

УДК 621.373.826.038.823
 PACS 42.72.Bj, 52.80.-s, 52.80.Yr
 DOI 10.24144/2415-8038.2019.46.92-106

А.О. Малініна, Р.В. Грицак, І.І. Аксенюк

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна,
 e-mail: antonina.malinina@uzhnu.edu.ua

Оптичні характеристики та параметри газорозрядної плазми на сумішах парів дийодиду кадмію з гелієм і малої добавки азоту

Наведено результати дослідження спектральних, інтегральних і ресурсних характеристик випромінювання газорозрядної плазми атмосферного тиску на багатокомпонентних сумішах дийодиду кадмію з гелієм і малої добавки молекулярного азоту. Створення газорозрядної плазми і збудження компонент робочої суміші здійснювалося імпульсно-періодичним (частота проходження імпульсів 18–20 кГц, тривалість імпульсів 150 нс) бар'єрним розрядом. Виявлено випромінювання у видимій області спектру ексиплексних молекул моноїодиду кадмію, атомів кадмію. Встановлено закономірності в змінах оптичних характеристик плазми в залежності від частоти проходження імпульсів накачки, компонентного і кількісного складу сумішей. Представлено обговорення результатів досліджень. Дані досліджень представляють інтерес для створення ексиплексних газорозрядних джерел видимого випромінювання з максимумом випромінювання на довжині хвилі $\lambda=650$ нм.

Ключові слова: газорозрядні ексиплексні джерела випромінювання, галогеновмісні молекули, моноїодид кадмію, видимий спектральний діапазон, бар'єрний розряд.

Вступ

Плазма на основі сумішей парів дийодиду кадмію з інертними газами досліджується з метою створення високоефективного когерентного і спонтанного (з великою площею) джерела у видимій спектральній області випромінювання на електронно-коливальних переходах ексиплексних молекул моноїодиду кадмію. На енергетичні та спектральні характеристики таких джерел можуть істотно впливати малі домішки газів: молекулярного азоту, ксенону, елегазу та ін. [1]–[17]. У роботах [18, 19] було виявлено, що в бар'єрному розряді в сумішах парів дийодиду кадмію з інертними газами і молекулярним азотом при частотах проходження імпульсів накачки менших або рівних 6000 Гц спостерігається інтенсивне випромінювання ексиплексних молекул моноїодиду кадмію CdI^* (перехід з максимумом випромінювання на довжині хвилі $\lambda=650$ нм). Ці експерименти обмежені дослідженням спе-

ктрів випромінювання плазми і залежностей інтенсивності випромінювання моноїодиду кадмію від парціальних тисків гелію, неону і азоту при низьких частотах проходження імпульсів накачки. Оптичні характеристики і параметри плазми бар'єрного розряду на багатокомпонентних сумішах дийодиду кадмію з інертними газами і молекулярним азотом при підвищених частотах проходження імпульсів накачки, а також ресурс роботи суміші не досліджувались. У цій статті представлені результати наших досліджень, що заповнюють прогалину в даних по оптичних характеристиках і параметрах плазми бар'єрного розряду на сумішах парів дийодиду кадмію з гелієм і малими добавками молекулярного азоту.

Техніка та методика досліджень

На рис. 1 представлені основні вузли ексиплексного джерела випромінювання.

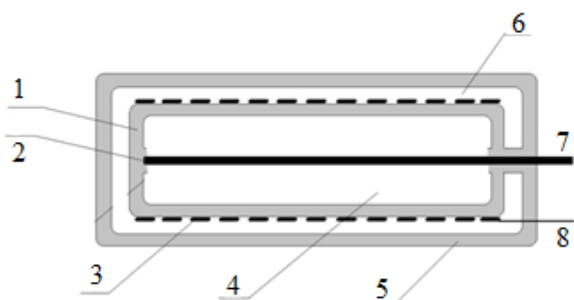


Рис. 1: Основні вузли експлексного джерела випромінювання: 1 — кварцова трубка, 2 — електрод, 3 — перфорований електрод, 4 — розрядна область, 5 — кварцова трубка, 6 — вакуумна область, 7, 8 — електричні вводи.

Експлексне джерело випромінювання виготовлялося з кварцовою трубкою діаметром 16 мм і довжиною 220 мм (1). По осі трубки розташовувався електрод (2) круглого перетину діаметром 4 мм, який виконаний з вольфраму. Другий електрод (3) перфорований (з коефіцієнтом пропускання випромінювання 50%) знаходився на зовнішній поверхні трубки (1). Експлексне джерело випромінювання розміщено в кварцовій трубці (5), яка зварена в торці, довжина її складає 230 мм, діаметр 26 мм. З об'єму (6) між експлексною лампою та кварцовою трубкою 5 видалено атмосферне повітря. Товщина розрядної області 4 і довжина горіння коаксіального об'ємного розряду складають 12 мм і 216 мм відповідно. Випромінювання виводиться із газорозрядної кювети нормально до поверхні зовнішньої кварцової трубки 5. Збудження робочої суміші джерела здійснюється в плазмі бар'єрного розряду на суміші парів дийодиду кадмію з гелієм і малої добавки азоту. Живлення розряду проводиться від імпульсно-періодичного генератора наносекундних імпульсів. В процесі експериментів імпульсні напруга і струм (тривалість імпульсів — 150 нс) на електродах лампи підтримувалися на рівні 10 кВ і 300 А, відповідно, частота повторення імпульсів становила 18–20 кГц.

Електричні характеристики (напруга і струм) вимірювалися за допомогою каліброваних подільника напруги і пасака Роговського, відповідно. На протилежній торцевій по-

верхні розташований патрубок з кварцового скла з капіляром (діаметр 1 мм, довжина 20 мм) через який здійснювалася відкачка трубки і її наповнення (заправка) досліджуваними компонентами суміші.

Випромінювання виводилося з центральної області міжелектродного простору і аналізувалося у видимій та ближній УФ-області спектра за допомогою оптичної системи (монохроматор ЗМР-3 і фотопомножувач ФЭУ-79). Спектральне розділення монохроматора ЗМР-3 становило 44 \AA на довжині хвилі $\lambda=434 \text{ нм}$. Калібрування оптичної системи проводилося за випромінюванням еталонної стрічкової вольфрамової лампи СИ-8-200 при температурі нитки накалу $T = 2173 \text{ К}$. Система реєстрації більш детально нами описана в [17]. Суміші газів готувалися безпосередньо в міжелектродному просторі при послідовному напуску азоту і легкого буферного газу гелію. Дийодид кадмію (CdI_2) в кількості 60 мг попередньо завантажувався в міжелектродний простір. Знегажування електрода і внутрішньої поверхні трубки вироблялося шляхом прогріву їх при температурі 500° С і відкачування протягом 2-ох годин. Парціальний тиск парів CdI_2 в робочих сумішах створювався за рахунок нагріву суміші при дисипації енергії імпульсно-періодичного розряду. Вимірювання його здійснювалося за температурою найбільш холодної частини трубки на підставі лінійної інтерполяції довідкових даних роботи [20]. Парціальні тиски газів вимірювалися мембранним зразковим вакуумметром або манометром.

