а)) [79] показали, що оптимальний тиск гелію складає $p(\text{He}) = 1$ і 11 кПа.

В праці [12] при парціальних тисках пари води 50 – 300 Па та гелію 1 – 8 кПа тліючий розряд випромінює переважно в спектральному діапазоні 130 – 190 нм.

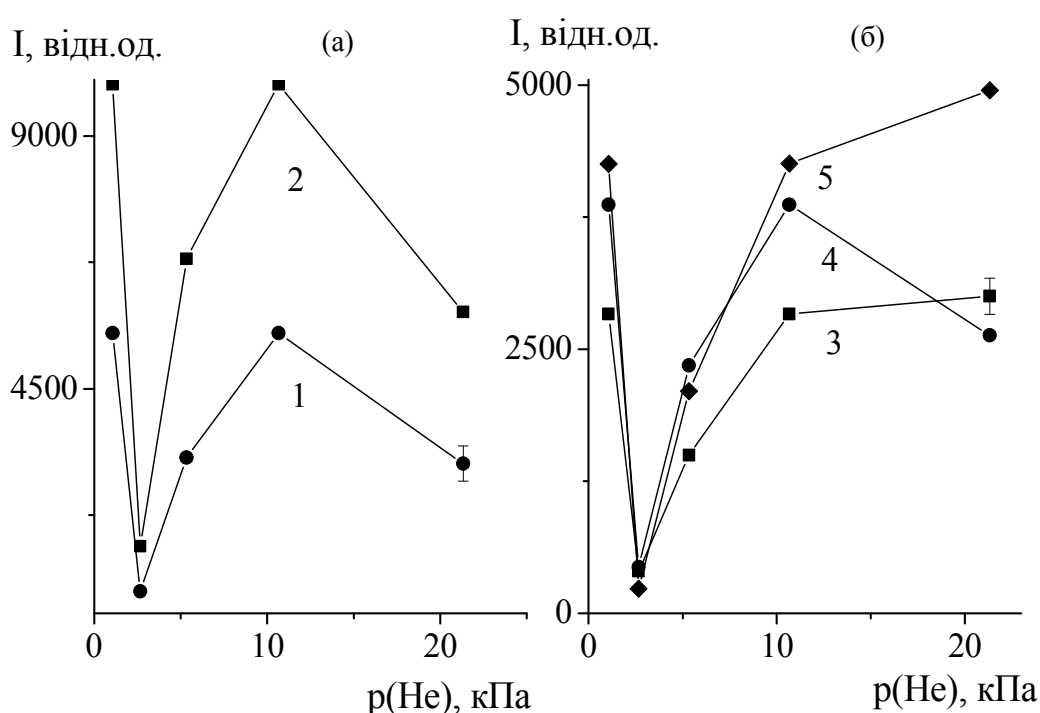


Рис. 3.8. Залежності відносної інтенсивності характеристичних смуг плазми на основі суміші He- H_2O від парціального тиску гелію при $p(\text{H}_2\text{O}) = 106.6$ Па: (1) – $\Delta\lambda = 176 - 183.9$ нм, (2) – $\Delta\lambda = 184.5 - 198$ нм (а) , (3) – $\Delta\lambda = 284.8 - 293$ нм, (4) – $\Delta\lambda = 296.7 - 301.6$ нм, (5) – $\Delta\lambda = 307.5 - 314.5$ нм (б) [79].

Подібні максимуми, але меншої інтенсивності ніж для ВУФ-діапазону, спостерігаються для характеристичних смуг випромінювання плазми в суміші He - H_2O в УФ діапазоні (рис. 3.8 (б)).

При взаємодії молекул води з інертними газами відсутня електростатична взаємодія. Для сумішей $\text{Ar}(\text{Kr}, \text{Xe}) - \text{H}_2\text{O}$ притаманне для води утворення водневих

зв'язків [16, 17]. Міжмолекулярна взаємодія для суміші He - H₂O може мати характер сили Ван-дер-Ваальса, так як міжмолекулярне електростатичне поле є дуже слабим [18].

Оскільки характеристики розряду сильно залежать від концентрації пари води, то розрізняють два випадки: а) при досить низьких парціальних тисках пари води в розряді переважають іони He⁺ і б) коли парціальний тиск пари води перевищує тиск гелію, то основними в розряді є позитивно заряджені іони (OH⁺, H₂O⁺, H₃O⁺) [19]. В наших експериментах розряд є електропозитивним, оскільки p(He) > p(H₂O).

Низький тиск пари води приводить до зменшення густини негативних іонів і до зростання кількості атомів гелію в метастабільних станах. Вплив концентрації пари води на розряд пов'язаний з зниженням температури електронів при збільшенні парціального тиску води та втратами метастабільних атомів He* (19.8 eV) внаслідок процесу іонізації Пеннінга та дисоціативного збудження радикала OH(A) (9.15 eV) [19].

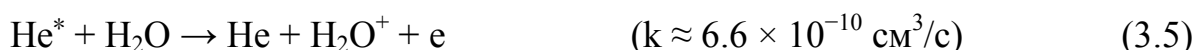
Оскільки порогова енергія збудження атома гелію складає близько ≈ 19.8 eV, то важливим процесом є іонізація Пеннінга, який є домінуючим для всього діапазону парціальних тисків пари води.

При дуже низькому тиску пари води основними реакціями є вище згадувана реакція Пеннінга з участю метастабілів гелію [19]:



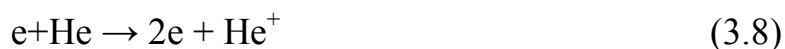
Константи швидкості реакції (3.1) – $k \approx 2.03 \times 10^{-9} (T_e/300)^{0.5} \text{ см}^3/\text{с}$, (3.2) – $(k \approx 8.7 \times 10^{-10} (T_e/300)^{0.5} \text{ см}^3/\text{с}$, (3.3) – $k \approx 5 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, (3.3) – $k \approx 5 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, (3.4) – $k \approx 2 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$).

Подальше зростання парціального тиску пари води приводить до взаємодії метастабільних атомів гелію з молекулами води в процесі іонізації Пеннінга [19]:





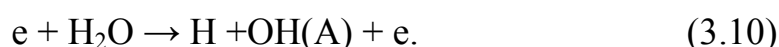
та до процесу іонізації електронним ударом атомів гелію [19]



та метастабільних атомів гелію



Утворення радикалів $\text{OH}(\text{A})$ в ємнісному розряді можливе переважно в процесі дисоціаціативного збудження молекул води електронним ударом [19, 20, 129]:



Внаслідок великої енергії метастабільних атомів гелію (19.8 eV) утворення $\text{OH}(\text{A})$ можливе також через іонізацію Пеннінга з подальшою дисоціативною рекомбінацією H_2O^+ [19-21]:



3.1.2. Дослідження джерела ВУФ і УФ випромінювання наносекундного ємнісного розряду в сумішах $\text{Ar-H}_2\text{O}(\text{D}_2\text{O})$

В даному пункті наводяться результати дослідження наносекундного ємнісного розряду в сумішах $\text{Ar-H}_2\text{O}$ та $\text{Ar-D}_2\text{O}$. В експерименті досліджувалися спектри випромінювання в діапазоні $\Delta\lambda=170 - 320$ нм, залежності інтенсивності випромінювання від тиску і парціального складу робочих газових сумішей. Результати даних досліджень опубліковані в працях [71, 79, 80].

Оскільки метастабільні енергетичні рівні і потенціал іонізації атома аргону значно менші за відповідні характеристики атома гелію, то при взаємодії збуджених та іонізованих атомів аргону з молекулами води слід чекати значних відмінностей в утворенні радикалів $\text{OH}(\text{A}, \text{B}, \text{D}, \text{C})$ та емісійних характеристик наносекундного ємнісного розряду. Використання аргону в робочих середовищах УФ і ВУФ ламп тліючого розряду низького тиску було ефективним [23, 24]. Тому ми продовжили

дослідження емісійних характеристик наносекундного ємнісного розряду і в сумішах аргону з парою звичайної та "важкої" води.

Спектри випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду в сумішах Ar-H₂O (а), Ar-D₂O (б) (рис. 3.9) складаються зі смуг з максимумами в ВУФ діапазоні $\Delta\lambda=180 - 190$ нм, які належать радикалу OH(OD) (C→A) та смуг радикалу OH(OD) (A→X) УФ діапазону [114].

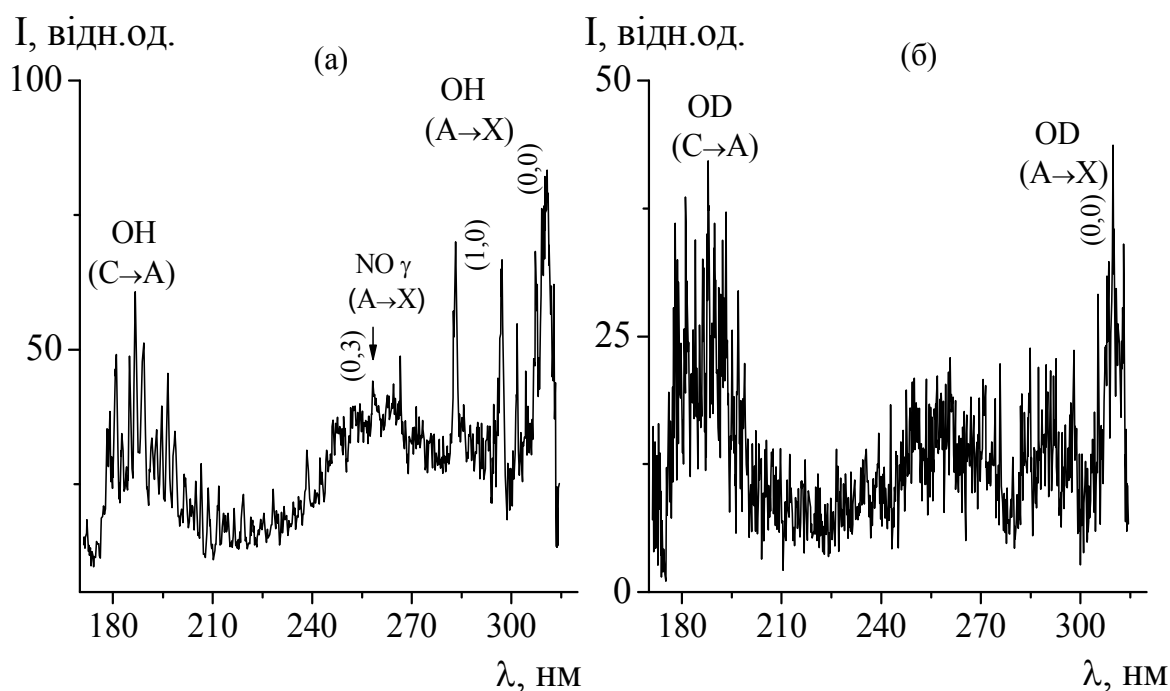


Рис. 3.9. Спектри випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду в сумішах $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 2.6 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$ (а) та $p(\text{Ar}) - p(\text{D}_2\text{O}) = 2.6 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$ (б).

В спектрі випромінювання наносекундного ємнісного розряду в суміші Ar-H₂O також спостерігається випромінювання радикала NO γ -системи A→X (0;3) переходу.

Дослідження випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду на основі суміші Ar - H₂O проводилося при парціальних тисках $p(\text{H}_2\text{O}) = 10\text{-}200 \text{ Па}$, $p(\text{Ar}) = 1.33\text{-}11 \text{ кПа}$. Розряд в суміші Ar - H₂O мав рожевий з фіолетовим відтінком колір.

Аналіз спектру, приведений на рис. 3.10, показує, що більше 70% потужності випромінювання плазми сконцентровано в ВУФ-діапазоні спектру $\Delta\lambda = 140 - 190 \text{ нм}$.

За характером спектр близький до спектру суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ (рис. 3.6 (б)) і відрізняється в основному величиною інтенсивності випромінювання радикала гідроксилу.

Оптимізація інтенсивності випромінювання смуги 308.9 нм показала, що максимум інтенсивності випромінювання радикала гідроксилу спостерігається при оптимальному тиску пари води $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13 - 0.20$ кПа (рис. 3.11) та тиску аргону в діапазоні 1.33 - 2.6 кПа.

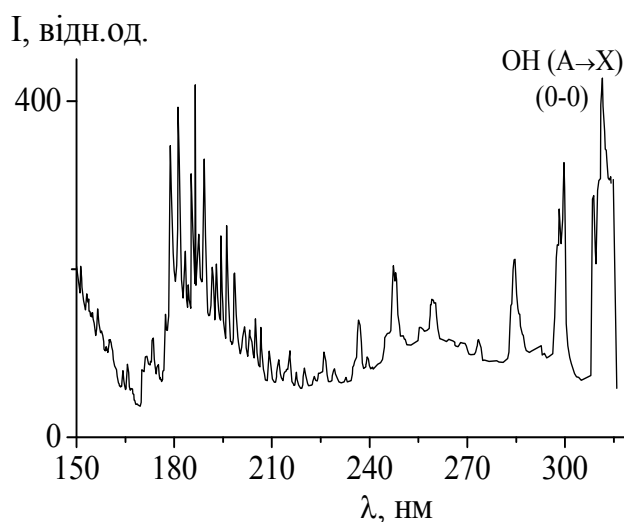


Рис. 3.10. Спектр випромінювання наносекундного ємнісного розряду в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 1.33 - 0.133$ кПа [71, 72, 79].

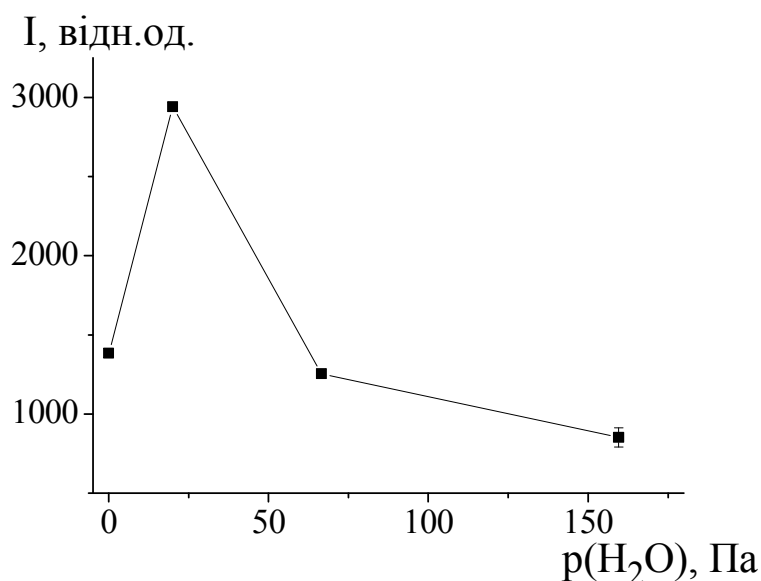


Рис. 3.11. Залежність відносної інтенсивності смуги випромінювання 308.9 нм OH від парціального тиску пари води в наносекундному ємнісному розряді в суміші $\text{Ar-H}_2\text{O}$ при $p(\text{Ar}) = 2.66$ кПа [71, 72, 79].

Подібні результати були отримані в поздовжньому тліючому розряді в суміші Ar - H₂O [23, 24], де збільшення тиску аргону до 4 кПа приводить до зростання інтенсивності смуги з максимумом при $\lambda \approx 306.4$ нм. В ємнісному розряді в парі води [8, 27, 28] ($p \sim 130 - 150$ Па) також спостерігаються смуги з $\lambda \approx 306.7$ нм та 309 нм. Подібні оптимальні умови (тиск пари води варіюється в діапазоні 3.33 – 426 Па, тиск буферних газів – 1.33 кПа) сприяли спостереженням у спектрі височастотного ємнісного розряду [33] смуги радикалів OH та OD.

В праці [80] представлений наступний ряд наших результатів по дослідженню наносекундного ємнісного розряду в суміші Ar - H₂O.

Сpektри ВУФ-випромінювання досліджувалися в спектральному діапазоні 120 - 314 нм при парціальних тисках $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.02-0.2$ кПа і $p(\text{Ar}) = 1.33-10.66$ кПа. На рис. 3.12 (а), (б) представлені спектри випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду в сумішах $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 1.33-0.13$ кПа і $10.66-0.13$ кПа.

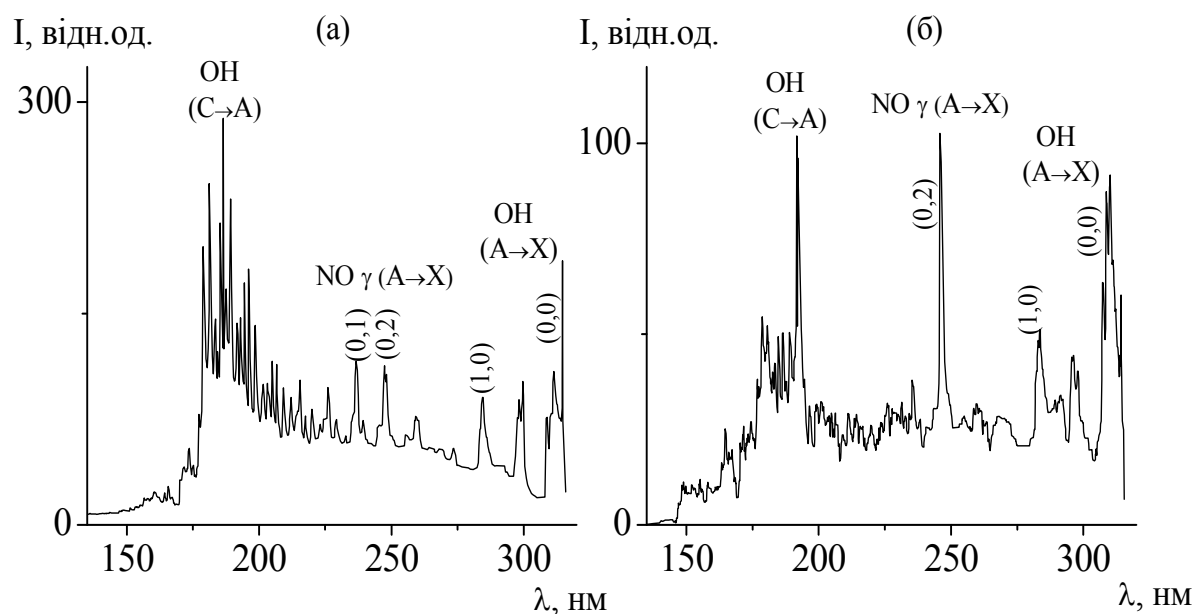


Рис.3.12. Сpektри випромінювання наносекундного ємнісного розряду в сумішах $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 1.33 - 0.133$ кПа (а), $10.66 - 0.133$ кПа (б) [80].

Основне випромінювання плазми наносекундного ємнісного розряду сконцентровано в діапазоні 175 - 200 нм. Дані смуги можуть бути ототожнені з електронно-коливальними переходами радикала гідроксилу ($\text{C} \rightarrow \text{A}$). Незмінними в спектрі залишились смуги гідроксилу OH ($\text{A} \rightarrow \text{X}$). Максимальна інтенсивність смуг

ВУФ-діапазону спостерігається, коли $p(\text{Ar}) = 1.33 \text{ кПа}$ і $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13 \text{ кПа}$ (рис. 3.12, (а)). При збільшенні тиску аргону від 1.33 кПа до 2.66 кПа – інтенсивність даних смуг зменшується в 2.5 раза. Наступне збільшення парціального тиску аргону до 10.66 кПа (рис. 3.12, (б)) приводить до ще більшого зменшення інтенсивності ВУФ-випромінювання плазми. При малих тисках аргону спостерігаються найбільш інтенсивні смуги випромінювання радикалів ОН.

На рис. 3.13 наведені результати оптимізації інтенсивності смуг випромінювання ОН в спектральному діапазоні $\Delta\lambda \approx 150 - 200 \text{ нм}$ в залежності від парціального тиску аргону при $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13 \text{ кПа}$.

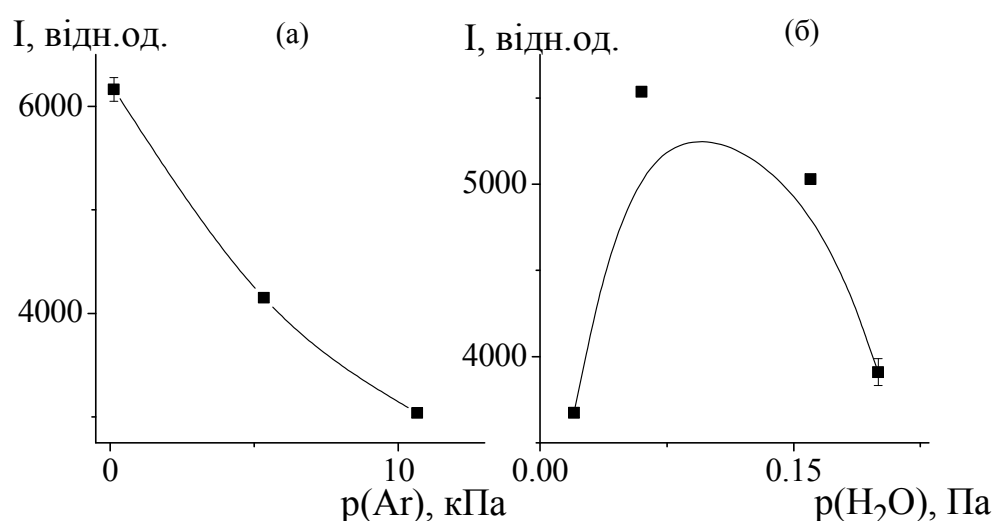
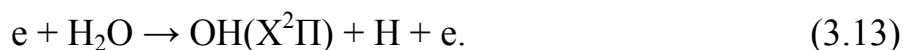


Рис. 3.13. Залежності відносної інтенсивності випромінювання характеристичних смуг (150 - 200 нм) газорозрядної плазми в суміші $\text{Ar} - \text{H}_2\text{O}$ від величини парціального тиску аргону при $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13 \text{ кПа}$ та від величини парціального тиску пари води при $p(\text{Ar}) = 2.66 \text{ кПа}$ [72, 80].

Щоб отримати найбільшу інтенсивність випромінювання, оптимальний тиск аргону має бути в діапазоні $0.1 - 0.5 \text{ кПа}$. Залежність інтенсивності смуг ВУФ-випромінювання плазми від парціального тиску пари води (рис. 3.13, (б)) показала, що для отримання максимальної інтенсивності смуг в діапазоні 150-200 нм оптимальний тиск пари води має знаходитись в межах $0.06 - 0.16 \text{ кПа}$. Зменшення інтенсивності випромінювання ВУФ-смуги радикала гідроксилу може відбуватися

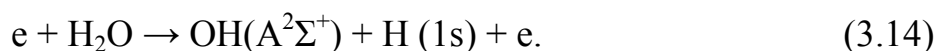
через реакцію "гасіння" радикала $\text{OH}(\text{A})$ [33-35] та зменшення температури електронів.

В активній зоні і в зоні післясвічення розряду головним механізмом утворення основного стану радикалів $\text{OH}(\text{X})$ є процес електронного удару з молекулою води [33-41, 130-139]:

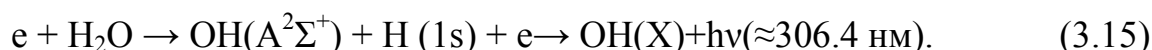


Для подолання порогу цієї реакції (швидкість, якої $k \approx 2 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$), потрібна енергія електронів 5.1 eV [36-39].

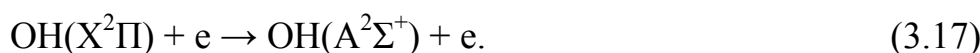
Утворення радикала $\text{OH}(\text{A})$ відбувається внаслідок реакції прямого дисоціативного збудження молекул води електронами ($k \approx 1.6 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$) [36-40]:



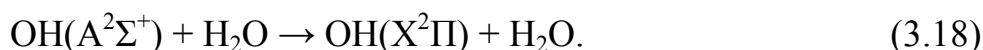
Порогова енергія електронів для реакції, яка відповідає за генерування УФ - фотонів з $\lambda \approx 306.4 \text{ нм}$ під час свічення, складає 9.1 – 9.7 eV [36-39, 42, 132]:



Утворення А-стану радикала $\text{OH}(\text{A})$ може відбуватись і в результаті двоступеневого процесу, який складається з утворення радикалів $\text{OH}(\text{X})$ і подальшого збудження стану $\text{OH}(\text{X})$ електронним ударом [9, 11, 12]:

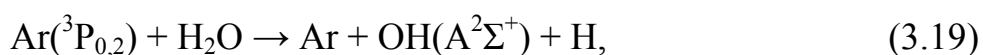


З підвищенням парціального тиску пари води в наносекундному ємнісному розряді відбувається реакція "гасіння" енергетичних А-станів радикалів гідроксилу молекулами води [33-35]:



Отже, утворення OH^* може проходити через збудження радикалів OH електронами або через руйнування тими ж електронами молекули води [36, 37].

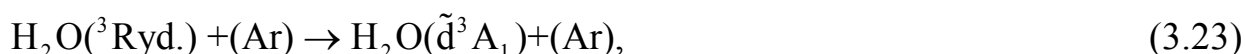
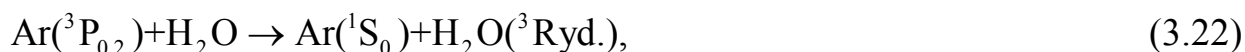
Іншим способом утворення OH^* є процес дисоціативного збудження молекули води в результаті зіткнення з триплетними метастабільними атомами інертного газу – аргону [41, 42, 134, 136-141]:



де енергія збудження $\text{Ar}(^3\text{P}_{0,2})$ рівна 11.72 і 11.55 еВ. Довгоживучий метастабільний стан $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$ має високу густину. Як правило, стани $\text{Ar}(^3\text{P}_{0,2})$ утворюються в результаті зіткнення з електронами в процесах [142]:



Автори [141] пропонують більш чіткий механізм з трьох каналів дисоціативного збудження молекули води, який приводить до утворення $\text{OH}(A)$:



Проте на даний час внаслідок великої кількості реакцій в плазмі газового розряду низького тиску в сумішах типу $\text{Ar}-\text{H}_2\text{O}$ та відсутністю констант швидкостей різних непружних реакцій, та реакцій з утворенням кластерів дослідження кінетики в цих плазмових середовищах не проводилось. Результати моделювання характеристик і параметрів плазми в сумішах пари води з гелієм наведені в наступному пункті.

3.1.3. Моделювання параметрів плазми OH^* - лампи розряду низького тиску в суміші $\text{He}/\text{H}_2\text{O}$

Для моделювання параметрів плазми низької густини на основі газової суміші $\text{He}/\text{H}_2\text{O}$ було вибрано найпростішу схему одержання такої плазми – повздовжній тліючий розряд низького тиску, яка одержала поширення і в УФ лампах низького тиску, що випромінюють на довжині хвилі 308-309 нм [11, 12, 23, 36, 37]. Оскільки ємність між електродами в наносекундному ємнісному розряді не переважає 5-10 нФ і є значно меншою за ємність розрядного проміжку типових бар'єрних ламп [2], тому усереднені за часом характеристики та механізм запалювання імпульсного ємнісного розряду близькі до відповідних характеристик повздовнього тліючого розряду низького тиску [143]. Результати моделювання відносяться до просторово

однорідної стадії наносекундного ємнісного розряду, коли було відсутнім контрагування в центрі розрядної трубки (перший максимум на рис.3.3 і рис. 3.4).

При розрахунках кінетики процесів та вихідних характеристик ОН*-лампи на основі розряду низького тиску розв'язувалась наступна система кінетичних рівнянь до тих пір, поки концентрації всіх компонентів плазми не досягали стаціонарних значень [82]:

$$\frac{dn_m}{dt} = S_m - \frac{D}{\Lambda^2} \cdot n_m. \quad (3.25)$$

Тут n_m – це концентрація компонентів газової суміші, S_m – доданок, який описує народження і гибель компонентів в результаті хімічних реакцій, D – коефіцієнт дифузії частинок, а Λ – характерна довжина дифузії, що визначалась як $1/\Lambda^2 = (2.4/R)^2 + (\pi/L)^2$, де R – радіус розрядної трубки (0.35 см), L – віддаль між електродами (5 см). Також $m \in [1, N_{max}]$, де N_{max} – загальна кількість складових газової суміші.

Доданок, який описує народження та гибель має наступний вигляд:

$$S_m = \sum_r C_{m,r} R_r. \quad (3.26)$$

Тут $C_{m,r}$ – загальна кількість частинок виду p , що створювались в реакції r ; її величина може бути або додатньою (народження) чи від'ємною (знищення). Також R_r – швидкість реакції типу r , яка визначалась як $R_r = k_{r,1,2} \cdot n_1 n_2$ для двочастинкової реакції, яка має константу швидкості k .

В моделі концентрація електронів розраховувалась в початковий момент часу з формули:

$$n_{e0} = \frac{W_d / V}{W_{in} + W_{el}}. \quad (3.27)$$

Вона залишалась постійною протягом всього часу. В формулі (3.27) W_d – потужність, яка вноситься в розряд, значення якої бралось з експериментальних даних, V – об'єм розряду, W_{in} – потужність, яка витрачається на непружні процеси і W_{el} – потужність, що витрачається на пружні процеси:

$$W_{in} = \sum k_{in} \varepsilon_{in} N_g, \quad (3.28)$$

$$W_{el} = 3m_e T_e \sum \frac{N_g k_{el}}{M}. \quad (3.29)$$

В рівнянні (3.28) сумування проводилось по всім непружним електронно-молекулярним реакціям (з He та H₂O), які мають константу швидкості k_{in} і енергетичний поріг ε_{in} . В (3.29) m_e – маса електрона, T_e – температура електронів, M – маса атома He і молекули H₂O, а сумування проводиться по пружним електронно-молекулярним процесам, які мають константу швидкості k_{el} .

Константи швидкості пружних і непружних процесів визначаються функцією розподілу електронів за енергіями. Вона розраховувалась числовим розв'язанням рівняння Больцмана в двочленному наближенні. Температура електронів визначалась як $T_e = 2/3 \langle \varepsilon_e \rangle$, де $\langle \varepsilon_e \rangle$ – середня енергія електронів, яка також визначалась через ФРЕЕ.

Коефіцієнти дифузії позитивних іонів визначались як $D_i = \pi \cdot v_i \cdot \lambda_i / 8$, де $v_i = \sqrt{8k_B T / \pi M_i}$ – теплова швидкість іона, k_B – стала Больцмана, T – температура газу (300 K), M_i – маса іона, $\lambda_i = 1 / (N_g \pi (R_{H_2O} + R_{He})^2)$ – довжина вільного пробігу іонів в газі. Також R_{H_2O} і R_{He} – радіуси молекули води і гелію, відповідно. Аналогічно розраховувались коефіцієнти дифузії нейтральних компонентів газової суміші. Швидкість цих складових визначалась за виразом $v_i = \sqrt{2k_B T / M_i}$.

Коефіцієнти дифузії негативних іонів рівні нулю, оскільки плазмові шари, які розміщені біля стінок розрядної трубки, відбивають негативні іони, що заважає їх виходу з області розряду. Моделювання проводилось при тисках гелію в інтервалі 1-9 кПа, для парціального тиску пари води в інтервалі 50-300 Па, розрядних струмів 10-50 мА та при напрузі 1 кВ.

На рис.3.14 наведена динаміка концентрацій збуджених компонентів газової суміші і концентрації радикала OH. З даного рисунку випливає, що найбільшу концентрацію має He*. Це зумовлено тим, що концентрація He на порядок величини переважає концентрацію молекули води, з якої утворюються всі інші компоненти плазми, приведені на даному рисунку (за виключенням молекул He₂*).

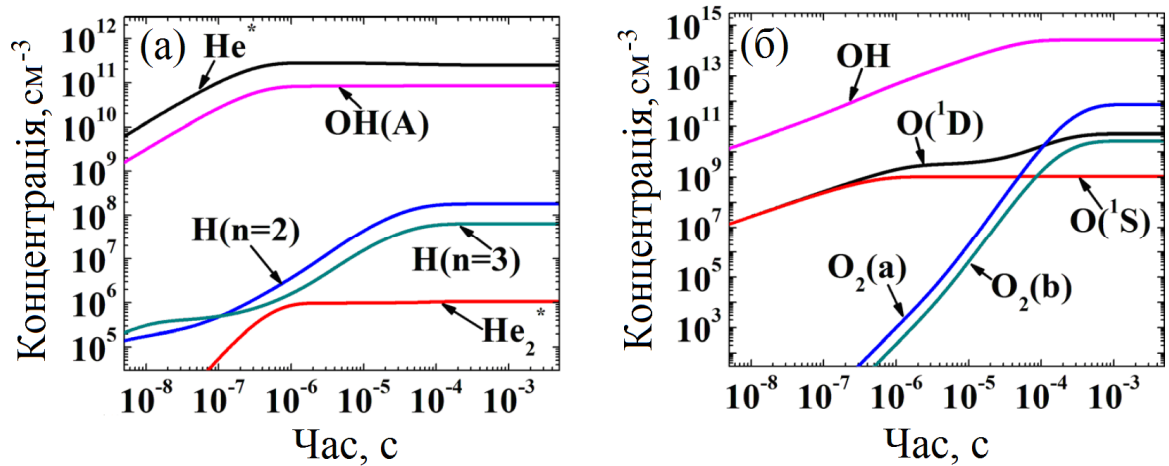
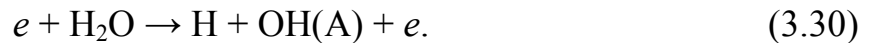


Рис.3.14. Часові залежності концентрацій збуджених компонентів плазми в розряді в газовій суміші: $p(\text{He})/p(\text{H}_2\text{O}) = 1000/150$ Па; $U = 1$ кВ; $I = 40$ мА [82].

Незалежно від співвідношення між парціальними тисками He і H_2O , основним процесом утворення радикала $\text{OH}(\text{A})$ в збудженому стані є реакція:



Другим процесом, який відповідальний за генерацію радикалів $\text{OH}(\text{A})$, є:



Результати моделювання показали, що збільшення тиску гелію приводить до зменшення відношення швидкостей реакцій (3.30) і (3.31). Наприклад, при $p(\text{He}) = 1$ кПа и $p(\text{H}_2\text{O}) = 150$ Па $k_6/k_7 \approx 16$, а при $p(\text{He}) = 9$ кПа и $p(\text{H}_2\text{O}) = 150$ Па $k_6/k_7 \approx 3$. Обернений ефект спостерігається при збільшенні тиску пари води. Наприклад, при $p(\text{He}) = 1$ кПа и $p(\text{H}_2\text{O}) = 300$ Па $k_6/k_7 \approx 23$.

Залежність концентрацій збуджених компонентів газової суміші і концентрації радикалів OH від тиску гелію представлена на рис.3.15. Також на рис. 3.15(в) показаний вплив $p(\text{He})$ на ФРЕЕ. З рис.3.15 (в) випливає, що збільшення тиску He при постійній різниці потенціалів між електродами приводить до зменшення кількості електронів в хвості ФРЕЕ, що приводить до зменшення середньої енергії електронів, і, відповідно, до зменшення температури електронів. Останнє веде до зменшення швидкостей електронно-молекулярних реакцій (3.30), (3.31) і до зменшення концентрації збуджених радикалів $\text{OH}(\text{A})$. Також результати

моделювання показали, що збільшення $p(\text{He})$ приводить до зміни процесів дезбудження радикалів $\text{OH}(\text{A})$.

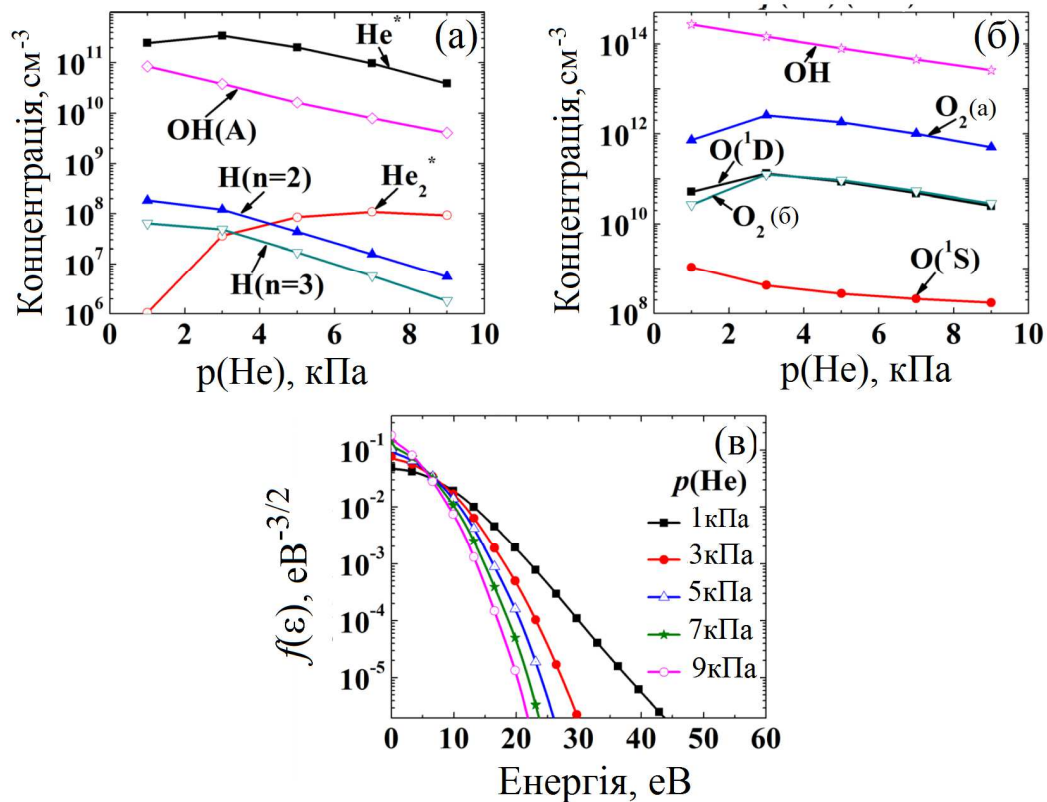


Рис.3.15. Вплив тиску гелію на концентрації збуджених компонентів і радикалів OH (а,б), а також на ФРЕЕ (в); $p(\text{H}_2\text{O}) = 150 \text{ Па}$; $U = 1 \text{ кВ}$; $I = 40 \text{ мА}$ [82].

А саме, при $p(\text{He}) = 1 \text{ кПа}$ збудження знімається при зіткненнях з молекулами води:



Другим процесом, який відповідає за зняття збудження, є спонтанне випромінювання:



При збільшенні тиску гелію реакції (3.32) і (3.33) міняються місцями, і основним процесом, відповідальним за дезбудження $\text{OH}(\text{A})$ стає процес (3.33). Константи швидкості реакцій (3.32) і (3.33) не залежать від температури електронів, тому зміна каналів пов'язана з тим, що при низькому тиску He менше молекул H_2O розкладається в розряді. Тому при низьких тисках He в стаціонарному стані концентрація молекул води вища.

На рис. 3.16 представлено вплив парціального тиску пари води на концентрації збуджених компонентів газової суміші, на концентрацію радикалів OH і на ФРЕЕ. З рис.3.16 випливає, що збільшення парціального тиску парів води – $p(\text{H}_2\text{O})$ приводить до зменшення долі електронів в хвості ФРЕЕ. Це, в свою чергу, приводить до зменшення температури електронів. Тому збільшення $p(\text{H}_2\text{O})$ приводить до зменшення констант швидкості реакцій (3.30) і (3.31). Тим не менше, швидкості реакцій (3.30) і (3.31) збільшуються за рахунок збільшення концентрації молекул води. Також результати моделювання показали, що при всіх парціальних тисках пари води процесом, відповідальним за дезбудження, є реакція (3.32), швидкість якої збільшується при збільшенні $p(\text{H}_2\text{O})$.

