

ВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕЛЕКТРОННІ КІНЕТИЧНІ КОЕФІЦІЄНТИ ПЛАЗМИ НА ОСНОВІ ПАРИ ВОДИ

О.К. Шуайбов, О. М. Малінін

Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»
Україна 88000, Ужгород, вул. Підгірна 46
E-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua, mal@univ.uzhgorod.ua

Представлені результати дослідження випромінювання плазми позитивного стовпа поздовжнього тліючого розряду в парах води і сумішах He - H₂O при парціальних тисках $p(\text{H}_2\text{O}) = 50\text{-}200$ Па; $2.0\text{-}2.5$ кПа та $p(\text{He}) = 0,1 - 1,5$ кПа. Аналіз випромінювання в спектральній області 130-350 нм показав, що при низькому тиску парів води основними в спектрах випромінювання плазми були смуги гідроксилу OH (X-A) ($\Delta\lambda = 280\text{-}320$ нм) та OH (X-C) ($\Delta\lambda = 140 - 200$ нм). Проведена оптимізація інтенсивності смуг випромінювання гідроксилу OH в залежності від тиску пари води та парціального складу суміші He - H₂O, а також струму розряду. Виявлено оптимальні умови роботи випромінювача на смугах OH (X-A) і OH (X-C).

На підставі складеної нами бази ефективних перерізів взаємодії електронів низьких енергій з молекулами води, для розряду в парах води і суміші $p(\text{He}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 9\text{-}1$ виконано розрахунок функцій розподілу електронів за енергіями та електронних кінетичних коефіцієнтів у діапазоні параметра $E/N = 1 - 300$ Тд.

Проведено аналіз впливу гелію на параметри плазми позитивного стовпа при сильному розведенні пари води гелієм. Отримані результати становлять інтерес для оптимізації та моделювання газорозрядних джерел спонтанного УФ-ВУФ випромінювання на основі продуктів розпаду молекул води в плазмі малої щільності.

Ключові слова: тліючий розряд, УФ-лампа, пари води, функція розподілу електронів, електронні кінетичні коефіцієнти.

Вступ

Газорозрядна плазма на основі пари води є екологічно чистим і недорогим робочим середовищем для УФ-ВУФ джерел спонтанного випромінювання на системах електронно-коливних смуг гідроксилу OH (X-A; X-C) [1-3]. Найбільш прості і досить потужні ультрафіолетові лампи на сумішах інертних газів з парами води розроблені зі збудженням поздовжнім тліючим розрядом. Парціальний тиск гелію або аргону в таких випромінювачах перебуває в діапазоні $0,1 - 1,5$ кПа, пари води $50\text{-}150$ Па, а випромінюють вони переважно в спектральному діапазоні $304\text{-}320$ нм OH (X-A). УФ-випромінювання в цьому спектральному діапазоні (переважно при $\lambda = 308$ нм) застосовується в фотомедицині (дерматології) [4]), тому випромінювачі на гідроксилі OH (X-A) можуть замінювати лампи з більш агресивним і дорогим газовим середовищем

на молекулах XeCl(X-B) ($\Delta\lambda = 307\text{-}310$ нм), а також лазери на хлориді ксенону.

Менш вивченим є робочі середовища газорозрядних ВУФ випромінювачів на системі смуг OH(X-C) ($\Delta\lambda = 140\text{-}200$ нм). Частково таке випромінювання пропускає атмосфера ($\Delta\lambda = 180\text{-}200$ нм), що важливо для застосувань у фотохімії та фотобіології (бактерицидні лампи). Випромінювання традиційних водневих ламп у цьому спектральному діапазоні (континуум молекул водню або дейтерію) є малоінтенсивним, а в робочих середовищах лампи на смугах 193 нм ArF* і 175 нм ArCl* використовуються агресивні галогеноносії, що призводить до низького ресурсу випромінювача. Тому важливим є дослідження емісійних характеристик і параметрів плазми поздовжнього тліючого розряду в сумішах інертних газів з молекулами води. У зв'язку з тим, що в програмах розрахунків функцій розподілу

електронів за енергіями (ФРЕЕ) та електронних кінетичних коефіцієнтів (ЕКК) [5] відсутня база даних щодо ефективних перерізів взаємодії електронів з молекулами води, то систематичні розрахунки параметрів плазми розрядів у сумішах інертних газів з молекулами води не проводились. Це стримує чисельне моделювання газорозрядних джерел УФ-ВУФ випромінювання на основі гідроксиду ОН. Моделювання плазми тліючого розряду в парі води відіграє також важливу роль при оптимізації плазмохімічних реакторів водню для нетрадиційних джерел енергії (тліючий розряд із стінками, що випаровуються в повітрі з парами етанолу та води) [6, 7].

У даній роботі наводяться випромінювальні характеристики і параметри позитивного стовпа поздовжнього тліючого розряду в парах води і суміші He-H₂O.