Дослідження оптичних характеристик проводилося при досягненні стабільних електричних і оптичних параметрів плазми. Візуально спостерігається однорідний розряд з наявністю філаментів. Філаменти складаються з двох дифузних конусів, звернених один до одного.

Спектральні та інтегральні характеристики

На рисунку 2 (а, б) представлені оглядові спектри випромінювання плазми бар'єрного

розряду на суміші парів дйодиду кадмію з гелієм та суміші парів дйодиду кадмію, гелію з малою добавкою азоту при частоті проходження імпульсів накачки 20 кГц, амплітудою напруги на електродах і амплітуді струму через газорозрядний проміжок 10 кВ і 300 А та 10 кВ і 310 А для суміші парів дйодиду кадмію з гелієм і суміші парів дйодиду кадмію, гелію з малою добавкою азоту, відповідно. Загальний тиск суміші 250 кПа.

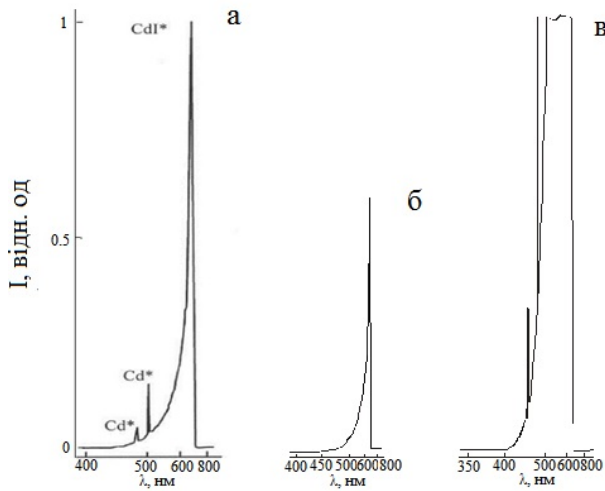


Рис. 2: Оглядові спектри випромінювання плазми бар'єрного розряду на сумішах CdI_2 : He = 0, 024: 250 кПа (а), CdI_2 : N_2 : He = 0, 024: 9, 7: 250 кПа (б) і CdI_2 : N_2 : He = 0, 024: 9, 7: 250 кПа (в). Частота проходження імпульсів накачки $f = 20$ кГц, амплітуда напруги і струму $U = 10$ кВ та $I = 300$ А відповідно.

Характерним для суміші парів дйодиду кадмію з гелієм (2) є наявність системи спектральних смуг електронно-коливального переходу, ексиплексних молекул CdI^* з максимумом випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 650$ нм, $\nu' = 0-2 \rightarrow \nu'' = 61, 62$ [21], крутим зростанням інтенсивності цих спектральних смуг з боку довгохвильової ділянки та повільним спадом в короткохвильовій області. Канти спектральних смуг перекривають діапазон довжин хвиль 470-700 нм. Крім цих спектральних смуг спостерігається також випромінювання на лініях $\lambda = 479.991$ нм і $\lambda = 508.582$ нм атомів Cd, переходи $5p^3P_0-6s^3S$ ($J = 1-1$) і $5p^3P_0-6s^3S$ ($J = 2-1$) [22, 23], а в суміші парів дйодиду кадмію з азотом та гелієм рис.2 (б) лінії атомів кадмію $\lambda = 479.991$ нм і $\lambda = 508.582$ нм

спостерігалися тільки при підвищенні в два рази чутливості експериментальної апаратури рис. 2 (в). Зі зміною частоти проходження імпульсів накачки від 18 кГц до 20 кГц інтенсивність випромінювання в спектральних смугах і лініях зростає на 10%. Інтенсивність випромінювання молекул CdI^* в максимумі випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 650$ нм перевищує інтенсивність випромінювання атомів кадмію на довжинах хвиль $\lambda = 479.991$ нм і $\lambda = 508.582$ нм в 3.4 і 1.8 разів відповідно. Випромінювання спектральних смуг молекулярного азоту не спостерігалось.

При підвищенні парціального тиску гелію від 120 кПа до 260 кПа спостерігається немонотонна зміна інтенсивності випромінювання: безперервне зростання в діапазоні 120–250 кПа, досягнення максимального значення при 250 кПа (рис.3) і спад при подальшому збільшенні тиску гелію. Значення парціального тиску парів дйодиду кадмію, при якому спостерігається максимум інтенсивності випромінювання монойодиду кадмію становить 24 Па.

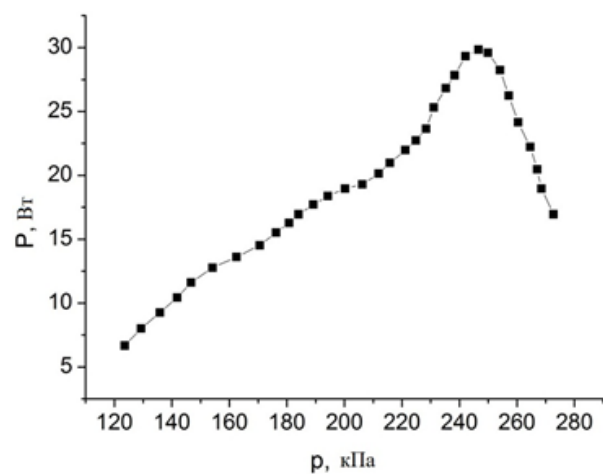


Рис. 3: Залежність середньої потужності випромінювання від парціального тиску гелію в суміші дйодиду кадмію з гелієм. Амплітуда напруги і струму $U = 10$ кВ і $I = 300$ А відповідно. Частота проходження імпульсів накачки $f = 20$ кГц.

На рис.4 наведено результати по залежностях інтенсивності випромінювання ексиплексних молекул монойодиду кадмію від парціального тиску молекулярного азоту. Найбільш інтенсивне випромінювання молекул відбувається при парціальному тиску мо-

лекулярного азоту 10 кПа. Для суміші з молекулярним азотом в залежності інтенсивності випромінювання молекул CdI^* від парціального тиску молекул N_2 спостерігається монотонне зростання, досягнення максимуму і при подальшому збільшенні парціального тиску цих компонент – спад.