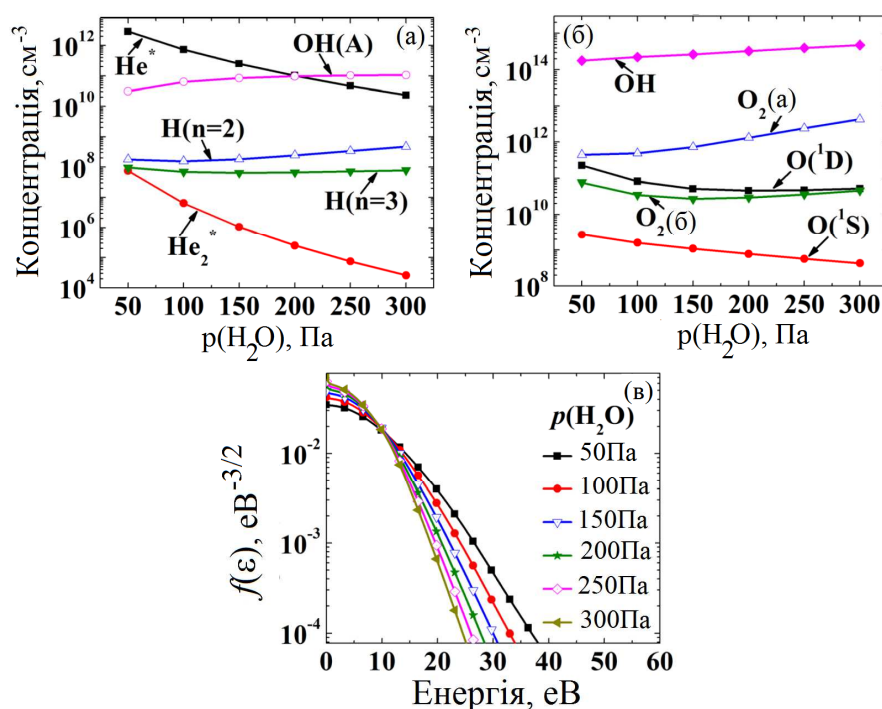


Рис.3.16. Вплив тиску пари води на концентрації збуджених компонентів і радикалів OH (а,б), а також на ФРЕЕ (в); $p(\text{He}) = 1$ кПа; $U = 1$ кВ; $I = 40$ мА [82].

Вплив струму, який протікає через розряд (при постійній різниці потенціалів між електродами), на концентрації збуджених компонентів газової суміші показано на рис.3.17. З цього рисунка випливає, що збільшення величини струму приводить до лінійного збільшення концентрацій всіх компонентів. Це пов'язано з тим, що збільшення струму приводить до лінійного збільшення потужності, яка вноситься в

розряд, що веде до лінійного збільшення густини електронів. Це приводить до лінійного збільшення швидкості електронно-молекулярних реакцій, які прямо пропорційні величині n_e .

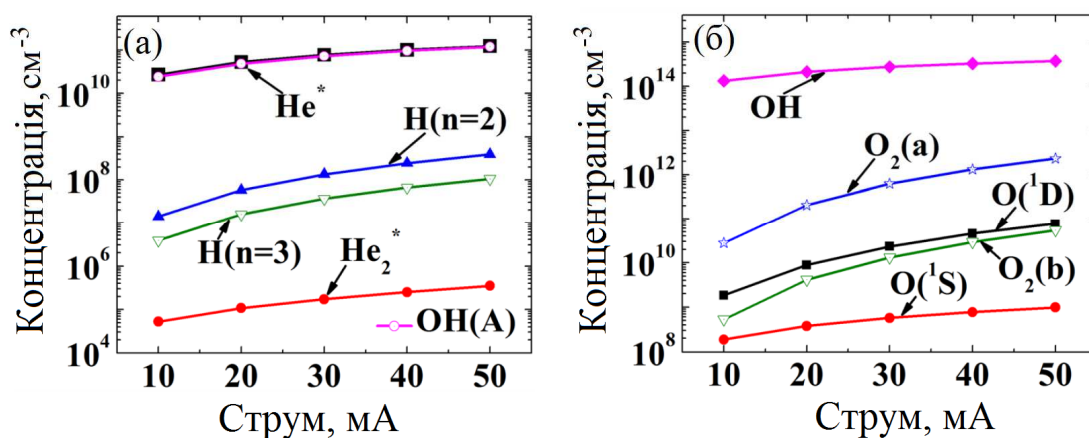


Рис.3.17. Вплив величини струму розряду низького тиску на концентрації збуджених компонентів і радикалів OH; $p(\text{He}) = 1$ кПа; $p(\text{H}_2\text{O}) = 200$ Па; $U = 1$ кВ [82].

3.2. Дослідження характеристик УФ і ВУФ джерел випромінювання з накачуванням наносекундного бар'єрного розряду в сумішах гелію, аргону з парами "важкої" води

В пункті наведено результати дослідження оптичних і електричних характеристик випромінювання газорозрядної плазми в ВУФ та УФ діапазонах спектру бар'єрного розряду в сумішах He-D₂O, Ar-D₂O. Спектри випромінювання газорозрядної плазми містять головним чином смуги $C \rightarrow X$ та $A \rightarrow X$ гідроксилу OD ($\Delta\lambda = 140 - 315$ нм).

Проведена оптимізація інтенсивності даних смуг випромінювання шляхом варіювання як тиску води, так і тиску інертних газів. Досліджені інтенсивності випромінювання смуги з максимумом при $\lambda = 309$ нм в залежності від величини напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора і частоти слідування імпульсів струму вказують на можливість збільшення середньої потужності випромінювання розряду при частотах $f > 1$ кГц. Для експериментів з дослідження характеристик бар'єрного розряду в суміші He-D₂O проведене чисельне моделювання механізму утворення OD(A) в плазмі бар'єрного розряду.

Результати досліджень опубліковані в працях [83-89, 91-94, 96, 97] та захищені патентами [90, 95].

3.2.1. Оптичні характеристики лампи на суміші He-D₂O

Огляд праць з розробок і дослідження джерел короткохвильового випромінювання на основі пари води показав, що емісійні характеристики плазми бар'єрного розряду в газових сумішах, які містять пари "важкої" води в спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 140 - 200$ нм відсутні, що і стимулювало дослідження цього бар'єрного розряду в ВУФ діапазоні спектру.

Запалювання імпульсно-періодичного наносекундного бар'єрного розряду проводилось з використанням циліндричної колби довжиною 20 см (зовнішній діаметр – 26 мм, внутрішній – 23 мм). Більш детальний опис газорозрядної трубки приводиться в розділі 2. На електроди двобар'єрної лампи подавались імпульси напруги амплітудою 25 - 40 кВ, а частота їх слідування могла змінюватися в діапазоні 35 - 1000 Гц.

Спектр випромінювання бар'єрного розряду в суміші He - D₂O представлений на рис. 3.18. При парціальному тиску пари "важкої" води $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.04 - 0.33$ кПа і гелію $p(\text{He}) = 10 - 60$ кПа випромінювання зосереджено, в основному, у ВУФ діапазоні спектру ($\lambda = 144 - 160$ нм). Смуги цього спектрального діапазону можуть бути віднесені до переходів $\text{C} \rightarrow \text{X}$ радикала OD [23]. Також в спектрі спостерігається УФ - смуга $\text{A} \rightarrow \text{X}$ гідроксилу OD з максимумом при $\lambda = 309$ нм.

Якщо порівняти із спектрами ємнісного розряду (рис. 3.1.), де найбільш інтенсивними були смуги $\text{C} \rightarrow \text{A}$ радикала OH з максимумами при $\lambda = 180$ і 186 нм, то в спектрах випромінювання бар'єрного розряду дані смуги не проявлялися.

Залежності інтенсивності випромінювання плазми бар'єрного розряду в суміші He-D₂O в спектральному діапазоні $\lambda = 144 - 160$ нм від парціального тиску пари "важкої" води приведені на рис. 3.19. Найбільш інтенсивне випромінювання радикала OD спостерігається при оптимальному тиску пари "важкої" води $0.06 - 0.2$ кПа (рис. 3.19 (а)). 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. 3.19 (б)).

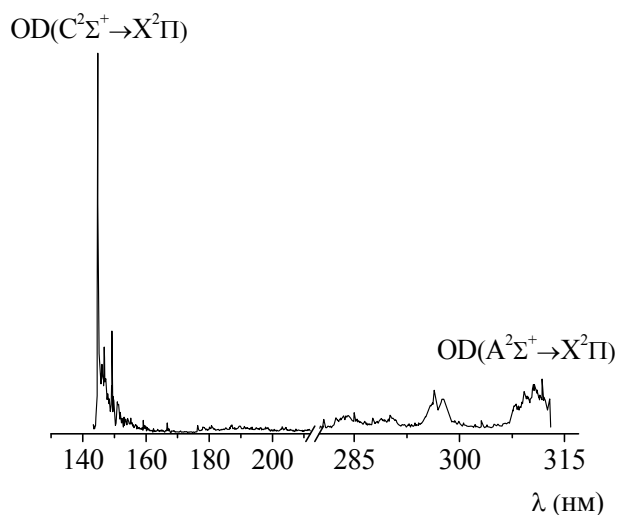


Рис. 3.18. Спектр випромінювання бар'єрного розряду в суміші He-D₂O при $p(\text{He}) = 20$ кПа, $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.33$ кПа [83, 84, 85].

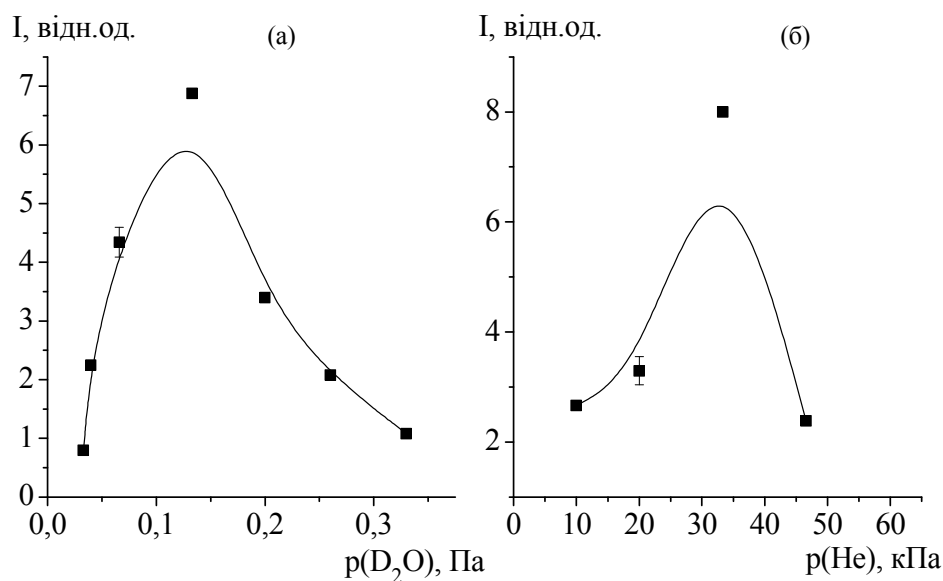


Рис. 3.19. Залежності інтенсивності смуги випромінювання OD ($C \rightarrow X$) плазми бар'єрного розряду в суміші He - D₂O від парціального тиску пари "важкої" води при $p(\text{He}) = 20$ кПа (а) і від парціального тиску гелію при $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.2$ кПа (б) [83, 84, 85].

Спрощена схема енергетичних рівнів молекули гідроксилу приведена на рис. 3.20 [23].

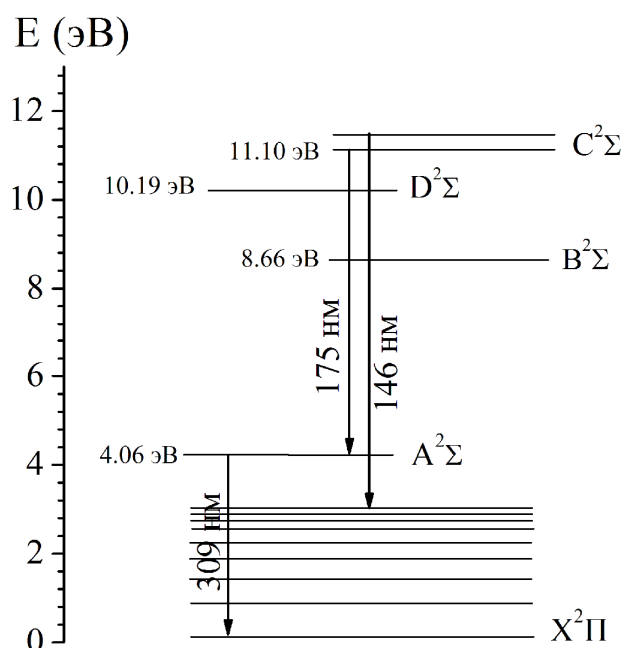


Рис 3.20. Схема енергетичних рівнів радикала OD [23].

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

Час життя радикалів OD в електронних станах C, D, B дорівнює 6 нс, що набагато менше часу життя OD(A) (770 ± 47 нс) [144, 145], тому збудження наносекундним розрядом приводить до ефективного утворення радикалів OD(C).

Типові результати оптимізації робочого середовища джерела УФ випромінювання смуги 309 нм OD ($A \rightarrow X; 0-0$) в однакових відносних одиницях (інтенсивності отримані сумуванням всіх електронно-коливальних смуг системи $A \rightarrow X$ в спектральному інтервалі 306 - 315 нм) від парціального тиску пари D_2O та гелію приведені на рис. 3.21.

У відомій нам науково-технічній літературі подібні результати для плазми бар'єрного розряду на основі сумішей гелію з парами "важкої" води відсутні.

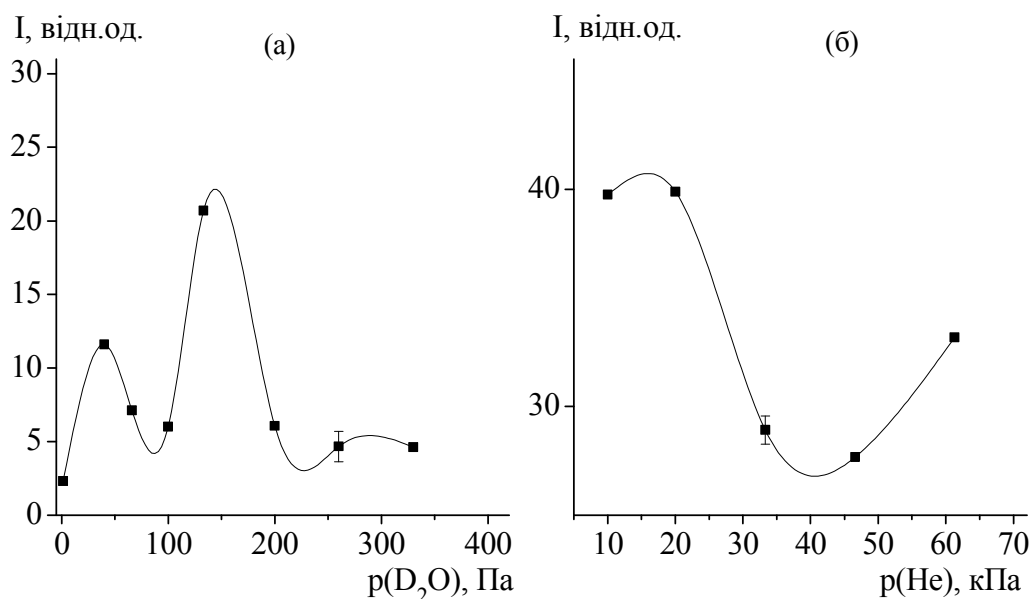


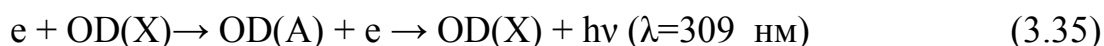
Рис. 3.21. Залежності інтенсивності випромінювання смуги з максимумом при $\lambda = 309$ нм OD ($A \rightarrow X$) від парціального тиску пари D_2O при $p(He) = 20$ кПа (а) та від парціального тиску гелію при $p(D_2O) = 0.2$ кПа (б) [83, 86-89].

Як випливає з рис. 3.21 (б), залежність інтенсивності випромінювання смуги 309 нм характеризується різними діапазонами парціального тиску пари D_2O . При найбільш низькому тиску пари D_2O (1 – 100 Па) (рис. 3.21, (а)) утворення радикалів OD(A, X) може відбуватися в результаті процесу дисоціативного збудження молекул D_2O :



Ефективність реакції (3.29) в плазмі не сильно залежить від роду інертного газу (гелію або аргону), тому в умовах нашого експерименту інтенсивність смуги з $\lambda \approx 309$ нм і оптимальний тиск пари D_2O відрізнялись в цих газових сумішах мало.

При підвищенні тиску пари D_2O до 150 - 200 Па в гелієвій суміші можливим стає збудження радикалів гідроксилу OD(X) електронним ударом з утворенням OD(A):



При $p(D_2O) \approx 200$ Па інтенсивність смуги OD ($A \rightarrow X$) різко зменшується, ймовірно, із-за "гасіння" радикалів OD(A) молекулами D_2O :





де h – постійна Планка, ν – частота випромінювання.

Оптимальний тиск гелію, який необхідний для отримання максимальної інтенсивності смуг радикала OD в газовій суміші знаходиться в діапазоні 10 - 20 кПа (рис. 3.21, (б)).

Для даного експерименту проведено чисельне моделювання впливу різних параметрів на характеристики випромінювання двобар'єрного розряду в суміші He-D₂O [91, 92]. Спочатку визначаються функції розподілу електронів за енергією (ФРЕЕ), які використовуються для розрахунку швидкостей електронно-молекулярних реакцій і температури електронів. Щоб визначити ФРЕЕ розв'язується рівняння Больцмана у двочленному наближенні. В табл.3.1 наведено реакції, які враховані при розрахунках кінетики утворення OD(A) в бар'єрному розряді.

Таблиця 3.1

Реакції, які враховані при розрахунках кінетики плазми у двобар'єрному розряді в суміші He-D₂O ($p(\text{He})=20$ кПа, $p(\text{D}_2\text{O})=10$ Па) [91].

№	Реакції	Швидкість реакції/(см ⁻³ с-1) [19]
1.	$e + \text{D}_2\text{O} \rightarrow e + \text{D} + \text{OD(A)}$	2.3×10^{20}
2.	$e + \text{OD} \rightarrow e + \text{OD(A)}$	2.1×10^{17}
3.	$\text{He}^+ + \text{D}_2\text{O} \rightarrow \text{D}^+ + \text{OD(A)} + \text{He}$	1.2×10^{16}
4.	$\text{He}_2^+ + \text{D}_2\text{O} \rightarrow \text{HeD}^+ + \text{He} + \text{OD(A)}$	1.7×10^{15}
5.	$e + \text{OD(A)} \rightarrow \text{OD}^+ + 2e$	2.2×10^{17}
6.	$e + \text{OD(A)} \rightarrow \text{O} + \text{D} + e$	5.4×10^{17}
7.	$\text{He}^+ + \text{OD(A)} \rightarrow \text{O}^+ + \text{D} + \text{He}$	8.8×10^{14}
8.	$\text{He}_2^+ + \text{OD(A)} \rightarrow \text{OD}^+ + 2\text{He}$	5.7×10^{11}
9.	$\text{He}^* + \text{OD(A)} \rightarrow \text{OD}^+ + \text{He} + e$	8.5×10^{15}
10.	$\text{He}_2^* + \text{OD(A)} \rightarrow \text{OD}^+ + 2\text{He} + e$	2.2×10^{11}
11.	$\text{He} + \text{OD(A)} \rightarrow \text{He} + \text{OD}$	2.0×10^{15}
12.	$\text{D} + \text{OD(A)} \rightarrow \text{D}_2 + \text{O}$	3.8×10^{12}
13.	$\text{D} + \text{OD(A)} + \text{He} \rightarrow \text{D}_2\text{O} + \text{He}$	9.0×10^{10}
14.	$\text{O} + \text{OD(A)} \rightarrow \text{D} + \text{O}_2$	4.2×10^8
15.	$\text{D}_2 + \text{OD(A)} \rightarrow \text{D} + \text{D}_2\text{O}$	3.0×10^{10}
16.	$\text{O}_2 + \text{OD(A)} \rightarrow \text{O}_2 + \text{OD}$	2.6×10^4
17.	$\text{OD} + \text{OD(A)} \rightarrow \text{D}_2\text{O} + \text{O}$	8.2×10^9
18.	$\text{OD} + \text{OD(A)} \rightarrow \text{D}_2\text{O}_2$	8.7×10^{10}

19.	$\text{OD(A)} + \text{D}_2\text{O} \rightarrow \text{D}_2\text{O} + \text{OD}$	3.6×10^{16}
20.	$\text{OD(A)} + \text{D}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{DO}_2 + \text{D}_2\text{O}$	5.2×10^5
21.	$\text{OD(A)} \rightarrow \text{OD} + h\nu$	3.4×10^{16}

Залежності функції розподілу електронів по енергіях (ФРЕЕ) при різних співвідношеннях He - D₂O і напруги розряду показали, що зі збільшенням тиску води зменшується число електронів у високоенергетичному хвості ФРЕЕ, що приводить до зниження як і температури електронів T_e, так і швидкостей реакцій зіткнення електронів з нейтральними частинками (рис. 3.22 (а)). В роботі [49] при збільшенні вмісту парів води в суміші He-H₂O значення ФРЕЕ має тенденцію до зменшення. На такий вигляд ФРЕЕ впливає не тільки зниження потенціалу іонізації при додаванні молекул до інертного газу, але також і зміна балансу набору енергії електронів в електричному полі і втрат її в різних каналах взаємодії з частинками [49].

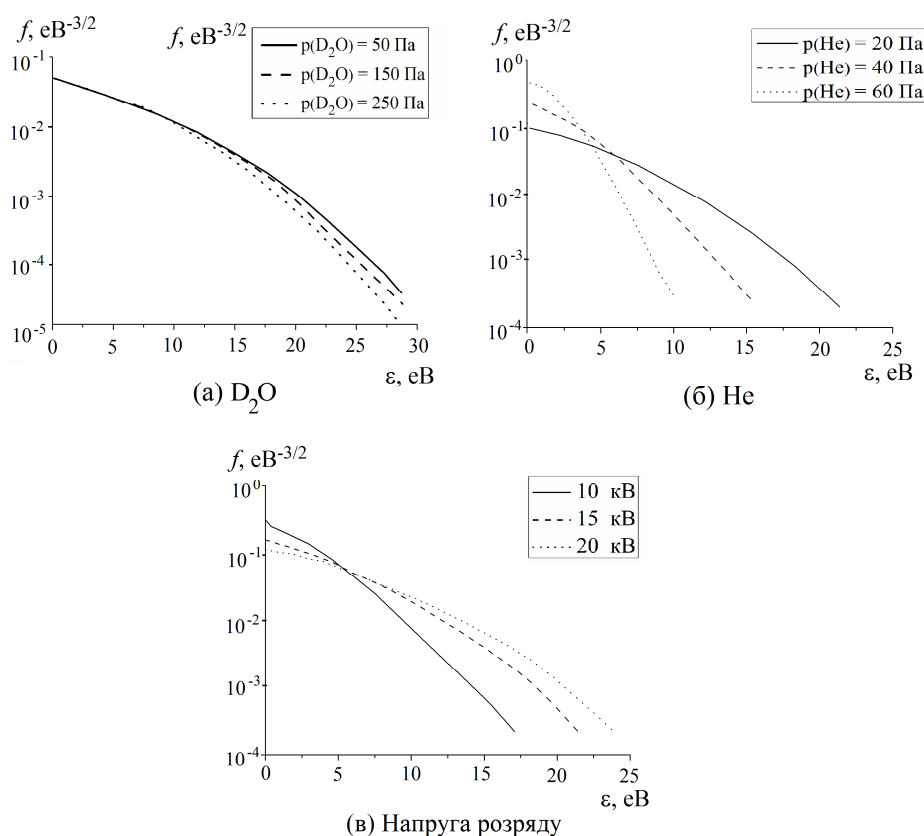


Рис.3.22. Функції розподілу електронів за енергією, які розраховані при різних співвідношеннях He-D₂O та напрузі розряду [83, 91].

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 (рис. 3.22 (б)). Це пояснюється тим, що переріз іонізації і поріг іонізації у атомів гелію більший ніж для молекул D_2O .

Збільшення напруги розряду веде до збільшення електронів у хвості ФРЕЕ, а це веде до збільшення температури електронів та збільшення швидкості реакцій зіткнення електронів з нейтральними частинкам (рис. 3.22 (в)).

Розрахована часова еволюція густини електронів, He^+ , D_2O^+ і $OD(A)$ під час одного розряду і подальшого післясвічення (рис. 3.23) показала, що густина гелію зменшується після припинення горіння розряду, а густина D_2O продовжує зростати. Густина електронів істотно не змінюється під час розряду, але N_e зменшується після вимкнення розряду, зростає в післясвіченні, а потім зменшується. Збільшення густини електронів у післясвіченні обумовлено відривом електронів від негативних іонів (O^- , OH^- , D^-), які ефективно генеруються у розряді.

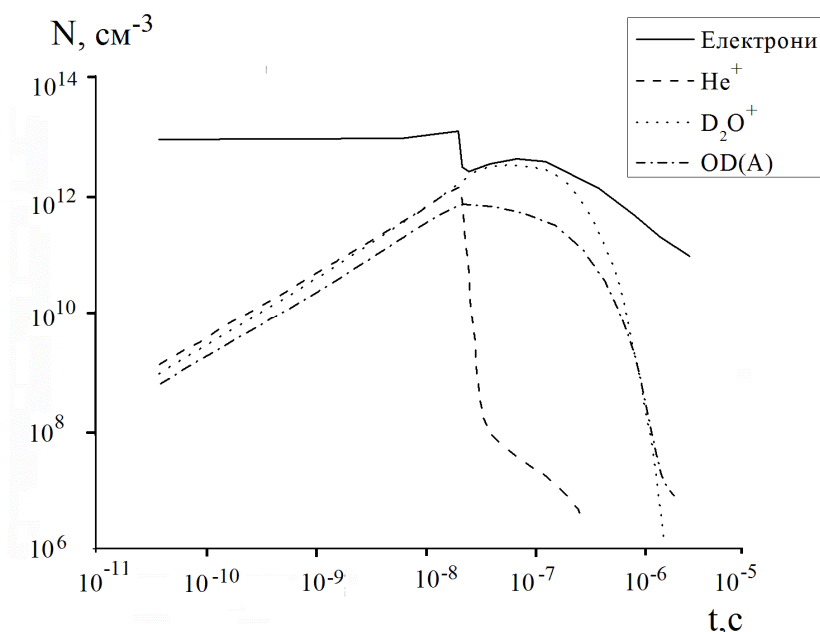


Рис.3.23. Часова еволюція густини електронів, іонів He^+ , D_2O^+ , густини радикала $OD(A)$ ($U_d = 20$ кВ, $W_d = 1 \times 10^5$ Вт, $\tau = 20$ нс) [83, 90].

Розрахунок кінетики показав, що більшою частиною позитивних іонів є He^+ , D_2O^+ . Густина He^+ зменшується, коли розряд вимикається, в той час як густина D_2O^+

продовжує зростати. Зниження густини He^+ обумовлене електрон-іонною рекомбінацією і зіткненням з перезарядкою:



Крім того перетворення He^+ в D_2O^+ зменшує термін служби плазми.

У тліючому розряді в суміші $\text{He}-\text{H}_2\text{O}$ починаючи з 10^{-8} с густина H_2O^+ , He^+ починає зростати, при чому концентрація H_2O^+ більша від концентрації He^+ [50].

Радикал $\text{OD}(\text{A})$ формується у розряді і втрачається у післясвіченні. Дезбудження $\text{OD}(\text{A})$ внаслідок зіткнення з гелієм не має істотного значення. Співвідношення реакцій (3.36) і (3.37) залежить від тиску води, а спонтанне випромінювання в реакції (3.37) стає домінуючим, коли $p(\text{D}_2\text{O}) < 15$ Па. Отже, чисельне моделювання показало, що $\text{OD}(\text{A})$ не генерується під час післясвічення.

На рис. 3.24 наведено залежність густини $\text{OD}(\text{A})$ від тиску пари "важкої" води та гелію.

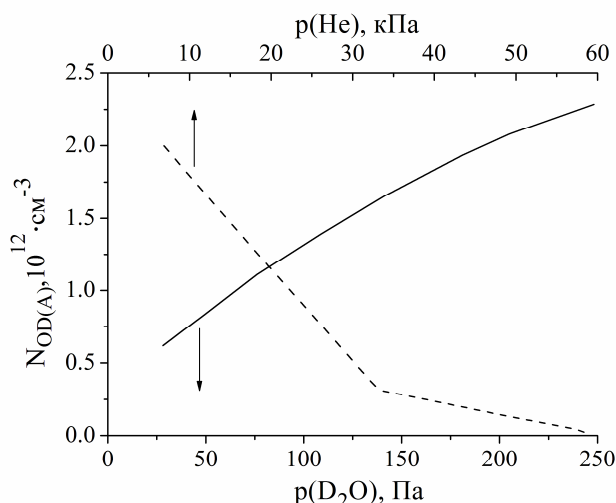


Рис. 3.24. Залежності густини $\text{OD}(\text{A})$ наприкінці розряду від $p(\text{He})$ (коли $p(\text{D}_2\text{O}) = 200$ Па) і від $p(\text{D}_2\text{O})$ (коли $p(\text{He}) = 20$ кПа), отримані шляхом чисельного моделювання ($U_d = 20$ кВ) [83, 90].

Видно, що збільшення парціального тиску гелію приводить до зменшення густини $\text{OD}(\text{A})$. Це зумовлено тим, що зі збільшенням тиску гелію зменшується температура електронів і швидкості реакції зіткнення електронів з нейтральними частинками.

Натомість збільшення парціального тиску пари води приводить до збільшення густини OD(A).

Характер залежності (рис. 3.24) можна пояснити конкуренцією між реакціями (3.36) і (3.37). Із реакції (3.22) випливає, що при збільшенні парціального тиску пари води збільшується швидкість утворення радикала OD(A). Коли $p(D_2O) < 15$ Па, то переважає реакція (3.37), а при $p(D_2O) > 15$ Па – реакція (3.36), яка проходить без випромінювання. Збільшення тиску пари "важкої" води приводить до зменшення інтенсивності випромінювання.

Якщо порівняти експериментальні розрахунки і розрахунки кінетики, то є добре узгодження. Збільшення тиску гелію приводить до зменшення густини OD(A). Експериментальне дослідження показало немонотонну залежність від тиску води, в той час як чисельне моделювання показує, що зі збільшенням тиску D_2O збільшується і густина OD(A). Немонотонність пов'язана з конкуренцією між реакціями на стадії післясвічення, коли генерується УФ-випромінювання. Крім того, співвідношення між реакціями (3.36) і (3.37) зростає при підвищенні тиску води. Останнє приводить до зменшення інтенсивності УФ-випромінювання.

Більш детальний спектр смуги з максимумом при $\lambda \approx 308.7$ нм OD(A \rightarrow X) при $p(D_2O) = 0.133$ кПа наведений на рис. 3.25.

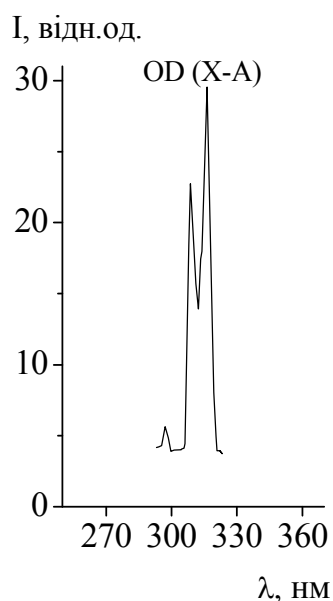


Рис. 3.25. Спектр випромінювання імпульсно-періодичної двобар'єрної лампи на основі суміші $p(He) - p(D_2O) = 20 - 0.133$ кПа [83, 90, 91, 93, 95].

Оптимізація даної смуги в суміші $p(\text{He}) - p(\text{D}_2\text{O}) = 20 - 0.133$ кПа (рис. 3.26) показала, що максимум інтенсивності смуги OD(X - A) спостерігається при парціальному тиску пари D_2O в діапазоні $p = 130 - 200$ Па.

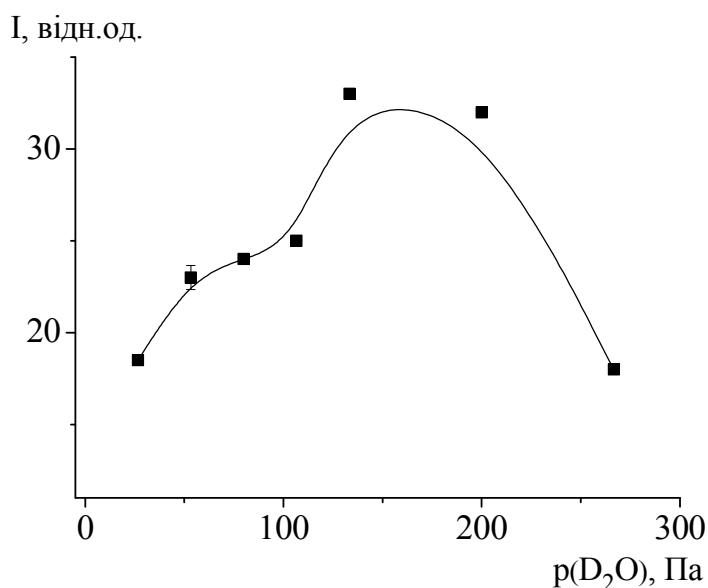


Рис. 3.26. Залежність інтенсивності випромінювання смуги гідроксилу (OD) з максимумом при $\lambda = 308.7$ нм OD(X - A) від парціального тиску пари D_2O при $p(\text{He}) = 20$ кПа (робоча суміш He - D_2O) [83, 90, 91, 94].

Збільшення парціального тиску пари D_2O приводить до зменшення кількості швидких електронів в розряді і спаду константи швидкості дисоціативного збудження радикалів молекул D_2O . При цьому, збільшуються втрати потужності розряду на коливальне збудження молекул D_2O і збільшується внесок реакції "гасіння" радикалів OD(A) молекулами D_2O .

3.2.2. Дослідження оптичних характеристик газорозрядної плазми випромінювання радикала OD в суміші Ar - D_2O

Дослідження випромінювання плазми імпульсно-періодичного бар'єрного розряду проводилося при $p(\text{Ar}) = 10 - 60$ кПа і $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.2$ кПа. Бар'єрний наносекундний розряд у суміші Ar - D_2O однорідно заповнював весь об'єм лампи і мав білий з рожевим відтінком колір.

Спектри випромінювання наносекундного бар'єрного розряду в суміші Ar з парами "важкої" води (рис. 3.27) включають як смуги у ВУФ, так і смуги в УФ – діапазоні спектру [83, 87, 88, 96].

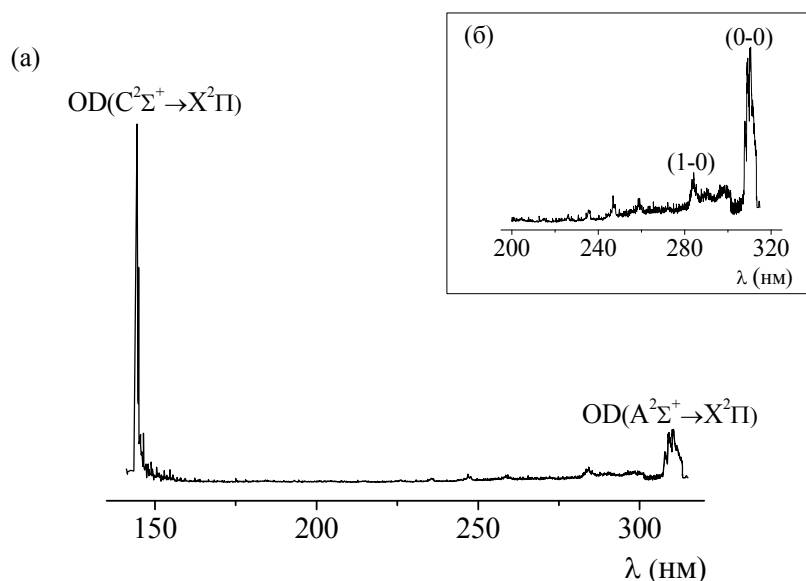


Рис. 3.27. Спектри випромінювання бар'єрного розряду в суміші Ar - D₂O при парціальному тиску пари "важкої" води $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.40$ кПа і $p(\text{Ar}) = 20$ кПа: в спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 140\text{-}320$ нм (а) та $\Delta\lambda = 200\text{-}320$ нм (б) [83, 87, 88].

Смуги в діапазоні $\lambda = 144 - 160$ нм можуть бути віднесені до переходів $\text{C} \rightarrow \text{X}$ радикала OD.

У спектральному діапазоні 200 - 320 нм найбільш інтенсивними є смуги 283 нм OD($\text{A} \rightarrow \text{X}; 1-0$) і 309 нм OD($\text{A} \rightarrow \text{X}; 0-0$), які спостерігаються на слабкому фоні континууму дейтерію. Найбільш виражено цей континуум проявляється при мінімальному парціальному тиску пари D₂O ($p = 50$ Па). Із збільшенням парціального тиску пари D₂O до 400 Па в спектрах починають проявлятися і смуги з максимумами при $\lambda \approx 289.0$ нм (1-0), 296.4 нм (3-2), 297.2 нм (2-0), 263.8 нм (3-1), які належать до випромінювання радикалів OD ($\text{A}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Pi$).

Як і в наносекундному розряді по поверхні струменя води (або в повітряній суспензії води) [48] в області довжин хвиль 260 нм і 275 нм спостерігається випромінювання смуг оксиду азоту (NO), основним каналом утворення яких є молекули води, а не молекулярний кисень, який в незначній кількості присутній в

залишкових газах. Випромінювання слабких смуг в спектральному інтервалі 220-240 нм можливо також віднести до випромінювання радикалів NO^* . Інтенсивність смуг NO^* збільшується із зростанням парціального тиску пари D_2O .

Результати оптимізації інтенсивності показали, що оптимальний тиск аргону, який необхідний для отримання максимальної інтенсивності смуг радикала OD, як у ВУФ, так і в УФ області спектру в бар'єрному розряді в суміші Ar - D_2O знаходиться в діапазоні 10 - 20 кПа (рис.3.28, (а); 3.29, (а)).

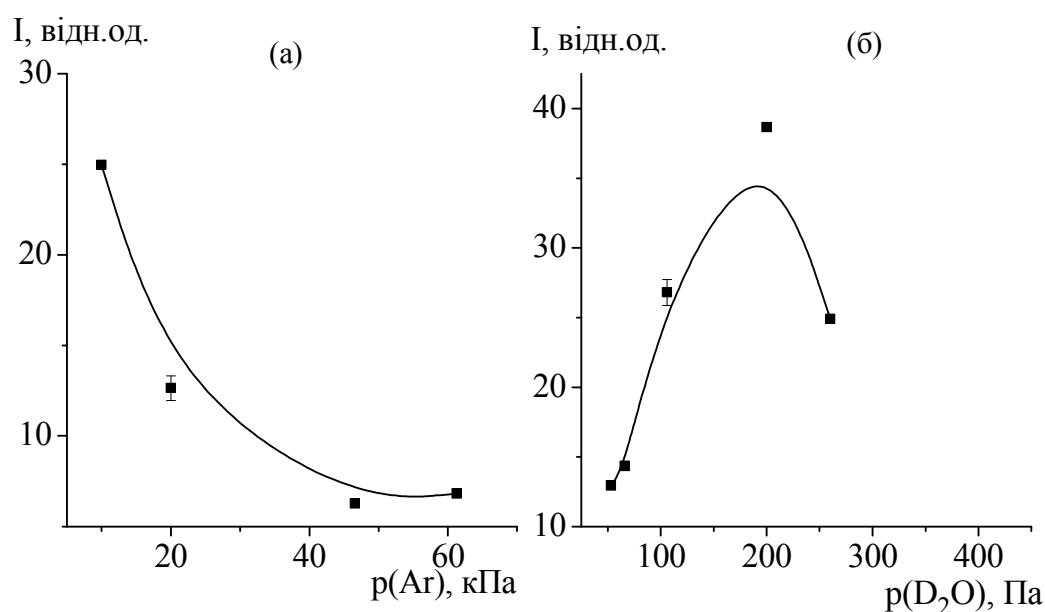


Рис. 3.28. Залежності інтенсивності випромінювання смуги з максимумом при $\lambda = 144 - 160$ нм OD ($\text{C} \rightarrow \text{X}$) від парціального тиску аргону при $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.2$ кПа (а) та від парціального тиску пари D_2O при $p(\text{Ar}) = 20$ кПа (б) [83].