Умови і техніка експерименту

Тліючий розряд запалювався в циліндричній кварцовій трубці з внутрішнім діаметром 0.7 см і відстанню між катодом та анодом 5 см. Електродами служили циліндри з нікелевої фольги, які встановлювалися в розрядну трубку з відкритими торцевими частинами. Розрядна трубка розміщувалася в буферній камері об'ємом 10 л, яка через вікно з CaF₂ була вакуумнощільно з'єднана з півметровим вакуумним спектрометром. Спектральна роздільна здатність вакуумного спектрометра становила 0.7 нм. Вимірювання з більш високою роздільною здатністю (до 0,2 нм) у спектральному діапазоні 250-350 нм проводилися з використанням монохроматора МДР-2. Випромінювання розряду детектували фотопомножувачі ФЕУ-142 та ФЕУ-106. Експериментальна установка та методика дослідження джерел спонтанного випромінювання зі збудженням поздовжнім тліючим розрядом більш детально описані в праці [8].

Тліючий розряд запалювався з використанням високовольтного випрямляча ($U < 10$ кВ; $I_{ch} < 50$ мА). Ненасичена пара дистильованої води ($p(H_2O) = 50-200$ Па)

напускалась в буферну камеру з вакуумної газозмішувальної системи, а насичена пара при температурі 18-20 °С одержувалась при випаровуванні води з резервуару, який встановлювався в нижній частині буферної камери. Тиск насиченої пари води визначався за допомогою таблиць [9], а ненасиченої - з використанням зразкового пружинного вакуумметра. Ототожнення молекулярних смуг проводилося за допомогою довідника [10]. За яскравість випромінювання електронно-коливної смуги приймалася площа під відповідною кривою на діаграмній стрічці, яка коректувалася на відносну спектральну чутливість спектрометра.

Випромінювальні характеристики

При тиску пари води в діапазоні 50-300 Па та в суміші $p(He) - p(H_2O) = (0.3-2) - (0.05-0.30)$ кПа тліючий розряд білого кольору порівняно однорідно заповнював внутрішню частину розрядної трубки. Розряд у чистій парі води низького тиску ($p(H_2O) < 50$ Па) був нестійким і спостерігався у вигляді страт з відстанню між світлими смужками 5-7 мм. При додаванні гелію ($p(He) > 300$ Па) розряд ставав стійким та однорідним. При низькому парціальному тиску пари води в суміші He - H₂O ($p(H_2O) = 150$ Па) та $p(He) = 1; 6$ кПа потенціал запалювання розряду складав відповідно 0.95 та 1.25 кВ. Нормальна стадія горіння тліючого розряду при цьому встановлювалась при струмах $I_{ch} > 30-40$ мА, а напруга горіння розряду становила відповідно 0.85 та 0.95 кВ. Піднормальна стадія тліючого розряду була найбільш яскраво вираженою при парціальному тиску гелію 6 кПа і струмах 2-25 мА. Потужність, що вносила в розряд, досягала 45 Вт.

Тліючий розряд у насиченій парі води при кімнатних температурах мав червоний колір, який визначався випромінюванням спектральної лінії атома водню з $\lambda = 656,3$ нм, а в суміші He-H₂O до неї додавалося і випромінювання інтенсивної спектральної лінії атома гелію при $\lambda = 667,8$ нм. Цей розряд представляв собою істотно неоднорідне за радіусом

розрядної трубки плазмоутворення з яскраво вираженою привіською областю діаметром 3-4 мм. Такий вигляд тліючого розряду характерний для всіх електронегативних газів.

При парціальному тиску пари води в діапазоні 50-300 Па в короткохвильовій частині спектру превалювало випромінювання смуг гідроксилу ОН з максимумами при 156, 180 та 186 нм (рис. 1.а). Збільшення парціального тиску

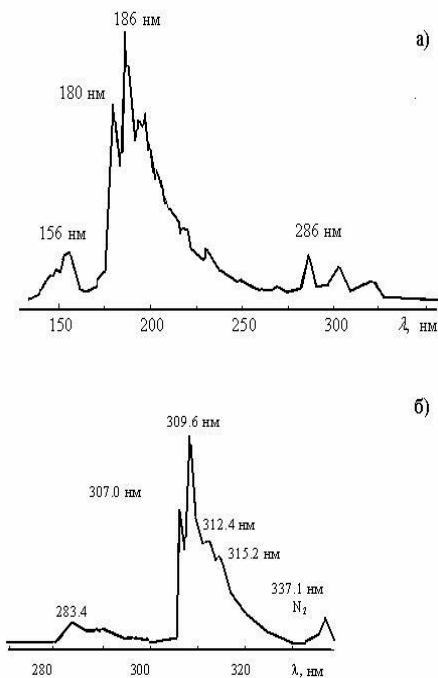
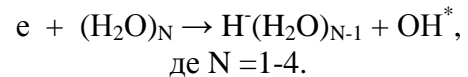


Рис. 1. Спектри випромінювання позитивного стовпа тліючого розряду в суміші р(He) – р(H₂O) = 2000-150 (а) та 2000-2500 Па (б) при струмі розряду 50 мА.