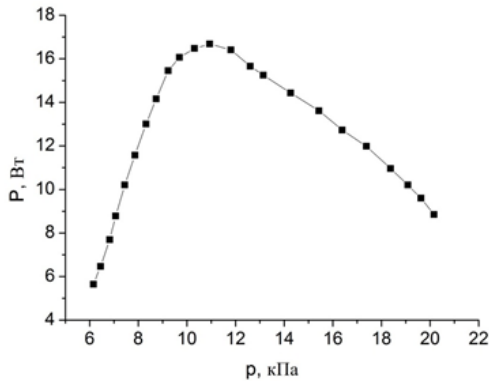


Рис. 4: Залежність потужності випромінювання експлекних молекул моноїодиду кадмію від парціального тиску молекулярного азоту в суміші парів дийодиду кадмію з гелієм і азотом. Парціальний тиск парів дийодиду кадмію 24 Па, гелію 250 кПа. Частота проходження імпульсів накачки 20 кГц.

Залежність потужності випромінювання моноїодиду кадмію від числа імпульсів накачування (співвідношення газових компонент вибиралося оптимальним — при якому спостерігаються максимальні інтенсивності випромінювання молекул CdI^*) представлені на рис.5. Для неї характерно, що насичення потужності в залежності від числа імпульсів накачування для молекул CdI^* настає після проходження $4 \cdot 10^7$ імпульсів накачування.

Оскільки експериментальна фізика не володіє задовільними методами діагностики щільної газорозрядної плазми, то параметри плазми бар'єрного розряду в оптимальних для здобуття максимальної потужності випромінювання електричного розряду на суміші $CdI_2 - He$ (0.000095–0,999905) при загальному тиску 250.024 кПа були визначені чисельного і розраховувались як повні інтеграли функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) на основі рівняння Больцмана в двочленному наближенні [24].

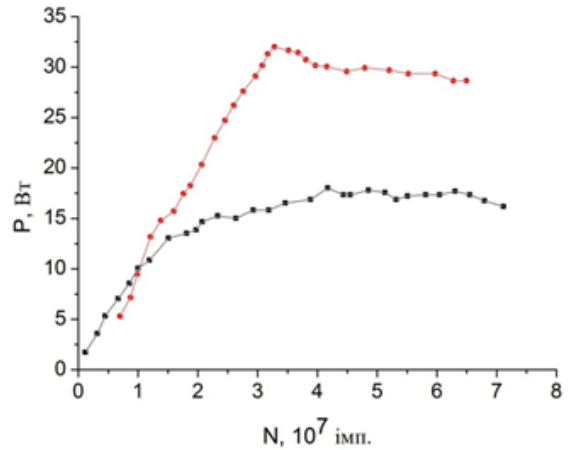


Рис. 5: Залежність потужності випромінювання експлекних молекул моноїодиду кадмію від числа імпульсів накачки.

Розрахунки ФРЕЕ проводились з використанням відомої програми «Bolsig+» [25]. На основі отриманих ФРЕЕ визначені ряд параметрів плазми в залежності від величини приведенного електричного поля (відношення напруженості електричного поля (E) до загальної концентрації атомів гелію і невеликої домішки парів дийодиду кадмію (N)). Діапазон зміни параметра $E/N = 1-100$ Тд ($1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-14} B \cdot cm^2$) включав величини параметра E/N, які були реалізовані в експерименті.

Всі розрахунки проводилися для розряду при парціальних тисках дийодиду кадмію 24 Па і гелію 250 кПа та при парціальних тисках дийодиду кадмію 24 Па, азоту 10 кПа і гелію 250 кПа, при яких досягалася максимальна величина потужності випромінювання в експериментах (рис.3, рис.4).

В інтегралі зіткнень електронів з атомами і молекулами враховані такі процеси: пружне розсіяння електронів на атомах гелію, збудження енергетичних рівнів атомів гелію (енергія порога 19.8 eV), іонізація атомів гелію (енергія порога 24.58 eV); дисоціативне збудження: $B^2 \Sigma_{1/2}^+$ - стану молекул моноїодиду кадмію (енергія порогу 4.986 eV), атомів кадмію $\lambda=479.991$ нм і $\lambda=508.582$ нм (енергія порогу 6.386 eV): іонізація дийодиду кадмію, диссоціативна іонізація з утворенням іонів: дийодиду кадмію, моноїодиду кадмію, кадмію та йоду (енергія порогу — 10 eV, 11 eV, 13 eV, 14 eV відповідно); пружне

розсіяння та збудження енергетичних рівнів молекули азоту: обертового — енергія порогу 0.020 eV, коливальних рівнів (енергії порогу: 0.290 eV, 0.291 eV, 0.590 eV, 0.880 eV, 1.170 eV, 1.470 eV, 1.760 eV, 2.060 eV, 2.350 eV; електронних станів: 6.170 eV, 7.000 eV, 7.350 eV, 7.360 eV, 7.800 eV, 8.160 eV, 8.400 eV, 8.550 eV, 8.890 eV, 11,03 eV, 11.87, eV 12.25 eV, 13.00 eV, іонізація (енергія порогу — 15.60 eV)

Дані за абсолютними величинами ефективних перерізів цих процесів, а також їх залежностей від енергії електронів взяті з бази даних [25] та праць [26]– [28].

Напруженість електричного поля (E) та приведені електричне поле на плазмі (E/N), при яких в експерименті спостерігалася максимальна потужність випромінювання в спектральній смузі ($\lambda=650$ нм) молекули

монойодиду кадмію. мали величини $2.0 \cdot 10^6$ В/м, 55.9 Тд, відповідно. Вони визначалися за методикою описаної нами в статті [29].

Чисельне моделювання транспортних характеристик електронів на суміші парів дийодиду кадмію і гелію та суміші парів дийодиду кадмію, азоту і гелію при співвідношенні компонент 24 Па: 250 кПа і 24 Па: 10 кПа: 250 кПа (таблиця 1, таблиця 2) виявило, що в плазмі зі збільшенням значень приведеної напруженості поля (E/N), спостерігається збільшення середньої енергії електронів (ϵ), температури електронів (T^0 К), швидкості дрейфу електронів ($V_{др}$), а концентрація електронів (N) зменшувалася. Транспортні характеристики електронів на суміші парів дийодиду кадмію, азоту і гелію (таблиця 2) мали менші значення.

E/N,Тд	ϵ ,eV	T^0 К	$V_{др}$,м/с	N ,м ⁻³
7.83	4.490	52084	$1.6 \cdot 10^5$	$4.2 \cdot 10^{18}$
55.9	10.37	120292	$1.7 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^{18}$
100	14.09	163444	$1.9 \cdot 10^5$	$3.6 \cdot 10^{18}$

Табл. 1: Транспортні характеристики електронів в плазмі на суміші парів дийодиду кадмію і гелію при співвідношенні компонент 24 Па: 250 кПа.

E/N,Тд	ϵ ,eV	T^0 К	$V_{др}$,м/с	N ,м ⁻³
7.83	1.042	12087.2	$2.4 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^{18}$
52.2	7.513	87150.8	$1.4 \cdot 10^5$	$4.9 \cdot 10^{18}$
100	11.27	130732	$1.5 \cdot 10^5$	$4.6 \cdot 10^{18}$

Табл. 2: Транспортні характеристики електронів на суміші парів дийодиду кадмію, азоту і гелію, при співвідношенні компонент 24 Па: 10 кПа: 250 кПа.