Подібні результати спостерігаються при дослідженні смуги з максимумом 309.1 нм для однобар'єрного розряду в суміші Ar - H_2O : $p(\text{Ar}) = 18$ кПа [31]. Наші результати показали, що інтенсивність випромінювання у ВУФ-області спектру, в порівнянні з УФ-випромінюванням, більша. В праці [31] дослідження суміші Ar - H_2O у ВУФ області спектру авторами не проведено. Потрібно відмітити, що використання двобар'єрної лампи, яка використовується у нашому експерименті, у порівнянні з однобар'єрною, згідно з [146], дозволяє уникнути контакту робочої суміші з металом електроду. При збільшенні потужності збудження в даній газорозрядній трубці характер розряду не поміняється.

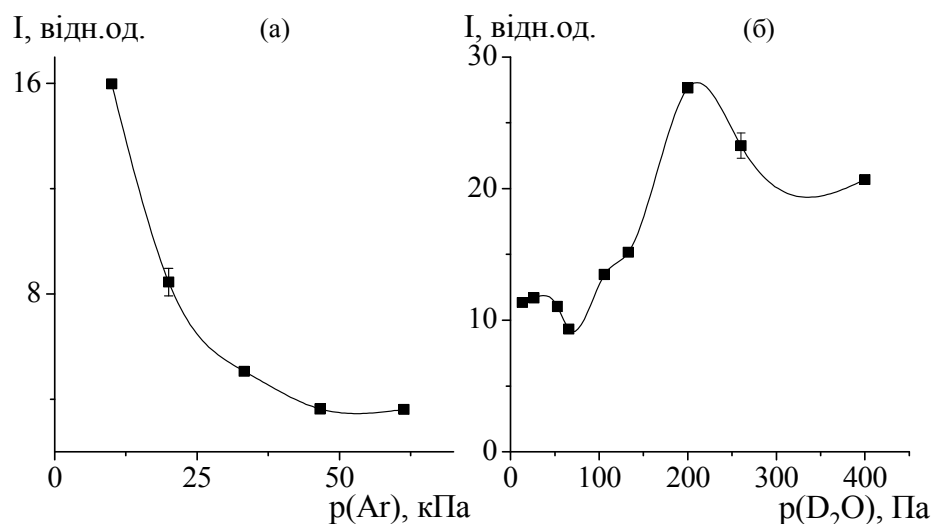
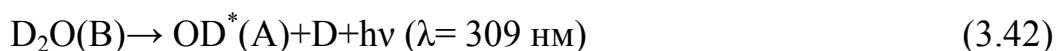
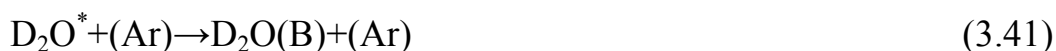


Рис. 3.29. Залежності інтенсивності випромінювання смуги з максимумом при $\lambda = 309$ нм OD ($A \rightarrow X$) від парціального тиску аргону при $p(\text{D}_2\text{O}) = 0.2$ кПа (а) та від парціального тиску пари D_2O при $p(\text{Ar}) = 20$ кПа (б) [83, 86-89].

Утворення радикала OD^* пов'язано з процесом збудження електронним ударом молекули води і з процесом передачі енергії від метастабільного атома аргону молекулам води, внаслідок чого відбувається дисоціація молекул води:



Таким чином, використання інертного газу Ar приводить до того, що в спектральному діапазоні 200 - 315 нм спостерігається яскраво виражена смуга $\lambda = 309$ нм $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ радикала OD . Така тенденція спостерігається і в мікросекундному бар'єрному розряді в суміші $\text{Ar} - \text{H}_2\text{O}$ [43].

Оптимальний вміст пари "важкої" води для випромінювача на основі $\text{C} \rightarrow \text{X}$ смуги з максимумом при $\lambda = 144 - 160$ нм $\text{OD}(\text{C} \rightarrow \text{X})$ та $\lambda = 309$ нм $\text{OD}(\text{A} \rightarrow \text{X})$ в суміші $\text{Ar} - \text{D}_2\text{O}$ знаходиться в діапазоні 150 - 400 Па. Оптимальний тиск пари води для мікросекундного бар'єрного розряду в суміші аргону з парами звичайної води [43] знаходиться в межах 130 - 170 Па (при $p(\text{Ar}) = 35-40$ кПа). Але наносекундний бар'єрний розряд має більше переваг в порівнянні з мікросекундним. Для

наносекундного бар'єрного розряду характерний швидкий час наростання імпульсу напруги, а це забезпечує однорідність розряду [45]. До того ж миттєве значення потужності в розрядному імпульсі на 1-2 порядки вище, ніж в мікросекундному розряді [147].

Інтенсивність випромінювання смуги 309 нм в діапазоні 150 - 200 Па парціального тиску пари D₂O в суміші на основі аргону приблизно в 1.5 рази вище, ніж в гелієвій, що може бути пов'язане з підключенням додаткового механізму утворення радикалів OD(A) за рахунок передачі енергії від метастабільних атомів аргону молекулам D₂O:



В області підвищеного тиску пари D₂O (200 - 400) Па утворення радикалів OD(A) може йти по каналу передачі енергії від метастабільних атомів аргону кластерам. Оскільки в цій області тиску пари води випромінювання смуги 309 нм в гелієвих середовищах практично відсутнє, то кластерний механізм утворення OD(A) може розглядатися тільки для сумішей на основі аргону:



Передача енергії від Ar(m) може здійснюватися через проміжне збудження кластера при стабілізації його в зіткненнях з атомами аргону.

3.2.3. Електричні характеристики плазми бар'єрного розряду в суміші гелію та аргону з парами D₂O

Для смуги OD (A → X) (λ = 307.8 нм) проведені дослідження залежностей інтенсивності випромінювання від частоти проходження імпульсів струму при зарядній напрузі U = 13 кВ для сумішей He - D₂O та Ar - D₂O (рис. 3.30, (а, б)).

Результати оптимізації інтенсивності показали, що різке зростання інтенсивності смуг спостерігається при частотах Δf = 500-1000 Гц і ці залежності близькі до лінійних. Насичення залежностей інтенсивності смуг випромінювання OD не спостерігається. Лінійний ріст інтенсивності пов'язаний з лінійним збільшення середнього енергетичного внеску в плазму і основною реакцією

утворення збуджених радикалів ОН в реакції дисоціативного збудження молекули води.

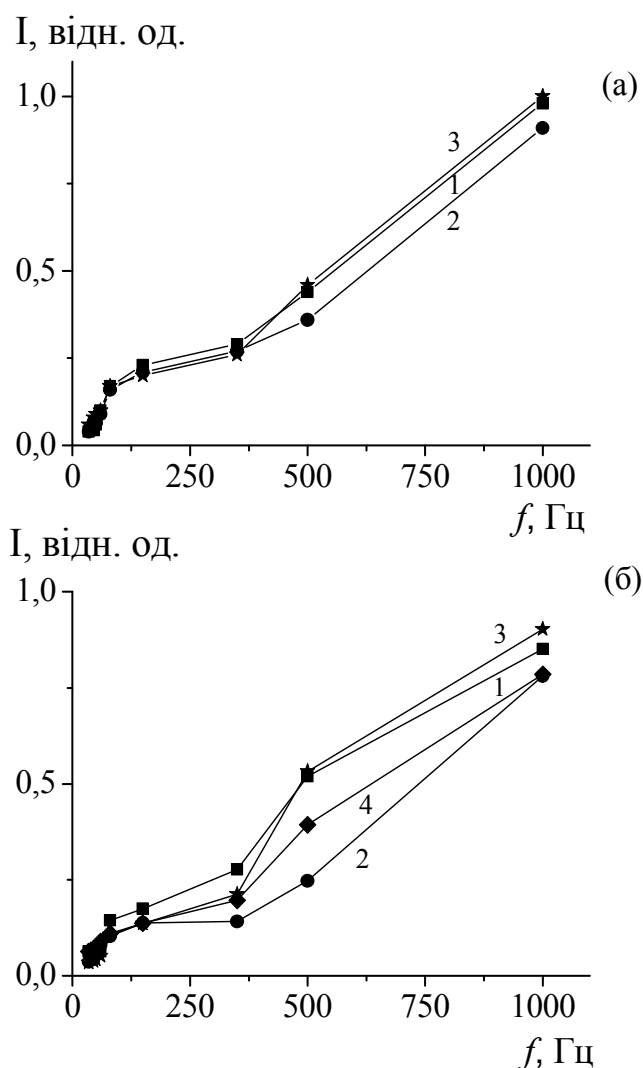


Рис. 3.30. Залежності інтенсивності смуги радикала OD ($\lambda = 308.7$ нм) від частоти повторення імпульсів струму при зарядній напрузі $U = 13$ кВ в джерелі УФ випромінювання в суміші $p(\text{He}) - p(\text{D}_2\text{O})$ при $p(\text{He}) = 20$ кПа і різному парціальному тиску пари D_2O (а): 1 – 0.053 кПа, 2 – 0.133 кПа, 3 – 0.2 кПа (а) та суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{D}_2\text{O})$ при $p(\text{Ar}) = 20$ кПа і парціальному тиску пари D_2O (б): 1 – 0.02 кПа, 2 – 0.06 кПа, 3 – 0.2 кПа, 4 – 0.4 кПа [83, 93, 97].

Із залежності інтенсивності випромінювання смуги з максимумом при $\lambda \approx 308.7$ нм від величини напруги на електродах розрядної кювети (рис. 3.31) випливає, що найбільша інтенсивність випромінювання в діапазоні зарядних напруг 13 - 18 кВ досягається в суміші $p(\text{He}) - p(\text{D}_2\text{O}) = 20\text{-}0.2$ кПа.

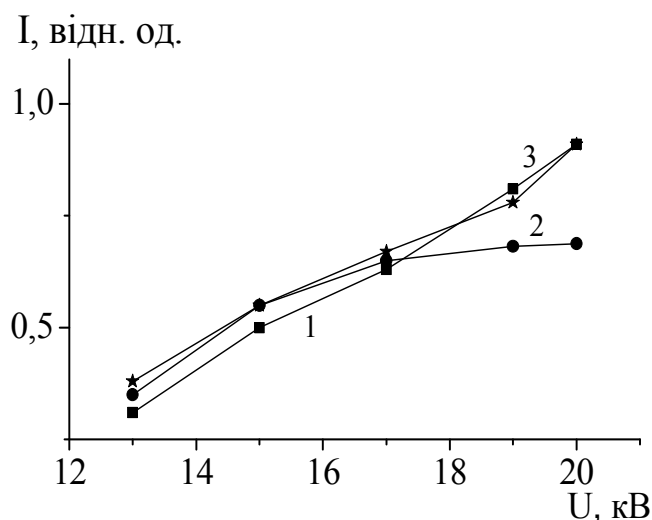


Рис. 3.31. Залежності інтенсивності смуги радикала OD ($\lambda = 308.7$ нм) від величини напруги на електродах розрядної кювети при $f = 80$ Гц в лампі в суміші p(He)-p(D₂O) при p(He) = 20 кПа і різних парціальних тисках пари D₂O: 1 – 0.08 кПа, 2 – 0.133 кПа, 3 – 0.2 кПа [83].

Для розряду в суміші p(He) - p(D₂O) = 20 - 0.133 кПа залежність інтенсивності від напруги має форму, близьку до параболи. Інтенсивність випромінювання радикала OD ($\lambda = 308.7$ нм) росте із збільшенням амплітуди імпульсів напруги та частоти слідування імпульсів. Із ростом величини напруги збільшується середня енергія електронів, що і приводить до збільшення заселеності OD (A).

Амплітуда імпульсів напруги на виході модулятора збільшується за допомогою імпульсного кабельного трансформатора приблизно в три рази і досягає 20 - 30 кВ при тривалості окремого викиду 5 - 20 нс (рис. 3.32). Такий характер осцилограми імпульсів напруги пов'язаний з врахуванням падіння потенціалів на розрядному проміжку та на діелектричних бар'єрах розрядної кювети.

Амплітуда основного максимуму імпульсу струму (рис. 3.32, (б)) досягає 50 А при його тривалості 20 - 30 нс, а частота проходження імпульсів f може змінюватися в межах 40 - 1000 Гц.

Враховуючи форму напруги, яка характеризується коротким високовольтним імпульсом і формуванням двох біполярних імпульсів струму в кінетиці утворення радикалів OD(A) необхідно враховувати утворення радикалів гідроксилу в основному стані і можливість їх збудження електронним ударом до OD(A).

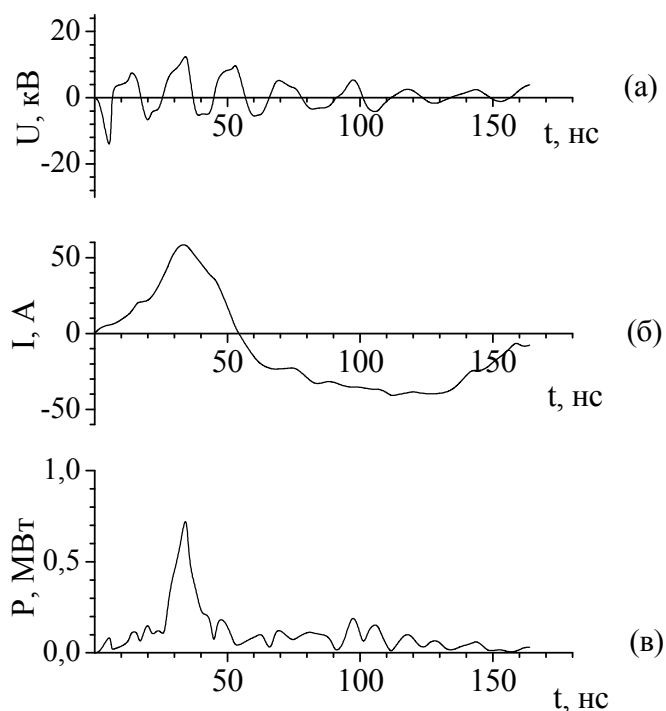


Рис. 3.32. Осцилограми імпульсів напруги (а), струму (б) і потужності (в), яка вносилась в бар'єрний розряд, в джерелі спонтанного випромінювання, що працює на смузі $C \rightarrow X$ радикала OD, при $p(D_2O) = 40$ Па, $p(He) = 20$ кПа і напрузі на робочому конденсаторі $U = 13$ кВ ($f = 100$ Гц) [83, 84].

Потрібно відмітити, що біполярний високовольтний імпульс з додатньо направленим імпульсом, за яким слідує імпульс від'ємної полярності, змінюючи один одного, є корисним для збудження бар'єрного розряду, оскільки заряд, який накопичується на поверхні діелектричної пластинки, може приймати участь у наступних імпульсах розряду [45].

З осцилограми потужності (рис. 3.32, (в)) випливає, що в часовому діапазоні $\Delta t \approx 25 - 45$ нс в бар'єрний розряд вноситься близько 70 % повної енергії, що накопичена в робочому конденсаторі.

На рис. 3.33 показана залежність густини радикалів OD(A) від напруги живлення розряду та частоти імпульсу струму, отримана шляхом чисельного моделювання бар'єрного розряду в суміші He-D₂O.

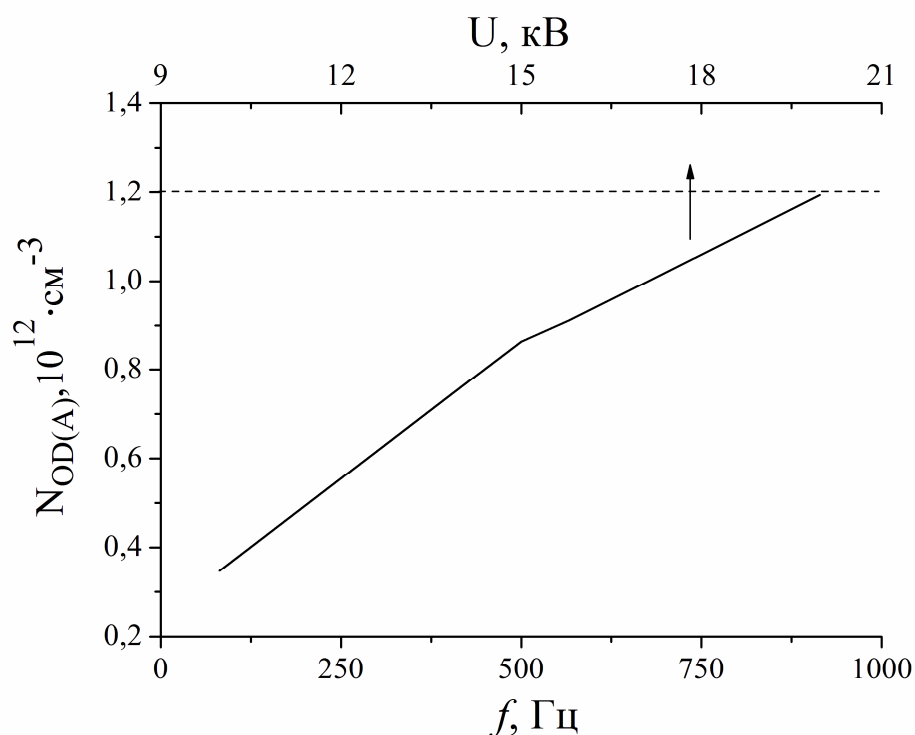


Рис.3.33. Залежності густини радикалів OD(A) від напруги розряду (коли частота імпульсів 1000 Гц) і частоти слідування імпульсів (при $U_d = 20$ кВ), отримані шляхом чисельного моделювання при $p(D_2O) = 100$ Па, $p(He) = 20$ кПа, $W_d = 1 \times 10^5$ Вт, $\tau = 20$ нс [83, 91].

Залежність густини радикалів OD(A) від напруги живлення показала якісне узгодження між комп'ютерним моделюванням і експериментальними розрахунками.

Збільшення напруги живлення бар'єрного розряду U_d приводить до збільшення як інтенсивності так і густини радикалів OD(A). Такий характер залежності обумовлений збільшенням електронної температури при збільшенні напруги розряду (рис. 3.33).

Щодо залежності від частоти слідування імпульсів, то результати комп'ютерного моделювання показали, що збільшення частоти слідування імпульсів не дає істотного впливу на густину радикалів OD(A). Це обумовлено тим, що всі активні частинки (іони, атоми і радикали) губляться в післясвіченні і їх густиною можна нехтувати на початку кожного розряду.

3.3. Чисельні розрахунки параметрів плазми розряду в сумішах інертних газів з молекулою води (H_2O)

Для того, щоб зрозуміти поведінку процесів в електричному розряді на сумішах інертних газів з молекулою води, доцільним є проведення комп'ютерного моделювання газорозрядних джерел УФ і ВУФ випромінювання на основі молекул гідроксилу (OH).

Мікроскопічний опис частинок в розряді дає саму модель розряду. В газових розрядах протікають як хімічні реакції збудження, іонізації, які обумовлені непружними зіткненнями молекул з електронами, так і процеси загибелі заряджених частинок внаслідок прилипання електронів до молекул [148]. Для знаходження коефіцієнтів швидкості процесів електронно-молекулярних зіткнень, коефіцієнтів дифузії, швидкості дрейфу електронів в електричному полі та середньої енергії електронів потрібно визначити функції розподілу електронів за енергією (ФРЕЕ). Для розрахунку ФРЕЕ потрібно розв'язати нульмірне однорідне стаціонарне рівняння Больцмана, на якому і заснований принцип роботи програми BOLSIG+ [149], з урахуванням всіх перерізів основних пружних і непружних електронних процесів зіткнення з атомами або молекулами основного стану газу.

Для ємнісного розряду в сумішах $\text{He-H}_2\text{O}$ та $\text{Ar-H}_2\text{O}$ проведені розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів в діапазоні $E/N = 1 - 300$ Тд при ступені іонізації 10^{-7} , концентрації електронів $N_e = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ і температурі газу – 300 К ($U=30$ кВ, $d=20$ см, $p(\text{Ar(He)}) = 2.6$ кПа).

При розв'язуванні кінетичного рівняння Больцмана для ФРЕЕ враховані процеси іонізації та дисоціативної іонізації, коливного і електронного збудження молекули води, дисоціативного прилипання електронів до молекули H_2O , дисоціативного збудження молекул гідроксилу, дисоціативного прилипання електронів до молекули води та процеси збудження, іонізації гелію і аргону. Перерізи даних процесів, які використовувалися для розрахунків взяті з праць [150, 151], наведені на рис.3.34 (а, б). Електронні процеси взаємодії електронів з молекулою води, що враховані при розв'язуванні рівняння Больцмана для ФРЕЕ у ємнісному розряді в сумішах $\text{He-H}_2\text{O}$ та $\text{Ar-H}_2\text{O}$ приведені в таблицях 3.2., 3.3.

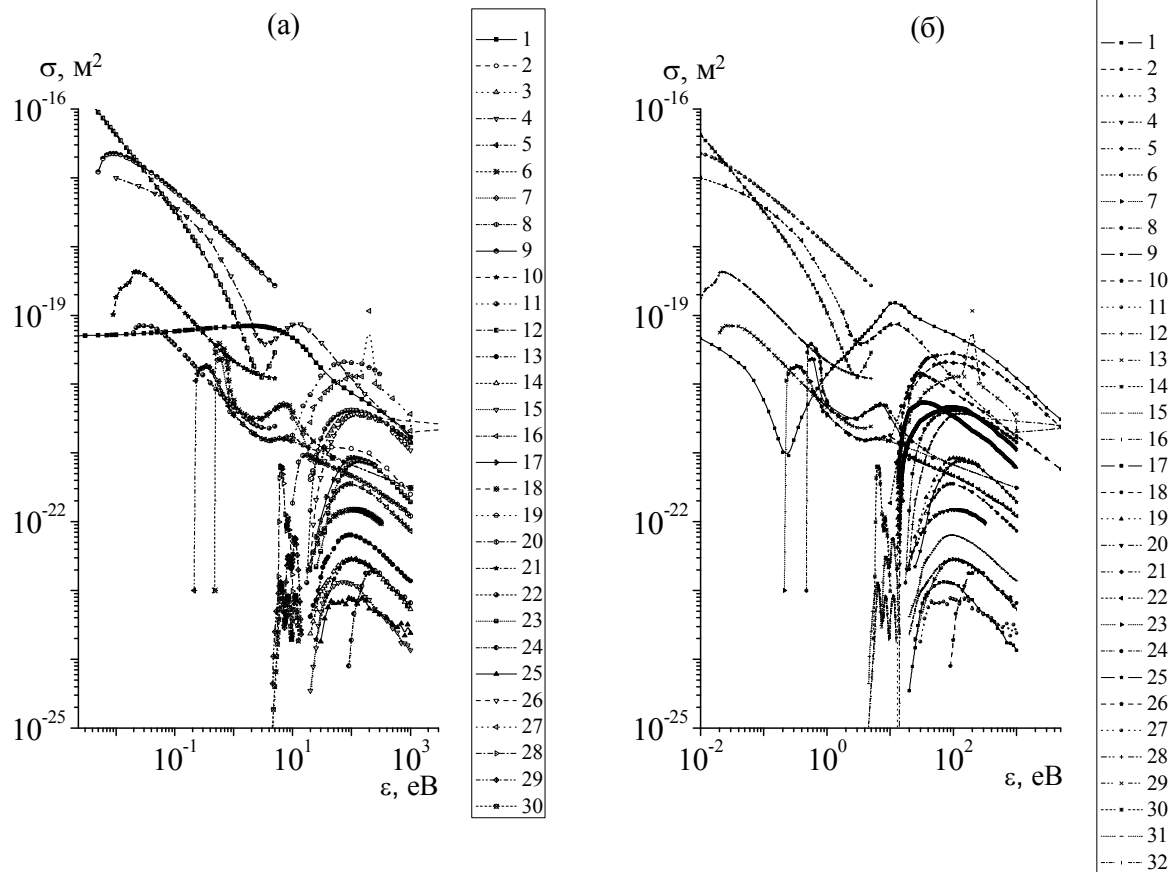


Рис. 3.34. Перерізи процесів зіткнення в сумішах He-H₂O (а) та Ar-H₂O (б) [150, 151].

Таблиця 3.2

Електронні процеси взаємодії електронів з молекулою води, що враховані при розв'язуванні рівняння Больцмана для ФРЕЕ у ємнісному розряді в суміші He-H₂O

№	Реакції	Література
1.	$e + \text{He} \rightarrow e_0 + \text{He}$	[150]
2.	$e + \text{He} \rightarrow e + \text{He}^* (19.8 \text{ eV})$	
3.	$e + \text{He} \rightarrow e + \text{He}^+$	
4.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e_0 + \text{H}_2\text{O}$	
5.	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*(v_2) + e \quad (0.2 \text{ eV})$	
6.	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*(v_3) + e \quad (0.43 \text{ eV})$	
7.	$e + \text{H}_2\text{O}(000) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O}(100+001) \quad (0.453 \text{ eV})$	
8.	$e + \text{H}_2\text{O}(000) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O}(010) \quad (0.198 \text{ eV})$	
9.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=1) \quad (0.004604 \text{ eV})$	

10.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=2)$	(0.00869 eV)	[151]
11.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=3)$	(0.0118 eV)	
12.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=0)$	(0 eV)	
13.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{OH} + \text{H}^* (n=4)$	(20 eV)	
14.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{O}^* (3^3\text{P}) + \text{H}_2$	(20 eV)	
15.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{O}^* (3^5\text{P}) + \text{H}_2$	(20 eV)	
16.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{OH} + \text{H}^* (n=3)$	(20 eV)	
17.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{OH} + \text{H}^* (n=2)$	(25 eV)	
18.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}(1s) + e + \text{H}_2(\text{X})$	(18.56 eV)	
19.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}(\text{X}) + e + \text{H}$	(10 eV)	
20.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}(\text{A}) + e + \text{H} \rightarrow \text{OH}(\text{X}) + h\nu (306 \text{ нм})$	(10 eV)	
21.	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}(130.4 \text{ нм})$	(25 eV)	
22.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H} + 2e$		
23.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}_2 + 2e$		
24.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}^{++}$		
25.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{O} + 2e$		
26.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH} + 2e$		
27.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + 2e$		
28.	$e^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}^-$		
29.	$e^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^-$		
30.	$e^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^-$		

Таблиця 3.3

Електронні процеси взаємодії електронів з молекулою води, що враховані при розв'язуванні рівняння Больцмана для ФРЕЕ у ємнісному розряді в суміші Ar-H₂O

№	Реакції	Література
1.	$e + \text{Ar} \rightarrow e_0 + \text{Ar}$	[150]

2.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^* (11.5 \text{ eB})$	[150]
3.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^* (13 \text{ eB})$	
4.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^* (14 \text{ eB})$	
5.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^+ (15.8 \text{ eB})$	
6.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e_0 + \text{H}_2\text{O};$	[151]
7.	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*(v_2) + e (0.2 \text{ eB})$	
8.	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*(v_3) + e (0.43 \text{ eB})$	
9.	$e + \text{H}_2\text{O}(000) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O}(100+001) (0.453 \text{ eB})$	
10.	$e + \text{H}_2\text{O}(000) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O}(010) (0.198 \text{ eB})$	
11.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=1) (0.004604 \text{ eB})$	
12.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=2) (0.00869 \text{ eB})$	
13.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=3) (0.0118 \text{ eB})$	
14.	$e + \text{H}_2\text{O} (j=0) \rightarrow e + \text{H}_2\text{O} (j=0) (0 \text{ eB})$	
15.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{OH} + \text{H}^* (n=4) (20 \text{ eB})$	
16.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{O}^*(3^3\text{P}) + \text{H}_2 (20 \text{ eB})$	
17.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{O}^*(3^5\text{P}) + \text{H}_2 (20 \text{ eB})$	
18.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{OH} + \text{H}^* (n=3) (20 \text{ eB})$	
19.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{OH} + \text{H}^* (n=2) (25 \text{ eB})$	
20.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}(1s) + e + \text{H}_2(\text{X}) (18.56 \text{ eB})$	
21.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}(\text{X}) + e + \text{H} (10 \text{ eB})$	
22.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}(\text{A}) + e + \text{H} \rightarrow \text{OH}(\text{X}) + h\nu (306 \text{ нм}) (10 \text{ eB})$	
23.	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}(130.4 \text{ нм}) (25 \text{ eB})$	
24.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H} + 2e (17.50 \text{ eB})$	
25.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}_2 + 2e (25 \text{ eB})$	
26.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}^{++}$	
27.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{O} + 2e$	
28.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH} + 2e$	
29.	$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + 2e$	

30.	$e^- + H_2O \rightarrow OH + H^-$	[151]
31.	$e^- + H_2O \rightarrow H_2 + O^-$	
32.	$e^- + H_2O \rightarrow OH + H^-$	

3.3.1. Розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів ємнісного розряду в суміші He-H₂O

На рис. 3.35 представлені результати розрахунків ФРЕЕ в ємнісному розряді в суміші He-H₂O при різних значеннях E/N. При збільшенні параметра E/N спостерігається збільшення енергії швидких електронів і зменшення густини електронів малих енергій. Вплив процесів дисоціативного збудження та іонізації спостерігається при високих енергіях у хвості ФРЕЕ. Сам характер ФРЕЕ при низьких енергіях визначається пружними процесами.

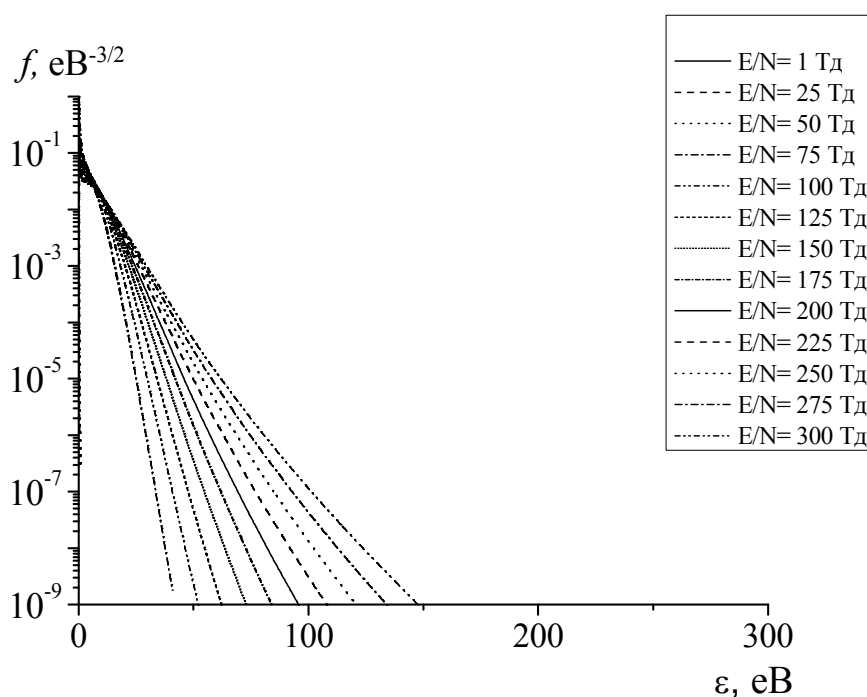


Рис. 3.35. Функція розподілу електронів за енергією у ємнісному розряді в суміші He-H₂O=0.95-0.05 [83].

На основі розрахованих ФРЕЕ визначені середня енергія, приведена рухливість, швидкість дрейфу електронів та константи швидкості реакції процесів.

Так, на рис 3.36 (а, I) видно, що середня енергія електронів у ємнісному розряді в суміші He-H₂O зростає до 26 еВ в діапазоні значень параметра E/N 30 – 300 Тд. Подібна залежність середньої енергії електронів спостерігається в тліючому розряді в суміші He-H₂O [9].

Щодо залежності приведеної рухливості від величини параметра E/N рис 3.36 (а, II), то вона складає $\mu \times N \approx 2.2 - 2.9 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$ і повільно зростає в межах E/N = 30 – 300 Тд. За даними приведеної рухливості розрахована швидкість дрейфу електронів (б), яка не є старою лінійною, тому, що енергія і приведена рухливість нелінійно залежить від електричного поля.

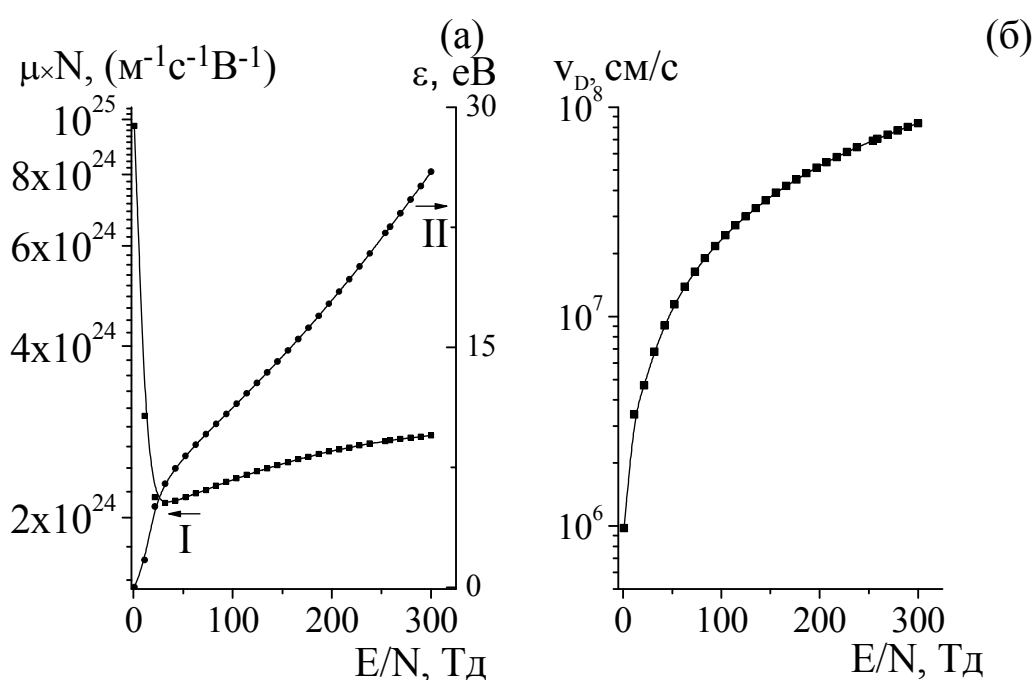


Рис. 3.36. Приведена рухливість (I, (а)), середня енергія (II, (а)) та швидкість дрейфу електронів (б) в ємнісному розряді в суміші He-H₂O [83].

Так як середня енергія електронів збільшується з ростом E/N, то і швидкість дрейфу зростає з ростом параметра приведенного поля E/N і складає $v_D = 3.4 \cdot 10^7 - 8.36 \cdot 10^7 \text{ см/с}$.

З залежності (рис. 3.37) випливає, що константи швидкості пружного розсіювання електронів на молекулах води більші ($k \approx 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, процес 4) від k пружного розсіювання електронів на атомах гелію ($k \approx 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$, процес 1). Потрібно відмітити, що величина k пружного розсіювання електронів на молекулах

води, отримана в даній роботі, на порядок більша від k пружного розсіювання електронів на молекулах води, отриманих в тліючому розряді [9].

Константи швидкості збудження та іонізації атомів гелію є одного порядку ($k \approx 10^{-15}-10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$, процеси 2, 3).

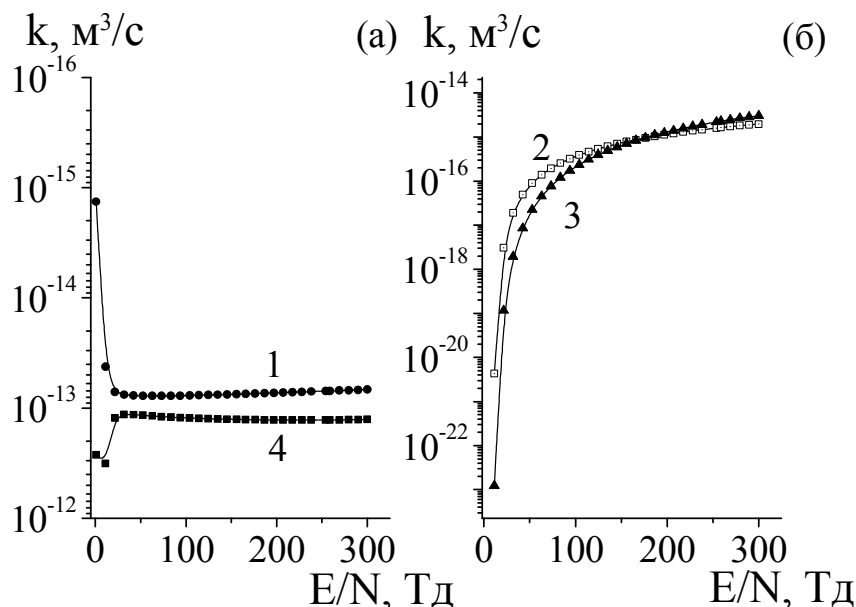


Рис. 3.37. Константи швидкості збудження, іонізації атома гелію та процесу пружного розсіювання електронів на атомі Ne та на молекулі H_2O [83].

Константи швидкостей збудження коливних рівнів молекули H_2O складають $k \approx 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ (процеси 5 - 8), обертальних рівнів - $k \approx 10^{-15} - 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (процеси 6 - 12) (рис. 3.38, а). При застосуванні перерізів зіткнення молекул води з електронами з праці [150] виходить, що коливально-обертальне збудження переважає при енергіях вище за 1 еВ. З ростом E/N спостерігається зростання і констант швидкостей дисоціативного збудження водню $\text{H}^*(n=2, 3)$ - $k \approx 10^{-18} - 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ (процеси 16, 17), $\text{H}^*(n=4)$ - $k \approx 10^{-18} - 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$ (процес 13) (рис. 3.38 (б)). Константи швидкості утворення радикала $\text{OH}(X)$ збільшуються від $k \approx 10^{-18} \text{ м}^3/\text{с}$ до $10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ (процес 19) (рис. 3.38, б).

На рис.3.39 наведені константи швидкості дисоціативного збудження атома O. У діапазоні величин $E/N = 10 - 300 \text{ Тд}$ константи швидкості утворення атома O (884.7 нм; 777.4 нм) зростають з $10^{-26} \text{ м}^3/\text{с}$ до $10^{-23} \text{ м}^3/\text{с}$, $\text{O}(1s)$ - з $10^{-26} \text{ м}^3/\text{с}$ до

10^{-21} м³/с, а O(130.4 нм) – з 10^{-28} м³/с до 10^{-23} м³/с (процеси 14,15,18,21) (рис. 3.38). Подібні результати отримані і в працях [30,152].

Константи швидкості утворення позитивних іонів збільшуються з збільшенням параметра E/N: H₂O⁺ – $k \approx 10^{-16}$ - 10^{-14} м³/с, OH⁺ – $k \approx 10^{-18}$ - 10^{-15} м³/с, H⁺ – $k \approx 10^{-19}$ - 10^{-15} м³/с, O⁺ – $k \approx 10^{-21}$ - 10^{-16} м³/с, H₂⁺ – $k \approx 10^{-21}$ - 10^{-18} м³/с, O⁺⁺ – $k \approx 10^{-28}$ - 10^{-19} м³/с (рис. 3.39, процеси 22 - 27).