пари води до 2.0-2.5 кПа призводило до суттєвої трансформації спектру випромінювання в систему широких смуг з максимумами при 185, 262, 286 та 309 нм. На рис. 1.б наведена структура найбільш яскравої смуги випромінювання при цих умовах експерименту, що була отримана з підвищеною роздільною здатністю спектрометра на основі монохроматора МДР-2. Ототожнення смуг УФ – випромінювання розряду, наведених на рис. 1.а, показало, що вони найбільш відповідають системі смуг гідроксилу ОН (А-С) ($\lambda_{max} = 179.1$ нм), а смуга з максимумом при $\lambda = 157$ нм може належати системі ОН (Х-В).

Ототожнення складових смуги (рис. 1.б) показало, що вона включає перший вузький максимум при $\lambda = 307.0$ нм і ряд не повністю розділених максимумів 309.6 (головний); 312; 315.2 нм. Ці максимуми не ототожнюються із системою смуг ОН (Х-А) ні з іншими системами смуг гідроксилу ОН. Аналогічні широкі смуги випромінювання спостерігалися в працях [11, 12], де досліджувалися емісійні характеристики височастотного розряду в парі води. Вони в цих роботах пов'язувалися з випромінюванням малих кластерів, продуктів дисоціації води. Дійсно, при підвищеному тиску пари води значна частина молекул води існує у вигляді малих кластерів [13, 14], а утворення гідроксилу ОН за наявності кластерів води відбувається в процесі [15]:



При зіткненні декількох радикалів ОН, один з яких перебуває в збудженому стані, відбувається утворення кластерів вигляду (ОН)_N. Останні можуть розпадатися з випромінюванням широких смуг в УФ-ВУФ діапазонах спектру або швидко гідратуватися в кластери вигляду (ОН)_N(H₂O)_M ($N, M = 1-4$) [16]. При цьому має відбуватися зниження енергії верхнього енергетичного рівня випромінюючої частки й зсув відповідних смуг випромінювання в більш короткохвильову область довжин у порівнянні з випромінюванням смуг гідроксилу ОН. Це і спостерігається в наших експериментах. На жаль, емісія УФ-ВУФ випромінювання малих кластерів води чи кластерів на основі молекул води (або їхніх продуктів розпаду) та інертних газів в даний час практично не досліджені, тому більш точне ототожнення цих широких смуг випромінювання (рис. 1.б) не можливо.

Найбільш значний вплив на яскравість ультрафіолетового випромінювання продуктів розпаду молекул або кластерів води в тліючому розряді чинить тиск пари води. У таблиці 1 представлені яскравості випромінювання тліючого розряду в чистій парі води при різних

тисках. Вплив щільності парів води є найбільшим для смуг з $\lambda_{\text{MAX}}=156; 180/186$ нм. Як впливає з таблиці 1, при невеликій щільності пари води розряд випромінює переважно у ВУФ області спектру, що може бути використано для розробки простих ВУФ випромінювачів, особливо в спектральному інтервалі 180-190 нм, де випромінювання водневих ламп є малоефективним.

Для тліючого розряду в суміші Ne з парою води при $p(\text{H}_2\text{O}) = 2,0-2,5$ кПа залежності яскравості широких УФ-ВУФ смуг випромінювання при збільшенні парціального тиску гелію в діапазоні 0.5-8.0 кПа були слабо вираженими. Вплив же гелію на яскравість випромінювання смуг гідроксилу при невеликому парціальному тиску води $p(\text{H}_2\text{O}) = 100-150$ Па показано на рис. 2.

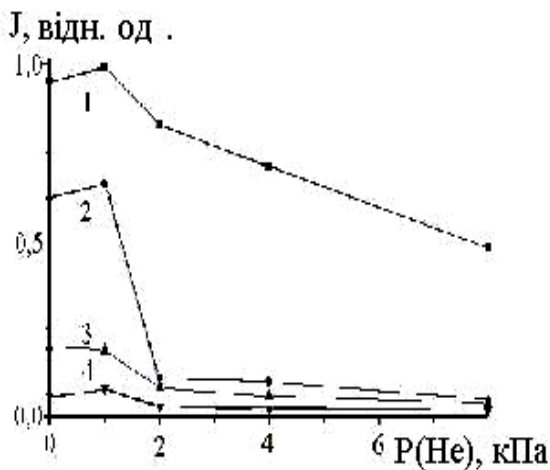


Рис. 2. Залежність яскравості випромінювання смуг гідроксилу ОН з $\lambda_{\text{MAX}} = 180 + 186$ (1), 156 (2), 313 (3) і 286 нм (4) від парціального тиску гелію в розряді на суміші Ne – H_2O при $p(\text{H}_2\text{O}) = 150$ Па і розрядному струмі 50 мА.