Константи швидкостей збудження та іонізації електронами атомів гелію і молекул дийодиду кадмію (таблиця 3, таблиця 4) також збільшуються з ростом параметра E/N.

Максимальні значення спостерігаються для константи дисоціативного збудження молекул дийодиду кадмію в суміші парів дийодиду кадмію та гелію (таблиця 3).

E/N, Тд	$kCdI^*$, $\cdot 10^{15}$ м ³ /с, $\lambda=650$ нм CdI_2	kCd^* , $\cdot 10^{15}$ м ³ /с $\lambda=479$ нм CdI_2	kCd^* , $\cdot 10^{15}$ м ³ /с $\lambda=509$ нм CdI_2	$kCdI^{2+}$, $\cdot 10^{14}$ м ³ /с CdI_2	k_r , $\cdot 10^{14}$ м ³ /с He	kHe^* , $\cdot 10^{16}$ м ³ /с He	kHe^+ , $\cdot 10^{17}$ м ³ /с He
7.83	3.002	0.1203	0.1804	0.2265	6.930	0.017	0.002
55.6	7.481	1.205	1.827	2.113	7.757	2.448	9.359
100	9.101	2.188	3.325	3.530	7.545	6.789	51.58

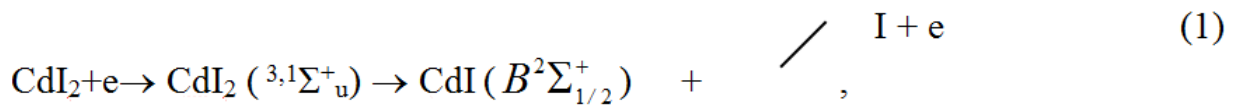
Табл. 3: Константи швидкостей: збудження (k), іонізації ($kCdI^{2+}$), (kHe^+), пружного розсіювання (k_r) електронами: $B^2\Sigma^-$ - стану ексиплексних молекул CdI^* ($kCdI^*$), рівнів атомів кадмію (kCd^*) та гелію (kHe^*), в суміші парів дийодиду кадмію та гелію при співвідношенні 24 Па: 250кПа.

E/N, Тд	$kCdI^*$, $\cdot 10^{15}$ м ³ /с $\lambda=650$ нм CdI_2	kCd^* , $\cdot 10^{15}$ м ³ /с $\lambda=479$ нм CdI_2	kCd^* , $\cdot 10^{15}$ м ³ /с $\lambda=509$ нм CdI_2	$kCdI^{2+}$, $\cdot 10^{14}$ м ³ /с CdI_2	k_r , $\cdot 10^{14}$ м ³ /с He	kHe^* , $\cdot 10^{16}$ м ³ /с N_2	kHe^+ , $\cdot 10^{17}$ м ³ /с He
7.83	0.02084	0.505 $\cdot 10^{-20}$	0.707 $\cdot 10^{-20}$	0.143 $\cdot 10^{-18}$	0.379 $\cdot 10^{-13}$	0.666 $\cdot 10^{-13}$	0.000
52.2	5.734	0.5610	0.8477	0.102 $\cdot 10^{-13}$	0.767 $\cdot 10^{-13}$	0.159 $\cdot 10^{-12}$	0.148 $\cdot 10^{-16}$
100	7.862	1.449	2.198	0.244 $\cdot 10^{-13}$	0.770 $\cdot 10^{-13}$	0.172 $\cdot 10^{-12}$	0.211 $\cdot 10^{-15}$

Табл. 4: Константи швидкостей: збудження (k), іонізації ($kCdI^{2+}$), (kHe^+), пружного розсіювання (k_r) електронами: $B^2\Sigma^+$ - стану ексиплексних молекул CdI^* ($kCdI^*$), рівнів атомів кадмію (kCd^*) та гелію (kHe^*), в суміші парів дийодиду кадмію, азоту та гелію при співвідношенні 24 Па: 10кПа: 250 кПа.

Виникнення емісії спектральних смуг з максимумом на довжині хвилі $\lambda=650$ нм електронно-коливального переходу $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ молекули CdI^* в газорозрядній плазмі на сумішах парів дийодиду

кадмію з гелієм відбувається внаслідок процесів, що призводять до утворення та руйнування $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану монойодиду кадмію, основними з яких є [18, 19, 26]:



$$\lambda_{\text{макс.}} = 650 \text{ нм}$$

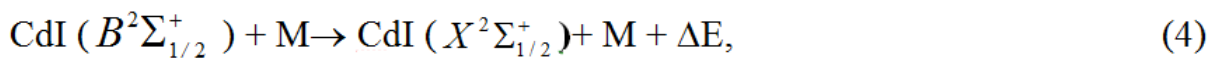
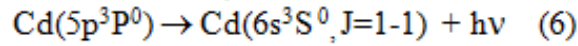
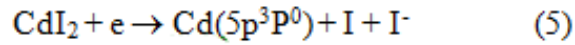


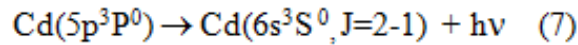
Рис. 6: Процеси, що приводять до утворення та руйнування $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану монойодиду кадмію: М — концентрації молекул CdI_2 , N_2 , He; ΔE — різниця енергії в реакції.

Реакції (1) і (2) є основними джерелами утворення ексиплексних молекул CdI^* [21]. Електронно-коливальні переходи $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ молекул CdI^* приводять до емісії спектральних смуг з максимальною інтен-

сивністю на довжині хвилі $\lambda=650$ нм (реакція 3). У реакції гасіння (4) відбувається електронно-коливальний перехід молекули моноїодиду кадмію в основний стан без випромінювання.



$$\lambda = 479.991 \text{ нм}$$



$$\lambda = 508.582 \text{ нм}$$

Рис. 7: Емісія ліній кадмію відбувається за рахунок даних реакцій [27].

Константи швидкостей збудження $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану ексиплексних молекул моноїодиду кадмію складають величину $7.481 \cdot 10^{-15}$ м³/с, а атомів кадмію $1.203 \cdot 10^{-15}$ м³/с та $1.804 \cdot 10^{-15}$ м³/с для приведеної напруженості електричного поля $E/N=55.9$ Тд, що існувало в експериментальних умовах для суміші парів дийодиду кадмію та гелію (таблиця 3). А для суміші парів дийодиду кадмію, азоту і гелію константи швидкостей збудження $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану ексиплексних молекул моноїодиду кадмію складають величину $5.734 \cdot 10^{-15}$ м³/с, а атомів кадмію $0.5610 \cdot 10^{-15}$ м³/с та $0.8477 \cdot 10^{-15}$ м³/с для приведеної напруженості електричного поля $E/N=52.2$ Тд, що існувало в експериментальних умовах.