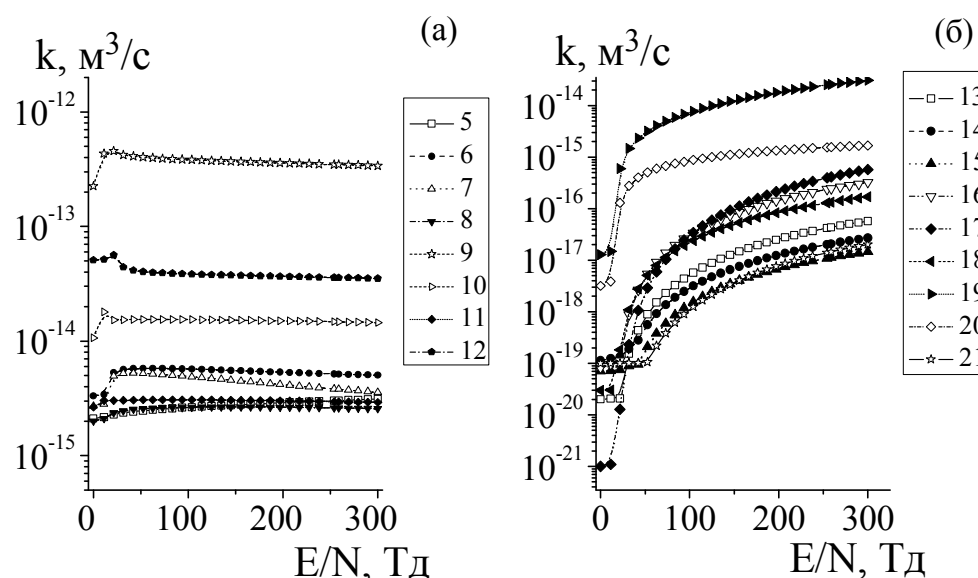


Рис. 3.38. Константи швидкості збудження молекули H₂O, атомів H, O [83].

Константи швидкості утворення негативних іонів O⁻, H⁻ складають 10^{-17} м³/с, OH⁻ на порядок менше – 10^{-18} м³/с (рис. 3.39, процеси 28 - 30).

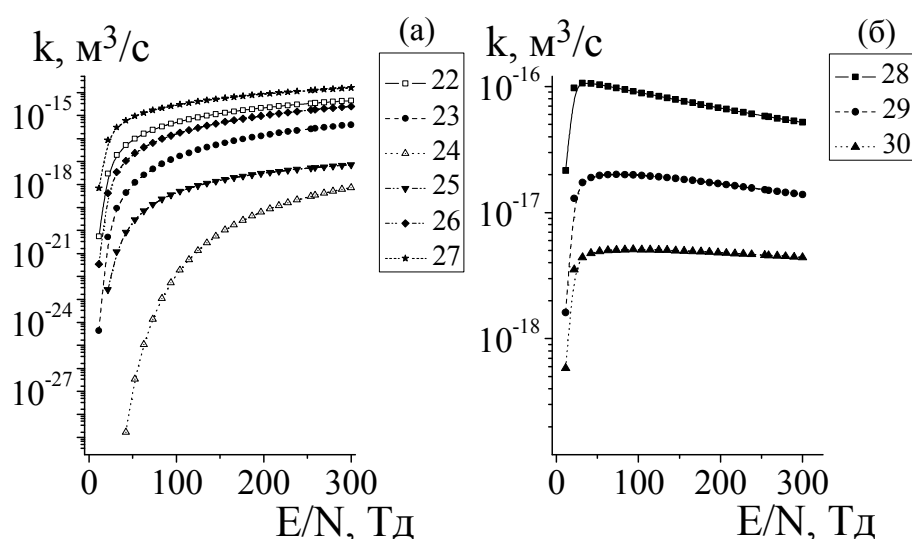


Рис. 3.39. Константи швидкості іонізації (а) та дисоціативного прилипання електронів до молекули води (б) [83].

Коли енергія електронів складає 4 еВ, то найбільшим імовірним процесом в плазмі розряду стає дисоціативне прилипання. Константи швидкості утворення негативних іонів O^- , H^- складають $10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$, OH^- – на порядок менша – $10^{-18} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 3.39, процеси 28-30). Так, як сума констант швидкостей утворення позитивних іонів переважає суму констант швидкостей утворення негативних іонів, то плазма є електропозитивною (рис.3.40).

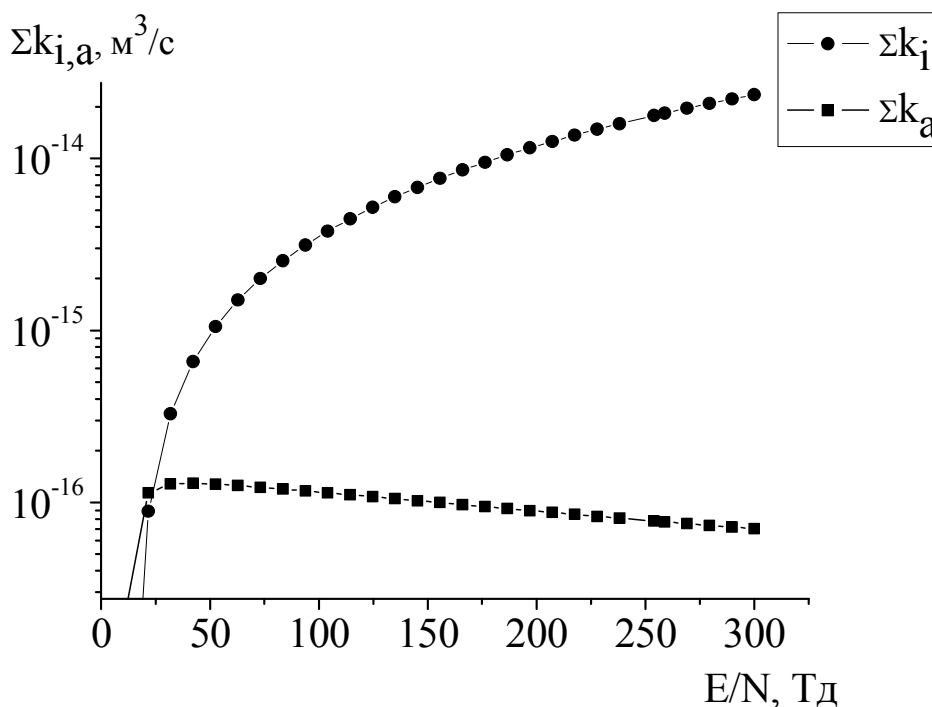


Рис. 3.40. Сумарні константи швидкості іонізації Σk_i з утворенням позитивних іонів OH^+ , O^+ , O^{++} , H_2^+ , H^+ , H_2O^+ і дисоціативного прилипання електронів Σk_a з утворенням негативних іонів H^- , O^- , OH^- [83].

3.3.2. Чисельні розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів плазми газового розряду в суміші аргону з молекулою води

На рис. 3.41 представлені ФРЕЕ в ємнісному розряді в суміші $Ar-H_2O$.

Середня енергія електронів різко зростає в межах 2 – 22 Тд і продовжує зростати з меншою швидкістю до 8 еВ (в межах 30 – 300 Тд) рис. 3.42. Дана залежність показала, що середня енергія електронів для суміші $Ar-H_2O$ майже у три рази менша ніж ϵ_{cp} у розряді в суміші $He-H_2O$, що може бути пов'язане з пороговими енергіями інертних газів.

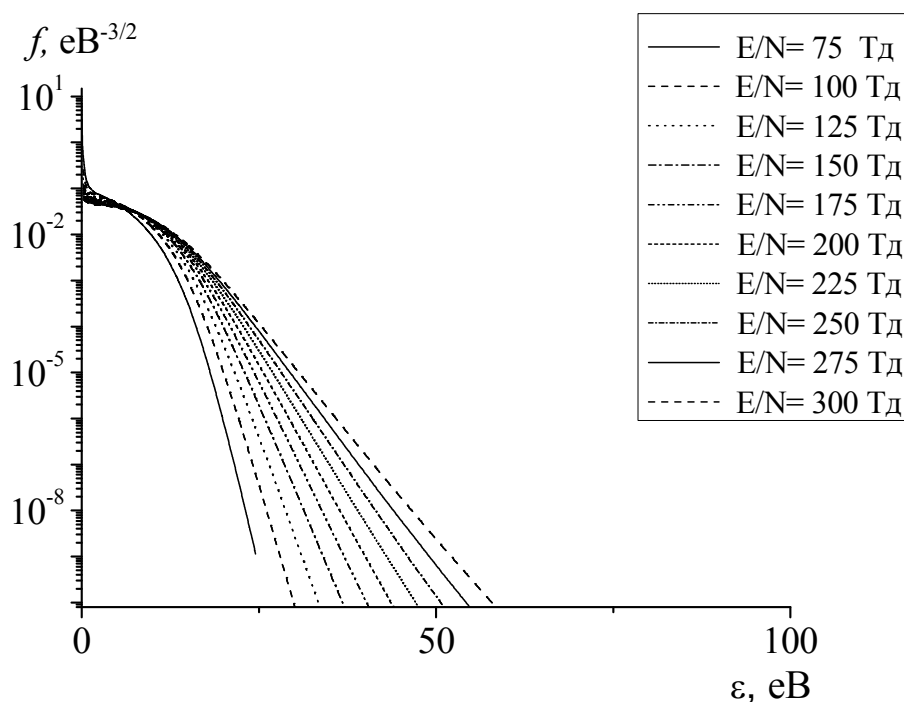


Рис. 3.41. Функція розподілу електронів за енергією у ємнісному розряді в суміші $\text{Ar-H}_2\text{O}=0.96-0.04$ [83].

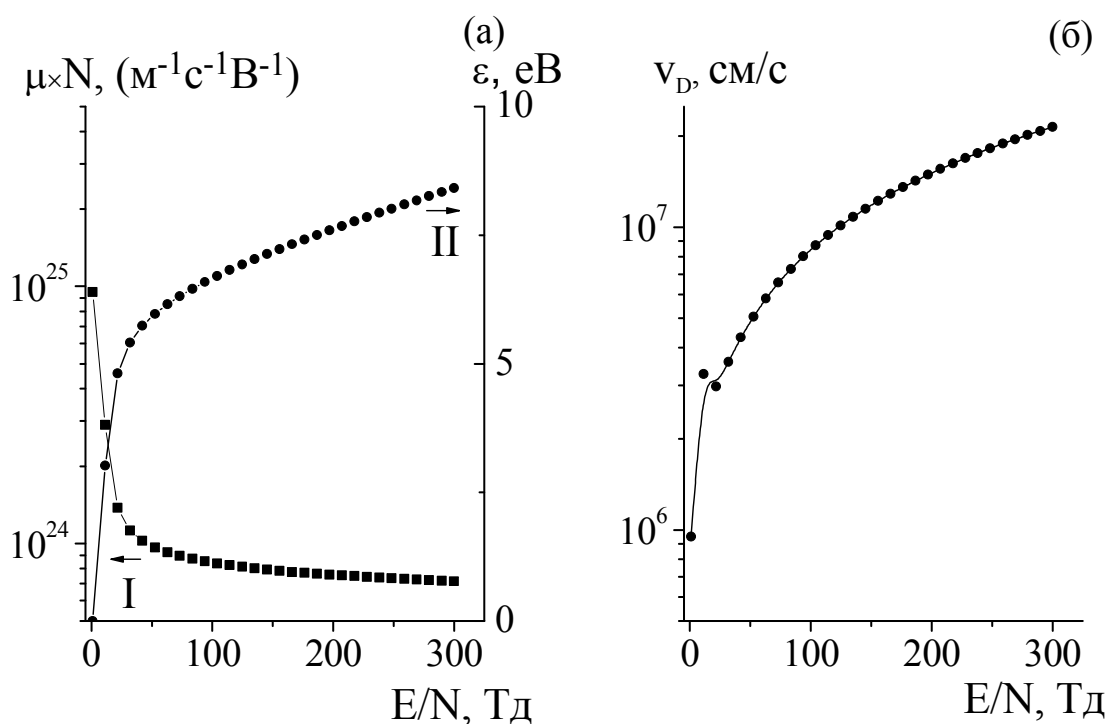


Рис. 3.42. Приведена рухливість (I), середня енергія (II) (а) та швидкість дрейфу електронів (б) в ємнісному розряді в суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ [83].

З отриманих даних приведеної рухливості (рис. 3.42, а), яка складає $\mu \times N \approx 1.37 \cdot 10^{24} - 7.14 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$, одержана залежність швидкості дрейфу

електронів для розряду в суміші $\text{Ar-H}_2\text{O}$ трохи менша від v_D для розряду в суміші $\text{He-H}_2\text{O}$ і складає $v_D \approx 3.2 \cdot 10^6 - 2.14 \cdot 10^7$ см/с (рис. 3.42, б).

Константи швидкості розсіювання електронів на молекулі води ($k \approx 10^{-13}$ м³/с) більші від k розсіювання електронів на атомі Ar ($k \approx 10^{-14} - 10^{-13}$ м³/с) (рис. 3.43, процеси 1, 6).

Константи швидкості збудження та іонізації атома аргону збільшуються з 10^{-19} м³/с до 10^{-16} м³/с (рис. 3.43, процеси 2-5). Із залежності констант швидкості збудження коливальних та обертальних рівнів H_2O випливає, що k обертальних рівнів ($\approx 10^{-14} - 10^{-13}$ м³/с) (рис. 3.44, процеси 11-14) більші від k коливальних рівнів ($\approx 10^{-15}$ м³/с) (процеси 7-10).

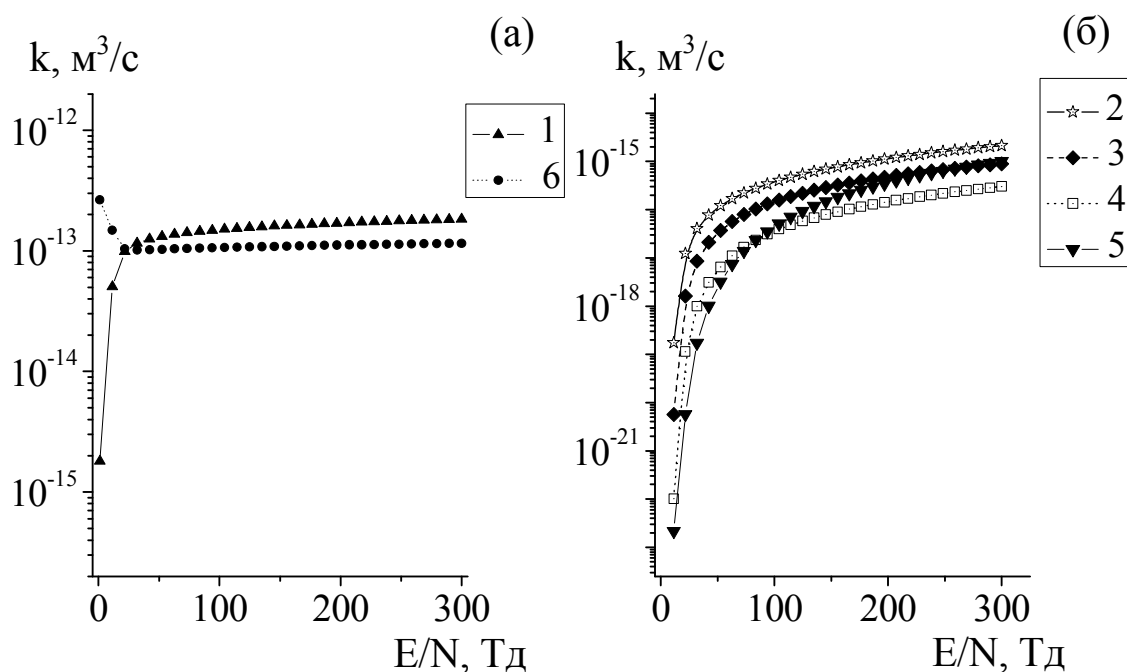


Рис. 3.43. Константи швидкості збудження, іонізації атома аргону та процесу пружного розсіювання електронів на атомі Ar та на молекулі H_2O [83].

Константи швидкості утворення радикала OH(X) збільшуються в діапазоні $k \approx 10^{-17} - 10^{-15}$ м³/с (процес 21) (рис.3.44). На порядок меншою є константа швидкості процесу $\text{A} \rightarrow \text{X}$ переходу радикала OH - $k \approx 10^{-18}$ м³/с до 10^{-16} м³/с (процес 22).

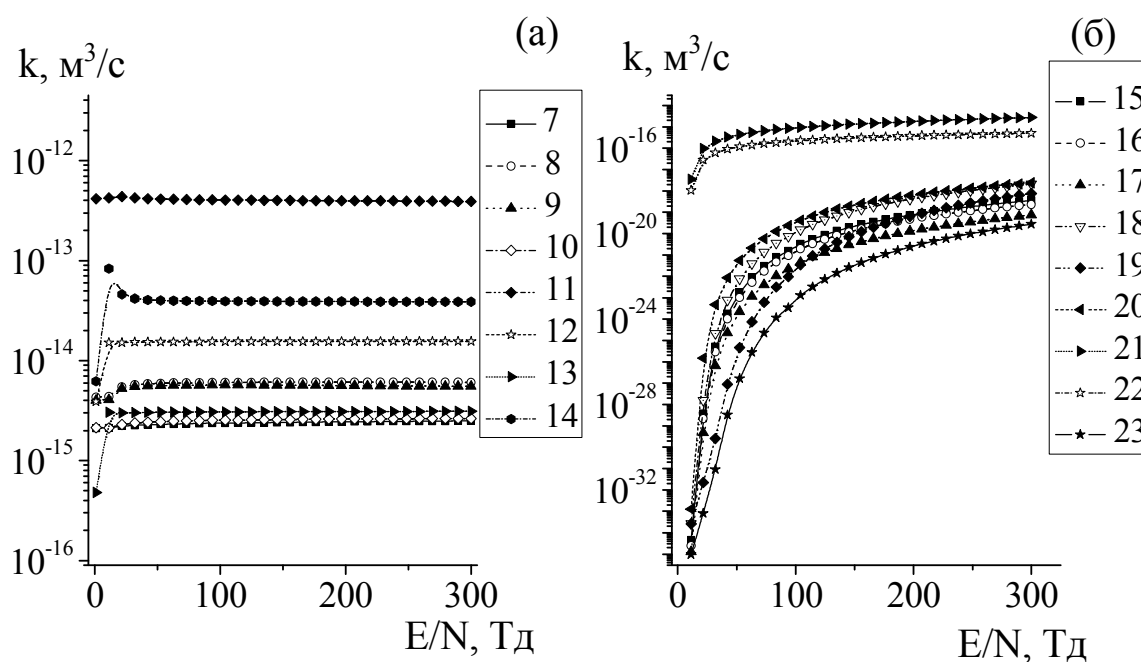


Рис. 3.44. Константи швидкості збудження H_2O , атомів H , O [83].

З ростом величини параметру E/N спостерігається однакове зростання як констант швидкості дисоціативного збудження станів атома водню $\text{H}^*(n=2,3,4)$, так і констант швидкості атома O (884.7 нм; 777.4 нм; 130.4 нм), $\text{O}(1s)$ – вони зростають в діапазоні 10^{-33} - 10^{-19} m^3/c (рис. 3.45, процеси 24-32).

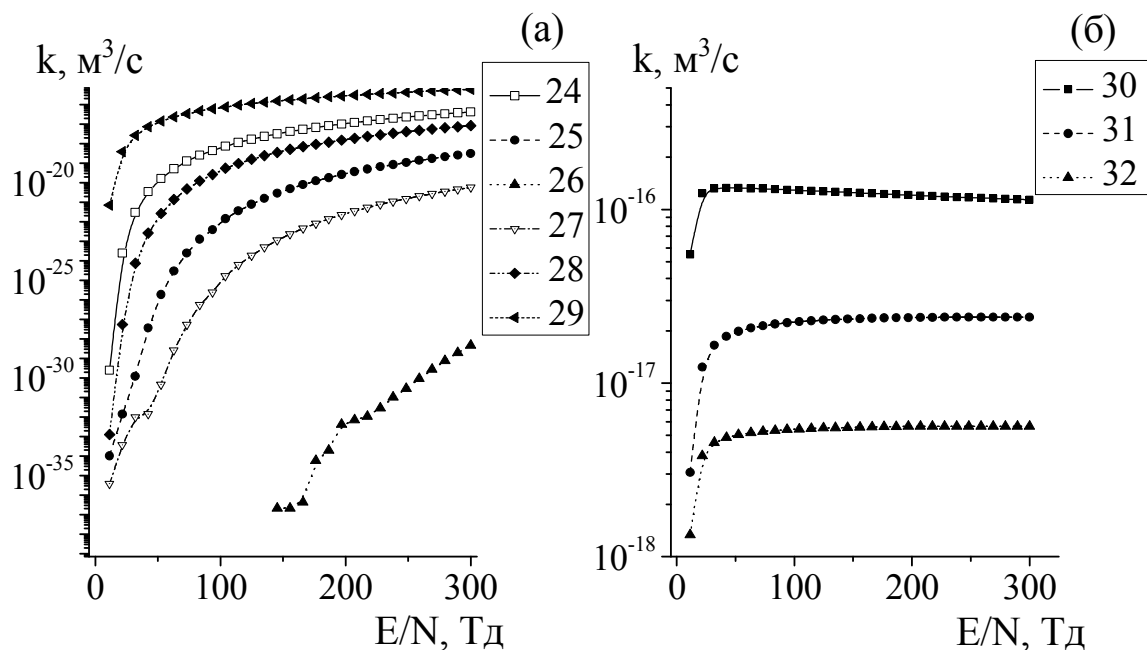


Рис. 3.45. Константи швидкості іонізації (а) та дисоціативного прилипання електронів (б) до молекули води [83].

Чисельне моделювання ЕКК в бар'єрному розряді для розряду в суміші Ar-H₂O показали, що в діапазоні $E/N = 1 - 1000$ Тд константи швидкості утворення негативних іонів H^- ($k \approx 10^{-16}$ м³/с), O^- ($k \approx 10^{-17}$ м³/с), OH^- ($k \approx 10^{-18}$ м³/с) (рис. 3.45, процеси 30-32) більші від констант швидкості утворення позитивних іонів. Константи швидкості позитивних іонів, утворених в процесі іонізації, різко збільшуються з ростом параметра приведенного поля E/N в діапазоні з $k \approx 10^{-37}$ м³/с до $k \approx 10^{-17}$ м³/с (рис. 3.45, процеси 24-29).

Як впливає з рис.3.46 при значеннях параметру $E/N < 145$ Тд сума констант швидкостей утворення негативних іонів переважає суму констант швидкостей процесів іонізації. При $E/N < 145$ Тд плазма є електронегативною і концентрація електронів внаслідок прилипання до молекул є низькою. Так, як при $E/N > 145$ Тд сума констант швидкостей утворення позитивних іонів переважає суму констант швидкостей дисоціативного прилипання електронів, то плазма є електропозитивною і концентрація електронів буде зростати при збільшенні параметру E/N .

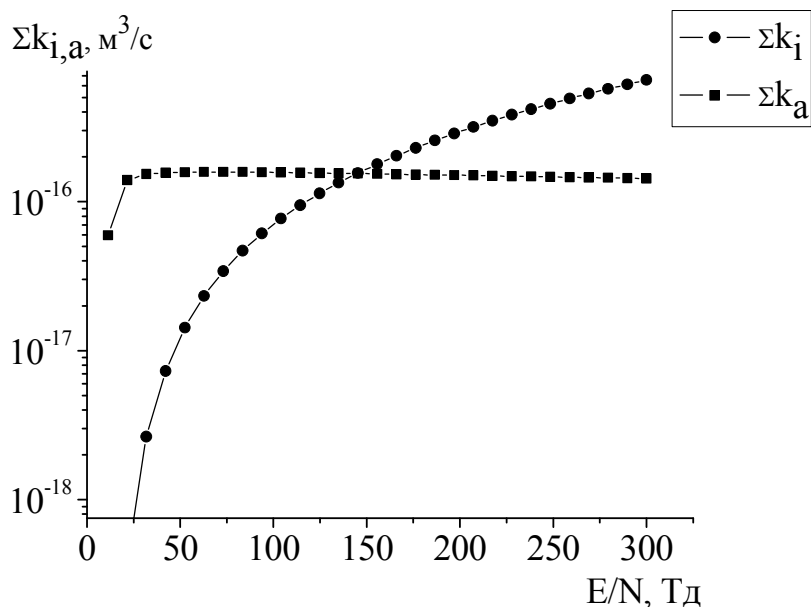


Рис.3.46.Сумарні константи швидкості іонізації Σk_i з утворенням позитивних іонів OH^+ , O^+ , O^{++} , H_2^+ , H^+ , H_2O^+ і дисоціативного прилипання електронів Σk_a з утворенням негативних іонів H^- , O^- , OH^- [83].

Також, одержано залежності приведеної рухливості та середньої енергії електронів (при $E/N = 250$ Тд) від тиску пари води в ємнісному розряді в суміші Ar-

H_2O при $p(\text{Ar}) = 2.6$ кПа. Встановлено, що зі збільшенням парціального тиску пари води, середня енергія електронів зменшується, відповідно, збільшується густина молекул H_2O (рис. 3.47).

Максимальне значення середньої енергії електронів 8.2 еВ спостерігається при $p(\text{H}_2\text{O}) = 10$ Па.

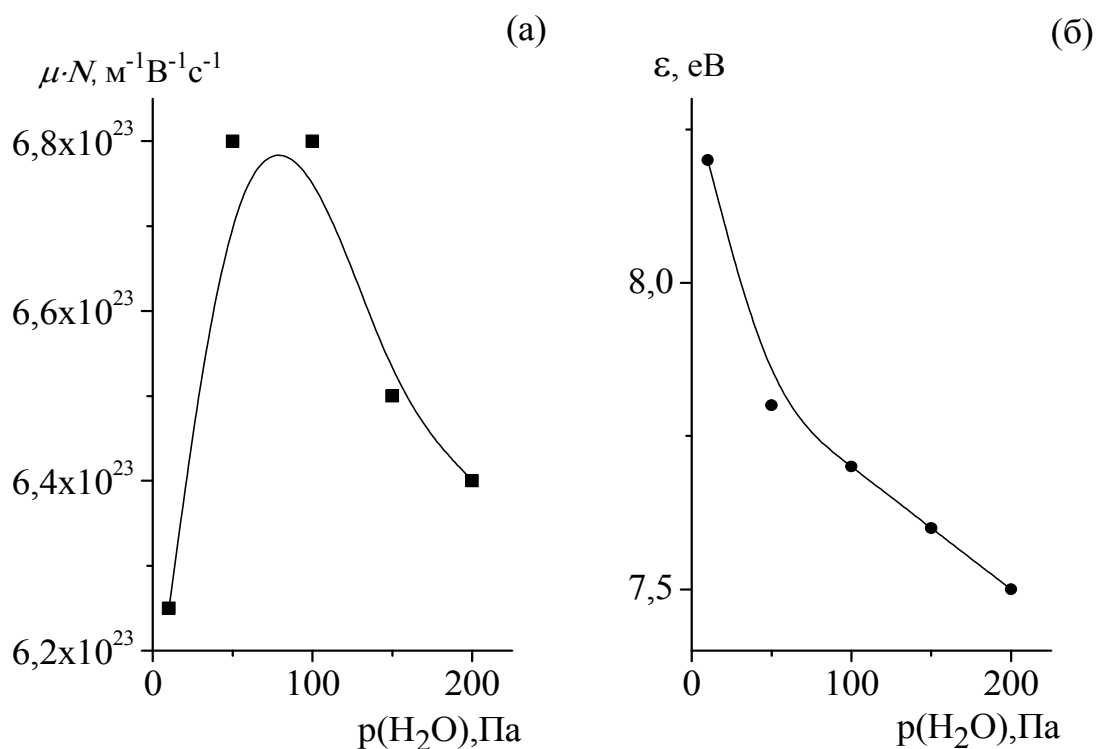


Рис. 3.47. Залежності середньої енергії та приведеної рухливості електронів від тиску пари води в розряді в суміші $\text{Ar-H}_2\text{O}$ при $p(\text{Ar}) = 2.6$ кПа [81, 83].

Із залежності рухливості електронів від тиску пари води випливає, що з ростом тиску пари води ($p(\text{H}_2\text{O}) = 30 - 110$ Па) зростає і приведена рухливість електронів ($\mu \times N = 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1} \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$). Після досягнення $p(\text{H}_2\text{O}) = 100$ Па приведена рухливість електронів зменшується.

На рис. 3.48 (а, б) наведені залежності констант швидкостей процесів взаємодії електронів з молекулою води (при $E/N = 250$ Тд) від тиску пари води. Із залежностей випливає, що найбільшими ($k \approx 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) є константи швидкості процесу збудження обертальних рівнів молекули води, процесу пружного розсіювання електронів на молекулах води та атомах аргону. Майже на два порядки

нижче ($k \approx 10^{-15} - 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$) є константи швидкості утворення гідроксилу OH(X) (рис. 3.48, а).

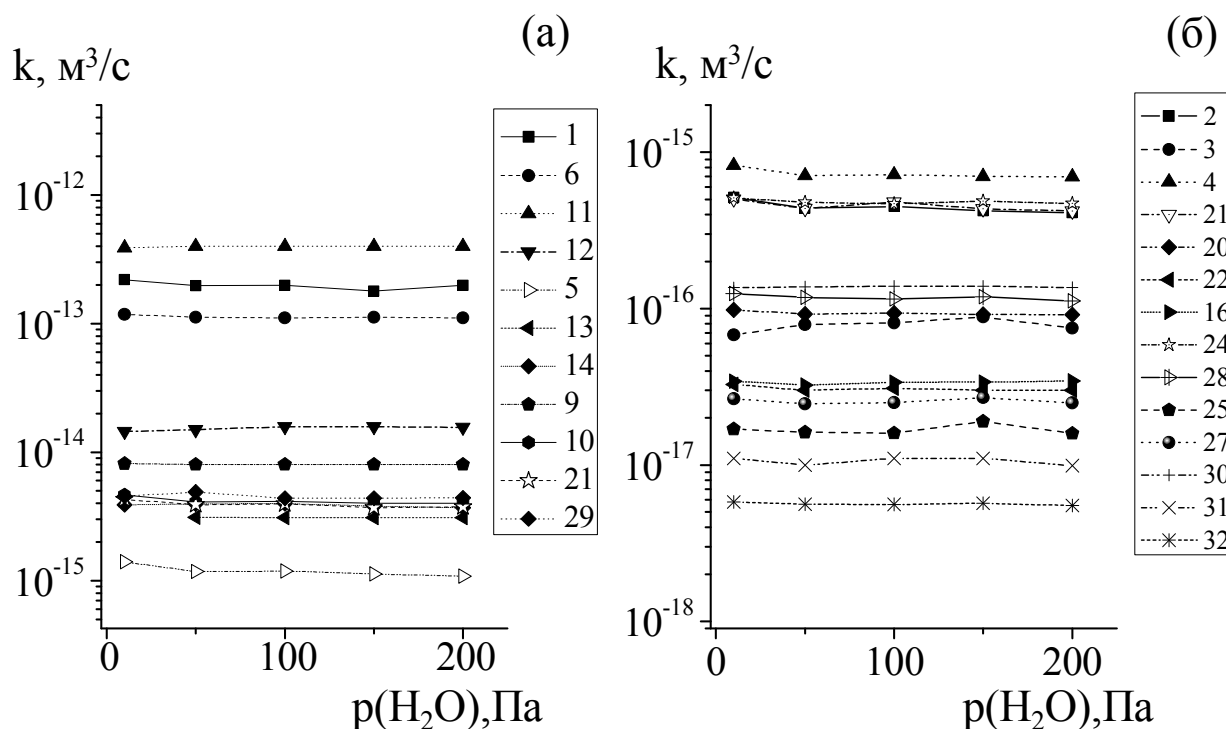


Рис. 3.48. Залежності констант швидкості електронних процесів від тиску пари води в розряді в суміші $\text{Ar-H}_2\text{O}$ при $p(\text{Ar}) = 2.6 \text{ кПа}$ [81, 83].

Константа швидкості процесу дисоціативного прилипання електронів ($k \approx 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$) є на порядок більшою від константи процесів дисоціативної іонізації та від константи швидкості утворення гідроксилу OH(A) ($k \approx 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$), розпад якого і приводить до випромінювання смуги 306-308 нм. Найменшими зі залежностей від тиску пари води є константи збудження нижніх електронних станів молекули води ($k \approx 10^{-18} - 10^{-19} \text{ м}^3/\text{с}$) (рис. 3.48, б).

Висновки до розділу 3

В результаті дослідження просторових, електричних та оптичних характеристик та фізики процесів в плазмі ємнісного і бар'єрного розрядів у сумішах He - H₂O (D₂O) і Ar - H₂O (D₂O) встановлено наступне:

1. Спектр випромінювання імпульсно-періодичного наносекундного ємнісного розряду в суміші He - H₂O (D₂O) характеризується наявністю смуг випромінювання як у ВУФ-діапазоні, так і в УФ-діапазоні спектру. Виявлено і оптимізовано два режими роботи ламп на радикалах гідроксилу. При оптимальному тиску пари звичайної води 130 - 150 Па, в залежності від вмісту гелію, спостерігаються максимуми при $p = 0.7 - 3.5$ кПа та $p = 5 - 15$ кПа, які можуть бути пов'язані з локалізацією розряду в трубці. Оптимальний тиск гелію складає $p_1 = 1.3$ кПа, $p_2 = 5.3$ кПа. Дослідження емісійних характеристик показало, що перехід від звичайної до "важкої" води приводить до зростання інтенсивності смуг гідроксилу в півтора рази.

2. В спектрі випромінювання ємнісного розряду в суміші Ar - H₂O (D₂O) основними є смуги радикала OH (OD) у ВУФ-діапазоні $\Delta\lambda = 150 - 200$ нм та смуга $\lambda = 309$ нм OH (OD) ($A \rightarrow X$); максимальна інтенсивність випромінювання у спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 150 - 200$ нм досягається, коли оптимальний тиск аргону складає 0.1 - 0.5 кПа, а оптимальний тиск пари води – 0.06 - 0.16 кПа. Результати оптимізації інтенсивності випромінювання смуги $\lambda = 308$ нм OH ($A \rightarrow X$) показали, що оптимальний парціальний тиск аргону складає 1.33 - 2.6 кПа, парціальний тиск пари води – 0.13 - 0.20 кПа. Чим меншим парціальний тиск аргону, тим вищою є інтенсивність випромінювання гідроксилу у ВУФ-діапазоні спектру. Це може бути зумовлено низькою ефективністю процесу передачі енергії від метастабільних атомів аргону молекулам води.

3. Моделювання кінетики процесів у плазмі газового розряду низького тиску показало, що: з усіх збуджених частинок плазми максимальною є концентрація збуджених атомів гелію ($n(\text{He}^*) = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$); незалежно від співвідношення між парціальними тисками гелію та пари води основним процесом утворення радикалів OH(A) є процес дисоціативного збудження молекули води електронами ($e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$

$H^+ + OH(A) + e$), а другим за важливістю є процес збудження радикалів гідроксилу з основного електронно-коливального стану електронним ударом; збільшення парціального тиску He приводить до зміни процесів "гасіння" радикалів $OH(A)$, так при $p(He) = 1$ кПа основним процесом "гасіння" є взаємодія збуджених радикалів з молекулою води ($OH(A) + H_2O \rightarrow OH + H_2O$), а другим за важливістю процесом "гасіння" є розпад радикала $OH(A)$ в результаті спонтанного випромінювання, а при вищих тисках He ці процеси при розгляді механізму "гасіння" радикалів $OH(A)$ міняються місцями; оптимальні парціальні тиски He і пари води на якісному рівні корелюються з відповідними експериментальними даними для просторово однорідної стадії наносекундного ємнісного розряду (при найменших тисках He і пари води).

4. Найбільш інтенсивне випромінювання електронно-коливальних смуг $A \rightarrow X$, $C \rightarrow X$ радикала 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 гідроксилу в нижній C – стан; максимальна інтенсивність смуг радикала OD як в УФ-, так і ВУФ-діапазоні спектра в суміші Ar - D_2O спостерігається при оптимальному тиску аргону 10 – 20 кПа та оптимальному тиску пари "важкої" води – 150 – 250 Па; дослідження електричних характеристик бар'єрного розряду в суміші He - D_2O показали, що амплітуда імпульсів напруги на виході модулятора досягає 20 – 30 кВ при тривалості окремого викиду 5 – 20 нс. Амплітуда основного максимуму імпульсу струму досягає 50 А при тривалості 20 – 30 нс; залежності інтенсивності випромінювання смуги OD 309 нм від величини частоти слідування імпульсів струму та напруги на високовольтному модуляторі вказують на можливість збільшення середньої потужності УФ-випромінювання при частоті $f > 1$ кГц.

5. Вивчення кінетики утворення радикала OD(A) в плазмі розряду показало, що збільшення тиску гелію веде до зменшення густини OD(A), що обумовлено зменшенням електронної температури і швидкостей реакцій; вплив тиску "важкої" води на інтенсивність УФ випромінювання показав немонотонну залежність, причиною якої є конкуренція між двома реакціями, каналами дезбудження радикала

OD(A) в стадії післясвічення, коли генерується УФ випромінювання. Збільшення парціального тиску пари "важкої" води приводить до збільшення густини OD(A); збільшення напруги живлення веде до збільшення інтенсивності та густини радикалів OD(A), що обумовлено збільшенням електронної температури. Останнє приводить до збільшення швидкості дисоціації електронного удару електронами, що збільшує густину OD(A) протягом одного розряду; якщо порівняти експериментальні розрахунки і розрахунки кінетики, то є якісна згода.

6. Проведені розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів електричного розряду в суміші He-H₂O показали, що швидкість дрейфу електронів не є строго лінійною, тому, що енергія і приведена рухливість залежить від електричного поля і зростає зі зростанням параметра 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 атомі Ar та процесу збудження обертальних рівнів H₂O. Така ж закономірність спостерігається і при 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 в суміші He-H₂O є електропозитивною; при значеннях параметру E/N < 145 Тд плазма в розряді в суміші Ar-H₂O є електронегативною, а при E/N > 145 Тд – електропозитивною.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ЗБУДЖЕНИХ МОЛЕКУЛ ХЛОРИДУ АРГОНУ, ХЛОРИДУ КРИПТОНУ, МОЛЕКУЛ ХЛОРУ ТА РАДИКАЛІВ ГІДРОКСИЛУ В НАНОСЕКУНДНОМУ БАР'ЄРНОМУ РОЗРЯДІ

Джерела спонтанного УФ і ВУФ випромінювання на електронно - коливальних переходах ексимерних та ексиплексних молекул з накачуванням різними видами електричних розрядів широко досліджуються в даний час, що зумовлено їх різним застосуванням [51-56]. Ексилампи із-за простоти їх будови та в експлуатації і більш низької вартості, тривалого часу роботи і відсутності викидів забруднюючих речовин є альтернативою відповідним лазерним джерелам в застосуваннях не пов'язаних з передачею лазерного випромінювання на далекі віддалі та його когерентністю.

В порівнянні з ексимерними ксеноновими лампами на димерах ксенону (172 нм Xe_2^*) [153], випромінювачі на хлориді аргону і хлору мають дешевше робоче середовище, а використання високоякісного кварцу з пропусканням до $\Delta\lambda = 150\text{-}160$ нм дозволяє розробляти ArCl^* -лампи бар'єрного розряду з великою величиною робочої поверхні.

Також, УФ і ВУФ джерела на основі некогерентного випромінювання молекули ArCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) з $\lambda = 175$ нм та KrCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) з $\lambda = 222$ нм, можуть бути альтернативними амальгамним ртутним лампам низького тиску, які випромінюють на спектральних лініях атома ртуті $\lambda = 185$ нм, $\lambda = 254$ нм [154-156], виробництво, використання та утилізація яких шкідливе для навколишнього середовища.