Для отримання максимальної яскравості цього випромінювання (на прикладі смуг із максимумами при 156; 180/186 нм) оптимальний тиск гелію має перебувати в межах 1.0 -1.5 кПа.

Яскравість смуг випромінювання гідроксилу ОН (Х-А; Х-С) при збільшенні розрядного струму з 4 до 50 мА збільшувалася на порядок. Такий характер цієї залежності підтверджує те, що в умовах цього експерименту основним механізмом утворення гідроксилу ОН (А, С, В) є дисоціативне збудження молекул H_2O електронним ударом, а ступінчасті процеси відіграють другорядну роль.

Оцінка середньої потужності випромінювання тліючого розряду в спектральному діапазоні 130-190 нм із усієї бічної поверхні кварцової трубки в оптимальній суміші $p(\text{He})-p(\text{H}_2\text{O}) = (1.0-1.5) - (0.1-0.15)$ кПа при струмі розряду 50 мА показує, що вона досягає 0,5-1,0 Вт.

Електронні кінетичні коефіцієнти

Проведене в праці [17] чисельне моделювання плазми позитивного стовпа тліючого розряду в азоті та кисні показало, що в його периферійній (пристінковій) області профілі констант коливних і електронних станів за радіусом розрядної трубки значно збільшуються від центральної області до периферії циліндричної розрядної трубки. Для плазми внутрішньої частини розряду, яка зазвичай і використовується в ексиплексно-галогенних лампах на сумішах інертних газів з електронегативними молекулами можливе використання локального наближення при розв'язанні

Таблиця 1

Яскравість випромінювання характерних смуг газорозрядної плазми на основі пари води при різних її тисках

λ , нм	156	180-186	286	306-315
J , відн.од. $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.1$ кПа)	610	920	54	90
J , відн.од. $p(\text{H}_2\text{O}) = 2.5$ кПа)	≤ 1	4	10	32

кінетичного рівняння Больцмана для ФРЕЕ, яке може проводитися з використанням програми [5]. При цьому ФРЕЕ залежить лише від кінетичної енергії (або швидкості електронів) і в даній точці простору залежить лише від локального значення приведенного електричного поля - E/N (де E - напруженість поздовжнього електричного поля в тліючому розряді, а N - концентрація частинок), ступені іонізації, щільності електронів і т.п. Просторовий розподіл констант швидкості електронних процесів та інших електронних кінетичних коефіцієнтів визначається профілем щільності електронів $N(R)$. Тліючий розряд у парі води і її сумішах з інертними газами якісно подібний до відповідних розрядів у сумішах інертних газів з галогеновмістними молекулами [8] і в чистому кисні [18], у яких в центральній частині трубки формується «іон-іонна» плазма, а в пристінковій зоні розряду "електрон-іонна" плазма з нелокальною ФРЕЕ. Тому розрахунки ЕКК у привісній зоні тліючого розряду на основі пари води можуть бути ФРЕЕ і параметри плазми розряду проведені з використанням програми для розрахунків локальної ФРЕЕ.

ФРЕЕ розраховувалися в чистій парі води та суміші $He-H_2O = 9-1$, яка за своїм складом близька до оптимальної для випромінювання гідроксилу OH (X-A; X-C; X-B). Параметри плазми: середня енергія та рухливості електронів, питомі втрати потужності розряду на електронні процеси та константи швидкості процесів розраховувалися з використанням програми [5]. Розрахунки параметрів розряду проводилися в умовах, близьких до умов експерименту - при ступені іонізації плазми $10^{-6} - 10^{-7}$ (коли ФРЕЕ є істотно нерівноважною) і щільності електронів у діапазоні $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$, тиску газу (1,0 - 1.5) кПа і величині параметра $E/N = 1-300$ Тд. У програмі [5] база даних щодо ефективних перерізів взаємодії електронів з молекулами води відсутня, тому ми в розрахунках використовували перерізи з

останніх праць з цієї тематики (табл. 2). Найбільш важливі із цих процесів - це: пружне розсіювання електронів, коливне збудження молекул води, дисоціація та дисоціативне збудження, іонізація та дисоціативна іонізація і дисоціативне прилипання електронів до молекул води.

Характерні ФРЕЕ для розряду в суміші $He-H_2O = 9-1$ при різних значеннях параметра E/N наведені на рис. 3.