Різке збільшення інтенсивності з боку ділянки в спектрі з великими довжинами хвиль і повільне її зменшення в області коротких довжин хвиль (рис.2) пояснюється ходом потенціальних кривих (збуджений $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стан зміщений в бік великих між'ядерних відстаней відносно $X^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану) та процесами релаксації заселеності верхніх коливальних рівнів збудженого електронного стану, які відбуваються швидше, ніж електронно-коливальний перехід на основний $X^2\Sigma_{1/2}^+$ - стан [30].

Збільшення інтенсивності спектральних смуг випромінювання ексиплексних молекул CdI^* , а також інтенсивності спектральних ліній атомів кадмію при збільшенні частоти проходження імпульсів накачки

в межах 18–20 кГц викликані підвищенням числа актів збудження компонент плазми і, відповідно, числа імпульсів випромінювання в одиницю часу, які потрапляють в систему реєстрації. Крім того, вони пов'язані зі зміною температури робочої суміші (потужність дисипації енергії розряду, при підвищенні частоти проходження імпульсів накачки збільшується [31], і, відповідно, збільшуються парціальні тиску дийодиду кадмію [20]). А це приводить до збільшення концентрації парів дийодиду кадмію і в кінцевому підсумку — до різних концентрацій збуджених молекул CdI^* в $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стані, що і приводить до збільшення інтенсивностей випромінювання в спектральних смугах і лініях.

Хід залежності потужності випромінювання від парціального тиску гелію і азоту (рис.2, рис.3) пов'язаний з часткою енергії розряду, яка витрачається на нагрів робочої суміші [31]. На основі чисельного моделювання питомих втрат потужності розряду на пружне розсіяння електронів на атомах і молекулах для сумішей дийодиду кадмію з гелієм і азотом було встановлено, що при збільшенні загального тиску суміші зменшується приведена напруженість електричного поля. Це приводить до підвищення питомих втрат потужності розряду на пружне розсіяння електронів на атомах і молекулах (нагрівання суміші) і, відповідно, до підвищення парціального тиску парів дийодиду кадмію та інтенсивності випромінювання молекул CdI^* . Наявність максимуму потужності і подальше її зменшення викликано змен-

шенням середньої енергії електронів (таблиця 1 і таблиця 2), а це в свою чергу приводить до зменшення констант швидкостей дисоціативного збудження $B^2\Sigma_{1/2}^+$ – стану CdI^* електронами (таблиця 3 і таблиця 4) в процесах (1) і (2). Крім того, у зменшення потужності випромінювання вносить свій внесок процес (4) гасіння люмінесценції молекул моноїодиду кадмію гелієм та азотом [32].

Різні швидкості (по числу імпульсів накачування) досягнення насичення в інтенсивності випромінювання молекул CdI^* від числа імпульсів для сумішей дийодиду кадмію з гелієм та дийодиду кадмію з гелієм і малими добавками молекулярного азоту (рис. 5, залежно 1 і 2, відповідно) викликані різною швидкістю дисипації енергії розряду для багатоконпонентної плазми і, яка залежить насамперед від ймовірності пружних зіткнень електронів з компонентами плазми [31]. Ймовірності пружних зіткнень електронів з молекулами азоту вище, що в першому наближенні пояснює виявлені закономірності. Для визначення кількісних характеристик цих закономірностей необхідно проведення чисельних розрахунків кінетики процесу дисипації енергії розряду в таких багатоконпонентних сумішах.

Висновки

Таким чином, в результаті дослідження оптичних характеристик газорозрядної плазми бар'єрного розряду на двокомпонентних і трикомпонентних сумішах (дийодиду кадмію з гелієм і малими добавками молекулярного азоту) виявлено випромінювання у видимій області спектру ексиплексних молекул моноїодиду кадмію та атомів кадмію ($\lambda=479.991$ нм і $\lambda=508.582$). Канти спектральних смуг перекривають діапазон довжин хвиль 470–700 нм (системи спектральних смуг електронно-коливального переходу ексиплексних молекул CdI^* з максимумами випромінювання на довжинах хвиль $\lambda=650$ нм, $\nu' = 0-2 \rightarrow \nu'' = 61,62$). Добавка азоту в су-

міш парів дийодиду кадмію з гелієм приводить до зменшення потужності випромінювання в два рази як системи спектральних смуг ексиплексних молекул CdI^* з максимумами випромінювання на довжинах хвиль $\lambda=650$ нм, так і спектральних ліній атомів кадмію $\lambda=479.991$ нм і $\lambda=508.582$ нм.

З ростом частоти проходження імпульсів накачки до 20000 Гц (в межах даних досліджень) інтенсивності випромінювання спектральних смуг, ліній кадмію в досліджених сумішах збільшуються. Ці зміни викликані як підвищенням числа імпульсів випромінювання в одиницю часу (за рахунок збільшення числа актів збудження компонент плазми), які потрапляють в систему релаксації, так і збільшенням парціального тиску дийодиду кадмію в зв'язку зі збільшенням швидкості дисипації енергії розряду.

Наявність у спектрах випромінювання додаткових компонент (ліній атомів кадмію), які не присутні в первинному складі суміші викликано процесом дисоціативного збудження при непружних зіткненнях електронів із молекулами дийодиду кадмію.

Різні швидкості насичення інтенсивностей випромінювання в залежності від часу напрацювання суміші викликані різною швидкістю дисипації енергії розряду в різних щодо компонентного складу сумішах. Помітних (в межах помилки вимірювань 10%) змін в інтенсивності випромінювання ексиплексних молекул моноїодиду кадмію (після виходу їх на максимальні значення) не спостерігається для $6.5 \cdot 10^7$ імпульсів накачування для досліджуваних сумішей.