Результати оптимізації багатохвильової ексилампи з накачуванням бар'єрним розрядом, що працювала на сумішах $\text{Ar} - \text{Kr} - \text{Cl}_2$, були отримані без врахування інтенсивності випромінювання смуги ArCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$), оскільки досліджувалися лише інтенсивності смуг 222 нм KrCl^* та 258 нм Cl_2^* [57]. В цьому випадку можливим є зниження реальної вихідної потужності і ККД цієї лампи на 10-20 %.

Отже, характеристики імпульсно-періодичного бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$, який може бути використаний як двоххвильова лампа на смугах хлориду

аргону і хлору, в даний час не досліджені. Для більш рівномірного покриття спектрального діапазону 170-260 нм перспективними можуть бути також лампи бар'єрного розряду на основі суміші $\text{Ar} - \text{Kr} - \text{CCl}_4$, які теж раніше не досліджувалися.

В даному розділі представлені результати дослідження емісійних та електричних характеристик наносекундного розряду з двома бар'єрами на сумішах $\text{Ar} - \text{CCl}_4$, $\text{Ar} - \text{Kr} - \text{CCl}_4$ та результати розрахунків електронних кінетичних коефіцієнтів газового розряду в даних сумішах.

Результати досліджень опубліковані в працях [83, 98-112].

4.1. Характеристики наносекундного бар'єрного розряду в сумішах інертного газу з парою фреону (CCl_4)

Проведено дослідження оптичних та електричних характеристик випромінювання електророзрядної плазми в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$.

Результати, які представлені в даному параграфі, опубліковано в наших працях [83, 98-108].

4.1.1. Емісійні характеристики плазми бар'єрного розряду в сумішах $\text{Ar} - \text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$ і $\text{Ar} - \text{CCl}_4$

Дослідження випромінювання плазми бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$ проводилося при парціальному тиску $p(\text{Ar}) = 24$ кПа, $p(\text{CCl}_4) = 0.013 - 0.2$ кПа, $p(\text{H}_2\text{O}) = 10 - 20$ Па [98, 99-101].

На рис. 4.1 (а,б) представлені спектри випромінювання бар'єрного розряду в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) - p(\text{H}_2\text{O}) = 24 - 0.026 - (0.01 - 0.02)$ кПа [98]. У спектральному діапазоні 140 - 350 нм в спектрах випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$ спостерігаються смуги ArCl^* , Cl_2^* , OH^* [99]. Коли парціальний тиск пари CCl_4 складає 0.026 і 0.05 кПа, то в спектрі превалюють смуги випромінювання молекули $\lambda = 175$ нм $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$. При збільшенні парціального тиску CCl_4 до $\sim 0.1 - 0.2$ кПа в спектрі переважає випромінювання смуги $\text{Cl}_2 (D' - A')$ з максимумом

при $\lambda = 258$ нм. У спектрі випромінювання плазми в суміші Ar - CCl₄ - H₂O присутня смуга $\lambda = 309$ нм OH (A \rightarrow X), хоча парціальний тиск пари води є дуже низьким. Наявність невеликої кількості пари води в суміші Ar - CCl₄ обумовлена використанням “технічного” аргону, що містить близько 10-20 Па пари води в робочій суміші, яка досліджувалася.

Внаслідок передачі енергії від метастабільних атомів аргону молекулам H₂O спостерігається досить ефективно утворення молекул OH (A), які радіаційно розпадаються з випромінюванням смуги при $\lambda_{\text{max}} = 309$ нм OH(A \rightarrow X).

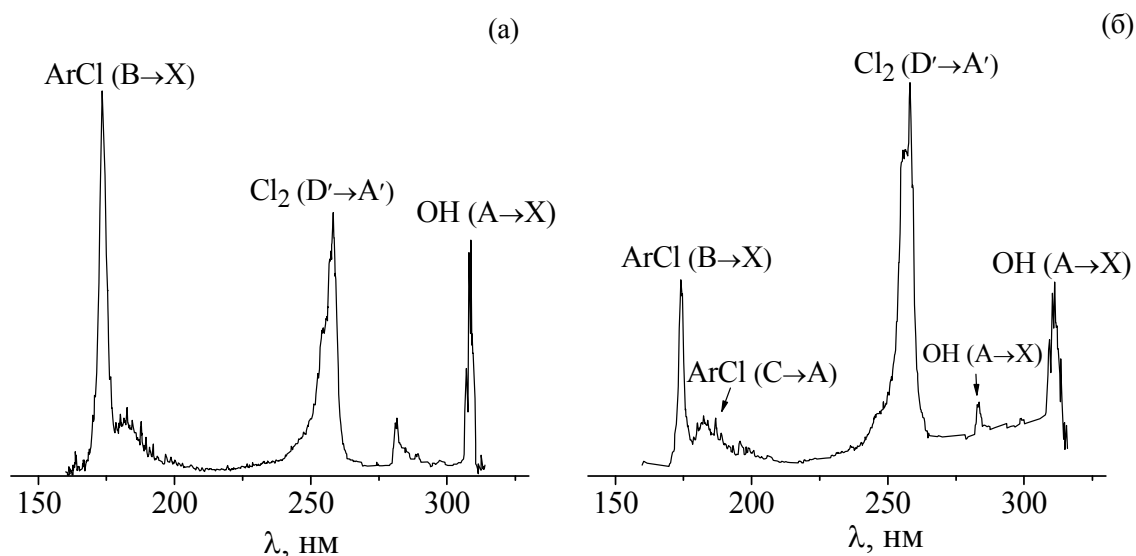


Рис. 4.1. Спектри випромінювання плазми наносекундного бар'єрного розряду в сумішах $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) - p(\text{H}_2\text{O}) = 24 - 0.026 - (0.01 - 0.02)$ кПа (а) та $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) - p(\text{H}_2\text{O}) = 24 - 0.093 - (0.01 - 0.02)$ кПа [83,98,100].

На рис. 4.2 (а, б) представлені спектри випромінювання плазми бар'єрного наносекундного розряду в сумішах Ar - CCl₄, в яких фіксований парціальний тиск пари рідкого фреону і різний парціальний тиск аргону [102-104].

При малих тисках суміші ($p(\text{Ar}) = 5 - 10$ кПа) (рис. 4.2, а) в спектрах випромінювання спостерігаються сумірні за інтенсивністю випромінювання смуги з максимумами при $\lambda = 175$ нм ArCl (B \rightarrow X) і $\lambda = 258$ нм Cl₂ (D' - A') [2, 54]. Менш інтенсивним є випромінювання смуг експлексної молекули ArCl* при $\lambda = 169$ нм ArCl (D \rightarrow X) і 199 нм ArCl (C \rightarrow A) [157, 158], яке проявляється лише при низькому тиску робочої суміші. Найбільш інтенсивною в спектрі випромінювання є смуга

молекули хлору з $\lambda = 258$ нм Cl_2 ($D' - A'$), яка починає превалювати при високому тиску суміші ($p > 20$ -30 кПа). В поперечному високочастотному розряді в суміші $\text{Ar} - \text{Cl}_2$ [61] також основними в спектрі є смуги ArCl ($B \rightarrow X$) та Cl_2 ($D' - A'$). Дані смуги відрізняються від смуг, які наведені на рис. 4.2. тим, що внаслідок малої швидкості процесу коливальної релаксації при низьких тисках спостерігається уширення цих смуг.

Особливістю спектру УФ - випромінювання є наявність нерозділеного виступу в короткохвильовому канті смуги випромінювання молекули хлору, який сильніше виявляється при збільшенні тиску суміші і який не спостерігається при використанні простих хлорвмісних молекул (HCl , Cl_2) [159]. Ці особливості УФ-випромінювання молекули хлору можуть бути пов'язані з внеском у випромінювання продуктів розпаду молекул CCl_4 (радикалів CCl^* або атомів вуглецю), які утворюються при їх дисоціації в бар'єрному розряді [158]. При збільшенні парціального тиску пари фреону до 0.3 кПа в спектрі УФ і ВУФ випромінювання розряду залишається тільки одна смуга молекули хлору ($\lambda = 258$ нм) (рис.4. 2, б).

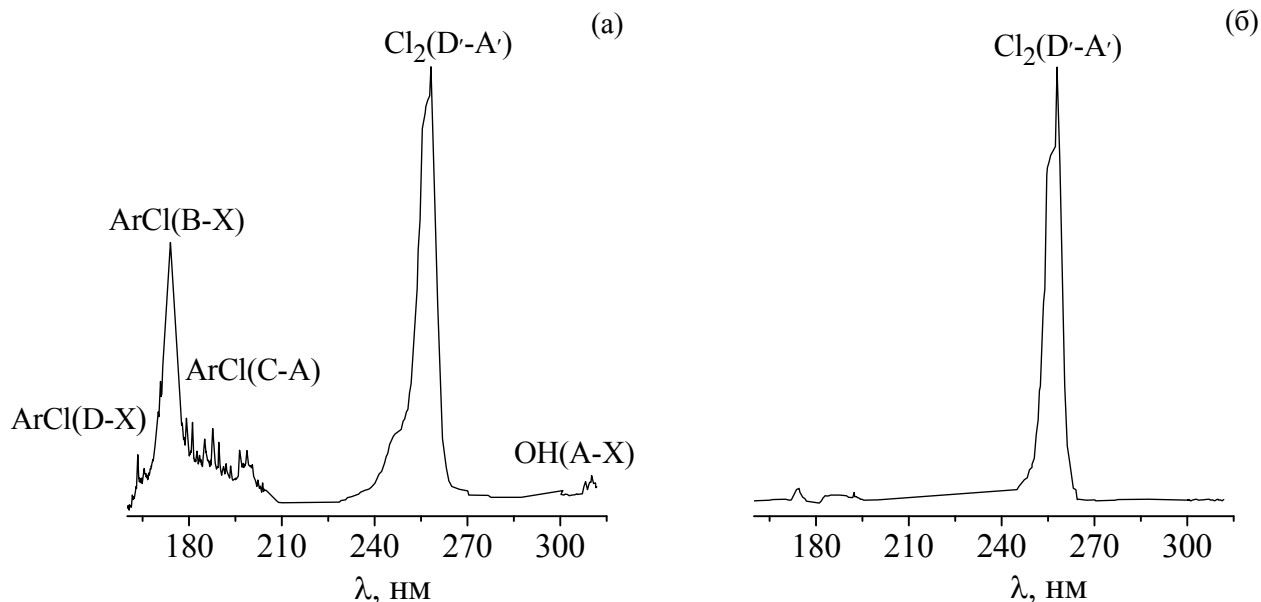


Рис. 4.2. Спектри випромінювання імпульсно-періодичного бар'єрного УФ- і ВУФ-випромінювача в сумішах $p(\text{Ar})$ - $p(\text{CCl}_4) = 6.7 - 0.13$ (а), 54.4 - 0.13 кПа (б) [83, 102-104].

З результатів оптимізації інтенсивності смуг випромінювання 175 нм ArCl ($B \rightarrow X$) (1), 258 нм Cl_2 ($D'-A'$) (2) і 309 нм OH ($A \rightarrow X$) (3) від парціального тиску пари CCl_4 при $p(\text{Ar}) = 24$ кПа (рис. 4.3) впливає, що для отримання максимальної інтенсивності цих смуг оптимальний тиск пари CCl_4 повинен знаходитися в діапазоні 10-20 Па. Такий же оптимальний тиск CCl_4 потрібний і для того, щоб в спектрі спостерігалася смуга випромінювання з максимумом 258 нм Cl_2 ($D' - A'$) (2), яка превалює над смугами ArCl ($B \rightarrow X$) і OH ($A \rightarrow X$), коли парціальний тиск пари CCl_4 збільшується до 95 Па. Подібна поведінка залежності інтенсивності випромінювання, при якій зі збільшенні тиску фреону-12 ($p(\text{CF}_2\text{Cl}_2) = 0.1 - 0.6$ кПа) зменшується інтенсивність смуги з максимумом при $\lambda \approx 258$ нм, спостерігається в поздовжньому розряді постійного струму на суміші $\text{He} - \text{CF}_2\text{Cl}_2$ [64]. Це пов'язано з тим, що при малих тисках фреонів (в нашому експерименті це – CCl_4) ефективність процесів "гасіння" Cl_2 ($D' - A'$) аргоном мала.

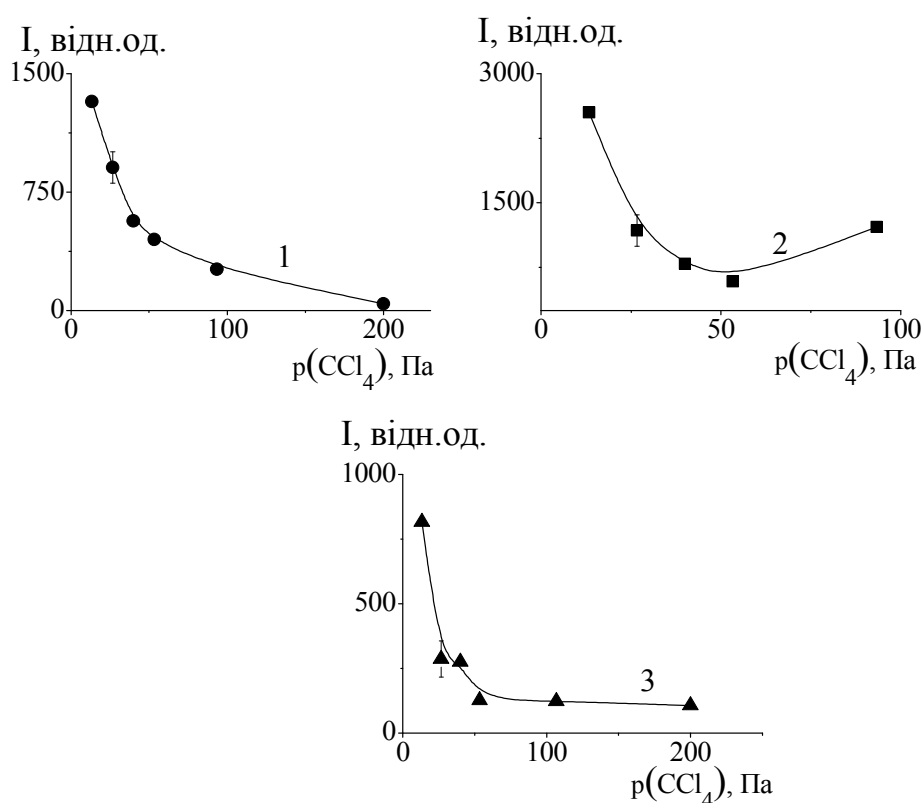


Рис.4.3. Залежності інтенсивності характеристичних смуг 175 нм ArCl ($B \rightarrow X$) (1) , 258 нм Cl_2 ($D'-A'$) (2) і 309 нм OH ($A \rightarrow X$) (3) газорозрядної плазми на основі суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$ від тиску пари CCl_4 при $p(\text{Ar}) = 24$ кПа і $p(\text{H}_2\text{O}) = 10 - 20$ Па [83,98].

Якщо порівняти залежності інтенсивності смуг $\lambda = 175$ нм ArCl ($B \rightarrow X$) і $\lambda = 309$ нм OH ($A \rightarrow X$), то інтенсивність випромінювання смуги ArCl ($B \rightarrow X$) в 1.5 рази вища за інтенсивність випромінювання смуги OH ($A \rightarrow X$).

Збільшення парціального тиску аргону від 10 до 55 кПа в бар'єрному розряді на суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ показало, що інтенсивності смуг ArCl ($B \rightarrow X$) (а) і Cl_2 ($D' - A'$) (б) зменшуються: смуги 258 нм – приблизно в три рази, а смуги - 175 нм на два порядки (рис. 4.4). Оптимальний парціальний тиск аргону складає 5 – 10 кПа. Подібна залежність, коли зростання тиску аргону приводить до зменшення інтенсивності смуг з максимумом при $\lambda = 175$ нм і $\lambda = 258$ нм спостерігається в піднормальному тліючому розряді в суміші $\text{Ar} - \text{Cl}_2$ [4]. Це може бути пояснено збільшенням ефективності електронно-коливальної релаксації збуджених верхніх станів Cl_2 ($^1\Sigma_{2u}^+$, $^1\Sigma_u^+$) до стану D' [159].

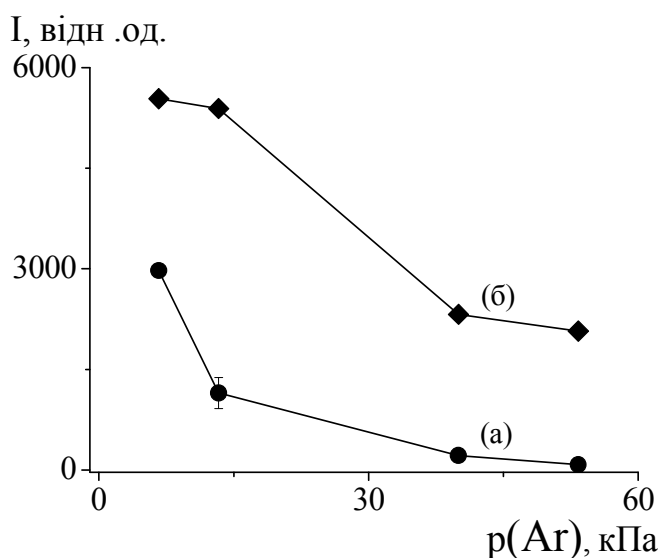


Рис. 4.4. Залежності інтенсивності смуг 175 нм ArCl ($B \rightarrow X$) (а) і 258 нм Cl_2 ($D' - A'$) (б) від величини тиску аргону при парціальному тиску фреону – $p(\text{CCl}_4) = 0.13$ кПа [83, 100, 102, 104].

У спектрах випромінювання плазми бар'єрного розряду в сумішах аргону з парами «рідкого» фреону (CCl_4) і невеликою домішкою пари води ($p \sim 10 - 20$ Па), що міститься в аргоні «технічної» чистоти в спектральній області $\Delta\lambda = 150 - 312$ нм найбільш інтенсивними є смуги випромінювання з максимумом при $\lambda = 175$ нм ArCl ($B \rightarrow X$), 258 нм Cl_2 ($D' - A'$) і смуга при $\lambda = 309$ нм OH ($A \rightarrow X$). В області

вакуумного ультрафіолету також зареєстроване слабе випромінювання смуги 169 нм $\text{ArCl} (D \rightarrow X)$, а в більш довгохвильовому спектральному діапазоні слабка смуга з максимумом при $\lambda = 199$ нм $\text{ArCl} (C \rightarrow A)$ (рис. 4.5).

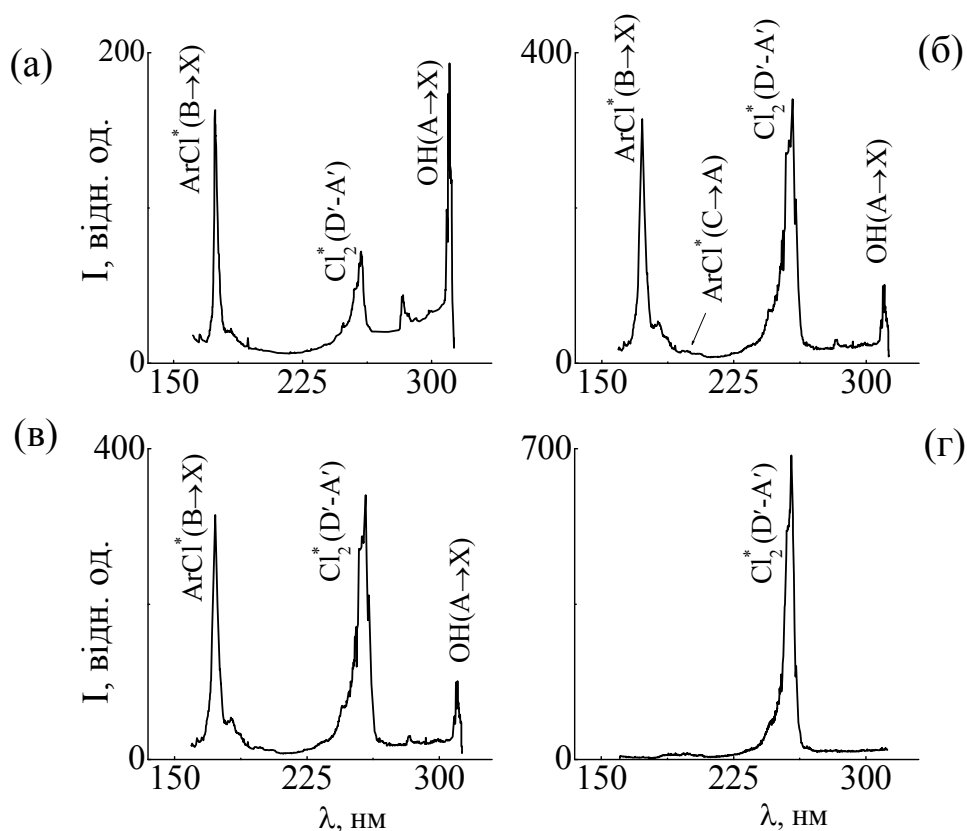


Рис.4.5. Спектри випромінювання наносекундного бар'єрного розряду в сумішах $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 24 \text{ кПа} - 26.6 \text{ Па}$ (а), $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 24 \text{ кПа} - 160 \text{ Па}$ (б), $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 24 \text{ кПа} - 266.6 \text{ Па}$ (в), $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 24 \text{ кПа} - 293.3 \text{ Па}$ (г) [83, 105].

При парціальному тиску аргону в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ рівному 24 кПа і малому парціальному тиску пари фреону (рис. 4.5, (а)) в спектрі випромінювання розряду превалює випромінювання смуг радикала гідроксилу $\text{OH} (A \rightarrow X)$ і експлексної молекули $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$. Коли збільшується парціальний тиск пари CCl_4 до 160 Па, то основними в спектрі випромінювання стають смуги $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$ і $\text{Cl}_2 (D' - A')$ (рис. 4.5, (б)). Збільшення парціального тиску пари фреону до 200 Па (рис. 4.5, (в)) приводить до сильного гасіння інтенсивності смуги випромінювання 175 нм $\text{ArCl} (B \rightarrow X)$ і збільшенню інтенсивності смуги з максимумом при $\lambda = 258$ нм $\text{Cl}_2 (D' - A')$ в чотири рази (рис. 4.5, (г)). При подальшому збільшенні парціального

тиску пари CCl_4 ($p(\text{CCl}_4) > 200$ Па) в бар'єрному розряді на суміші інтенсивність випромінювання смуг ArCl ($B \rightarrow X$) і OH ($A \rightarrow X$) зменшується практично до фонового рівня, а основним залишається випромінювання смуги Cl_2 ($D'-A'$). В спектрі випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ [58] (при $p(\text{Ar}) = 26.6$ кПа та $p(\text{Cl}_2) = 133.3$ Па)) також спостерігається одна смуга з максимумом $\lambda = 258$ нм Cl_2 ($D'-A'$). Потрібно відмітити, що півширина смуги $\lambda = 258$ нм Cl_2 ($D'-A'$) з підвищенням парціального тиску CCl_4 зменшується, що може бути зумовлено ростом коливальної релаксації в середині стану $^3\Pi_{2g}$.

У спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 280 - 285$ нм спостерігаються також слабкі смуги випромінювання, які можуть бути ототожнені з випромінювання продуктів дисоціації молекул фреону в розряді і смугою 283 нм OH ($A \rightarrow X$; 1;0).

На рис. 4.6. приведені залежності інтенсивності випромінювання смуг хлориду аргону, молекули хлору і радикала OH від величини парціального тиску пари CCl_4 при постійному парціальному тиску аргону.

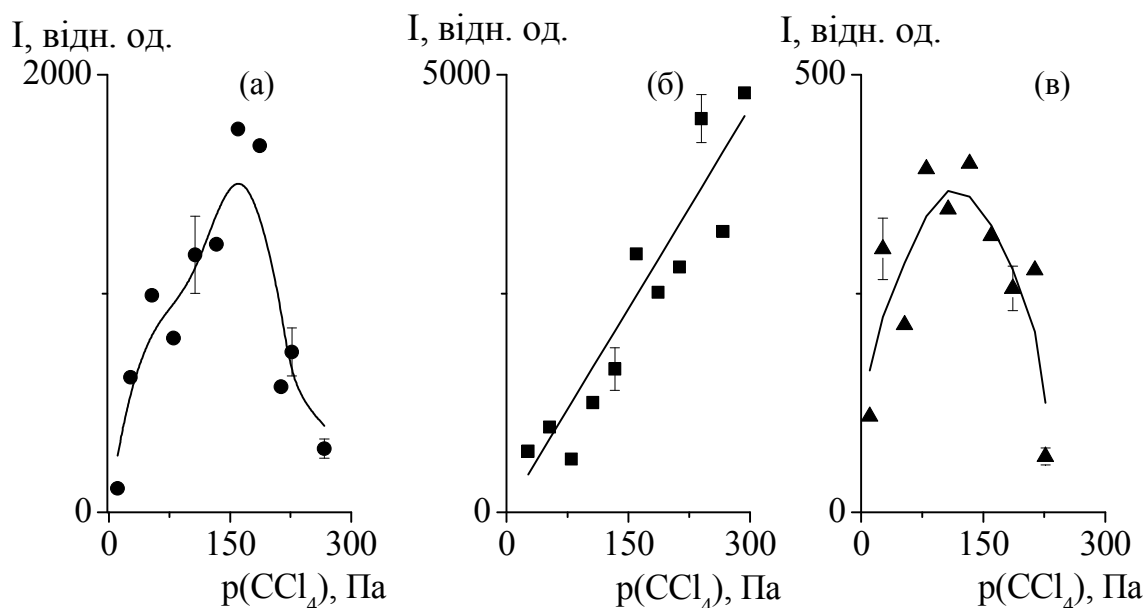


Рис. 4.6. Залежності інтенсивності випромінювання смуг з максимумом при $\lambda = 175$ нм ArCl ($B \rightarrow X$) (а), при $\lambda = 258$ нм Cl_2 ($D'-A'$) (б), при $\lambda = 309$ нм OH ($A \rightarrow X$) (в) при $p(\text{Ar}) = 24$ кПа [83, 100, 103, 105-107].

Вони характеризують ефективність одночасного утворення молекул ArCl (В), Cl_2 (D') і OH (А) залежно від складу робочої суміші. Збільшення парціального тиску

пари фреону приводить до майже лінійного зростання ефективності утворення збуджених молекул хлору; для утворення молекул ArCl (В) оптимальним є парціальний тиск фреону в діапазоні 200 – 220 Па, а для радикала OH – 140 - 160 Па.

Оптимальний парціальний тиск аргону для утворення збуджених молекул, що досліджувались, складає 10-15 кПа. Збільшення парціального тиску аргону в бар'єрному розряді з 10 до 50 кПа приводить 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 складає 5 - 10 кПа.

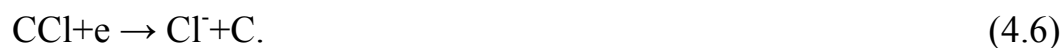
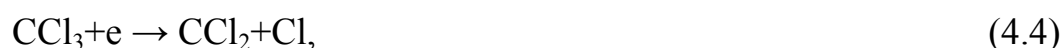
Як вже відмічалось в розділі 3 енергія нижніх метастабільних станів для аргону складає 11.5 еВ, а для криптону 9.91 еВ. Тому утворення збуджених станів аргону та криптону проходить швидко. По налогії з розрядом на суміші $\text{Kr} - \text{CCl}_4$ [68], можна виділити ряд реакцій, які приводять до формування молекул ArCl^* та Cl_2^* .

Невелика частина енергії, яка вносилась в розряд іде на утворення збуджених та іонізованих атомів і молекул, а інша частина енергії втрачається на пружні зіткнення з важкими атомами і молекулами.

Електрони з великою енергією іонізують та збуджують атоми інертних газів внаслідок непружних зіткнень з утворенням атомів аргону в метастабільних станах [59, 60, 115, 161, 162]:



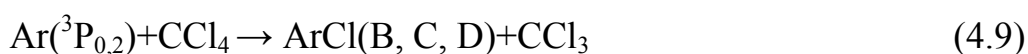
Негативний іон хлориду, який є попередником у формуванні каналу для ексимерноподібної молекули Cl_2 утворюється в реакції дисоціативного прилипання [68, 163-168]:



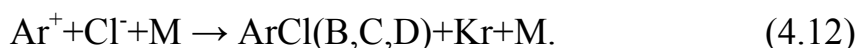
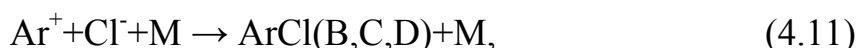
Процеси утворення ексимерних молекул та молекулярних іонів Ar_2^* , Ar_2^+ аналогічні з [68]):



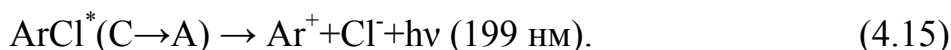
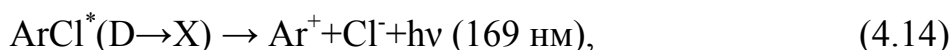
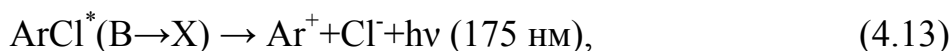
Ексиплексна молекула $ArCl^*$ може бути утворена внаслідок "гарпунної" реакції (при низьких тисках) [157, 158, 161, 164, 168]. В даному випадку у формуванні молекул $ArCl$ (B, C) бере участь нижній метастабільний рівень атома $Ar(^3P_2)$ з енергією збудження 11.5 еВ, а за утворення молекули $ArCl(D)$ відповідає рівень $Ar(^3P_0)$ ($\epsilon = 11.72$ еВ) [164, 169]:



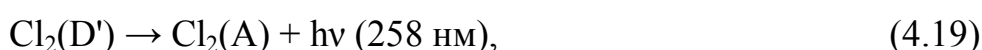
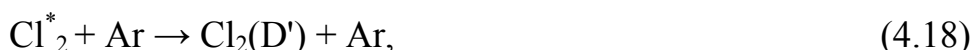
Також ексиплексна молекула $ArCl^*$ може бути утворена шляхом потрійної рекомбінації позитивних іонів інертного газу і негативного іона галогену [157, 158]:



Внаслідок реакцій (4.9) і (4.10) аргон передає слабо зв'язані електрони молекулам CCl_4 , що приводить до утворення електронно-збудженого стану $ArCl^*$. Так як електричний стан $ArCl^*$ нестійкий (час життя стану $ArCl$ (B) $\tau \approx 5.2$ нс, $ArCl$ (C) $\tau \approx 100$ нс, $ArCl$ (D) $\tau \approx 20$ нс [163, 164, 169-171]), тому швидко розпадається віддаючи енергію збудження у вигляді випромінювання квантів світла в ВУФ діапазоні:



При високих тисках утворення збуджених молекул хлору можливо внаслідок реакції іон-іонної рекомбінації [172]:





4.1.2. Електричні та ресурсні характеристики бар'єрного розряду в суміші аргону з парами CCl_4

Залежності інтенсивності випромінювання смуг 175 нм і 258 нм від частоти слідування імпульсів (рис. 4.7) показали, що при малих частотах (40 – 350 Гц) спостерігаються нелінійні залежності від частоти, а середня інтенсивність випромінювання невелика. В області частот $\Delta f = 400\text{--}1000$ Гц спостерігаються залежності інтенсивності близькі до лінійних і значне збільшення їх величини.

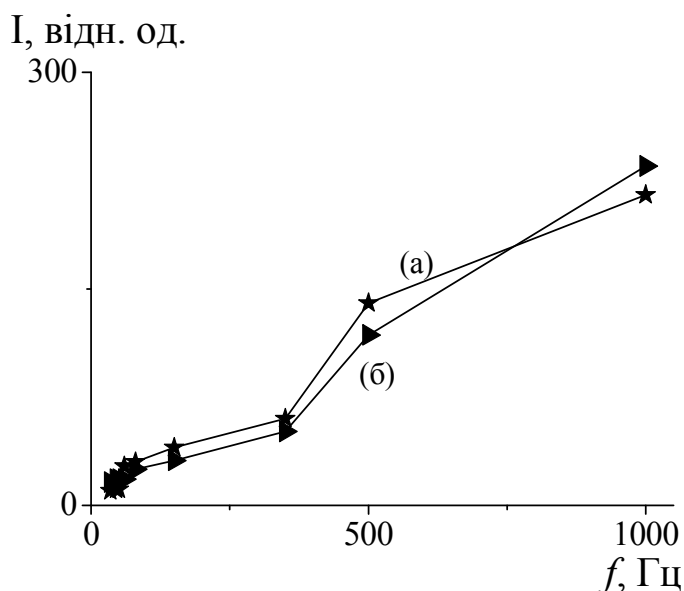


Рис. 4.7. Залежності інтенсивності смуг 175 нм ArCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) (а) і 258 нм Cl_2 ($\text{D}' - \text{A}'$) (б) в наносекундному бар'єрному розряді в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 13.3 - 0.13$ кПа від частоти повторення імпульсів [83, 102].

Такий характер залежностей інтенсивності пов'язаний, імовірно, з розпадом молекул CCl_4 в бар'єрному розряді при великій частоті повторення імпульсів струму.

Результати, приведені на рис 4.8., характеризують ефективність утворення молекул $\text{ArCl}^*(\text{B})$ і $\text{Cl}_2^*(\text{D}')$ залежно від частоти повторення імпульсів струму. У діапазоні частот $\Delta f = 40 - 400$ Гц залежності нелінійні, а при збільшенні частоти до 1000 Гц вони стають лінійними без ознак насичення інтенсивності випромінювання.

Такий характер залежності можливо пов'язаний з внеском продуктів дисоціації молекул CCl_4 в утворення молекул ArCl (B) і Cl_2 (D').

На рис. 4.8. приведені залежності ефективності утворення молекул ArCl (B) і Cl_2 (D') від кількості розрядних імпульсів бар'єрного розряду в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 13.33 \text{ кПа} - 0.1333 \text{ кПа}$. Ефективність утворення молекул ArCl^* (B) (рис. 4.8, (a)) збільшується при збільшенні кількості розрядних імпульсів з 2×10^5 до 2.5×10^5 . Після 2.5×10^5 імпульсів густина молекул ArCl (B) виходить на стаціонарний рівень. Для молекул хлору отримано приблизно такі ж результати (рис. 4.8, (б)), що вказує на напрацювання з часом атомів хлору або радикалів, які беруть участь в утворенні молекул ArCl (B) і Cl_2 (D'). Більш виражено ці ефекти проявлялися в експлексних лазерах і лампах з накачуванням поперечним розрядом.

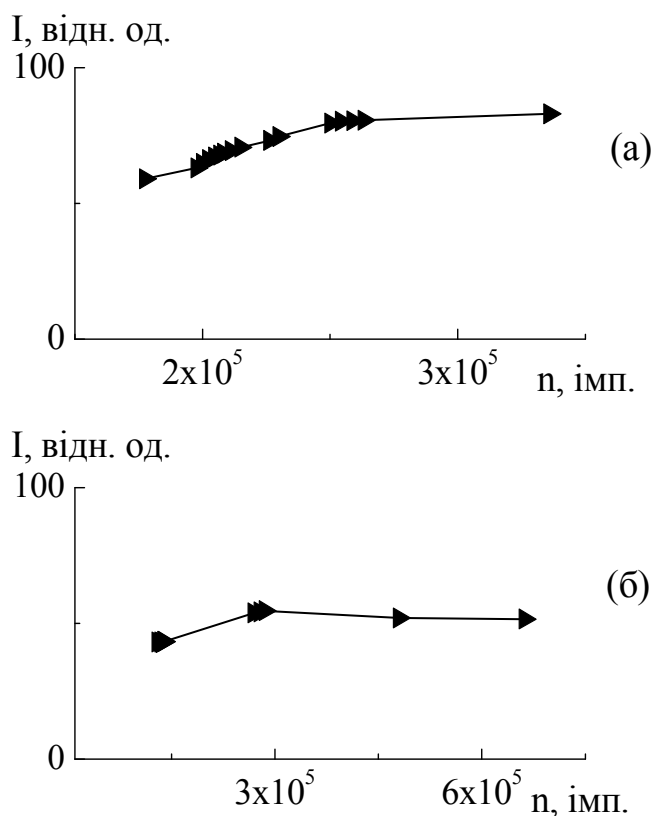


Рис. 4.8. Залежності інтенсивності випромінювання смуги ArCl ($B \rightarrow X$) (a) та смуги Cl_2^* (D'-A') (б) від кількості розрядних імпульсів наносекундного бар'єрного розряду в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 13.33 \text{ кПа} - 0.1333 \text{ кПа}$ при $U_{\text{зар.}} = 13 \text{ кВ}$ [83, 103, 105, 107].

У праці [156] приведена константа швидкості прямої реакції утворення ArCl (В, С) в процесі зіткнення метастабільних атомів $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$ з молекулою CCl_4 – $1.6 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. Це достатньо мала величина, тому ефективніше утворюються молекули ArCl (В; С) у вторинних реакціях: "гарпунній" реакції атомів $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$ з молекулами хлору і реакції іон-іонної рекомбінації іонів Ar^+ з іонами Cl^- .

Механізм утворення збуджених молекул в такому складному середовищі як бар'єрний розряд в суміші аргону, фреону і пари води вимагає створення складної кінетичної моделі фізико-хімічних процесів і чисельного моделювання параметрів плазми. Це дозволить встановити конкретні механізми утворення всіх найбільш важливих складових у тому числі і з урахуванням процесів дисоціації молекул фреону.

Із залежності потужності випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ від парціального тиску Ar , яка наведені на рис. 4.9 (а), випливає, що оптимальна величина парціального тиску аргону, при якій досягається максимальне значення потужності випромінювання, складає 6 кПа.

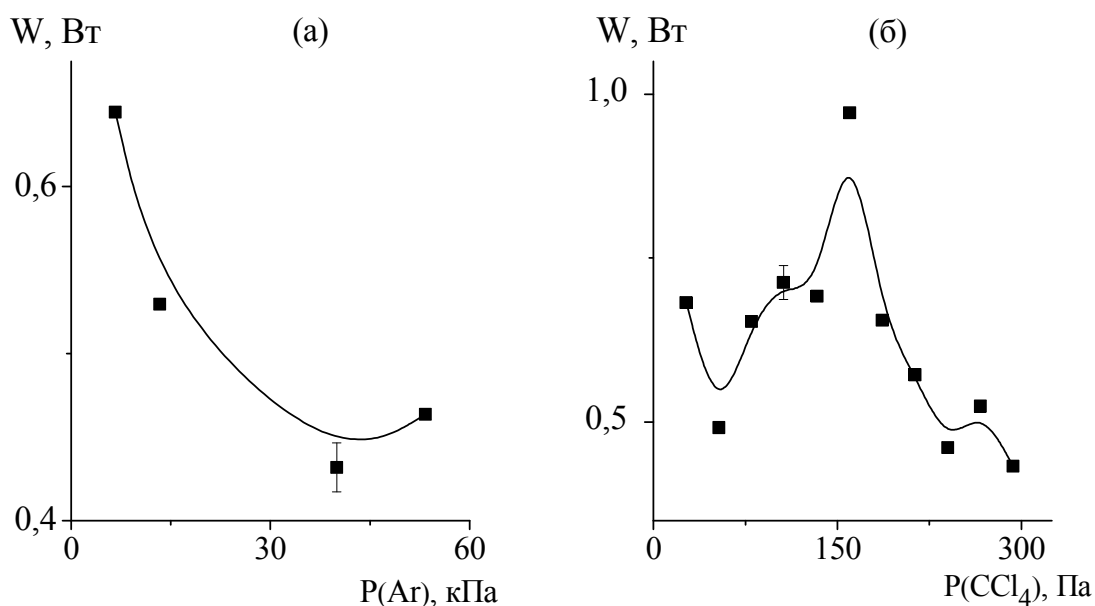


Рис. 4.9. Залежності потужності випромінювання плазми наносекундного бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ від парціального тиску аргону (а) та пари CCl_4 (б) при частоті слідування імпульсів струму 80 Гц та зарядній напрузі робочого конденсатора високовольтного модулятора 13 кВ [83,102].