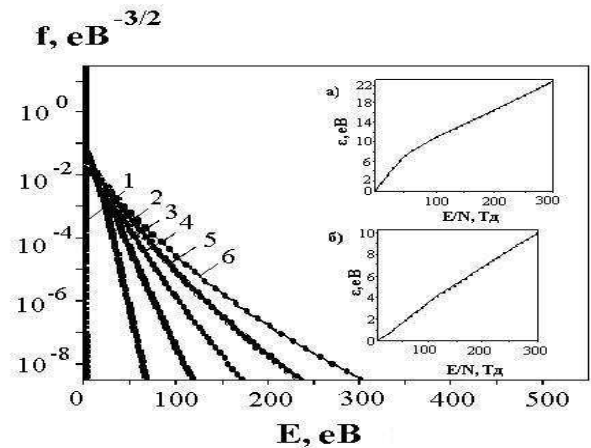


Рис. 3. Функції розподілу електронів за енергіями в розряді на суміші $He-H_2O = 9-1$ при $E/N = 1.0$ (1), 60.8 (2), 121 (3), 180 (4), 240 (5), 300 (6) Тд; на вставках: залежності середньої енергії електронів від параметру E/N в розряді на суміші $He-H_2O$ (а) та парах води (б).

Зі збільшенням параметра E/N спостерігається збільшення енергії швидких електронів і зменшення щільності електронів малих енергій.

Середня енергія електронів у розряді на парах чистої води при збільшенні E/N практично лінійно збільшується від 0.1 до 10 eV (рис. 3б). Розведення ж пари води гелієм призводить до зростання середньої енергії електронів приблизно в 2.2 рази (рис. 3а).

На рис. 4 наведені залежності питомих втрат потужності розряду в суміші $He - H_2O$ (а) та (б) і чистих парах води (в) від параметра E/N . У таблиці 2 наведені процеси відповідальні за взаємодію електронів з атомами гелію.

Процеси взаємодії електронів з молекулами води, що враховувались при рішенні рівняння Больцмана для ФРЕЕ.

	Процеси	Література
1	Пружне розсіювання електронів $e + H_2O \rightarrow e_0 + H_2O$; енергія електрона $e_0 E(e_0) < E(e)$.	[19]
2	$H_2O(000) + e \rightarrow H_2O(010) + e$.	[20]
3	$H_2O(000) + e \rightarrow H_2O(100) + e$.	
4	$H_2O(000) + e \rightarrow H_2O(001) + e$.	
5	$H_2O(000) + e \rightarrow H_2O(100+001) + e$.	
6	$H_2O + e \rightarrow OH(A) + e + H$.	
7	$H_2O + e \rightarrow H(2p^2P_0) + OH$.	
8	$H_2O + e \rightarrow O(3p) + H_2O$.	
9	$H_2O + e \rightarrow H_2O^+ + 2e$.	
10	$H_2O + e \rightarrow OH^+ + H + 2e$.	
11	$H_2O + e \rightarrow H^+ + OH + 2e$.	
12	$H_2O + e \rightarrow O^+ + H_2 + 2e$.	
13	$H_2O + e \rightarrow H_2^+ + O + 2e$.	
14	$H_2O + e \rightarrow OH^* + H$.	[22]
15	$H_2O + e \rightarrow H_2 + O^*$.	
16	$H_2O + e \rightarrow OH + H$.	
17	Пружне розсіяння на атомах гелію $He + e \rightarrow e_0 + He$;	[5]
18	$He + e \rightarrow He(2^3S) + e$.	
19	$He + e \rightarrow He(2^1S) + e$.	
20	$He + e \rightarrow He(2^3P) + e$.	
21	$He + e \rightarrow He(2^1P) + e$.	
22	$He + e \rightarrow He(3SPD) + e$.	
23	$He + e \rightarrow He(4SPD) + e$.	
24	$He + e \rightarrow He(5SPD) + e$.	
25	$He + e \rightarrow 2e + He^+$.	

Номери кривих на рис. 4 та 5 відповідають номерам процесів, наведеним у таблиці 2. Максимальними для цього випадку є втрати потужності розряду на іонізацію гелію (до 25% при $E/N > 200$ Тд). Для цього процесу характерним було

лінійне зростання втрат у діапазоні $E/N = 20-120$ Тд, а при великих E/N ця залежність приходила до насичення. Для розподілу втрат на збудження гелію характерною була плавна крива з широким максимумом при $E/N = 80-100$ Тд. Іншою