Газорозрядна плазма бар'єрного розряду на сумішах дийодиду кадмію, гелію і азоту становить інтерес для створення ексиплексних газорозрядних джерел видимого випромінювання з максимумом випромінювання на довжині хвилі $\lambda=650$ нм, які знайдуть застосування у біотехнології, агрофізиці, наукових дослідженнях з квантової електроніки, для накачування твердотільних і рідинних лазерів та в медицині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Малинин А.Н. Исследование излучения HgBr в импульсном разряде через стекло / А.Н.Малинин,А.К.Шуаибов, В.С. Шевера // Журн. прикл. спектр. — 1980. — Т. 32. — С. 735–737.
- [2] Furusawa H. High efficiency continuous operation HgBr excimer lamp excited by microwave discharge / H. Furusawa, S. Okada, M. Obara //Appl. Phys. Lett. — 1995. — V. 66. — P. 1877–1879.
- [3] Malinin A.N. Excitation of mercury monohalides in the plasma of pulse-periodic discharge in mixtures of mercury dihalides and rare gases / A.N. Malinin // Laser Physics — 1997. — V. 7, № 5. — P. 1032–1040.
- [4] Гаврилова Ю.Е. Экцимерный HgJ^* —лазер, возбуждаемый электрическим разрядом / Ю.Е. Гаврилова, В.С. Зродников, А.Д.Клементов, А.С. Подсосонный // Квантовая электроника. — 1980. — Т. 7, № 11. — С. 2495–2497.
- [5] Малинин А.Н. Оптимизация энергетических характеристик в газоразрядной плазме на рабочих смесях HgBr-лазера / А.Н. Малинин, Л.Л. Шимон, Н.Н.Гуйван, А.В.Поляк // Оптика атмосферы и океана. — 1999. — Т. 12, № 11. — С. 1024–1026.
- [6] Гуйван М.М., Малінін О.М., Шимон Л.Л. Оптимізація компонентного складу газорозрядної HgBr-екцимерної лампи / М.М. Гуйван, О.М. Малінін, Л.Л. Шимон // Науковий вісник Ужгородського університету, Серія Фізика. — 1999. — № 4. — С. 12–17.
- [7] Гуйван М.М. Дослідження можливості підвищення вихідних характеристик височастотної HgBr/HgCl-екцимерної лампи / М.М.Гуйван, О.М. Малінін, Л.Л. Шимон // Науковий вісник Ужгородського університету, Серія Фізика. — 1999. — № 5. — С. 87–91.
- [8] Guivan N.N. Population density of $B^2\Sigma_{+1/2}$ – state of mercury monobromide and monochloride in excimer radiation sources / N.N. Guivan, A.N. Malinin, L.L. Shimon // Uzhgorod University Scientific Herald, Series Physics. — 2000. — № 8. — P. 187–190.
- [9] Малинин А.Н. Спектры излучения рабочих смесей HgBr/HgCl-екцимерной лампы / А.Н. Малинин, Н.Н. Гуйван, Л.Л. Шимон // Оптика и спектроскопия. — 2000. —Т. 89, № 6. — С. 905–910.
- [10] Поляк А.В. Чисельна оптимізація парціальних тисків робочої суміші екцимерної HgBr/HgI лампи / А.В. Поляк, М.М. Гуйван, О.М. Малінін //Науковий вісник Ужгородського університету, Серія Фізика. — 2000. — № 7. — С. 127–130.
- [11] Гуйван М.М. Збудження екцимерних молекул HgBr та HgCl в плазмі височастотного розряду через діелектрик / М.М. Гуйван, О.М. Малінін // Науковий вісник Ужгородського університету, Серія Фізика. — 2000. — № 7. — С. 131–138.
- [12] Малинин А.Н. Временные характеристики излучения рабочих смесей HgBr/HgCl-екцимерной лампы / А.Н. Малинин, Н.Н. Гуйван, Л.Л. Шимон, А.В. Поляк, Н.Г. Зубрилин, А.И. Щедрин // Оптика и спектроскопия. — 2001. — Т. 91, № 6. — С. 922–926.
- [13] Малинин А.Н. Коаксиальные HgI-эксилампы / А.Н. Малинин, А.В. Поляк, Н.Н. Гуйван, Н.Г. Зубрилин, Л.Л. Шимон Квантовая электроника. — 2002. — Т. 32, № 2. — С. 155–159.

- [14] Гуйван М.М. Оптимізація оптичних характеристик робочих сумішей HgBr та HgCl ексиламп / М.М. Гуйван, О.М. Малінін, Л.Л. Шимон // Журнал фізичних досліджень. — 2002. — Т. 6, № 1. — С.74–77.
- [15] Гуйван М.М. Оптимізація оптичних характеристик робочих сумішей HgBr та HgCl ексиламп / М.М. Гуйван, О.М. Малінін // УФЖ. — 2002. — Т. 47, № 1. — С. 24–27.
- [16] Malinina A. Experimental and analytical characterization of dielectric barrier discharge in the mixture of HgI₂ vapor, Xe and He gas formula / A. Malinina, A. Malinin // Engineering Physics. — 2018. — № 5(2) — P. 14–19.
- [17] Malinina A.A. Emission characteristics and parameters of gas discharge plasma on mixtures of mercury dichloride vapor, neon and small addition of nitrogen / A.A. Malinina, I.I. Aksenyuk // Plasma Res. Express — 2019. — № 1, 035008. — P. 1–12.
- [18] Шевера В.С. Исследование возбуждения и тушения $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния CdI^* в импульсном разряде через диэлектрик / В.С. Шевера, А.Н. Малинин, А.К. Шуайбов // Журнал прикладной спектроскопии. — 1983. — Т. 39, № 3. — С. 476–478.
- [19] Коноплев А.Н. Исследование излучения импульсного разряда в смесях ZnI_2 , CdI_2 и HgI_2 с гелием и неоном / А.Н. Коноплев, В.А. Кельман, В.С. Шевера // Журнал прикладной спектроскопии. — 1983. — Т. 39, № 2. — С. 315–317.
- [20] Таблицы физических величин: справочник / Под ред. акад. И.К.Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
- [21] Pears R.W.B. The Identification of Molecular Spectra / R. W. B. Pears, A. G. Gaydon. — London: Chapman Hall LTD, 1963. — 347 p.
- [22] Зайдель А.Н. Таблицы спектральных линий / А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, В.А. Славный, Е.Я. Шрейдер. — М.: Наука, 1977. — 800 с.
- [23] Прокопьев В.Е. Уровни энергий и радиационные переходы нейтральных атомов. / В.Е. Прокопьев, А.С. Яценко. — Новосибирск. Препринт ИАЭ СО АН СССР, № 161 — 1981. — 52 с.
- [24] Hagelaar G.J.M. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models / G.J.M. Hagelaar, L.C. Pitchford Plasma Sources Sci Technol. — № 14. — 2005. — P. 722–733.
- [25] <https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>.
- [26] Коноплев А. Н. Диссоциативное возбуждение CdJ_2 электронным ударом / А.Н. Коноплев, Н.Н. Чаварга, В.Н. Славик, В.С. Шевера // Письма в ЖТФ. — 1989. — Т. 15, № 22. — С. 48–51.
- [27] Смирнов Ю.М. Неупругие столкновения медленных электронов с молекулами иодида кадмия (II) / Ю.М. Смирнов // Химия высоких энергий. — 2000. — Т. 34, № 6. — С. 405–410.
- [28] Коноплев А.Н. Диссоциативная ионизация молекул CdJ_2 электронным ударом / Коноплев, В.Н. Славик, В.С. Шевера // Письма в ЖТФ — 1990. — Т. 16, № 19. — С. 86–89.