Для отримання найбільшої потужності випромінювання бар'єрного розряду оптимальне значення парціального тиску чотирихлористого вуглецю знаходиться в діапазоні тисків 120 - 215 Па (рис. 4.9, (б)). При малих парціальних тисках пари CCl_4 потужність випромінювання зростає, що зумовлено внесками в утворення реакцій збудження молекул (ArCl , Cl_2). Далі з підвищенням парціального тиску відбувається спад потужності УФ-випромінювання, що зумовлено процесом безвипромінювального переходу ексиплексних молекул і молекули хлору.

Типові осцилограми напруги, струму та потужності випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ наведені на рис. 4.10 та на рис. 4.11.

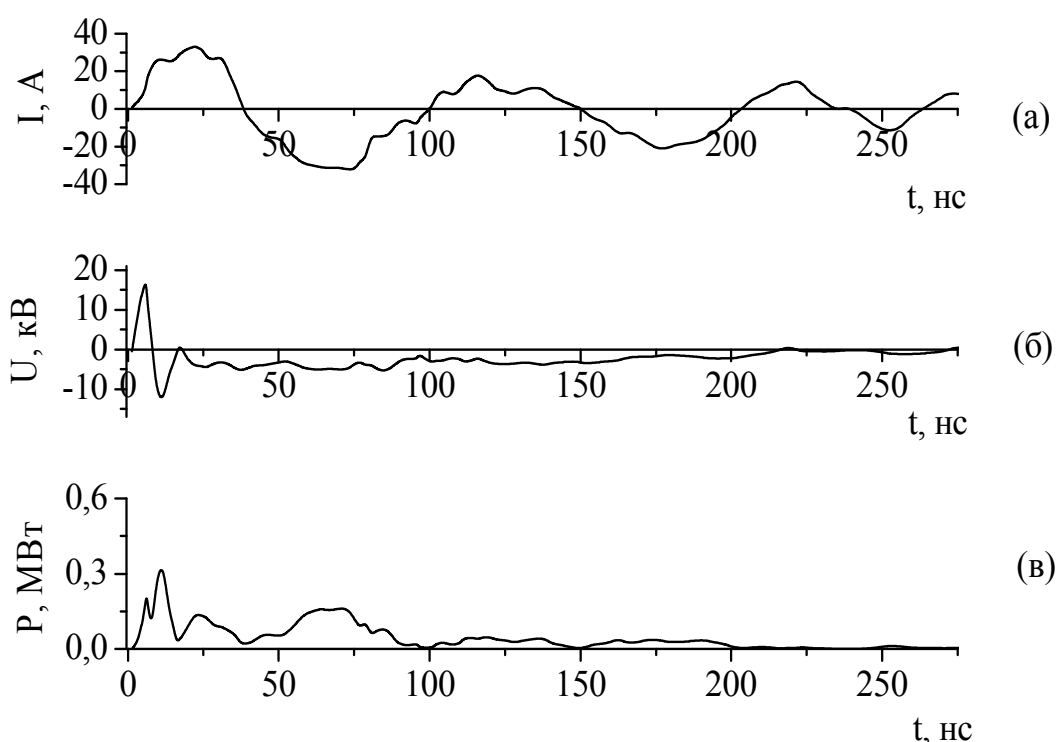


Рис. 4.10. Осцилограми імпульсів напруги (а), струму (б) і потужності (в), що вкладається в бар'єрний розряд у суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 6.6 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$ при напрузі на робочому конденсаторі $U = 13 \text{ кВ}$ ($f = 80 \text{ Гц}$) [83, 103].

Амплітуда основного максимуму імпульсу струму досягає 33 А (суміш $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 6.6 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$) (рис. 4.10, (а)) при його тривалості 20-30 нс, 50 - 60 А (суміш $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 24 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$) (рис. 4.11, (а)) при тривалості – 25-35 нс. При зростанні тиску аргону відбувається зростання імпульсу струму. Зі збільшенням тиску аргону збільшується кількість реакцій заряджених частинок, що у свою чергу

приводить до зростання струму. Також на осцилограмі струму можна спостерігати наявність в бар'єрному розряді мікророзрядів.

Амплітуда імпульсів напруги на виході модулятора збільшується за допомогою імпульсного кабельного трансформатора і досягає 16 кВ (для суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 6.6 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$) (рис. 4.10, (б)) та 22 кВ (для суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 24 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$) (рис. 4.11, (б)) при тривалості окремого викиду 8 нс.

Осцилограми потужності (рис. 4.10, (в), рис. 4.11, (в)) показали, що в діапазоні 50 нс вкладається в розряд максимум енергії. Потрібно відмітити, що збільшення тиску аргону ($p(\text{Ar}) = 24 \text{ кПа}$) приводить до збільшення енерговкладу.

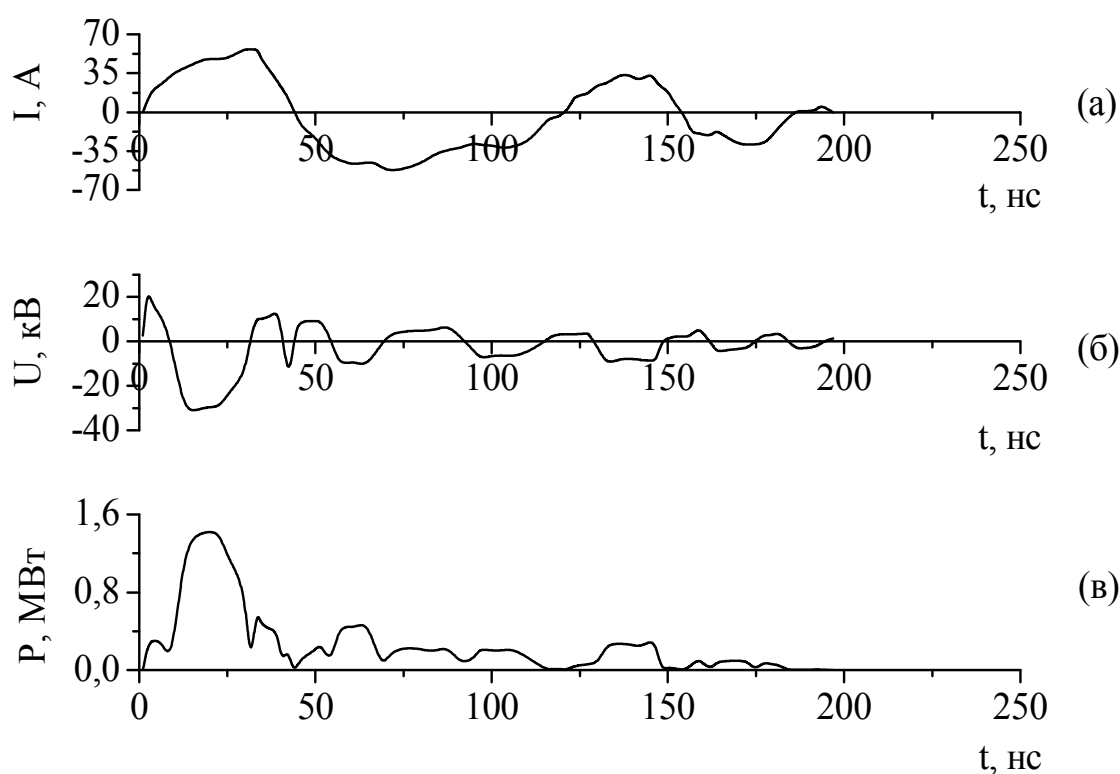


Рис. 4.11. Осцилограми імпульсів напруги (а), струму (б) і потужності (в), що вкладається в бар'єрний розряд у суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4 = 24 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$ при напрузі на робочому конденсаторі $U = 13 \text{ кВ}$ ($f = 80 \text{ Гц}$) [83, 103].

4.1.3. Кінетика утворення ексімерних молекул ArCl^* , $\text{Cl}_2(\text{D}')$ в бар'єрному розряді в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$

Розрахунок проводився для умов наносекундного бар'єрного розряду в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ [83, 104].

Одновимірна модель розрахунку кінетики в бар'єрному розряді включала розв'язок рівнянь неперервності для густини і середньої енергії електронів, а також кінетичних рівнянь для нейтральних компонент середовища. Суміш складу Ar-CCl₄ збуджувалася одиночним синусоїдальним імпульсом тривалістю 80 нс і амплітудою 20 кВ. Розрахункові залежності напруги на розрядному проміжку і струму розряду наведені на рис.4.12.

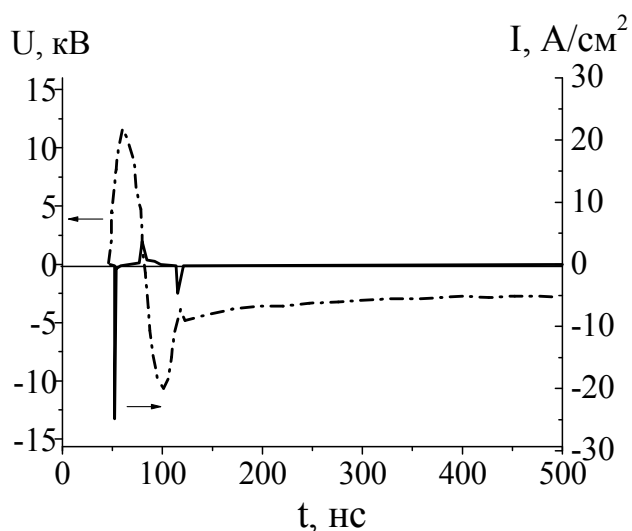


Рис.4.12. Напруга на розрядному проміжку і струм бар'єрного розряду в суміші $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 6.7 - 0.13 \text{ кПа}$ [83, 104].

На рис.4.13 наведено часові залежності концентрації випромінюючих молекул в активному об'ємі розряду.

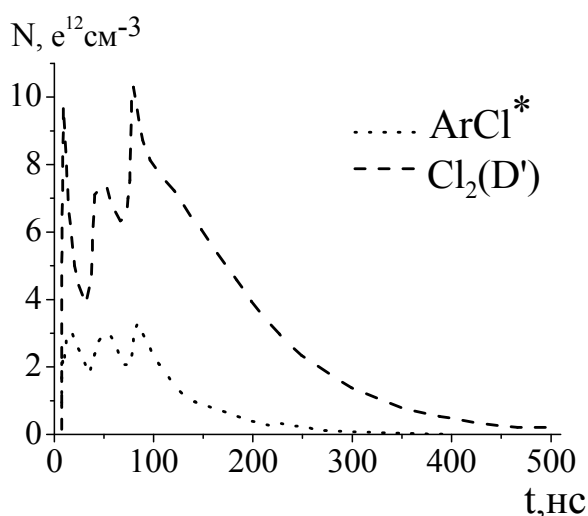


Рис.4.13. Часові залежності концентрацій випромінюючих молекул ArCl (B)* і Cl₂(D') [83, 104].

Декілька піків в профілі концентрацій відповідають кільком пробоям розрядного проміжку при збудженні імпульсами високої напруги. Співвідношення концентрацій ArCl(B)^* і $\text{Cl}_2(\text{D}')$ становить приблизно 1:4. Враховуючи, що часи радіаційного розпаду цих молекул складають 5.2 нс і 16 нс, відповідно, можна зробити висновок про те, що співвідношення інтенсивностей випромінювання відповідних смуг складає $I(175 \text{ нм}): I(258 \text{ нм}) = 2:3$, що добре узгоджується з даними експерименту, наведеними на рис.4.2 (а).

4.2. Випромінювальні характеристики імпульсно-періодичного бар'єрного розряду в суміші криптону, аргону та пари фреону

Нами були досліджені спектри випромінювання наносекундного розряду з двома бар'єрами в суміші $\text{Kr} - \text{Ar} - \text{CCl}_4$, залежності інтенсивності спектральних смуг $\text{ArCl}(\text{B} \rightarrow \text{X})$, $\text{KrCl}(\text{D} \rightarrow \text{X})$, $\text{KrCl}(\text{B} \rightarrow \text{X})$ і $\text{Cl}_2(\text{D}' \rightarrow \text{A}')$ і середньої потужності випромінювання від тиску інертних газів (криптону, аргону) та осцилограми напруги, струму і потужності випромінювання, яка вносила в розряд.

Результати дослідження бар'єрного розряду в суміші криптону, аргону та пари фреону опубліковані в наших статтях [83, 109-112].

4.2.1. Дослідження характеристик джерел випромінювання наносекундного бар'єрного розряду в суміші Ar-Kr-CCl_4

Спектри випромінювання наносекундного бар'єрного розряду в потрібних сумішах різного складу приведені на рис. 4.14 [82, 100, 109-111]. При невеликому парціальному тиску криптону – $p(\text{Kr}) = 0.3\text{-}1.3 \text{ кПа}$ в спектрах спостерігаються смуги з $\lambda = 175 \text{ нм}$ $\text{ArCl}(\text{B} \rightarrow \text{X})$, 199 нм $\text{KrCl}(\text{D} \rightarrow \text{X})$, 222 нм $\text{KrCl}(\text{B} \rightarrow \text{X})$ і 258 нм $\text{Cl}_2(\text{D}' \rightarrow \text{A}')$. Дані смуги спостерігаються в поздовжньому тліючому розряді на суміші $\text{Ar} - \text{Kr} - \text{Cl}_2$ [64], в поперечному об'ємному розряді (суміш $\text{Ar} - \text{Xe} - \text{Cl}_2$) [65] та в бар'єрному розряді (суміш $\text{Ar} - \text{Kr} - \text{Cl}_2$) [57]. Найбільш чутливим розподіл інтенсивності в спектрі є до парціального тиску криптону, оскільки у атома криптону найменша енергія нижніх метастабільних рівнів. Тому в розряді на основі

криптонвмісних сумішей випромінювання смуги 308 нм ОН ($A \rightarrow X$) практично відсутнє.

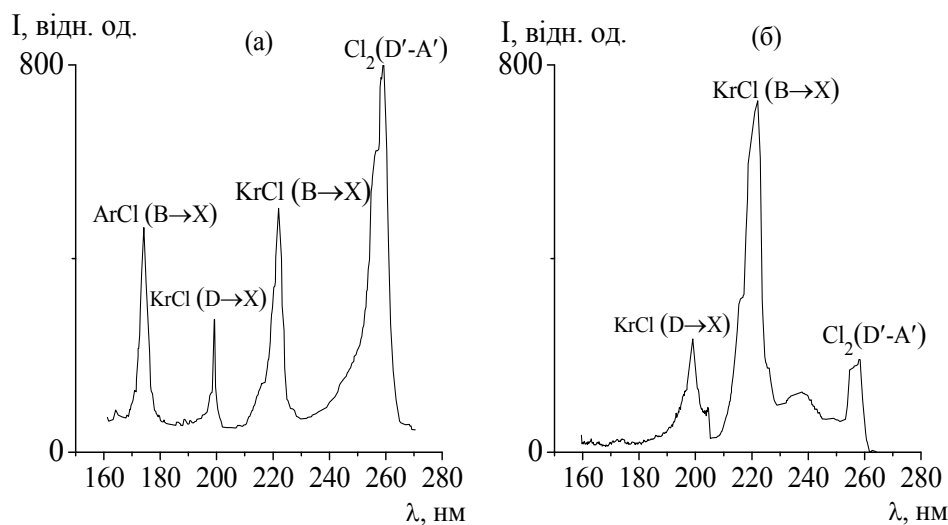
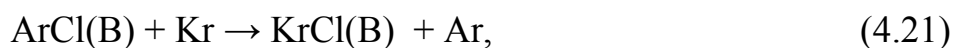


Рис. 4.14. Спектри випромінювання плазми бар'єрного розряду в сумішах Ar-Kr-CCl₄: 1.33 - 6.6 - 0.13 кПа (а) і 6.6-6.6-0.13 кПа (б) при $f = 80$ Гц [83, 100, 109 - 111].

Збільшення парціального тиску криптону в розряді на цій суміші до 6.6 кПа приводить до превалювання в спектрі випромінювання смуг хлориду криптону.

Особливістю застосування як хлорносія молекули CCl₄ в порівнянні з простішими молекулами (HCl, Cl₂) [159] є вища інтенсивність випромінювання смуги 258 нм Cl₂ (D' - A') в порівнянні із смугами хлоридів аргону і криптону. Дана смуга спостерігається і в спектрі люмінесценції суміші Ar - Kr - CCl₄, яка збуджувалась α - частинками ²¹⁰Po [69]. Введення криптону в подвійну суміш ($p(\text{Kr}) = 1.3$ кПа) не приводить до сильного спаду і зростання сумарної інтенсивності УФ і ВУФ випромінювання молекулярних смуг, а тільки до перерозподілу їх інтенсивності між собою. Це дозволяє використовувати просту колбу з двома діелектричними бар'єрами для розробки багатохвильової короткохвильової лампи. Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання експлексних смуг в бар'єрному розряді є реакція заміщення атомів аргону атомами криптону при утворенні відповідних хлоридів



механізм якої пов'язаний з передачею енергії від метастабільних атомів (молекул) аргону атомам криптону. Такі реакції характеризуються досить великими константами швидкості. Так, для реакції заміщення атомів Kr атомами Xe при утворенні молекул KrCl (B) і XeCl (B) в газорозрядній індикаторній панелі змінного струму вона складає $-7 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ [64].

Результати оптимізації смуг випромінювання ексиплексних молекул і молекули хлору від величини парціального тиску важких інертних газів при фіксованому $p(\text{CCl}_4)$ (рис. 4.15) 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 KrCl($B \rightarrow X$; $D \rightarrow X$), ArCl ($B \rightarrow X$) і практично не впливає на інтенсивність смуги 258 нм Cl_2 ($D'-A'$).

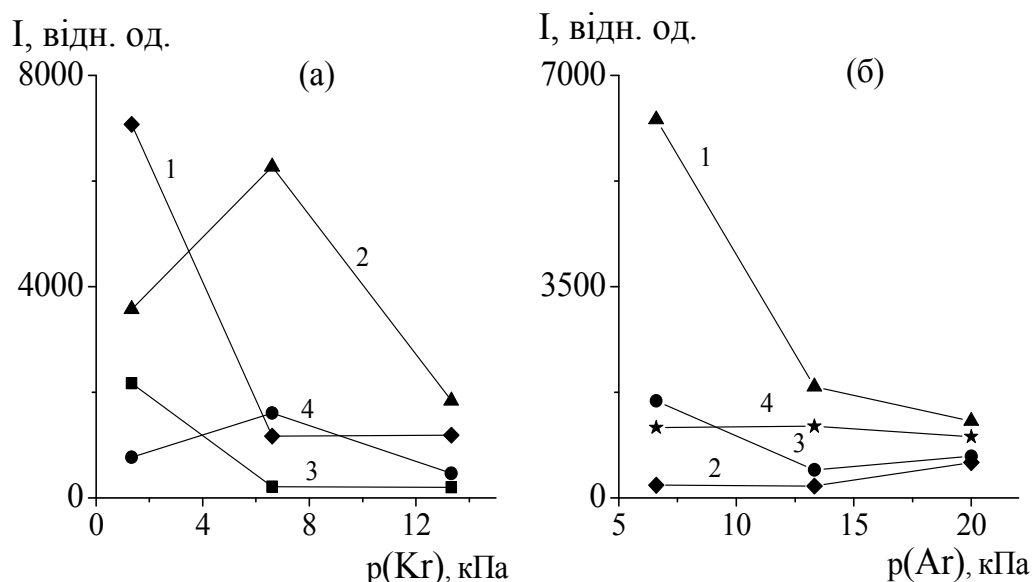


Рис. 4.15. Залежності інтенсивності випромінювання смуг хлоридів інертних газів і молекули хлору від величини парціального тиску криптону в суміші Ar-Kr- CCl_4 при $p(\text{CCl}_4) = 130 \text{ Па}$, $p(\text{Ar}) = 6.6 \text{ кПа}$ і $f = 80 \text{ Гц}$: 1 – 258; 2 – 222; 3-175; 4-200 нм (а) та від величини парціального тиску аргону в суміші Kr-Ar- CCl_4 при $p(\text{CCl}_4) = 130 \text{ Па}$, $p(\text{Kr}) = 6.6 \text{ кПа}$ і $f = 80 \text{ Гц}$: 1 – 222 ; 2 - 175; 3-200; 4-258 нм (б) [83, 100, 109-111].

Це пов'язано із зменшенням параметра E/N (де E – напруженість електричного поля, а N – загальна густина атомів і молекул в суміші), яке приводить до зниження

густини метастабільних атомів і позитивних іонів важких інертних газів, що впливають на утворення ексиплексних молекул в "гарпунних" реакціях і реакціях іон-іонної рекомбінації.

Збільшення ж парціального тиску криптому 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 криптому при утворенні хлоридів аргону і криптому. Інтенсивність випромінювання смуги хлору, при цьому, також зменшувалася приблизно на порядок. Для отримання максимальної інтенсивності смуг KrCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$; $\text{D} \rightarrow \text{X}$) оптимальний парціальний тиск криптому в потрібній суміші знаходиться в діапазоні 6 – 8 кПа.

В порівнянні з поздовжнім тліючим розрядом, де в потрібній суміші Ar-Xe-Cl_2 спостерігається широкосмугове випромінювання на основі смуг монохлоридів Ar , Xe , Kr і молекул хлору [65], у бар'єрному розряді на суміші Kr-Ar-CCl_4 спостерігаються вузькі смуги ArCl^* , KrCl^* та Cl_2^* . Це свідчить про високу швидкість процесу коливної релаксації станів ексиплексної молекули і збуджених станів молекули CCl_4 .

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.

4.2.2. Енергетичні та електричні характеристики бар'єрного розряду в суміші криптому, аргону з парою CCl_4

Залежності інтенсивності смуг 222 нм KrCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) (1), 258 нм Cl_2 ($\text{D}'\text{-A}'$) і 175 нм ArCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) від частоти слідування імпульсів струму приведені на рис. 4.16.

Відносна інтенсивність кожної смуги приведена в різних відносних одиницях і вони не можуть порівнюватися між собою. У діапазоні частот 40-400 Гц залежності на рис. 4.16 нелінійні, а при збільшенні частоти до 1000 Гц вони стають лінійними без ознак насичення інтенсивності випромінювання.

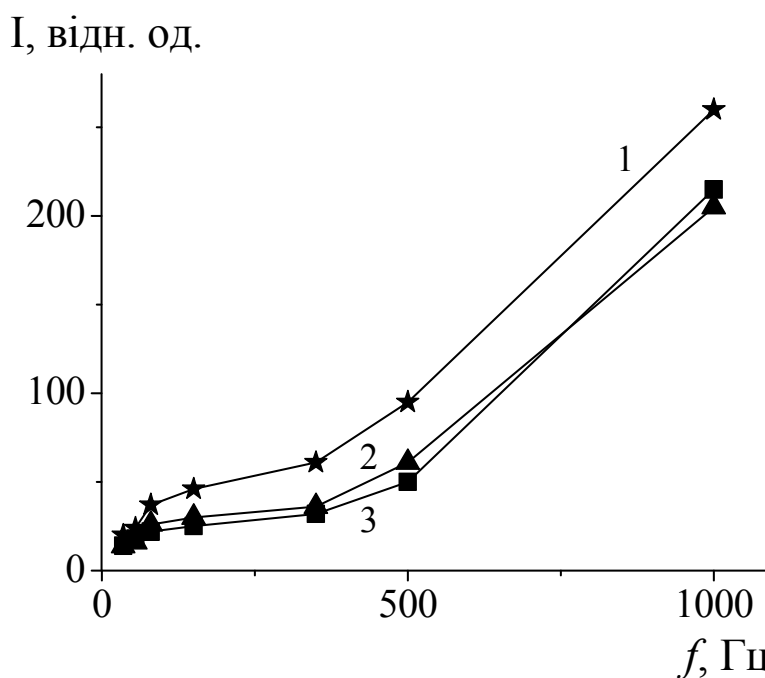


Рис. 4.16. Залежності інтенсивності смуг KrCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) (1), Cl_2 ($\text{D}' - \text{A}'$) (2) і ArCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) (3) від частоти проходження імпульсів бар'єрного розряду в суміші $p(\text{Kr})$ - $p(\text{Ar})$ - $p(\text{CCl}_4) = 1.33 - 6.6 - 0.13$ кПа [83, 100, 110].

Такий характер залежностей можливо пов'язаний з внеском продуктів дисоціації молекул CCl_4 в утворення ексиплексних молекул і молекул Cl_2 (D').

Ефективніше утворюються молекули ArCl (B ; C) у вторинних реакціях : "гарпунна" реакція атомів $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$ з молекулами хлору і іон-іонна рекомбінація іонів Ar^+ з іонами Cl^- . Напрацювання складових цих реакцій найефективніше відбувається при підвищених частотах проходження імпульсів струму, що може бути причиною зміни форми залежностей, приведених на рис. 4.16., при переході від низьких до високих частот. Оцінка константи "гасіння" молекул ArCl ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) і Cl_2 ($\text{D}' - \text{A}'$) з наших результатів дослідження з використанням формули Штерна-Фольмера показало, що для молекули ArCl ($\tau_p \approx 5.2$ нс [160]) константа швидкості "гасіння" складає $k_T \approx 1 \times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, а для молекули $\text{Cl}_2(\text{D}')$ ($\tau_p \approx 16$ нс [173]) в 2 рази менше - $k_T \approx 0.5 \times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

Залежності потужності випромінювання бар'єрного розряду в суміші $\text{Kr} - \text{Ar} - \text{CCl}_4$ приведена на рис. 4.17.

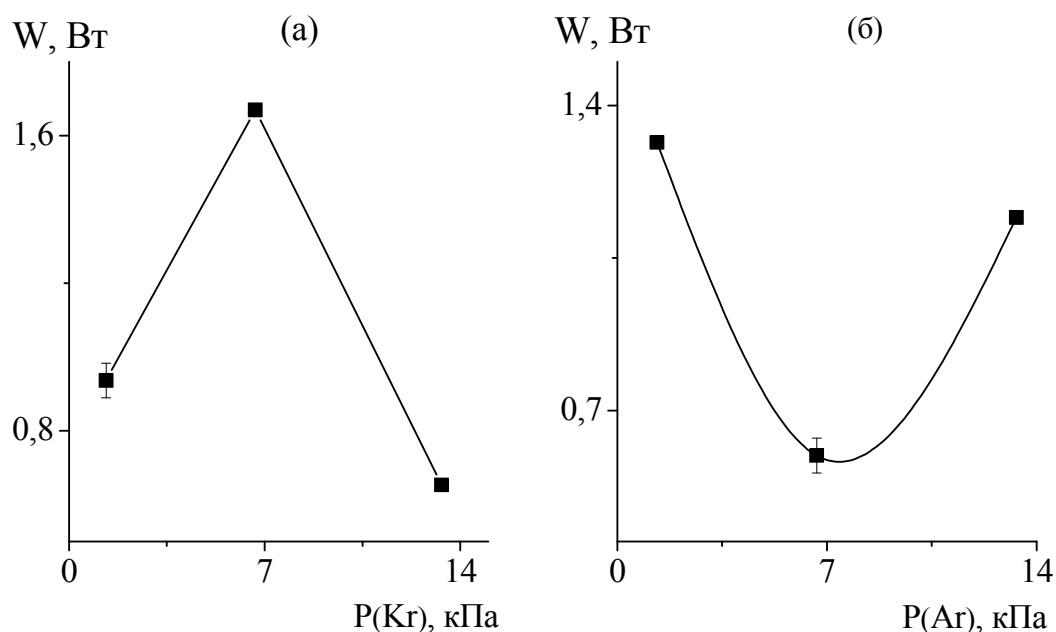


Рис. 4.17. Залежності потужності випромінювання бар'єрного розряду в суміші Kr - Ar - CCl_4 від парціального тиску криптону (а) та аргону (б) при частоті слідування імпульсів струму $f=80$ Гц та зарядній напрузі 13 кВ [83, 111].

Оптимум середньої потужності випромінювання знаходиться при парціальному тиску криптону 6.6 кПа, а подальше збільшення парціального тиску приводить до спаду потужності випромінювання (а). При парціальному тиску аргону 1.3 кПа спостерігається найбільша середня потужність випромінювання (б). Оптимізація залежностей потужності випромінювання від тиску аргону показала, що потужність випромінювання потрібної суміші у два рази більша від суміші Ar - CCl_4 (рис. 4.9).

Амплітуда імпульсів напруги на виході модулятора збільшується за допомогою імпульсного кабельного трансформатора і досягає 50-55 кВ (рис. 4.18, а) при тривалості окремого викиду 8 нс. Амплітуда основного максимуму імпульсу струму досягає 25 - 50 А (рис. 4.18, б) при його тривалості 10 - 30 нс. Основний енерговнесок в бар'єрний розряд в потрібній суміші відбувається в діапазоні 50 нс.

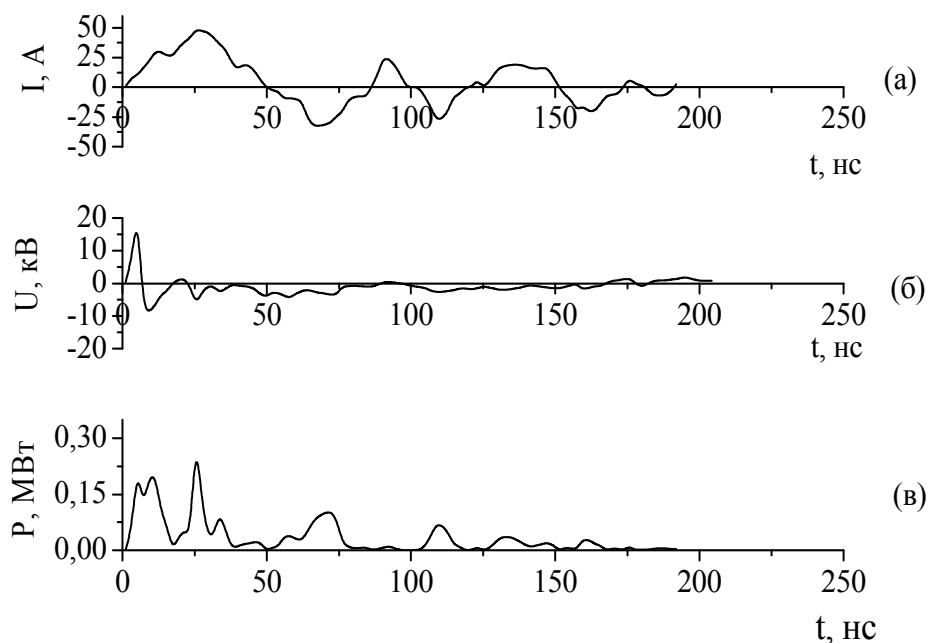


Рис. 4.18. Осцилограми імпульсів напруги (а), струму (б) і потужності (в), що вноситься в бар'єрний розряд у суміші $\text{Ar-Kr-CCl}_4 = 6.6 \text{ кПа} - 6.6 \text{ кПа} - 133 \text{ Па}$ при напрузі на робочому конденсаторі $U = 13 \text{ кВ}$ ($f = 80 \text{ Гц}$) [83, 107, 111].

4.3. Результати моделювання параметрів плазми бар'єрного розряду в сумішах інертних газів, аргону, криптону та пари фреону

Проведений огляд літератури свідчить про те, що інформація по розрахункам електронних кінетичних коефіцієнтів для бар'єрного розряду в сумішах Ar-CCl_4 та Ar-Kr-CCl_4 відсутня, то доцільним є провести числове моделювання, шляхом розв'язання кінетичного рівняння Больцмана.

Проведено розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів у діапазоні величин параметру $E/N = 1 - 1000 \text{ Тд}$ для бар'єрного розряду в сумішах $\text{Ar-CCl}_4 = 0.99-0.01\%$ та $\text{Ar-Kr-CCl}_4 = 0.495-0.495-0.01\%$ при ступені іонізації 10^{-5} , концентрації електронів $N_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і температурі газу – 300 К .

Перерізи основних пружних і непружних електронних процесів зіткнення з атомами та молекулами наведені на рис. 4.19. Електронні процеси взаємодії електронів з атомами Ar і молекулами CCl_4 , які враховані при розв'язуванні рівняння Больцмана для ФРЕЕ у розряді в сумішах Ar-CCl_4 та Ar-Kr-CCl_4 приведені в таблицях 4.1, 4.2.

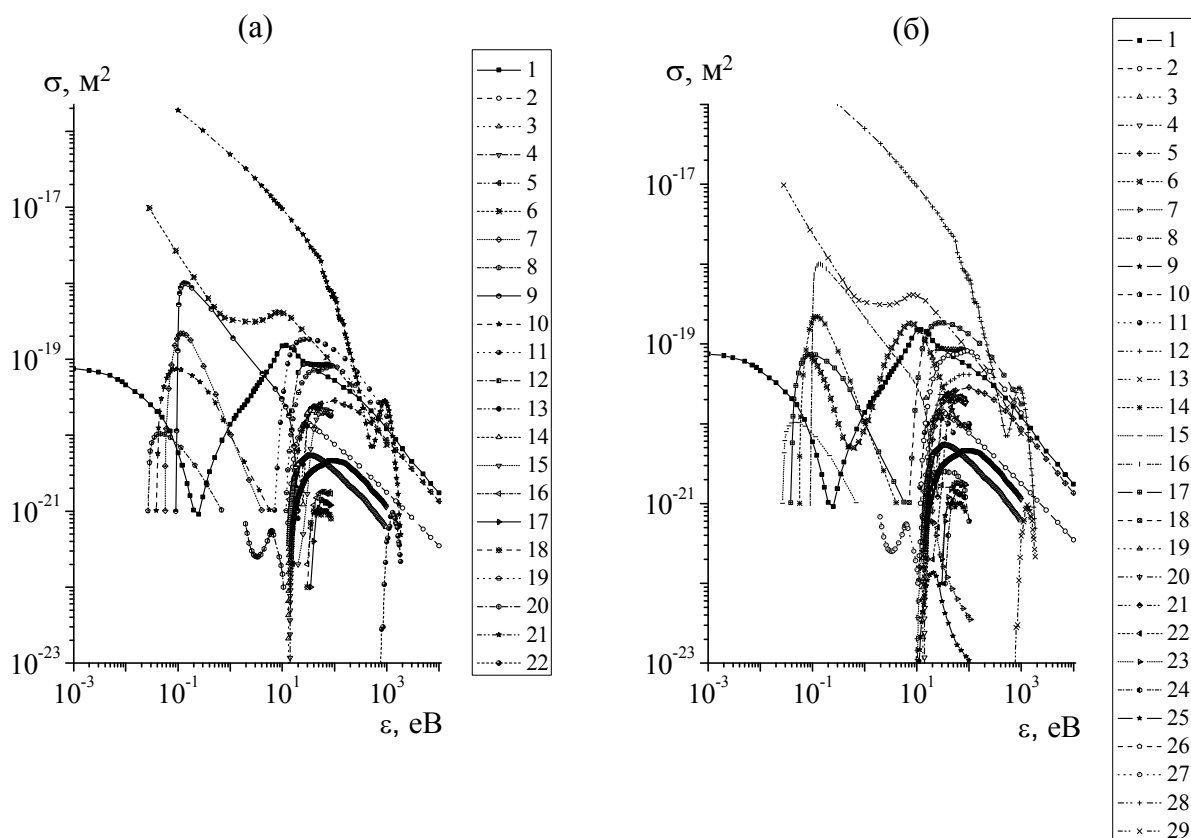


Рис. 4.19. Перерізи процесів зіткнення в сумішах Ar-CCl_4 (а) та Ar-Kr-CCl_4 (б) [83, 150, 174-176].

Таблиця 4.1

Електронні процеси взаємодії електронів з атомами Ar і молекулами CCl_4 , які враховані при розв'язуванні рівняння Больцмана для ФРЕЕ у розряді в суміші Ar-CCl_4

№	Реакції	Література
1.	$e + \text{Ar} \rightarrow e_0 + \text{Ar}$	[150]
2.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^* \quad (11.5 \text{ eV})$	
3.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^* \quad (13 \text{ eV})$	
4.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^* \quad (14 \text{ eV})$	
5.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^+ \quad (15.80 \text{ eV})$	
6.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow e_0 + \text{CCl}_4$	
7.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow e + \text{CCl}_4^*(v_1) \quad (0.05 \text{ eV})$	

Продовж. табл. 4.1

8.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow e + \text{CCl}_4^*(v_2)$	(0.02 eB)	[150]
9.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow e + \text{CCl}_4^*(v_3)$	(0.08 eB)	
10.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow e + \text{CCl}_4^*(v_4)$	(0.03 eB)	
11.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow e + \text{CCl}_4^*$	(7.1 eB)	
12.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{CCl}_3^+ + \text{Cl}$	(15 eB)	[174,175]
13.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{CCl}^+ + \text{Cl}_2 + \text{Cl}$	(20 eB)	
14.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{CCl}_2^+ + 2\text{Cl}$	(20 eB)	
15.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{Cl}^+ + \text{CCl}_3$	(20 eB)	
16.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{C}^+ + 4\text{Cl}$		
17.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{CCl}_3^{2+}$		
18.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{Cl}_2^+$		
19.	$e + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{CCl}_4^+$	(11.7 eB)	
20.	$e^- + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{CCl}_4^-$		[176]
21.	$e^- + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{Cl}^- + \text{CCl}_3$		
22.	$e^- + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{Cl}_2^- + \text{CCl}_2$		

Таблиця 4.2

Електронні процеси взаємодії електронів з атомами Ar, Kr і молекулами CCl_4 , що враховані при розв'язуванні рівняння Больцмана для ФРЕЕ у електричному розряді в суміші Ar-Kr- CCl_4

№	Реакції	Література
1.	$e + \text{Ar} \rightarrow e_0 + \text{Ar}$	[150]
2.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^*$	
3.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^*$	
4.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^*$	
5.	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^+$	
6.	$e + \text{Kr} \rightarrow e_0 + \text{Kr}$	
7.	$e + \text{Kr} \rightarrow e + \text{Kr}^*$	

8.	$e+Kr \rightarrow e+Kr^*$	(10.0 eB)	[150]
9.	$e+Kr \rightarrow e+Kr^*$	(10.0 eB)	
10.	$e+Kr \rightarrow e+Kr^*$	(10.0 eB)	
11.	$e+Kr \rightarrow e+Kr^*$	(11.0 eB)	
12.	$e+Kr \rightarrow e+Kr^+$		
13.	$e+CCl_4 \rightarrow e_0+CCl_4$		[174,175]
14.	$e+CCl_4 \rightarrow e+CCl_4^*(v_1)$	(0.05 eB)	
15.	$e+CCl_4 \rightarrow e+CCl_4^*(v_2)$	(0.02 eB)	
16.	$e+CCl_4 \rightarrow e+CCl_4^*(v_3)$	(0.08 eB)	
17.	$e+CCl_4 \rightarrow e+CCl_4^*(v_4)$	(0.03 eB)	
18.	$e+CCl_4 \rightarrow e+CCl_4^*$	(7.1 eB)	
19.	$e+CCl_4 \rightarrow CCl_3^++Cl$		
20.	$e+CCl_4 \rightarrow CCl^++Cl_2+Cl$		
21.	$e+CCl_4 \rightarrow CCl_2^++2Cl$		
22.	$e+CCl_4 \rightarrow Cl^++CCl_3$		
23.	$e+CCl_4 \rightarrow C^++4Cl$		
24.	$e+CCl_4 \rightarrow CCl_3^{2+}$		
25.	$e+CCl_4 \rightarrow Cl_2^+$		
26.	$e+CCl_4 \rightarrow CCl_4^+$		
27.	$e^-+CCl_4 \rightarrow CCl_4^-$		[176]
28.	$e^-+CCl_4 \rightarrow Cl^-+CCl_3$		
29.	$e^-+CCl_4 \rightarrow Cl_2^-+CCl_2$		

4.3.1. Результати чисельного моделювання параметрів плазми електричного розряду в суміші аргону та пари CCl_4

На основі розрахованих залежностей ФРЕЕ (рис.4.20) знайдено значення середньої енергії електронів, які показали, що значення ϵ у діапазоні $E/N=1-1000$ Тд зростає до 32 eB (рис.4.21, а(I)).