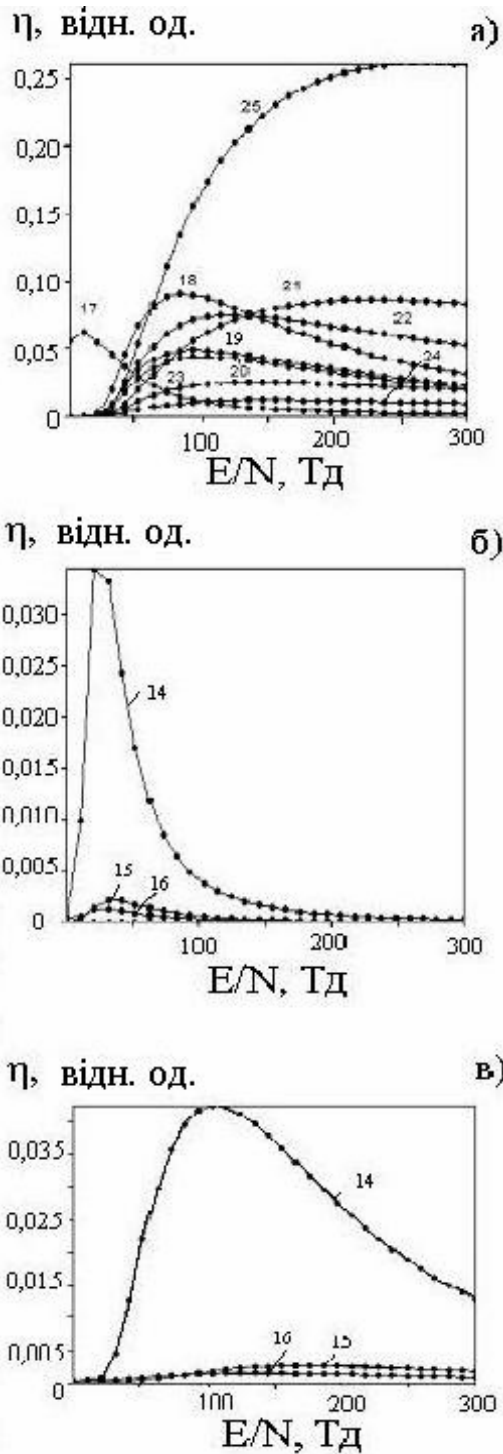


Рис. 4. а), б). Розподіл питомих втрат потужності розряду на процеси, пов'язані із взаємодією електронів з молекулами води в плазмі на суміші He-H₂O; в). питомі втрати потужності розряду на парі води.

була тільки залежність втрат від параметра E/N на утворення атомів He (¹P), максимум для якої був дуже широким та зміщеним до E/N = 200 Тд. Найбільшими були втрати потужності розряду на утворення метастабільних атомів гелію - He (²3S) з

максимумом при E/N = 80-100 Тд. Втрати на пружне розсіювання електронів на атомах гелію не перевищували 6% (при E/N = 5-10 Тд). Процес же утворення гідроксиду OH* і H⁻ (реакція 14 в табл. 2) у плазмі на суміші He-H₂O і чистій парі води був досить малоефективним (η = 3.5-4.0%). У розряді на парах води максимум утворення OH* в цьому процесі був широким і знаходився при E/N = 80-120 Тд, а для розряду на суміші He-H₂O максимум вузький і зміщений в область низьких E/N (20-30 Тд). Втрати потужності розряду на утворення негативних іонів (O⁻, OH⁻) у порівнянні із процесом 14 (табл. 2) були на порядок нижче. Найбільшими були втрати потужності розряду на процеси коливного збудження та пружного розсіювання електронів на молекулах води.

На рис. 5 наведені залежності констант швидкості процесів взаємодії електронів з молекулами води в розряді на суміші пари води з гелієм і в чистій парі води. Найбільшими були константи швидкості пружного розсіювання електронів на молекулах води. У діапазоні E/N = 1-20 Тд для обох середовищ константи швидкості пружного розсіювання електронів на молекулах H₂O різко збільшуються зі зростанням параметра E/N від (1-2)·10¹⁴ до 8·10¹⁴ м³/с. Ці відмінності обумовлені в основному будовою електронних станів атома гелію. Для непружних електронних процесів в діапазоні E/N = 1-100 Тд найбільшими були константи збудження нижніх коливних станів молекули H₂O та її іонізації. Для розряду на суміші He-H₂O характерною була залежність k_{кол}(E/N) із широким максимумом при E/N = 100 Тд. Константа швидкості утворення гідроксиду OH (А), розпад якого призводить до випромінювання смуги 306-320 нм, при E/N = 100 Тд в 1.5 рази вище для розряду на гелієвій суміші, ніж для розряду в чистій парі води. Константа же швидкості процесу 14 (див. Табл.2) є приблизно на порядок нижчою за константою процесу дисоціативного руйнування молекул H₂O з утворенням OH (А) (реакція 6; табл. 2).

Висновки

Таким чином, дослідження випромінювальних характеристик і параметрів плазми тліючого розряду в парі води та суміші He - H₂O показало, що при невеликому тиску пари води (<150-200 Па) основним у спектрах УФ випромінювання є смуги випромінювання гідроксилу OH (X-C; X-B). Найбільш оптимальною для роботи випромінювача на парі води є суміш p(He)-p(H₂O) = (100-150) - (1000-1500) Па. При збільшенні тиску пари води до насичених при кімнатній температурі (близько 2.0-2.5 кПа), в спектрі УФ-випромінювання плазми спостерігаються розширені і зміщені, щодо відповідних смуг гідроксилу OH, смуги низької яскравості. Механізм випромінювання цих смуг маловивчений і може бути пов'язаний з утворенням малих кластерів води або кластерів на сполученні інертних газів із молекулами води.