- [29] Малініна А.О. Механізм збільшення потужності випромінювання газорозрядної лампи на сумішах парів дихлориду ртуті, неону та азоту в синьо – зеленому спектральному діапазоні / А.О. Малініна, О.К. Шуайбов, О.М. Малінін // Укр.фіз.журнал — 2019. — Т. 64, № 9. — С. 797 – 806.
- [30] Дацюк В.В. Колебательная релаксация эксимерных молекул / В.В. Дацюк, И.А. Измайлов, В.А. Кочелап // Успехи физических наук — 1998. — Т. 168, № 4. — С. 439-464.
- [31] Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П.Райзер. — М.: Наука. — 1987. — 592 с.
- [32] Ediger M.N. CdI and CdBr photodissociation lasers at 655 and 811 nm: CdI spectrum identification and enhanced laser output with $^{114}\text{CdI}_2$ / M.N. Ediger, A.W. McCown, J.G. Eden // Appl. Phys. Lett — 1982. — V. 40, № 2. — P. 99 – 101.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2019

А.А. Малинина, Р.В. Грицак, И.И. Аксенюк

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54, Украина,
e-mail: antonina.malinina@uzhnu.edu.ua

Оптические характеристики и параметры газоразрядной плазмы на смеси паров дийодида кадмия с гелием и малой добавки азота

Приведены результаты исследования спектральных, интегральных и ресурсных характеристик излучения газоразрядной плазмы атмосферного давления на многокомпонентных смесях дийодида кадмия с гелием и малой добавки молекулярного азота. Создание газоразрядной плазмы и возбуждение компонент рабочей смеси осуществлялось импульсно-периодическим (частота следования импульсов 18–20 кГц, длительность импульсов 150 нс) барьерным разрядом. Выявлено излучение в видимой области спектра эксиплексных молекул моноидида кадмия, атомов кадмия. Установлены закономерности в изменениях оптических характеристик плазмы в зависимости от частоты следования импульсов накачки, компонентного и количественного состава смесей. Представлены обсуждения результатов исследований. Данные исследований представляют интерес для создания эксиплексных газоразрядных источников видимого излучения с максимумом излучения на длине волны $\lambda=650$ нм.

Ключевые слова: газоразрядные эксиплексных источника излучения, галогенсодержащие молекулы, моноидид кадмия, видимый спектральный диапазон, барьерный разряд.

A.O. Malinina, R.V. Hrytsak, I.I. Akseniuk

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voshyna Str., 54, Ukraine, e-mail: avtor@gmail.com

Optical characteristics and parameters of gas discharge plasma on a mixture of cadmium diiodide vapor with helium and small addition of nitrogen

Purpose. To investigate the optical characteristics and parameters of the barrier discharge plasma on mixtures of cadmium diiodide vapor and helium with small molecular nitrogen additives at high pump pulse frequencies.

Methods. The creation of a gas-discharge plasma and the excitation of the components of the working mixture were carried out by a pulse-periodic (pulse repetition rate of 18–20 kHz, pulse duration 150 ns) barrier discharge. Barrier discharge plasma parameters were determined numerically based on the electron energy distribution function (EEDF) in discharge. EEDF was determined by solving the kinetic Boltzmann equation in two-terms approximation using the well-known program «Bolsig+». Based on EEDF: mean electron energies, electron mobility, specific power losses of electrical discharge and rate constants of elastic and inelastic scattering of electrons on cadmium diiodide, helium and molecular nitrogen as a function of the reduced electric field were identified.

Results. Emission in the visible spectrum of cadmium monoiodide exciplex molecules and cadmium atoms was detected. The regularities in the changes in the optical characteristics of the plasma are established depending on the repetition rate of the pump pulses, the component and the quantitative composition of the mixtures. Discussions of research results are presented. The research data is of interest for creating exciplex gas-discharge sources of visible radiation with a radiation maximum at a wavelength of $\lambda=650$ nm.

Conclusions. A gas-discharge barrier discharge plasma on mixtures of cadmium diiodide vapor, helium, and molecular nitrogen is of interest for creating exciplex gas-discharge sources of visible radiation with a radiation maximum at a wavelength of $\lambda=650$ nm, which will be used in biotechnology, agrophysics, scientific researches in quantum electronics, for pumping solid-state and liquid lasers and in medicine.

Keywords: gas-discharge exciplex radiation sources, halogen-containing molecules, cadmium monoiodide, visible spectral range, barrier discharge.

REFERENCES

- [1] Malinin A. N., Shuaibov A.K., Shevera V.S. (1980), "Study of HgBr radiation in a pulsed discharge through glass" ["Issledovanie izlucheniya HgBr v impulsnom razryade cherez steklo"], Journal of Applied Spectroscopy, № 32, pp. 735–737.
- [2] Furusawa H. (1995) "High efficiency continuous operation HgBr excimer lamp excited by microwave discharge", Appl. Phys. Lett., 1995, V. 66, pp. 1877–1879.
- [3] Malinin A.N. (1997) "Excitation of mercury monohalides in the plasma of pulse-periodic discharge in mixtures of mercury dihalides and rare gases", Laser Physics, V. 7, № 5, pp. 1032–1040.
- [4] Gavrilova Yu.E., Zrodnikov V.S., Klementov A.D., Podsonnyiy A S. (1980) "Excimer HgJ^* laser excited by an electric discharge", ["Eksimernyy HgJ^* —lazer, vzbuzhdaemyy elektricheskim razryadom"], Soviet Journal of Quantum Electronics, V. 7, № 11, pp. 2495–2497.
- [5] Malinin A.N., Shimon L.L., Guyvan N.N., Polyak A.V. (1999) "The Optimization of Energy Characteristics in Gas-Discharge Plasma on the Working Mixtures of HgBr-laser", ["Opti-

mizaciya energeticheskikh karakteristik v gazorazryadnoy plazme na rabochih smesyah HgBr-lazera”], Atmospheric and oceanic optics, V. 12, № 11, pp. 1024 – 1026.