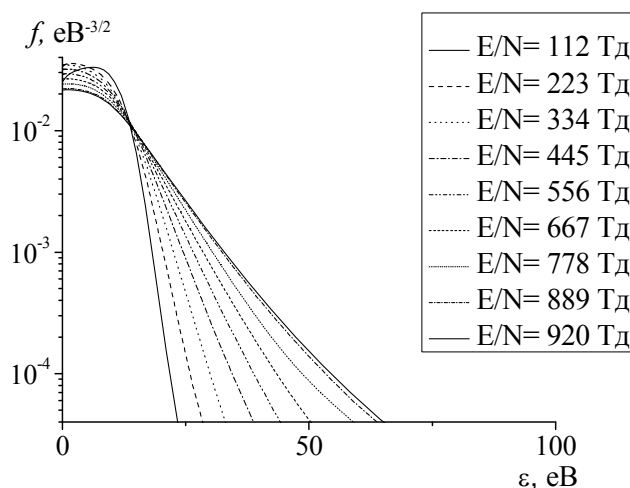


Рис. 4.20. Функція розподілу електронів за енергією у бар'єрному розряді в суміші $\text{Ar-CCl}_4=0.99-0.01\%$ [83, 108].

В діапазоні величини параметру $E/N = 1 - 50$ Тд спостерігається зріст приведеної рухливості з $1.24 \cdot 10^{25}$ до $1.39 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-1} \text{с}^{-1} \text{В}^{-1}$ (рис. 4.21, а, II). На рис. 4.21 (б) спостерігається нелінійний характер зростання швидкості дрейфу електронів у всьому діапазоні E/N і становить $v_D = 1.25 \cdot 10^6 - 1.34 \cdot 10^8 \text{ см/с}$.

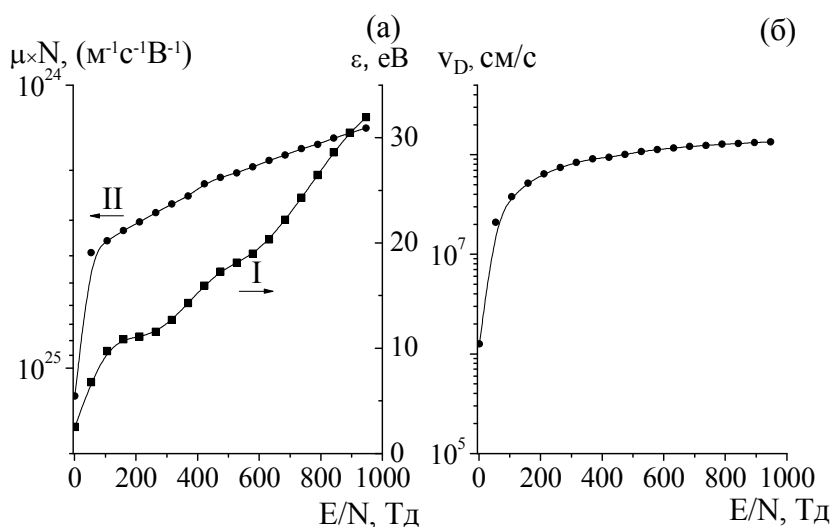


Рис. 4.21 Приведена рухливість (II), середня енергія (I) (а) та швидкість дрейфу електронів (б) у бар'єрному розряді в суміші Ar-CCl_4 [83, 108].

В поздовжньому тліючому розряді на суміші He-I_2 спостерігається лінійний характер швидкості дрейфу електронів з ростом величини електричного поля [177].

Із залежності констант швидкості процесу пружного розсіювання електронів на атомі аргону та молекулі CCl_4 випливає, що ці константи одного порядку

$k \approx 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4.22, процеси 1, 6). Такого ж порядку є і константи швидкості електронного збудження рівнів молекули CCl_4 (рис. 4.23, (а), процес 11). Константи швидкості збудження та іонізації атомів аргону (процеси 2-5) і збудження коливних рівнів CCl_4 виявились меншими – $k \approx 10^{-16} - 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4.23, (а), процеси 7-10).

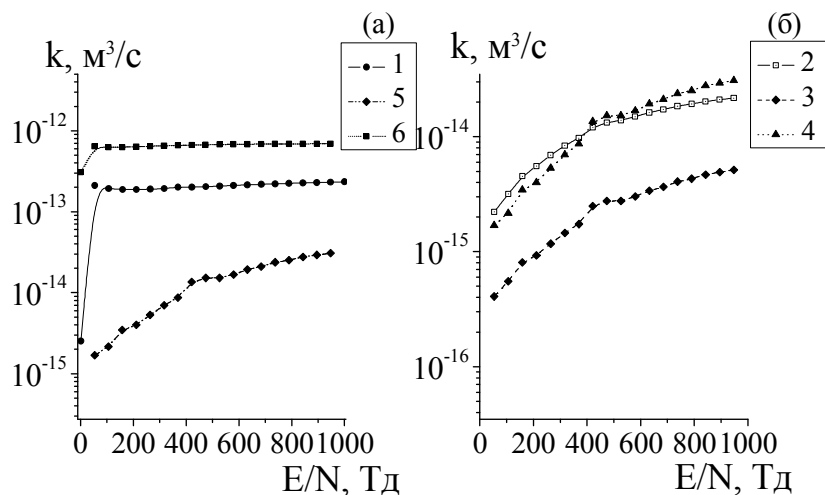


Рис. 4.22. Константи швидкості збудження та іонізації атома аргону та процесу пружного розсіювання електронів на атомі Ag і на молекулі CCl_4 (процеси 1-6 – див. табл.4.1) [83, 108].

При зростанні параметру E/N константи швидкості утворення позитивних іонів збільшуються: CCl_4^+ , CCl_3^+ – $k \approx 10^{-14} - 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, CCl^+ , CCl_2^+ – $k \approx 10^{-15} - 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$, Cl^+ – $k \approx 10^{-16} - 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$, C^+ , CCl_3^+ , Cl_2^+ – $k \approx 10^{-17} - 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4.23, б) (процеси 12-19).

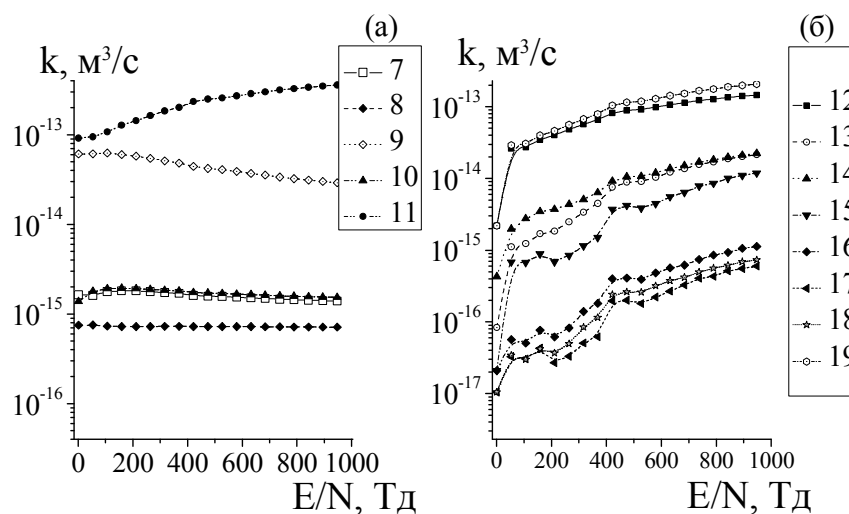


Рис. 4.23. Константи швидкості дисоціації (а), іонізації (б) при зіткненні електронів з молекулою CCl_4 [83].

Щодо констант швидкості утворення негативних іонів в електричному розряді в суміші Ar-CCl₄, то найбільшими є k утворення іона Cl⁻ – 10^{-11} м³/с, Cl₂⁻ – $k \approx 10^{-17}$ м³/с, а найменшими – константи швидкості утворення іону CCl₄⁻ – $k \approx 10^{-20}$ м³/с (рис. 4.24, процеси 20-22).

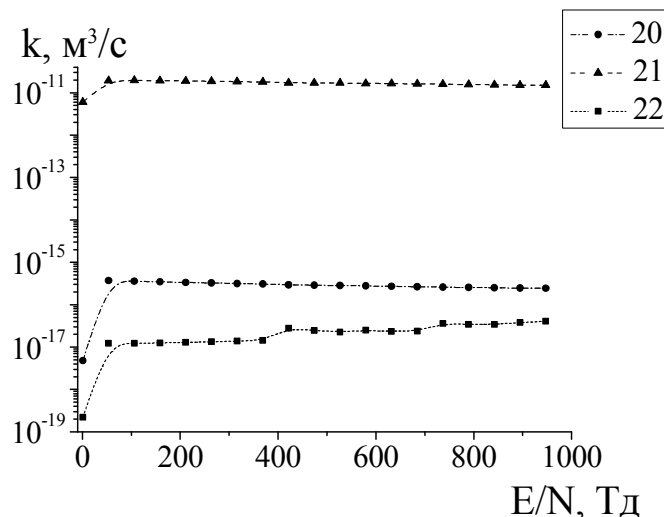


Рис. 4.24. Константи швидкості дисоціативного прилипання електронів до молекули CCl₄ [83].

Оскільки сума констант швидкостей утворення негативних іонів переважає суму констант швидкостей утворення позитивних іонів, то плазма для суміші Ar-CCl₄ є електронегативною (рис.4.25).

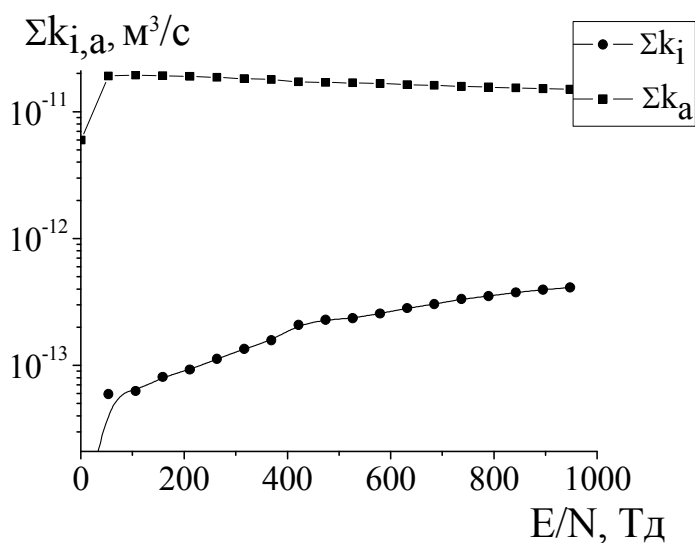


Рис.4.25. Сумарні константи швидкості іонізації Σk_i з утворенням позитивних іонів CCl₃⁺, CCl⁺, CCl₂⁺, Cl⁺, C⁺, CCl₃²⁺, Cl₂⁺, CCl₄⁺ і дисоціативного прилипання електронів Σk_a з утворенням негативних іонів CCl₄⁻, Cl⁻, Cl₂⁻ [83].

4.3.2. Розрахунки параметрів плазми газового розряду в суміші Ar-Kr-CCl₄

На рис. 4.26 представлені функції розподілу електронів за енергіями при різних E/N у бар'єрному розряді для суміші Ar-Kr-CCl₄=0.495-0.495-0.01%.

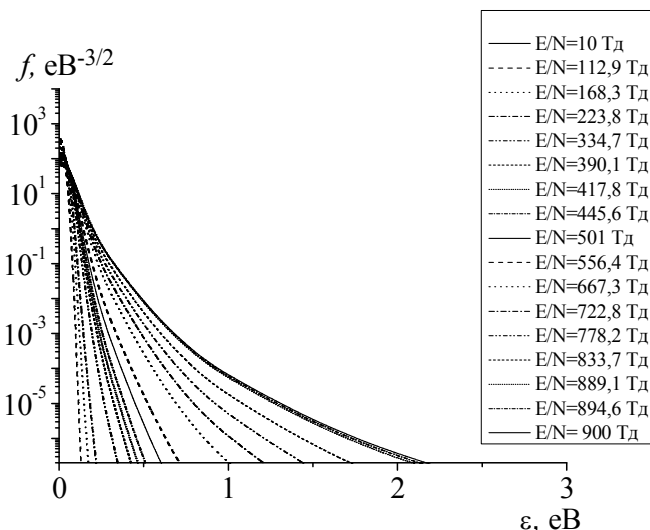


Рис. 4.26. Функція розподілу електронів за енергією у бар'єрному розряді в суміші Ar-Kr-CCl₄=0.495-0.495-0.01% [83, 112].

Середня енергія електронів розряду в суміші Ar-Kr-CCl₄ сильно залежить від параметру $E/N = 1 - 90$ Тд і лінійно збільшується від 1 до 5 еВ. В діапазоні значень параметру $E/N = 100 - 1000$ Тд величина ϵ збільшується з меншою швидкістю від 6 до 12 еВ (рис. 4.27, а, І).

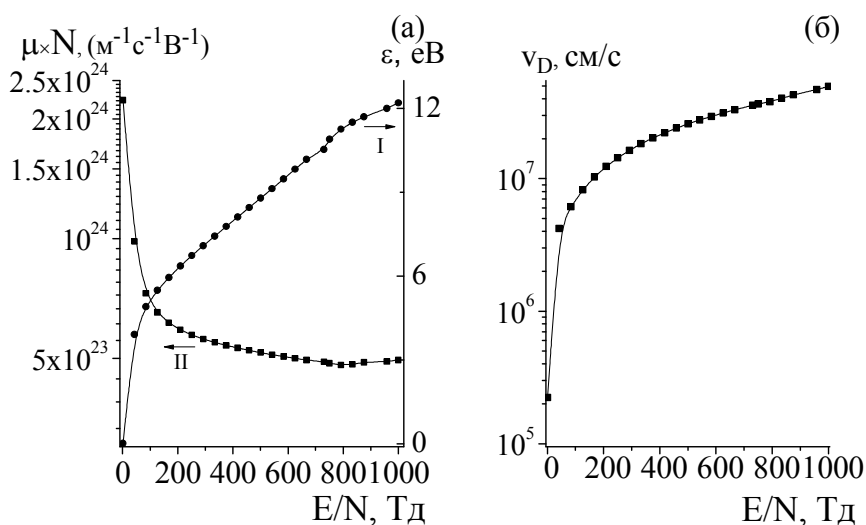


Рис. 4.27. Приведена рухливість (ІІ), середня енергія (І) (а) та швидкість дрейфу електронів (б) у бар'єрному розряді в суміші Ar-Kr-CCl₄ [83, 111].

Залежність приведеної рухливості від величини параметру E/N (рис.4.27(II)) показала, що збільшення E/N приводить до зменшення $\mu \times N$ в діапазоні $2.26 \times 10^{24} - 4.96 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$ (рис. 4.27, а, II). Зростання параметру E/N приводить до зростання швидкості дрейфу електронів v_D в діапазоні $2.23 \cdot 10^5 - 4.95 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ (рис. 4.27, б). Швидкість дрейфу електронів у розряді в суміші Ar-Kr-Xe-Cl₂ збільшується по закону близькому до лінійного від 1 до $4 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ [178].

Розрахунки чисельного моделювання бар'єрного розряду в суміші Ar-Kr-CCl₄ показали, що найбільшими є константи швидкості утворення іона Cl⁻ – $k \approx 10^{12} \text{ м}^3/\text{с}$ (процес 28); на порядок меншими є: CCl₃⁺ (процес 19), CCl₄⁺ (процес 26) (рис. 4.29.–4.30.), Kr⁺ (процес 12), константи швидкості пружного розсіювання електронів на молекулі CCl₄ (процес 13) – $k \approx 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4.29).

Константи швидкості пружного розсіювання електронів на атомі Kr складають – $k \approx 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (процес 6), а константи швидкості розсіювання електронів на атомі аргону виявилися меншими на сім порядків – $k \approx 10^{-20} \text{ м}^3/\text{с}$ (процес 1) (рис. 4.29.).

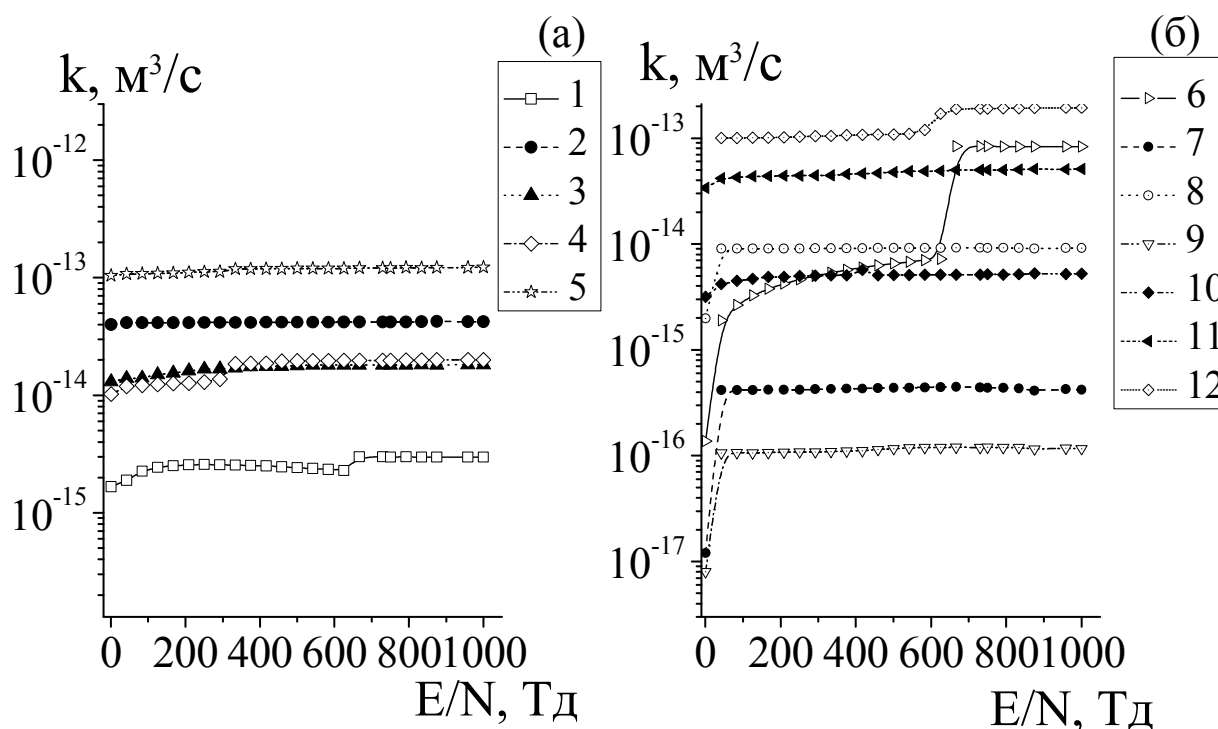


Рис. 4.28. Константи швидкості процесів дисоціації, іонізації, дисоціативного прилипання електронів до Ar (а) та процесів дисоціації, іонізації, дисоціативного прилипання електронів до Kr (б) [83].

З ростом параметра E/N в діапазоні 1 - 1000 Тд переважають k збудження атомів кріптоніу (процеси 7 - 11) (рис. 4.28.) та CCl_4 (процеси 14 - 18), які зростають в діапазоні 10^{-16} - 10^{-14} м³/с (рис. 4.29).

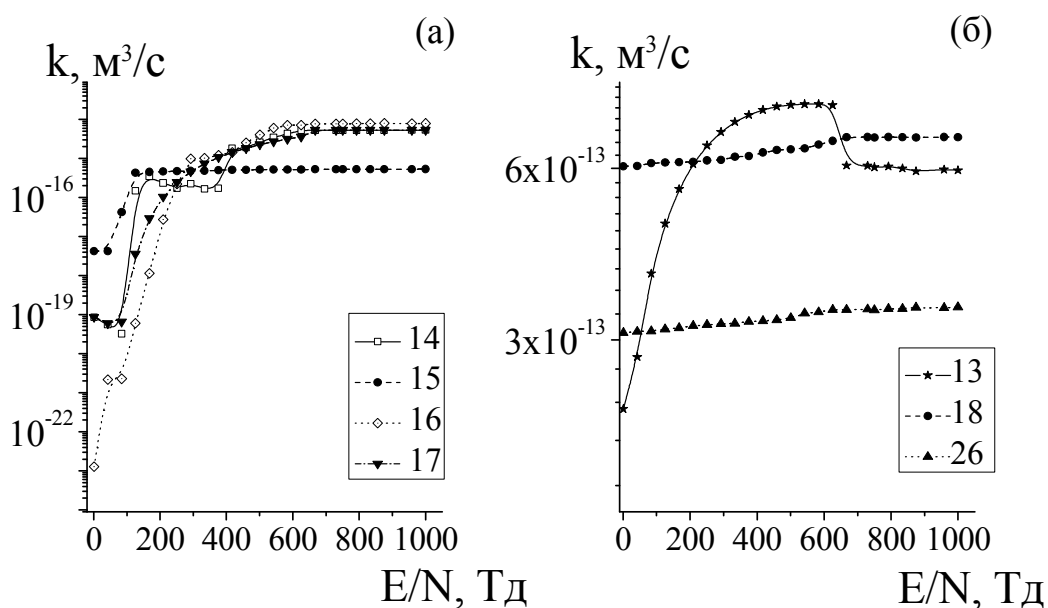


Рис. 4.29. Константи швидкості дисоціації, іонізації та процесу пружного розсіювання електронів на молекулі CCl_4 (а, б) [83].

А константи швидкості збудження атомів аргону (процеси 2 - 4) є меншими на один-два порядки – 10^{-18} - 10^{-17} м³/с.

Залежності констант швидкості процесу іонізації від E/N показали, що більшими є k утворення позитивних іонів CCl^+ , CCl_2^+ , Cl^+ , C^+ (процеси 20 - 23) – 10^{-15} - 10^{-14} м³/с, а k утворення позитивних іонів Ar^+ (процес 5) складають 10^{-16} м³/с (рис. 4.30, а).

Константи швидкості утворення негативних іонів CCl_4^- , Cl_2^- (процеси 27, 29), внаслідок дисоціативного прилипання електронів до CCl_4 є найменшими – 10^{-19} м³/с, 10^{-24} - 10^{-23} м³/с (рис. 4.30, б).

Оскільки при $E/N < 80$ Тд сума констант швидкостей утворення позитивних іонів переважає суму констант швидкостей дисоціативного прилипання електронів, то плазма для суміші Ar-Kr-CCl_4 є електропозитивною і концентрація електронів буде зростати при збільшенні параметра E/N (рис. 4.31). При значеннях параметра $E/N > 80$ Тд сума констант швидкостей утворення негативних іонів переважає суму

констант швидкостей утворення позитивних іонів. При $E/N > 80$ Тд плазма є електронегативною і концентрація електронів внаслідок прилипання до молекул є низькою.

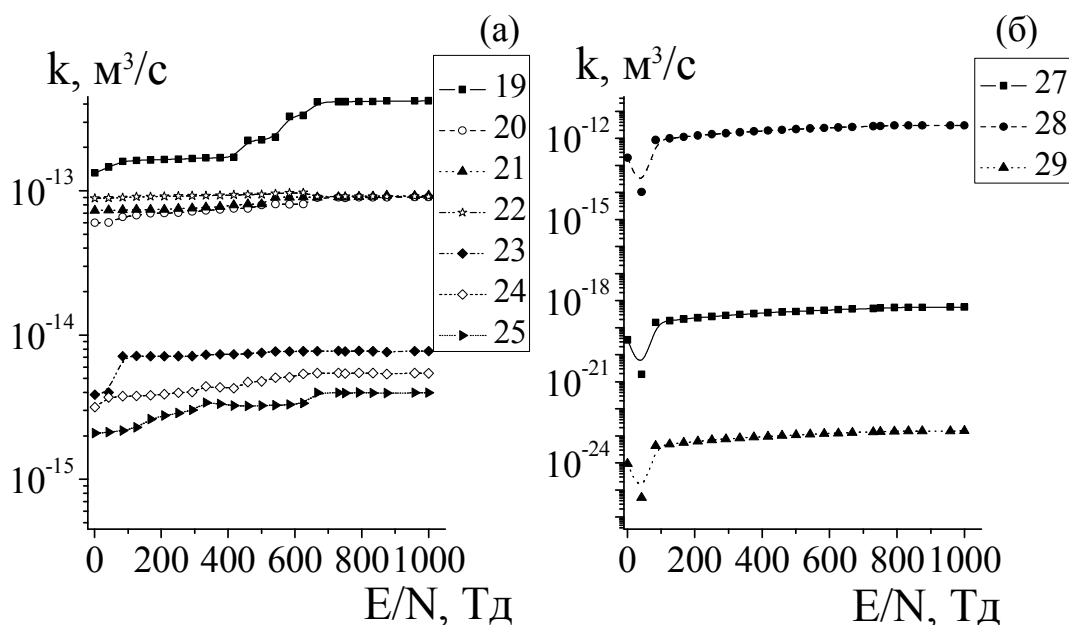


Рис. 4.30. Константи швидкості іонізації (а) та дисоціативного прилипання електронів до молекули CCl_4 (б) [83].

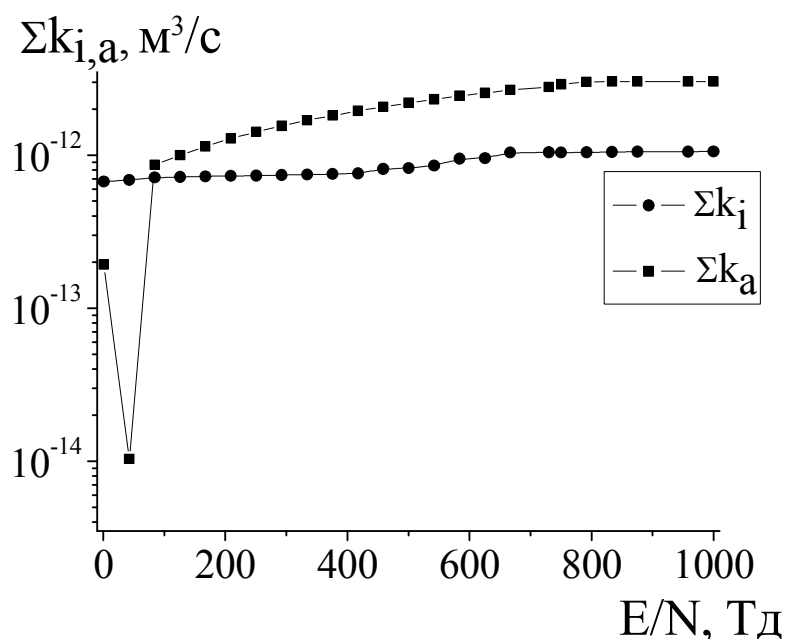


Рис. 4.31. Сумарні константи швидкості іонізації Σk_i з утворенням позитивних іонів CCl_3^+ , CCl^+ , CCl_2^+ , Cl^+ , C^+ , CCl_3^{2+} , Cl_2^+ , CCl_4^+ і дисоціативного прилипання електронів Σk_a з утворенням негативних іонів CCl_4^- , Cl^- , Cl_2^- [83].

Висновки до розділу 4

1. Вперше проведені дослідження емісійних характеристик наносекундного бар'єрного розряду в сумішах $\text{Ar} - \text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ показали, що основними в спектрах випромінювання плазми є смуги ArCl ($B \rightarrow X$) та Cl_2 ($D' - A'$), а при додаванні в ці робочі середовища парів води до них додається смуга з максимумом при $\lambda = 309$ нм OH ($A \rightarrow X$).

З результатів оптимізації інтенсивності випромінювання смуг ArCl ($B \rightarrow X$), Cl_2^* ($D' - A'$) і смуги $\lambda = 309$ нм OH ($A \rightarrow X$) від парціального тиску CCl_4 (при $p(\text{Ar}) = 24$ кПа) впливає, що для отримання максимальної інтенсивності даних смуг оптимальний парціальний тиск пари CCl_4 повинен складати 10 - 20 Па. Інтенсивність випромінювання смуги ArCl ($B \rightarrow X$) в 1.5 рази вища за інтенсивність випромінювання смуги OH ($A \rightarrow X$); оптимізація інтенсивності смуг ArCl ($B \rightarrow X$) і Cl_2 ($D' - A'$) в бар'єрному розряді в суміші $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ при збільшенні парціального тиску аргону від 10 до 55 кПа показала, що інтенсивність даних смуг зменшується: $\lambda = 258$ нм – приблизно в три рази, а $\lambda = 175$ нм на два порядки; оптимальний парціальний тиск аргону складає 5 – 10 кПа, а оптимальний тиск пари CCl_4 знаходиться в діапазоні 150 - 180 Па.

Найбільша середня потужність випромінювання досягається при роботі в частотному режимі при $f = 400 - 1000$ Гц, що може бути пов'язано з розпадом молекул CCl_4 в розряді при великій частоті повторення імпульсів накачування, а ресурс випромінювання смуг ArCl ($B \rightarrow X$) та Cl_2 ($D' - A'$) становить $n > (2.5 - 5) \cdot 10^5$ імпульсів; максимальна 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; 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 в плазму.

2. Вперше проведені результати оптимізації смуг випромінювання експлексних молекул і молекули хлору для плазми в суміші $\text{Kr} - \text{Ar} - \text{CCl}_4$ від величини парціального тиску важких інертних газів при фіксованому $p(\text{CCl}_4)$ показали, що при збільшенні парціального тиску аргону (при $p(\text{Kr}) = \text{const}$) в діапазоні 6.5 - 13.5 кПа відбувається зменшення інтенсивності випромінювання смуг

KrCl ($B \rightarrow X$; $D \rightarrow X$), ArCl ($B \rightarrow X$); така поведінка інтенсивностей пов'язана із зменшенням параметра E/N , яке приводить до зниження густини метастабільних атомів і позитивних іонів важких інертних газів, які впливають на утворення ексиплексних молекул в "гарпунних" реакціях і реакціях іон-іонної рекомбінації; при збільшенні парціального тиску криптону від 1.2 до 6.6 кПа (при $p(\text{Ar}) = \text{const}$) спостерігається зменшення інтенсивності смуги 175 нм ArCl ($B \rightarrow X$) із-за реакції заміщення атомів аргону атомами криптону при утворенні хлоридів аргону і криптону, а інтенсивність випромінювання смуги хлору, при цьому зменшується приблизно на порядок; максимальна інтенсивність смуг KrCl ($B \rightarrow X$; $D \rightarrow X$) спостерігається при оптимальному парціальному тиску криптону – 6 - 8 кПа.

Лінійний характер без ознак насичення інтенсивності випромінювання в діапазоні частот 40-1000 Гц може бути пов'язаний з внеском продуктів дисоціації молекул CCl_4 в утворення ексиплексних молекул і молекул Cl_2 (D'); оптимум середньої потужності випромінювання знаходиться при тиску криптону 6.6 кПа і тиску аргону - 1.3 кПа, а оптимізація залежності потужності випромінювання від тиску аргону показала, що потужність випромінювання потрібної суміші у два рази більша від потужності випромінювання розряду в суміші Ar - CCl_4 ; вперше запропонована спрощена кінетична модель процесів, які протікають в бар'єрному розряді наносекундної тривалості в суміші Ar- CCl_4 .

3. Чисельне моделювання кінетики процесів в наносекундному бар'єрному розряді в суміші Ar- CCl_4 , яке проведено вперше, показало добре узгодження з результатами експерименту; знайдені значення середньої енергії електронів в плазмі показали, що середня енергія електронів для суміші Ar- CCl_4 є більшою від енергії електронів для розряду в потрібній суміші Ar-Kr- CCl_4 ; розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів для сумішей Ar- CCl_4 та Ar-Kr- CCl_4 показали, що найбільшими є константи швидкості утворення негативного іона Cl^- , константи швидкості процесів пружного розсіювання електронів на атомі Ar, на молекулі CCl_4 , процесів утворення позитивних іонів Ar^+ , Kr^+ , CCl_4^+ , CCl_3^+ ; найменшими – константи швидкості утворення негативного іону Cl_2^- ; оскільки сума констант швидкості утворення негативних іонів переважає суму констант швидкості

утворення позитивних іонів, то плазма в розряді в суміші Ar-CCl₄ є електронегативною; при значеннях параметру $E/N < 80$ Тд плазма розряду на суміші Ar-Kr-CCl₄ є електропозитивною, а при $E/N > 80$ Тд – електронегативною.

ВИСНОВКИ

1. Вперше встановлено, що ємнісний розряд у сумішах He-H₂O(D₂O) характеризується наявністю УФ-ВУФ смуг випромінювання; оптимальний тиск пари звичайної води становить 130-150 Па, оптимальні тиски гелію складали 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 $A \rightarrow X$, $C \rightarrow X$ 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 $p(\text{Ar})=10\text{-}20$ кПа; $p(\text{D}_2\text{O}) = 150 - 250$ Па. На основі проведених досліджень може бути розроблена УФ-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,

$p(\text{Ar}) - 6 \text{ кПа}$. Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання експлексних 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-CCl_4 показали добре узгодження з експериментом. Середня енергія електронів для розряду в суміші Ar-CCl_4 є більшою ніж для розряду в потрійній суміші Ar-Kr-CCl_4 . Розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів показали, що оскільки сума констант швидкостей утворення негативних іонів переважає суму констант швидкостей утворення позитивних іонів, то плазма в розряді в суміші Ar-CCl_4 є електронегативною. При значеннях параметра $E/N < 80 \text{ Тд}$ плазма на суміші Ar-Kr-CCl_4 є електропозитивною, а при $E/N > 80 \text{ Тд}$ – електронегативною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шуаїбов О.К. Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка та застосування / О.К. Шуаїбов, 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. Шуаибов А.К. УФ-ВУФ эксимерный излучатель с накачкой поднормальным тлеющим разрядом / А.К. Шуаибов, А.И. Дашенко, И.В. Шевера // Квантовая электроника. – 2001. – Т.31, № 4. – С.371–372.
5. Соснин Э.А. Эксилампы- перспективный инструмент фотоники / Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. //Фотоника. – 2015. –Т.49,№1. – С.60–69.
6. Oppenländer T. Mercury-free Vacuum-(VUV) and UV Excilamps: Lamps of the Future? / T. Oppenländer, E. Sosnin // IUVA news. – 2005. - Vol. 7, No. 4. – PP.16-20.
7. Автаева С.В. Барьерный разряд. Исследование и применение / С.В. Автаева – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009. –152 с.
8. 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).
9. Шуаїбов О.К. Випромінювальні характеристики та електронні кінетичні коефіцієнти плазми на основі пари води / О. К. Шуаїбов, О. М. Малінін // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2010. – № 27. – С.50 – 58.
10. Шуаибов А.К. Эмиссионные характеристики газоразрядного ультрафиолетового излучателя низкого давления на парах воды / А.К. Шуаибов, А.А. Генерал, В.А. Кельман, И.В. Шевера // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, Вып. 14. – Р. 6 – 11.

11. Шуаибов А.К. Электроразрядный ВУФ-излучатель на парах воды / А.К. Шуаибов, Л.Л. Шимон, А.И. Дашенко, И.В. Шевера // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, Вып. 15. – С. 46 – 50.
12. Шуаибов А.К. Стационарный излучатель в диапазоне 130- 190 нм на основе плазмы паров воды / А.К. Шуаибов, А.И.Дашенко, И.В.Шевера // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, №6. – С.547–548.
13. Шуаибов О.К. Хемілюмінесцентне випромінювання стаціонарної електророзрядної плазми низького тиску на суміші парів води з гелієм / О.К. Шуаибов // Укр. фіз. журн. – 2001. – Т. 46, № 10. – С.1047 – 1050.
14. Шуаибов А.К. Исследование излучения плазмы тлеющего разряда постоянного тока на смеси He/H₂O / А.К. Шуаибов, А.И. Дашенко, И.В. Шевера // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, №11. – С.139–142.
15. Шуаибов А.К. О влиянии паров воды на характеристики импульсно-периодического УФ-излучателя / А.К. Шуаибов, А.Й. Дашенко, И.В. Шевера // Письма в ЖТФ. – 2001 – Т. 27, №23. – С.90–94.
16. Naidis G.V. Modelling of OH production in cold atmospheric-pressure He–H₂O plasma jets / G.V. Naidis // Plasma Sources Science Technology. – 2013. – V. 22, №3. – P. 035015 (6 pp.).
17. Aquilanti V. Glory-scattering measurement of water-noble-gas interactions : The birth of the hydrogen bond / V. Aquilanti, E. Cornicchi, M.M. Teixidor [et al.] // Angewandte Chemie International Edition. – 2005. – V.44, №16.– P. 2357 –2360.
18. Cappelletti D. Molecular-beam study of the water-helium system: Features of the isotropic component of the intermolecular interaction and a critical test for the available potential-energy surfaces / D. Cappelletti, V. Aquilanti, E. Cornicchi [et al.] // The journal of chemical physics – 2005. – V.123, №2. – P. 024302 (7 pp.).
19. Liu D.X. Global model of low-temperature atmospheric-pressure He + H₂O plasmas / D.X. Liu, P. Bruggeman, F. Iza [et al.] // Plasma Sources Sci. Technol. – 2010. – V. 19, №2. – P. 025018 (22 pp.).
20. Bruggeman P. Mass spectrometry study of positive and negative ions in a capacitively coupled atmospheric pressure RF excited glow discharge in He–water mixtures / P.

- Bruggeman, F. Iza, D. Lauwers [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – V.43, №1. – P. 012003 (6 pp.).
21. Bruggeman P. Electronic quenching of OH(A) by water in atmospheric pressure plasmas and its influence on the gas temperature determination by OH(A–X) emission / P. Bruggeman, F. Iza, P. Guns [et al.] // Plasma Sources Sci. Technol. – 2010.- V.19, №1. – P. 015016 (7 pp.).
 22. Verreycken T. Spectroscopic study of an atmospheric pressure dc glow discharge with a water electrode in atomic and molecular gases / T. Verreycken, D. C.Schram, C. Leys, P. Bruggeman // Plasma Sources Sci. Technol. – 2010. – V.19, №4. – P. 045004 (9 pp.).
 23. Вуль А.Я. Новый эффективный газоразрядный источник оптического излучения низкого давления на основе гидроксидов OH / А.Я. Вуль, С.В. Кидалов, В. М. Миленин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 1. – С. 10–16.
 24. Вуль А.Я. Исследование тлеющего разряда в смеси аргона с гидроксидом OH / А. Я. Вуль, С. В. Кидалов, В. М. Миленин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1999. –Т. 25, № 8. – С. 62–66.
 25. Миленин В.М. Влияние комплексов молекул воды на параметры тлеющего разряда в смеси аргона с гидроксидом OH / В.М. Миленин, НА. Тимофеев, А.Я. Вуль, СВ. Кидалов, М.А. Ходорковский // Письма в ЖТФ. – 2000. –Т. 26, № 18. – С. 63–67.
 26. Генерал А.А. Газоразрядная лампа на смеси паров воды и перекиси водорода / А.А. Генерал, В.А. Кельман // Науковий вісник УжНУ.Серія Фізика. – 2009. – № 25. – С.154 –157.
 27. Генерал А.А. Электровакуумная лампа на паре воды / А.А. Генерал, В.А. Кельман // Науковий вісник УжНУ.Серія Фізика. – 2006. – № 19. – С.194–196.
 28. Генерал А.А. Ультрафиолетовый излучатель импульсно-периодического действия на молекулах гидроксидов / А.А. Генерал. В.А. Кельман. Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпеник // Приборы и техника эксперимента. – 2010.–№ 4. – С.1–4.
 29. Авдеев С.М. Исследование спектральных, временных и энергетических характеристик газоразрядной плазмы на основе паров воды и водного аммиака /

- С.М. Авдеев, Э.А. Соснин, А.А. Смирнов, А.А. Генерал, В.А. Кельман, В.Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т.22, №8. – С. 818–822.
30. Генерал А.А. Источник ультрафиолетового излучения на парах воды / А.А. Генерал, С.В. Автаева // Журнал технической физики. – 2010. – Т.80, №5. – С.123–126.
 31. Генерал А.А. Эмиссионные характеристики барьерного разряда в смеси $\text{Ar-H}_2\text{O}$ / А.А. Генерал, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпеник, М.С. Кленовский // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т.114, №. 1. – С.28–32.
 32. Broida H.P. Rotational intensity distributions of OH and OD in an electrodeless discharge through water vapor / H.P. Broida, W.R. Kane // Physical review. – 1953. – V. 89, №5. – P 1053–1059.
 33. Sarani A. Atmospheric pressure plasma jet in Ar and $\text{Ar/H}_2\text{O}$ mixtures: Optical emission spectroscopy and temperature measurements / A. Sarani, A. Yu. Nikiforov, C. Leys // Physics of Plasmas. – 2010. – V. 17, №6. – P. 063504 (8 pp.).
 34. Sarani A. Atmospheric-Pressure Plasma Jet in $\text{He/H}_2\text{O}$ Mixture / A. Sarani, A. Yu. Nikiforov, C. Leys // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – V.39, №11. – P. 063504 (1-8).
 35. Nikiforov A.Yu. The influence of water vapor content on electrical and spectral properties of an atmospheric pressure plasma jet / A.Yu. Nikiforov, A. Sarani, C. Leys // Plasma Sources Sci. Technol. – 2011. – V. 20, №1 – P. 015014 (8 pp.).
 36. Artamonova E. Low pressure water vapour discharge as a light source: I. Spectroscopic characteristics and efficiency / E. Artamonova, T. Artamonova, A. Beliaeva [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V. 41, №15. – P. 155206 (8 pp.).
 37. Artamonova E. Low pressure water vapour discharge as a light source: II. Electrical characteristics / E. Artamonova, T. Artamonova, A. Beliaeva [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V. 42, №17. – P. 175204 (9 pp.).
 38. Srivastava N. Effects of water addition on OH radical generation and plasma properties in an atmospheric argon microwave plasma jet / N. Srivastava, Chuji Wang // J. Appl. Phys. – 2011. – V. 110, №5. – P. 053304 (9 pp.).

