

# ЕМІСІЙНА СПЕКТРОСКОПІЯ ЕКСИПЛЕКСНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА НА СУМІШАХ ПАРІВ ДИБРОМІДУ КАДМІЮ З ГАЗАМИ

**М.М. Гуйван**

Ужгородський національний університет,  
фізичний факультет, кафедра квантової електроніки  
вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000  
e-mail: m\_guivan@rambler.ru

В статті наводяться результати досліджень спектральних характеристик випромінювання газорозрядної плазми атмосферного тиску на сумішах парів диброміду кадмію з газами (Ne, Ar, Kr, Xe та N<sub>2</sub>), яка збуджувалася розрядом через діелектрик при частоті повторення імпульсів напруги синусоїдальної форми до 140 кГц. Виявлено випромінювання ексиплексних молекул CdBr(*B*→*X*, *C*→*X*), а в сумішах з ксеноном також випромінювання ХеBr(*B*→*X*, *B*→*A*). Випромінювання ХеBr(*B*→*X*) домінує в спектрах при температурі суміші до 200<sup>0</sup>С. Подальше підвищення температури приводить до переважання випромінювання CdBr(*B*→*X*). Встановлено, що найбільша інтенсивність випромінювання CdBr(*B*→*X*) спостерігається в суміші CdBr<sub>2</sub>/Xe, причому при температурі суміші вище 250<sup>0</sup>С випромінювання розряду сріблясто-білого кольору.

## Вступ

Існуючі джерела спонтанного випромінювання по фізичній природі можна розділити на теплові та люмінесцентні. Теплові джерела (до них відносяться лампи розжарювання) мають низький ресурс, світловіддачу (близько 20 лм/Вт) та колір, що істотно відрізняється від кольору денного світла. Для люмінесцентних джерел характерні значно вищі величини світловіддачі (~100 лм/Вт) і ресурсу (до 15 тисяч годин) [1, 2].

Для отримання суцільного спектру випромінювання часто використовується плазма дуги в ксеноні, а також джерела світла на основі імпульсно-періодичного розряду в парах лужних металів [3, 4]. Крім того, для створення ефективних ширококутових джерел видимого випромінювання застосовують люмінофори, які збуджуються ультрафіолетовим (УФ) або ВУФ – випромінюванням ексимерних молекул Хе<sub>2</sub>\* [5]. Певний інтерес для створення джерел суцільного випромінювання може представляти

кластерна плазма, що генерує безперервне випромінювання у видимому діапазоні [6].

Актуальним залишається пошук ефективних ширококутових джерел випромінювання на основі емісії ексимерних і ексиплексних молекул [7]. Можливим кандидатом для цих цілей може служити випромінювання ексиплексної молекули CdBr (*B*→*X* перехід) [8].

У даній статті приведені результати спектроскопічних досліджень газорозрядної плазми в сумішах парів диброміду кадмію, інертних газів і азоту, яка збуджувалась бар'єрним розрядом з синусоїдальною формою імпульсів накачки.

## 1. Техніка експерименту

Характеристики бар'єрного розряду (БР) досліджувалися за допомогою експериментальної установки, яка детально описана в роботах [9, 10]. Використовувався малогабаритний циліндричний випромінювач з одним діелектричним бар'єром, виготовлений з кварцової трубки із зовнішнім діаметром 6 мм. У середині по осі розташований

молібденовий електрод. Розрядний проміжок становив 1.5 мм. Зовнішній електрод, який розташований на поверхні трубки, був виготовлений із сітки з коефіцієнтом пропускання  $T = 50\%$ . Парціальний тиск парів диброміду кадмію створювався одночасно шляхом саморозігріву робочої суміші за рахунок дисипації енергії розряду і за допомогою зовнішнього електронагрівача

Робочі суміші готувалися безпосередньо у випромінювачі. Значення парціального тиску парів  $\text{CdBr}_2$  визначалися по температурі найбільш холодної точки випромінювача на підставі інтерполяції довідкових даних роботи [11] і в наших умовах складала 0.01–1.8 Па. Парціальний тиск газів вимірювався з точністю до 10 Па.

Збудження робочих сумішей в бар'єрному розряді атмосферного тиску здійснювалося джерелом живлення з синусоїдальною формою вихідної напруги, з можливістю зміни частоти в межах 1–140 кГц, амплітудою імпульсів напруги до 10 кВ.

Реєстрація випромінювання розряду проводилася в напрямі, перпендикулярному бічній поверхні кварцової трубки і аналізувалося в спектральному діапазоні 200–900 нм. Спектри випромінювання записувалися за допомогою монохроматора Jobin Yvon TRIAX 550 (гратка 1200 штр./мм, кварцове оптичне волокно, CCD детектор Spectrum ONE, що охолоджувався рідким азотом). Спектральне розділення системи реєстрації складало 0.05 нм. Калібрування системи реєстрації в області 200–400 нм проводилося з допомогою дейтерієвої лампи, а в області 400–900 нм – еталонної вольфрамової лампи.