- [6] Guivan M.M., Malinin O.M., Shymon L.L. (1999) ”Optimization of component compound of the gas-discharge HgBr-excimer lamp” [”Optymizatsiia komponentnoho skladu hazorozriadnoi HgBr-eksymernoi lampy”], Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series Physics, № 4, pp. 12 – 17.
- [7] Guivan M.M., Malinin O.M., Shymon L.L. (1999) ”Investigation on revealing the possibility of increasing output characteristics of high-frequency HgBr/HgCl-excimer lamp” [”Doslidzhennia mozhlyvosti pidvyshchennia vykhidnykh kharakterystyk vysokochastotnoi HgBr/HgCl-eksymernoi lampy”], Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series Physics, № 5, pp. 87 – 91.
- [8] Guivan N.N., Malinin A.N., Shimon L.L. (2000) ”Population density of $B^2\Sigma_{+1/2}$ –state of mercury monobromide and monochloride in excimer radiation sources”, Uzhgorod University Scientific Herald, Series Physics, № 8, pp. 187 – 190.
- [9] Malinin A.N., Guyvan N.N., Shimon L.L. (2000) ”Emission spectra of working mixtures of HgBr / HgCl excimer lamps” [”Spektry izlucheniya rabochih smesey HgBr/HgCl-eksimernoy lampy”], Optics and spectroscopy, V. 89, № 6, pp. 905 – 910.
- [10] Poliak A.V., Guivan M.M., Malinin O.M. (2000) ”Numerical optimization of partial pressures of working mixture excimer HgBr/HgI lamp” [”Chyselna optymizatsiia partsialnykh tyskiv robochoi sumishi eksymernoi HgBr/HgI lampy”], Uzhgorod University Scientific Herald, Series Physics, № 7, pp. 127 – 130.
- [11] Guivan M.M., Malinin O.M. ”Excitation of HgBr and HgCl excimer molecules in plasma of a high frequency barrier discharge” [”Zbudzhennia eksymernykh molekul HgBr ta HgCl v plazmi vysochastotnoho rozriadu cherez dielektryk”], Uzhgorod University Scientific Herald, Series Physics, 2000, № 7, p. 131 – 138.
- [12] Malinin A.N., Guyvan N.N., Shimon L.L., Polyak A.V., Zubrillin N.G., Schedrin A. I. ”Temporal characteristics of the radiation of working mixtures of HgBr / HgCl excimer lamps” [”Vremennye kharakteristiki izlucheniya rabochih smesey HgBr/HgCl-eksimernoy lampy”] Optics and spectroscopy, 2001, V. 91, № 6, pp. 922 – 926.
- [13] Malinin A.N., Polyak A.V., Guyvan N.N., Zubrillin N.G., Shimon L.L. (2002) ”Coaxial HgI excimer lamps” [”Koaksial’nye HgI-eksilampy”], Quantum Electronics, V. 32, № 2, pp. 155 – 159.
- [14] Guivan M.M., Malinin O.M., Shymon L.L. (2002) ”Optimization of optical characteristics of working mixtures of HgBr and HgCl exilamps” [”Optymizatsiia optychnykh kharakterystyk robochykh sumishei HgBr ta HgCl eksylamp”], Zhurnal fizychnykh doslidzhen, V. 6, № 1, pp. 74 – 77.
- [15] Guyvan M.M., Malinin O.M. (2002) ”Optimization of the optical characteristics of the working mixtures of HgBr and HgCl excillamps” [”Optimizaciya optichnih kharakteristik robochih sumishey HgVr ta HgSI eksilamp”], UJP, V. 47, № 1, pp. 24 – 27.
- [16] Malinina A., Malinin A. (2018) ”Experimental and analytical characterization of dielectric barrier discharge in the mixture of HgI^2 vapor, Xe and He gas formula”, Engineering Physics. № 5(2), pp. 14 – 19.

- [17] Malinina A.A., Aksenyuk I.I. (2019) "Emission characteristics and parameters of gas discharge plasma on mixtures of mercury dichloride vapor, neon and small addition of nitrogen", *Plasma Res. Express*, № 1, 035008, pp. 1 – 12.
- [18] Shevera V.S., Malinin A.N., Shuaibov A.K. (1983) "Investigation of the excitation and quenching of the $B^2\Sigma_{1/2}^+$ state of CdI^* in a pulsed dielectric discharge", *Jh. of Applied Spectroscopy*, V. 39, № 3, pp. 476 – 478.
- [19] Konoplev A.N., Kelman V.A., Shevera V.S. (1983) Investigation of the radiation of a pulsed discharge in mixtures of ZnI_2 , CdI_2 and HgI_2 with helium and neon, *Jh. of Applied Spectroscopy*, V. 39, № 2, pp. 315 – 317.
- [20] Kikoin I.K. (1976) Tables of physical quantities: directory [Tablicy fizicheskikh velichin: spravochnik], M.: Atomizdat, 1008 p.
- [21] Pears R.W.B. (1963) The Identification of Molecular Spectra, London: Chapman Hall LTD., 347 p.
- [22] Zaydel' A.N., Prokof'ev V.K., Rayskiy S.M., Slavnyy V.A., Shreyder E.Ya. (1977) Spectral line tables. [Tablicy spektral'nyh liniy], M.: Nauka, 800 p.
- [23] Prokop'ev V.E., Yacenko A.S. (1981) Energy levels and radiation transitions of neutral atoms ["Urovni energiy i radiacionnye perehody neytral'nyh atomov"], Novosibirsk, Preprint IAE SO AN SSSR, № 161, 52 p.
- [24] Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. (2005) "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models", *Plasma Sources Sci Technol.*, № 14, pp. 722 – 733.
- [25] <https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>.
- [26] Konoplev A. N., Chavarga N.N., Slavik V.N., Shevera V.S. (1989) "Dissociative excitation of CdJ_2 by electron impact" ["Dissociativnoe vozбуzhdenie CdJ_2 elektronnyim udarom"], *Pis'ma v ZhTF*, V. 15, № 22, pp. 48 – 51.
- [27] Smirnov Yu.M. (2000) "Inelastic Collisions of Slow Electrons with Cadmium(II) Iodide Molecules", *High Energy Chemistry*, V.34, № 6, pp. 351 – 355.
- [28] Konoplev A. N., Slavik V.N., Shevera V.S. (1990) "Dissociative ionization of CdJ_2 molecules by electron impact" ["Dissociativnaya ionizaciya molekul CdJ_2 elektronnyim udarom"], *Pis'ma v ZhTF*, V. 16, № 19, pp. 86 – 89.
- [29] Malinina A.O., Shuaibov O.K., Malinin O.M. (2019) "Mechanism enhancing the emission power of gas-discharge lamps based on mixtures of neon, nitrogen, and mercury dichloride vapor in the blue-green spectral interval" ["Mekhanizm zbilshennia potuzhnosti vyprominiuvannia hazorozriadnoi lampy na sumishakh pariv dykhlorydu rtuti, neonu ta azotu v syno – zelenomu spektralnomu diapazoni"], *Ukr. J. Phys.*, V. 64, № 9, pp. 797 – 806.
- [30] Dacyuk V.V., Izmaylov I.A., Kochelap V.A. (1998) "Vibrational relaxation of excimers" ["Kolebatel'naya relaksaciya eksimernyh molekul"], *Physics-Uspekhi*, V. 168, № 4, pp. 439 – 464.
- [31] Rayzer Yu.P. (1987) Physics of gas discharge [Fizika gazovogo razryada], M.: Nauka, 592 p.

- [32] Ediger M.N., McCown, and J.G. Eden J.G.(1982) "CdI and CdBr photodissociation lasers at 655 and 811 nm: CdI spectrum identification and enhanced laser output with $^{114}\text{CdI}_2$ ", Appl. Phys. Lett , V. 40, № 2, pp. 99–101.

©Ужгородський національний університет