Розраховані параметри плазми розряду на суміші He-H₂O будуть надалі використовуватися при моделюванні вихідних характеристик УФ-ВУФ лампи, яка збуджується поздовжнім тліючим або емнісним розрядом.

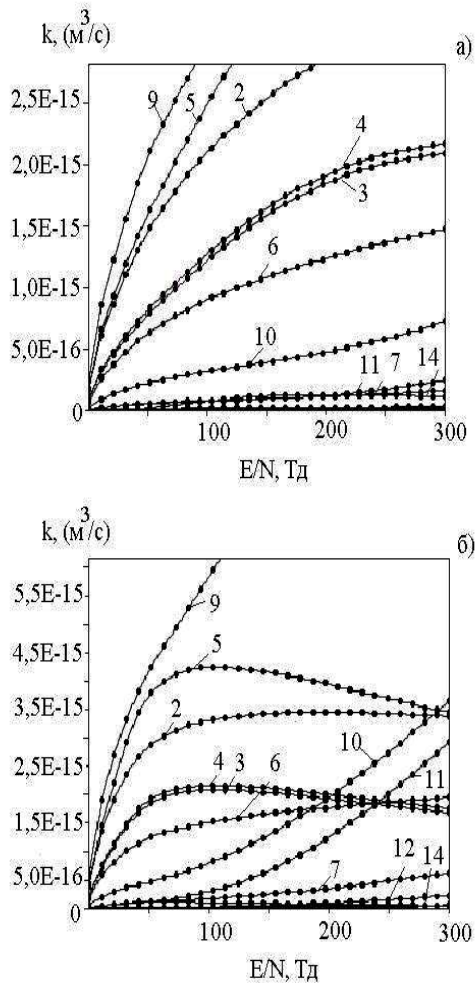


Рис. 5. Залежності констант швидкості електронних процесів в розряді на чистих парах води (а) та суміші He-H₂O (б) від параметра E/N.

Література

1. Вуль А.Я., Кидалов С.Й., Миленин В.М., Тимофеев Н.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т.25. Вып.1. С. 10-16.
2. Шуайбов А.К., Дашенко А.И., Миня А.И. // Физика Плазмы. 2002. Т.28. №.8. – С. 765-768.
3. Morozov F., Kruchen R., Ottenhall T., Ulrich A. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 011 502-1-011 502-3.
4. Шуайбов О.К., Шевера І.В., Шимон Л.Л., Соснин Е.А. Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка і застосування. Ужгород-Томськ, Видавництво УжНУ «Говерла», 2006. – 223 с.
5. <http://www.siglo-kinema.com/database/index.htm>.
6. Chernyk V. Ya., Olszewski S.V., Yuhymenko V.V., Solomenko E.V. and all // IEEE Trans. Plasma Shi (Special Issue on Plasma – Assisted Combustion). 2008. V.36. Issue 6. P. 2933-2939.
7. Shchedrin A.I., Levko D.S., Ryabsev A.V., Chernyk V. Ya. and all // Problems of Atomic Sciens and Technology. 2008. V.4. P.159-169.
8. Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Дашенко А.И., Шевера И.В. // ПТЭ. 2002. №.1. С. 104-106.
9. Краткий физико-технический справочник / Под ред. Яковлева К.П. – М.: Гос. Изд. физ.-мат. лит. 1962. Т.3.
10. Pears R.W.B., Gaydon A.G. // The Identification of Molecular Spektra. Chapman Hall LTD, L, 1963.

11. Soskida M. // 6 EPAS Conf. on Atom and Mol. Phys.: Contrib. Paper, Siena, Italy, 1998. P. 9-14.
12. Soskida M. // 6 EGAS: Abstracts, Vilnius. 2000. P. 314.
13. Zaviropulo A.N., Dolgin A.I., Khodorkovsky M.A. // Physica Scripta. 1994. V.50. P. 696-700.
14. Миленин В.М., Тимофеева Н.А., Вуль А.Я. и др. // Письма в ЖТФ. 2000, Т.26. Вып. 18. – С. 63-67.
15. Востриков А.А. Дубов Д.Ю. // ЖТФ. 1987. Т.57. Вып.4. – С. 760-770.
16. Стаханов И.П. // О физической природе шаровой молнии. М.: Атомиздат, 1985.
17. Богданов Е.А., Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д., Арсланбеков Р.Р. и др. // ЖТФ. 2003. Т.73. Вып.8. – С.45-55.
18. Богданов Е.А., Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д., Арсланбеков Р.Р. и др. // ЖТФ. 2003. Т.73. Вып.9. – С. 70-77.
19. Khakoo M.A., Silva H., Muse J., Lopes M.C.A., Winstead C. and McKoy // Phys.Rev.A. 2008.78.052710.
20. Khakoo Silva H., Muse J, Lopes M.C.A., Winstead C. and McKoy // Phys.Rev.A. 2009.79.052711.
21. Авакян С.В., Ильин Р.Н., Лавров В.М., Огурцов Г.Н. // Сечения процессов ионизации и возбуждения УФ излучения при столкновениях электронов, ионов и фотонов с атомами и молекулами атмосферных газов. Справочник. СПб., 2000. – 365 с.
22. Rawat Prashat, Prabhudesai Vaibhav S., Aravind G., Rahman M.A. and Krisshnakumar E. // J. Phys. B:At.Mol.Opt.Phys. 2007. – V.40. P. 4625.