39. Wang C. Optical diagnostics of a low power—low gas flow rates atmospheric-pressure argon plasma created by a microwave plasma torch / C. Wang, N. Srivastava, S. Scherrer [et al.] // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2009. – V. 18, №2. – P. 025030 (11 pp.).
40. Annušová A. Spectroscopic study of an Ar-H₂O discharge excited by a RF helical cavity / A. Annušová, J. Krištof, P. Veis // 20th Annual Conference of Doctoral Students – WDS, Prague, Czech Republic. –29 May – 1 June, 2012. – P. 99–104.
41. Xiong Q. Absolute OH density determination by laser induced fluorescence spectroscopy in an atmospheric pressure RF plasma jet / Q. Xiong, A.Yu. Nikiforov, L. Li, P. Vanraes [et al.] // *Eur. Phys. J. D.* – 2012. – V.66, №1. – P. 281 (8 pp.).
42. Татаренко П.А. Диагностика плазмы барьерного разряда во влажном аргоне методом кросс-корреляционной спектроскопии / П.А. Татаренко, К.В. Козлов. В.Г. Самойлович, МВ. Соколова // *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия.* – 2010. – Т.51, № 6. – С.422-426.
43. Соснин Э.А. Ультрафиолетовая лампа барьерного разряда на молекулах OH / Э. А. Соснин, М. В. Ерофеев, С. М. Авдеев [и др.] // *Квантовая электроника* – 2006. – Т. 36, № 10. – С.981–983.
44. Morozov A. Ultraviolet emission from argon water-vapor mixtures excited with lowenergy electron beams / A. Morozov, R. Krücken, T. Ottenthal, A. Ulrich, and J. Wieser // *Applied physics letters.* – 2005. – V.86, № 1. – P. 011502
45. Ayan H. Application of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge for biomedical treatment of topographically non-uniform surfaces / H. Ayan, D. Staack, G. Fridman [at al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2009. – V.42, № 12. – P.125202 (5 pp.).
46. Корнев Я.И. Использование эмиссионных спектров для исследования характеристик барьерного разряда в водо-воздушной среде / Я.И. Корнев, Н.А. Яворовский, Г.Ф. Иванов, Г.Г. Савельев, Т.В. Шаманская // *Известия Томского политехнического университета.* – 2003. – Т.306, № 5. – С.108 – 113.
47. Яворовский Н.А. Использование эмиссионных спектров для исследования характеристик барьерного разряда в водо-воздушной среде / Н.А. Яворовский,

- Я.И. Корнев, С.В. Прейс, С.С. Пельцман, М.Б. Хаскельберг, Б.Н. Чен // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309, № 2. – С.78–82.
48. Кривоносенко А.В. Излучательные характеристики импульсного разряда по струе воды в воздухе / Кривоносенко А. В., Кривоносенко Д.А., Прокопьев В.Е. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т.15, № 3. – С.268–273.
49. Бернацкий А.В. Измерение концентраций молекул воды в плазме с помощью комбинации спектральных и зондовых методов / А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, О.Н. Афонин, А.Б. Антипенков // Физика плазмы. – 2015. – Т.41, № 9. – С.767–777.
50. Бернацкий А.В. Исследование тлеющего разряда в инертных газах с парами воды / А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, Кочетов И.В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2017. – Т.44, № 5. – С.39–43.
51. Ломаев М.И. Эксиламп — эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения / М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, №2. – Р. 201–217.
52. Kogelschatz U. Silent discharges for the generation of ultraviolet and vacuum ultraviolet excimer radiation / U. Kogelschatz // Pure & App. Chem. – 1990. – V. 62, №9. – P. 1667–1674.
53. Gellert B. Generation of excimer emission in dielectric barrier discharges / B. Gellert, U. Kogelschatz // Applied Physics B. – 1991. – V. 52, №1. – P. 14–21.
54. Kogelschatz U. Ultraviolet excimer radiation from nonequilibrium gas discharges and its application in photophysics, photochemistry and photobiology / U. Kogelschatz // J. Opt. Technol. – 2012. – V.79, №8. – P. 484–493.
55. Kogelschatz U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications / U. Kogelschatz // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2003. – V.23, №1. – P. 1– 46.
56. Eliasson B. UV excimer radiation from dielectric-barrier discharges / B. Eliasson, U. Kogelschatz // Applied Physics B. – 1988. – V. 46, №4. – P. 299–303.
57. Авдеев С.М. Оптические характеристики плазмы многополосных эксилламп барьерного разряда на молекулах KrCl^* , Cl_2^* , Br_2^* / С. М. Авдеев, Э.А. Соснин,

- А.А. Смирнов, В.Ф. Тарасенко // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. – 2010. – Т.37, № 4. – С.161–164.
58. Авдеев С.М. Излучение молекул Cl_2^* в барьерном разряде / С.М. Авдеев, М.В. Ерофеев, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко // Квантовая электроника. – 2008. – Т.38, № 8. – С.791–793.
59. Авдеев С.М. Оптические характеристики плазмы эксиламп барьерного разряда на димерах галогенов I_2^* , Cl_2^* , Br_2^* / С.М. Авдеев, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 103, № 4. – С.546–552.
60. Авдеев С.М. Планарные эксилампы барьерного разряда / С.М. Авдеев, М.В. Ерофеев, Э.Л. Соснин, В.Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т.21, № 8. – С.725–728.
61. Шуаибов А.К. Высокочастотный УФ—ВУФ излучатель на смеси аргона с молекулами хлора / А.К. Шуаибов, Л.Л. Шимон, И.В. Шевера, П.Н. Волович // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т.34, № 7. – С.33–37.
62. Шуаибов А.К. Оптические характеристики стационарной плазмы продольного разряда на смеси гелий/фреон-12 / А.К. Шуаибов, А.И. Дашенко, И.В. Шевера // ЖТФ. – 2002. – Т.72, № 4. – С.32–35.
63. Шуаибов А.К. Характеристики многоэлектродного коронного разряда в рабочих средах импульсно-периодических XeCl и KrCl лазеров / А.К. Шуаибов // ЖТФ. – 1998. – Т.68, № 5. – С.48–51.
64. Шуаибов А. К. Излучательные характеристики и параметры газоразрядной плазмы на смесях атомов тяжелых инертных газов с молекулами хлора / А.К. Шуаибов, А.Н. Малинин // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т.106, № 4. – С.568–573.
65. Шуаибов А.К. Условия одновременного образования хлоридов Ar , Kr и Xe в многоволновом излучателе с накачкой поперечным разрядом/ А.К. Шуаибов, А.И. Дашенко // Квантовая электроника. – 2000. – Т.30, № 3. – С.279–281.
66. Shuaibov A.K. Emission characteristics of an ultraviolet emitter based on mixtures of krypton with low-aggressive halogen carriers pumped by a barrier discharge / A.K.

Shuaibov, Z.T. Gomoki, A.I. Minya, I.V. Shevera // Optics and Spectroscopy. – 2013. – Vol.114, № 2. – С. 189–192.

67. Шуайбов А.К. Импульсно-периодический ультрафиолетовый излучатель с перестройкой длины волны в области главного максимума поглощения молекулы ДНК / А.К. Шуайбов, З.Т. Гомоки, А.И. Миня, И.В. Шевера // ЖТФ.– 2011.– Т. 81, Вып. 11. – С.152–153.
68. Пикулев А.Л. Исследование законов подобия газового разряда при возбуждении смеси Kr/CCl₄ барьерным разрядом / А.Л. Пикулев, В.М. Цветков // Журнал технической физики. – 2010. – Т.80, № 1. – С.45–53.
69. Хасенов М.У. Излучение смесей инертных газов с галогенидами при ионизирующей накачке / М.У. Хасенов // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2009. – № 2 (29). – С.70-74.
70. Barjasteh A. Numerical investigation of effect of driving voltage pulse on low pressure 90%Ar-10%Cl₂ dielectric barrier discharge / A. Barjasteh, E. Eslami // Plasma chemistry and plasma processing. –2018. – V. 38, №1. – P. 261–279.
71. Миня О.Й. Короткохвильовий випромінювач ємнісного розряду на парі води / О.Й. Миня, О. К. Шуайбов, І. В. Шевера, Р. В. Грицак, З. Т. Гомоки // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2010. – № 28. – С.135–139.
72. Shuaibov A.K. Optical characteristics of UV–VUV lamps on the electronic-vibrational transitions of the hydroxyl radical pumped by a nanosecond capacitive discharge // A.K. Shuaibov, R.V. Gritzak // High Volt. – 2017. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 78-81.
73. 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.
74. 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.
75. 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.

76. Шуайбов А.К. Вакуумно-ультрафіолетовый излучатель низкого давления на смеси гелия с парами воды / А.К. Шуайбов, А. Й. Миня, З. Т. Гомоки, И. В. Шевера, Р.В.Грицак // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37, № 3. – С.64–67.
77. Патент України №60127, МПК H01S 3/097(2006.01). Вакуумно-ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парі води / Шуайбов 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.
78. Патент України №100155 МПК H01J 61/16 (2006.01). Вакуумно-ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парах води / Шуайбов 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.
79. Шуайбов А.К. ВУФ-лампа на смесях инертных газов с молекулами воды с накачкой импульсно-периодическим емкостным разрядом / А.К. Шуайбов, А.Й. Миня, А. Н. Малинин, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т.78, №6.– С.932–936.
80. Шуайбов А.К. ВУФ-лампа емкостного разряда на смеси паров воды с аргоном / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера, Р.В. Грицак // Оптический журнал. – 2012. – Т.79, № 8. – С.96–99.
81. Грицак Р.В. ВУФ-лампа ємнісного розряду на сумішах He-H₂O і Ar-H₂O / Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуайбов// Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2011. – № 29. – С.227–232.
82. 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. Tsymbaliuk // Journal of Applied Physics. – 2014. – V.116. – P. 113303 (1-6).
83. Шуайбов О.К. Ультрафіолетові лампи на радикалах гідроксила та експлексних молекулах з накачуванням бар'єрним наносекундним розрядом: монографія. / Шуайбов О.К., Грицак Р.В. - Ужгород: Видавництво «Говерла», 2018 р. – 114 с. – ISBN 978-617-7333-63-9.

84. Шуайбов А.К. Импульсно-периодический ВУФ излучатель с накачкой барьерным разрядом в смеси гелия с парами тяжелой воды (D_2O) / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Квантовая электроника. – 2012. – В.42, №8. – С.747–749.
85. 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.
86. Шуайбов А.К. Оптические характеристики электроразрядного источника ультрафиолетового излучения на смеси аргона с парами «тяжелой» воды D_2O / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114, № 2. – С.42–45.
87. Грицак Р.В. Коротковолновая лампа с накачкой наносекундным барьерным разрядом на парах тяжелой воды (D_2O) / Р.В. Грицак, А.К. Шуайбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки // Материалы Международной молодежной конференции «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия», Томск, Россия. –17-18 сентября, 2012.– P.28-31.
88. Грицак Р.В. Емісійні характеристики наносекундного бар'єрного розряду в суміші аргону та гелію з парами важкої води (D_2O) / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомоки // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. – № 32. – С.73–76.
89. Грицак Р.В. Ультрафіолетова лампа на парі води з накачкою наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.І. 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.
90. Патент України №76500, МПК H01S 3/097 (2006.01). Ультрафіолетова імпульсно- періодична лампа бар'єрного розряду на суміші гелію з парами води / Шуайбов О.К., Грицак Р.В., Миня О.Й., Шевера І.В., Гомоки З.Т. // № u201206294; Заявл. 24.05.2012; Опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.–5 с.

91. 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.
92. 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.
93. Шуайбов А.К. Газоразрядный источник неканцерогенного УФ-излучения на смеси гелия с парами тяжелой воды (D₂O) / А.К. Шуайбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 3. – С.152–154.
94. Hrytsak R.V. Ultraviolet emitter barrier discharge on the molecule of heavy water (D₂O) / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, I.V. Shevera, Z.T. Homoki //The 10th International conference «Atomic and molecular pulsed lasers», Tomsk, Russia. – 12-16 September, 2011. – P.104.
95. Патент України №71686, МПК H01S 3/097 (2006.01). Ультрафіолетовий газорозрядний випромінювач на парі важкої води / Шуайбов О.К., Миня О.Й., Грицак Р.В., Гомоки З.Т. // № u201115335; Заявл. 26.12.2011; Опубл. 25.07.2012, Бюл. №14.– 3 с.
96. Hrytsak R. Emitee 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.
97. Грицак Р.В. Лампа бар'єрного розряду на сумішах інертних газів з парою важкої води / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомоки // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. – № 31. – С.146–150.
98. 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.

99. 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.
100. Грицак Р.В. Лампа на смузі 175 нм ArCl (В-Х) з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомоки // Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів (ІЕФ-2013). Ужгород, Україна, 20-23 травня, 2013. – С.295-296.
101. Hrytsak R.V. Two-band UV-VUF 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.
102. 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.
103. 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.
104. 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.
105. 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.
106. Hrytsak R.V. Emission and electrical characteristics of a barrier discharge in a Ar-CCl₄ 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.
107. Hrytsak R.V. The resource and energy characteristics of the multiwavelength UV-VUV lamp barrier discharge in a mixture of Ar - CCl₄ and Kr - Ar - CCl₄ / 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.
108. 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.
109. Hrytsak R.V. Optical characteristics of nanosecond barrier discharge in a Kr-Ar-CCl₄ mixture / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // Proceedings of the XIIIth International young scientists conference on applied physic, Kyiv, Ukraine. – 12-15 June, 2013. – P. 202–203.
110. 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.
111. 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.
112. Грицак Р.В. Числове моделювання електронних кінетичних коефіцієнтів для розряду в робочій суміші Ar-Kr-CCl₄ / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, Л.Л. Шимон // Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2015», Ужгород, Україна. – 18-22 травня, 2015. – С.96–97.
113. Шваб А. Измерение на высоком напряжении : Измерительные приборы и способы измерения / А. Шваб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.

114. Pears R.W.B. The Identification of Molecular Spectra / R. W. B. Pears, A. G. Gaydon.
– London: Chapman Hall LTD, 1963. – P.246–248; 265–267.
115. Boyd I.W. Development and application of UV excimer lamps from 354 - 126 nm /
I.W. Boyd, I.I. Liaw // Proc. SPIE 6261, High-Power Laser Ablation VI, Taos, New
Mexico, United States.– 7 June, 2006. – P.626104.
116. Шуайбов А.К. Эксимерный излучатель низкого давления для спектральной
области 170-310 нм./ А.К. Шуайбов, Л.Л. Шимон, А.Й. Дашенко, И.В. Шевера // *Приборы и техника эксперимента*. –2002. –№ 1. – С.104–106.
117. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.:
Наука, 1974. – 108 с.
118. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. – М.: Мир, 1985.–271 с.
119. Soloshenko I.O. Utilization of Ultraviolet Radiation of Cold Hollow Cathode Glow
Discharge Plasma for Water Disinfection / I.O. Soloshenko, V.Yu. Bazhenov, V.O.
Khomych, V.V. Tsiolko, N.G. Potapchenko, V.V. Goncharuk // *Ukrainian Journal of
Physics*.–2006. – V. 51, № 11–12. – P.1063–1070.
120. Tanino M. Sterilization using Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure /
M. Tanino, W. Xilu, K. Takashima, S. Katsura, A. Mizuno // *International Journal of
Plasma Environmental Science & Technology*.– 2007. – V.1, №1.– P.102–107.
121. Hayashi N. Sterilization of Medical Equipment Using Oxygen Radicals Produced by
Water Vapor RF Plasma / N. Hayashi, S.Tsutsui, T.Tomari, W. Guan // *IEEE
Transactions on Plasma Science*. – 2008. – V. 36, №. 4. – P.1302–1303.
122. Соснин Э.А. Применение эксиплексных источников УФ излучения в анализе /
Э.А. Соснин, В.Н. Баталова, Э.А. Захарова // *Заводская лаборатория:
Диагностика материалов*. – 2005.– Т.71, № 8. – С.18–24.
123. Сапрыкина М.Н. Обеззараживающее действие. УФ – излучения по отношению
к микромицетам / М.Н. Сапрыкина, А.О. Самсони-Тодоров, В.В. Гончарук // *Химия и технология воды*. – 2009.– Т.31, №5. – С.575–582.
124. Базалеев Н.И. Электрофизические технологии: новая концепция
обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением / Н.И. Базалеев, В.Ф.

Клепиков, В.В. Литвиненко, С.Н. Шаляпін // Наука та інновації. – 2005.– Т.1, №1. – С. 99–109.

125. Connolly J. Characterization and antimicrobial efficacy against E. coli of a helium/air plasma at atmospheric pressure created in a plastic package / J. Connolly, V.P. Valdramidis, E. Byrne, K.A. Karatzas, P.J. Cullen, K.M. Keener, J.P. Mosnier // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – V.46, № 3. – P.1 – 12.
126. Воронкін О.С. Фізико-хімічні перетворення при енергетичних взаємодіях з водою в перспективних технологіях її очищення та знезаражування / О.С. Воронкін, О.Д. Єгізарян // Вісник державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського: Природничі науки. – 2008. – В.5, Ч.1. – С. 27–31.
127. Mizeraczyk J. Atmospheric pressure low-power microwave microplasma source for deactivation of microorganisms / J. Mizeraczyk, M. Dors, M. Jasiński, B. Hrycak, D. Czyłkowski // European Physical Journal Applied Physics. – 2013. – V.61, №2. – P.1 – 7.
128. Hirschberg J. Influence of excitation pulse duration of dielectric barrier discharges on biomedical applications / J. Hirschberg, T. Omairi, N. Mertens, A. Helmke, S. Emmert W. Viöl // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – V.46, №16. – P.1 – 8.
129. Bruggeman P. Measurement of the gas temperature in plasmas in and in contact with liquids / P. Bruggeman, T. Verreycken, D.C. Schram [et al.] // 19th International symposium on Plasma Chemistry, Bochum, Germany. – 26-31 Juli, 2009. – P.4.
130. Dutuit O. Photodissociation processes of water vapor below and above the ionization potential / O. Dutuit, A. Tabche-Fouhaile, I. Nenner, H. Frohlich [et al.] // J. Chem. Phys. – 1985. – V. 83, №2. – P. 584 – 596.
131. Yousfi M. Boltzmann equation analysis of electron-molecule collisions cross sections in water vapor and ammonia / M. Yousfi, M. D. Benabdessadok // J. Appl. Phys. – 1996. – V. 80, №12. – P. 6619–6630.
132. Becker K. Crossed-beam investigations of the $\text{OH}(\text{A}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Pi_1)$ emission spectrum after dissociative excitation of water by electron impact / K. Becker, B. Stumpf, G. Schulz // Chem. Phys. Lett. – 1980. – V. 73, №1. – P. 102 – 105.

133. Harb T. Production of ground state OH following electron impact on H₂O / T. Harb, W. Kedzierski, J. W. McConkey // J. Chem. Phys.– 2001. – V. 115, №12. – P. 5507 – 5512.
134. Tochikubo F. Study on Decay Characteristics of OH Radical Density in Pulsed Discharge in Ar/H₂O / F. Tochikubo, S. Uchida, T. Watanabe // Japanese Journal of Applied Physics. – 2004. – V. 43, № 1. – P. 315–320.
135. Shao Z. Effect of Water Vapor Addition on the Microwave-Excited Ar Plasma-Induced Poly(ethylene glycol) Polymerization and Immobilization of L-Cysteine / Z. Shao, A. Ogino, M. Nagatsu // Applied Physics Express.– 2012. – V.5. – P. 046201 (8 pp.).
136. Kregar Z. Space and time resolved optical emission spectroscopy characterization of inductively coupled RF water vapour plasma / Z. Kregar, N. Krstulović, N. Glavan Vukelić [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys.– 2012. – V.42, №14 – P. 145201 (8 pp.).
137. Dolan T.J. Electron and ion collisions with water vapour / T.J. Dolan // J. Phys. D: Appl. Phys.– 1993. – V.26, №1. – P. 4 – 8.
138. Dodet B. Hydrogen Peroxide Formation by Discharges in Argon/Water Vapor Mixtures at Atmospheric Pressure / B.Dodet, E. Odic, A. Goldman, M. Goldman [et al.] // Journal of Advanced Oxidation Technologies. – 2005.– V. 8, №1. – P.91–97.
139. Nikiforov A. LIF spectroscopy of OH radicals in a micro-flow DC discharge in Ar and He with a liquid electrode / A. Nikiforov, L. Li, Q. Xiong, C. Leys [et al.] // The European Physical Journal Applied Physics. – 2011.– V. 56, №2. – P.201124009 (2 pp.).
140. Mueller D.R. Reaction of Metastable Ar*(³P₂) and Kr*(³P₂) Atoms with Water Vapor: Excitation Functions for Electronic Quenching Collisions / D. R. Mueller, John Krenos // J. Phys. Chem.– 2002.–V. 106. – P. 8142–8147.
141. Tabayashi K. Dissociative excitation of water by metastable rare gas atoms: Rg(³P_{0,2})+H₂O→Rg+OH(A²Σ⁺)+H (Rg=Ar,Kr) / K.Tabayashi, K. Shobatake // J. Chem. Phys.– 1988.–V. 88, №2. – P. 835–844.

142. Gaens W.V. Kinetic modelling for an atmospheric pressure argon plasma jet in humid air / W.V. Gaens, A. Bogaerts // J. Phys. D: Appl. Phys.– 2013.–V. 46. – P. 275201 (53 pp.).
143. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. - М.: Наука, 1987. – 592 с.
144. Кузнецова Л.А. Вероятности оптических переходов двухатомных молекул / Л.А. Кузнецова, Н.Е. Кузьменко, Ю.Я. Кузяков, Ю.А. Пластинин. – М.: Наука, 1980. – 319 с.
145. Хьюбер К.П. Константы двухатомных молекул. Ч.2 / К.П. Хьюбер, Г. Герцберг. – М.: Мир, 1984. – 368с.
146. Ломаев М.И. Одно- и двухбарьерные эксилампы ВУФ диапазона на димерах ксенона / М.И. Ломаев, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, № 2. – С.103–107.
147. Yang D.Z. A homogeneous dielectric barrier discharge plasma excited by a bipolar nanosecond pulse in nitrogen and air / De-Zheng Yang, Yang Yang, Shou-Zhe Li [et al.] // Plasma Sources Science and Technology.–2009. – V.21, № 3. – P.035004 (9 pp.).
148. Словецкий Д.И. Функция распределения электронов по энергиям и взаимодействие электронов с многоатомными фторсодержащими газами / Д.И. Словецкий, А.А. Дерюгин // Химия плазмы. Вып. 13. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С.240 – 277.
149. BOLSIG+ 2005 CPAT [электронный ресурс]: <http://www.codiciel.fr/plateforme/plasma/bolsig/bolsig.php>.
150. SIGLO database: <http://www.lxcat.laplace.univ-tlse.fr>.
151. Itikawa Y. Cross sections for electron collisions with water molecules / Y. Itikawa, N. Mason // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2005. –V. 34, №1. – P. 1–22.
152. Генерал А.А. Моделирование газового разряда в парах воды /Генерал А.А., Шпеник Ю.О.// Укр. фіз. журн. – 2013.– Т.58, №2.– С.116–121.
153. Ломаев М.И. Мощная эксилампа на димерах ксенона / М.И. Ломаев, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, Д. В. Шитц // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т.32, № 11. – С.68–73.

154. Василяк Л.М. Генерация вакуумного ультрафиолетового излучения (185 нм) амальгамной лампой низкого давления / Л.М. Василяк, А.Л. Дриго, Л.А. Дроздов, С.В. Костюченко [и др.] // Труды МФТИ. Прикладная физика. – 2010. – Т.2, № 3. – С.66–70.
155. Василяк Л.М. Влияние режимов работы газоразрядной амальгамной лампы низкого давления на интенсивность генерации вакуумного УФ-излучения с длиной волны 185 нм / Л. М. Василяк, Л. А. Дроздов, С. В. Костюченко, Д. В. Соколов [и др.] // Прикладная физика. – 2010. – № 6. – С.70–76.
156. Василяк Л.М. Применение импульсных электроразрядных ламп для бактерицидной обработки / Л.М. Василяк // Электронная обработка материалов. – 2009. – № 1. – С.30–40.
157. Gundel L.A. Rate constants for specific product channels from metastable $\text{Ar}(^3\text{P}_{2,0})$ reactions and spectrometer calibration in the vacuum ultraviolet / L.A. Gundel, D. W. Setser, M. A. A. Clyne [et al.] // J. Chem. Phys. – 1976. – V. 64, №11. – P.4390–4410.
158. Tsuji M. Dissociative excitation of CF_4 , CCl_4 , and chlorofluoromethanes by collisions with argon and helium active species / M. Tsuji, M. Furusawa, T. Mizuguchi, T. Muraoka, Y. Nishimura // J. Chem. Phys. – 1992. – V. 97, №1. – P. 245–255.
159. 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. – С.169–173.
160. Möler T. Time and Spectrally Resolved Fluorescence of Cl_2 and ArCl^* in Cl_2 Doped Ar Under State Selective Pulsed Photoexcitation with Synchrotron Radiation / T. Möler, B. Jordan, G. Zimmerer, D. Haaks [et al.] // Z.Phys.D-Atoms, Molecules and Clusters. – 1986. – V. 4. – P. 73–87.
161. Bassett N. L. Effect of Cl_2 additions to an argon glow discharge / N. L. Bassett, D. J. Economou // J. Appl. Phys. – 1994. – V. 75, №4. – P. 1931–1939.
162. Словецкий Д.И. Возбужденные атомы и молекулы в физико-химических процессах и диагностике неравновесной плазмы / Д.И. Словецкий // V Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, Иваново, Россия. – 3 – 8 сентября, 2008 г. – С.58–62.

163. Tsuji M. Formation of ArCl(B,C) , $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$, and Cl by the threebody ionic recombination reaction of $\text{Ar}+(^2\text{P}_{3/2})+\text{Cl}^-+\text{Ar}$ / M. Tsuji, M. Ide, T. Muraoka, Y. Nishimura // *J. Chem. Phys.* – 1994. – V.101, №1. – P.328–337.
164. Balamuta J. Product distributions in the reactions of excited noble gas atoms with halogen-containing compounds / J. Balamuta, M. F. Golde, A. M. Moyle // *J. Chem. Phys.* – 1985. – V. 82, №7. – P.3169–3178.
165. Tonkyn R.G. Destruction of carbon tetrachloride in a dielectric barrier/packed-bed corona reactor / R.G. Tonkyn, S.E. Barlow, T.M. Orlando // *J. Appl. Phys.* – 1996. – V. 80, №9. – P. 4877–4886.
166. Ulejczyk B. Decomposition of carbon tetrachloride in the reactor of dielectric barrier discharge with different power supplies / B. Ulejczyk, K. Krawczyk, M. Młotek, K. Schmidt-Szałowski [et al.] // *The European Physical Journal Applied Physics.* – 2013. – V. 61. – P. 24324.
167. Kim H.J. Decomposition of carbon tetrachloride in air plasma using glow discharge atomic emission spectrometry / H.J. Kim, C.H. Choa, H. Kimb, S.C. Lee // *Analyst.* – 1998. – V. 123. – P. 607 – 610.
168. Sommerer T. J. Monte Carlo-fluid model of chlorine atom production in Cl_2 , HCl and CCl_4 radio-frequency discharges for plasma etching / T. J. Sommerer, M. J. Kushner // *J. Vac. Sci. Technol B.* – 1992. – V. 10, №5. – P. 2179 – 2187.
169. Sadeghi N. Comparison of the $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$ and $\text{Ar}(^3\text{P}_0)$ reactions with chlorine and fluorine containing molecules: Propensity for ion–core conservation / N. Sadeghi, M. Cheaib, D. W. Setser // *J. Chem. Phys.* – 1989. – V. 90, №1. – P. 219–231.
170. Tsuji M. Formation of ArCl(B,C) , $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$, and Cl by the threebody ionic recombination reaction of $\text{Ar}+(^2\text{P}_{3/2})+\text{Cl}^-+\text{He}$ / M. Tsuji, M. Ide, T. Muraoka, Y. Nishimura // *J. Chem. Phys.* – 1993. – V.99, №3. – P.1710–1718.
171. Golde M.F. Chemiionization reactions of metastable $\text{Ar}(^3\text{P}_{0,2})$ atoms / M.F. Golde, Y.-S. Ho, H. Ogura // *J. Chem. Phys.* – 1982. – V. 76, №7. – P. 3535–3542.
172. Nee J.B. Pressure effects on the $\text{Cl}_2(\text{D}'\text{-A}')$ transition at 258 nm / J. B. Nee, S. Hubinger // *Chemical Physics.* – 1996. – V. 211. – P. 403–412.

173. Правилон А.М. Фотопроцессы в молекулярных газах / А.М. Правилон. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.
174. Sierra B. Electron-impact dissociative ionisation of the CCl_4 molecule / B. Sierra, R. Martinez, C. Redondo, F. Castano // International Journal of Mass Spectrometry. – 2005. – V.246, № 1-3. – P. 105–112.
175. Lindsay B.G. Electron-impact ionization of CCl_4 and CCl_2F_2 / B.G. Lindsay, K.F. McDonald, W.S. Yu, R.F. Stebbings, F.B. Yousif // The Journal of Chemical Physics. – 2004. – V. 121, № 3. – P. 1350–1356.
176. Braun M. High-resolution electron attachment to the molecules CCl_4 and SF_6 over extended energy ranges with the (EX)LPA method / M. Braun // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – V. 42, №12. – 125202 (20 pp).
177. Шуаибов А.К. Выходные характеристики и параметры плазмы газоразрядного ультрафиолетового излучателя низкого давления, работающего на смесях гелий-иод и ксенон-иод / А.К. Шуаибов, И.А. Грабовая, З.Т. Гомоки, АТ. Калюжная, А.И. Щедрин // Журнал технической физики. – 2009. – Т.79, № 12. – С.97–102.
178. Шуаибов А.К. Эмиссионные характеристики и электронные кинетические коэффициенты плазмы поперечного объемного разряда в смеси тяжелых инертных газов с молекулами хлора / А.К. Шуаибов, В.И. Чигинь, Л.Л. Шимон, И.В. Шевера, П.П. Горун, Р.О. Обуховский // Журнал технической физики. – 2010. – Т.80, № 5. – С.87–93.

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.
2. Шуаїбов А.К. Ультрафиолетовые источники излучения на парах воды (H_2O , D_2O) / А.К. Шуаїбов, 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.
3. Миня О.Й. Короткохвильовий випромінювач ємнісного 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.
4. Шуаїбов А.К. Вакуумно-ультрафиолетовый 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.
5. 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.
6. Грицак Р.В. ВУФ-лампа ємнісного розряду на сумішах $He-H_2O$ і $Ar-H_2O$ / Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуаїбов// Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2011. – № 29. – С.227–232.
7. Шуаїбов А.К. ВУФ-лампа емкостного разряда на смеси паров воды с аргонном / А.К. Шуаїбов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера, Р.В. Грицак // Оптический журнал. – 2012. – Т.79, № 8. – С.96–99.
8. Грицак Р.В. Емісійні характеристики наносекундного бар'єрного розряду в суміші аргону та гелію з парами важкої води (D_2O) / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомокі // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. – № 32. – С.73–76.

9. Шуаибов А.К. Импульсно-периодический ВУФ излучатель с накачкой барьерным разрядом в смеси гелия с парами тяжелой воды (D_2O) / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Квантовая электроника. – 2012. – В.42, №8. – С.747–749.
10. Грицак Р.В. Лампа бар'єрного розряду на сумішах інертних газів з парою важкої води / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Міня, З.Т. Гомокі // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2012. с № 31. – С.146–150.
11. Шуаибов А.К. Оптические характеристики электроразрядного источника ультрафиолетового излучения на смеси аргона с парами «тяжелой» воды D_2O / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114, № 2. – С.42–45.
12. Levko D. Physical processes in barrier discharge lamp working in He/ D_2O mixture / D. Levko, A. Shuaibov, R. Gritzak, A. Minya, Z. Homoki // High Voltage Engineering. – 2013. – V.39, №9. – P.30505 – 30512.
13. Шуаибов А.К. Газоразрядный источник неканцерогенного УФ-излучения на смеси гелия с парами тяжелой воды (D_2O) / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 3. – С.152–154.
14. Шуаибов А.К. Эмиссионные характеристики барьерного разряда на смеси аргона с парами фреона и воды в УФ-ВУФ области / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, Р.В. Грицак // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т.114, № 5. – С.30–32.
15. 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. Tsymbaliuk // Journal of Applied Physics. – 2014. – V.116. – P. 113303 (1-6).
16. Грицак Р.В. Лампа на смугі 175 нм $ArCl$ (В-Х) з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Міня, З.Т. Гомокі, Т.І. Варга // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2014. – № 35. – С.113–117.
17. Шуаибов А.К. Коротковолновой излучатель на системе полос молекул хлорида аргона (175 nm) и хлора (258 nm) с накачкой наносекундным барьерным разрядом

- / А. К. Шуаибов, 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. Шуаибов А.К. Излучательные характеристики плазмы импульсно-периодического барьерного разряда в смеси криптона, аргона и паров «жидкого» фреона / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т.116, № 2. – С.230–233.
 20. Шуаибов А.К. Характеристики многоволновой УФ-ВУФ лампы на смеси аргона, криптона и паров фреона с накачкой наносекундным барьерным разрядом / А.К. Шуаибов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, З.Т. Гомоки // Квантовая электроника. – 2015. – В.45, №2. – С.185–188.
 21. Шуаибов А.К. Характеристики и параметры плазмы газоразрядной УФ–ВУФ лампы на системе полос молекул хлорида аргона и хлора / А.К. Шуаибов, 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 // A.K. Shuaibov, R.V. Gritzak // High Volt. – 2017. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 78-81.
 23. 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.
 24. 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.

25. 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. // № а201014168; Заявл. 29.11.2010; Опубл. 26.11.2012, Бюл. №22.–3 с.
26. 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.
27. 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.
28. Грицак Р.В. ВУФ-лампа ємнісного розряду на сумішах He-H₂O і Ar-H₂O / Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуаїбов // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011», Ужгород, Україна. – 24-27 травня, 2011. – С.183.
29. Hrytsak R.V. Ultraviolet emitter barrier discharge on the molecule of heavy water (D₂O) / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, I.V. Shevera, Z.T. Homoki //The 10th International conference «Atomic and molecular pulsed lasers», Tomsk, Russia. – 12-16 September, 2011. – P.104.
30. 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.
31. Hrytsak R. Emitter barrier discharge in mixtures of argon and helium wich 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.
32. Грицак Р.В. Коротковолновая лампа с накачкой нансекундным барьерным разрядом на парах тяжелой воды (D₂O) / 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.
33. Грицак Р.В. Ультрафіолетова лампа на парі води з накачкою наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, О.І. 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.
34. Hrytsak R.V. Two-band UV-VUF 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.
35. 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. 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.
36. Hrytsak R.V. Optical characteristics of nanosecond barrier discharge in a Kr-Ar-CCl₄ mixture / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // Proceedings of the XIIIth International young scientists conference on applied physic, Kyiv, Ukraine. – 12-15 June, 2013. – P. 202-203.
37. 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.
38. Hrytsak R.V. Emission and electrical characteristics of a barrier discharge in a Ar-CCl₄ 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.
39. Hrytsak R.V. The resource and energy characteristics of the multiwavelength UV-VUV lamp barrier discharge in a mixture of Ar - CCl₄ and Kr - Ar - CCl₄ / 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.
40. 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.
41. 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.
42. Грицак Р.В. Числове моделювання електронних кінетичних коефіцієнтів для розряду в робочій суміші Ar-Kr-CCl₄ / Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, Л.Л. Шимон // Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2015», Ужгород, Україна. – 18-22 травня, 2015. – С.96-97.
43. 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.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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. – Усна доповідь.
2. 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. – Усна доповідь.

3. Hrytsak R.V. Ultraviolet emitter barrier discharge on the molecule of heavy water (D_2O) / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, I.V. Shevera, Z.T. Homoki // The 10th International conference «Atomic and molecular pulsed lasers», Tomsk, Russia. – 12-16 September, 2011. – P.104. – Публікація тез.
4. 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. – Публікація тез.
5. 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. – Публікація тез.
6. 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. – Публікація тез.
7. Грицак Р.В. Ультрафіолетова лампа на парі води з накачкою наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.І. Миня, З.Т. Гомокі, 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. – Публікація тез.
8. Hrytsak R.V. Two-band UV-VUF 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. – Публікація тез.
9. Грицак Р.В. Лампа на смугі 175 нм $ArCl$ (В-Х) з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом / Р.В. Грицак, О.К. Шуаїбов, О.Й. Миня, З.Т. Гомокі // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів

«ІЕФ-2013», Ужгород, Україна. – 20-23 травня, 2013. – С.295-296. – Публікація тез. – Усна доповідь.

10. Hrytsak R.V. Optical characteristics of nanosecond barrier discharge in a Kr-Ar-CCl₄ mixture / R.V. Hrytsak, A.K. Shuaibov, A.I. Minya, Z.T. Homoki // Proceedings of the XIIIth International young scientists conference on applied physic, Kyiv, Ukraine. – 12-15 June, 2013. – P. 202-203. – Публікація тез.
11. 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. – Публікація тез.
12. Hrytsak R.V. Emission and electrical characteristics of a barrier discharge in a Ar-CCl₄ 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. – Публікація тез.
13. Hrytsak R.V. The resource and energy characteristics of the multiwavelength UV-VUV lamp barrier discharge in a mixture of Ar - CCl₄ and Kr - Ar - CCl₄ / 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. – Публікація тез.
14. 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. – Публікація тез.
15. 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. – Публікація тез.
16. Грицак Р.В. Числове моделювання електронних кінетичних коефіцієнтів для розряду в робочій суміші Ar-Kr-CCl₄/ Р.В. Грицак, О.К. Шуайбов, Л.Л. Шимон //

Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2015», Ужгород, Україна. – 18-22 травня, 2015. – С.96-97. – Публікація тез.

17. 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. – Публікація тез.