RADIATIVE CHARACTERISTICS AND ELECTRONIC TRANSPORT COEFFICIENTS PLASMA-BASED WATER VAPOR

A.K. Shuaibov, A.N. Malinin

Uzhhorod National University, Ukraine, 88000 Uzhhorod, Pidgirna Str., 46
E-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua, mal@univ.uzhgorod.ua

The results of studies of the positive column plasma radiation of a longitudinal glow discharge in water vapor and mixtures He- H₂O with partial pressures $p(\text{H}_2\text{O}) = 50\text{-}200\text{ Pa}$; $2.0\text{-}2.5\text{ kPa}$ and $p(\text{He}) = 0,1\text{-}1,5\text{ kPa}$ are presented. Analysis of radiation in the spectral range 130-350 nm showed that at low water vapor pressure the main in the emission plasma spectra were bands of hydroxyl OH (X-A) ($\Delta\lambda = 280\text{-}320\text{ nm}$) and OH (A-C) ($\Delta\lambda = 140\text{-}200\text{ nm}$). The optimization of the hydroxyl emission bands OH intensity, depending on the water vapor pressure and partial composition of the He - H₂O mixture, as well as the discharge current is conducted. Optimum conditions of the radiator at the bands OH (X-A) and OH (A-C) are identified.

Based on the effective interaction cross sections database of low energy electrons with water molecules, for a discharge in water vapor and mixtures of $p(\text{Re}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 9.1$ compiled by us the electron energy distribution functions and electron kinetic coefficients in the range of the parameter $E/N = 1 - 300\text{ Tg}$ are calculated.

Analysis of helium influence on the positive column plasma parameters in a strong dilution of water vapor with helium is conducted. The results are of interest for the optimization and modeling of spontaneous UV-VUV radiation gas-discharge sources on the basis of the decay products of water molecules in the low density plasma.

Key words: glow discharge, UV-lamp, water vapour, electron energy distribution function, electron kinetic coefficients

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭЛЕКТРОННЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ КОЭФИЦИЕНТЫ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ПАРОВ ВОДЫ

А.К. Шуайбов, А. Н. Малинин

Государственный высшее учебное заведение «Ужгородский национальный университет»
Украина 88000, Ужгород, ул. Пидгирна, 46
E-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua, mal@univ.uzhgorod.ua

Представлены результаты исследования излучения плазмы положительного столба продольного тлеющего разряда в парах воды и смесях He - H₂O при парциальных давлениях $p(\text{H}_2\text{O}) = 50\text{-}200$ Па; $2.0\text{-}2.5$ кПа и $p(\text{He}) = 0,1 - 1,5$ кПа. Анализ излучения в спектральной области 130-350 нм показал, что при низком давлении паров воды основными в спектрах излучения плазмы были полосы гидроксила OH (X-A) ($\Delta\lambda = 280\text{-}320$ нм) и OH (X-C) ($\Delta\lambda = 140\text{-}200$ нм). Проведена оптимизация интенсивности полос излучения гидроксила OH в зависимости от давления паров воды и парциального состава смеси He - H₂O, а также тока разряда. Выявлены оптимальные условия работы излучателя на полосах OH (X-A) и OH (X-C).

На основании составленной нами базы эффективных сечений взаимодействия электронов низких энергий с молекулами воды, для разряда в парах воды и смеси $p(\text{He}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 9\text{-}1$ выполнен расчет функций распределения электронов по энергиям и электронных кинетических коэффициентов в диапазоне параметра $E/N = 1 - 300$ Тд.

Проведен анализ влияния гелия на параметры плазмы положительного столба при сильном разбавлении паров воды гелием. Полученные результаты представляют интерес для оптимизации и моделирования газоразрядных источников спонтанного УФ-ВУФ излучения на основе продуктов распада молекул воды в плазме малой плотности.

Ключевые слова: тлеющий разряд, УФ-лампа, пары воды, функция распределения электронов, электронные кинетические коэффициенты.