## 2. Результати та їх обговорення

Дослідження проводилися з використанням подвійних сумішей  $\text{CdBr}_2/(\text{Ne}, \text{Ar}, \text{Xe}, \text{N}_2)$ , а також потрійних сумішей  $\text{CdBr}_2/\text{Xe}/\text{Ne}(\text{Kr})$ . Колір розряду в початковій стадії залежав від роду буферного газу. У міру нагріву суміші спостерігався більш дифузний і однорід-

ний характер розряду, істотно згладжувався контраст яскравості в об'ємному розряді і філаментах.

Оглядові спектри випромінювання плазми БР на подвійній суміші парів диброміду кадмію з ксеноном у видимому, ближньому ІЧ і УФ діапазонах приведені на рис. 1, 2. У одержаних спектрах істотно виділяється широка система смуг з максимумом при  $\lambda = 797$  нм, яка відповідає електронно-коливальному переходу  $B^2\Sigma^+_{1/2} \rightarrow X^2\Sigma^+_{1/2}$  ексиплексних молекул  $\text{CdBr}$  [12]. Випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  проявляється, починаючи з  $\lambda \sim 400$  нм і перекриває весь видимий діапазон. Слід зазначити, що, починаючи з  $250^\circ\text{C}$  і в стаціонарному режимі (при температурі  $\sim 360^\circ\text{C}$ ), бар'єрний розряд в даній суміші горів сріблясто-білим кольором. Форма системи смуг  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  аналогічна смугам, що відповідають переходу  $B \rightarrow X$  в галогенідах ртуті і цинку, а саме: крутіше зростання інтенсивності з боку довгохвильової ділянки і повільний спад в короткохвильовій області. Як видно з рис. 1, дифузні смуги накладаються і утворюють широкий континуум. При збільшенні частоти слідування імпульсів накачки зростала яскравість смуги  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$ , при цьому форма смуги і положення максимуму випромінювання не мінялися. Під яскравістю молекулярної смуги вважалася площа під кривою на спектрі.

У видимій області в спектрі спостерігалися також інтенсивні лінії кадмію – триплет  $6s \rightarrow 5p$  (467.8, 480.0 і 508.6 нм) та лінія  $5d \rightarrow 5p$  (643.8 нм). У ближній інфрачервоній області спостерігалися лінії ксенону  $6p \rightarrow 6s$  при 823.2, 828.0, 834.7, 840.9 та 881.9 нм. Характерною особливістю спектру випромінювання БР на суміші  $\text{CdBr}_2/\text{Xe}$  в УФ діапазоні (рис. 2) є наявність смуг випромінювання ексиплексних молекул  $\text{XeBr}(B \rightarrow X)$  і  $\text{XeBr}(B \rightarrow A)$  з максимумами при 282 і 325 нм. Відзначимо, що смуга  $\text{XeBr}(B \rightarrow X)$  спостерігалася в другому порядку у видимому діапазоні і третьому порядку в ближньому ІЧ діапазоні (рис. 1).

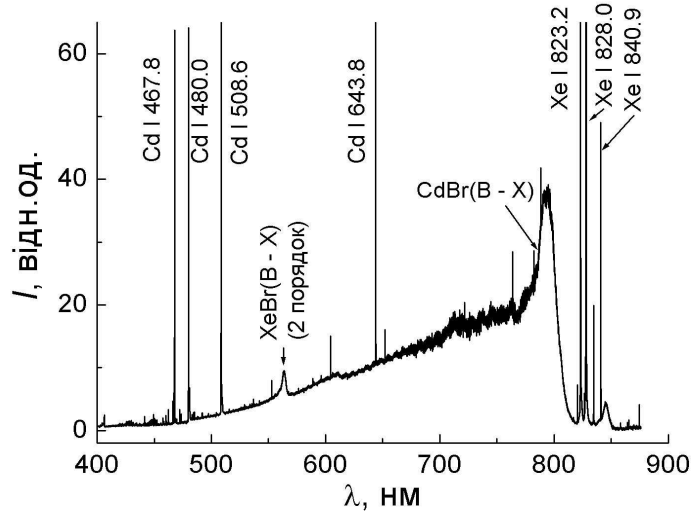


Рис. 1. Оглядовий спектр випромінювання бар'єрного розряду у видимій та ближній ІЧ області на суміші  $\text{CdBr}_2/\text{Xe} = 1.8 \text{ Па}/85 \text{ кПа}$ .

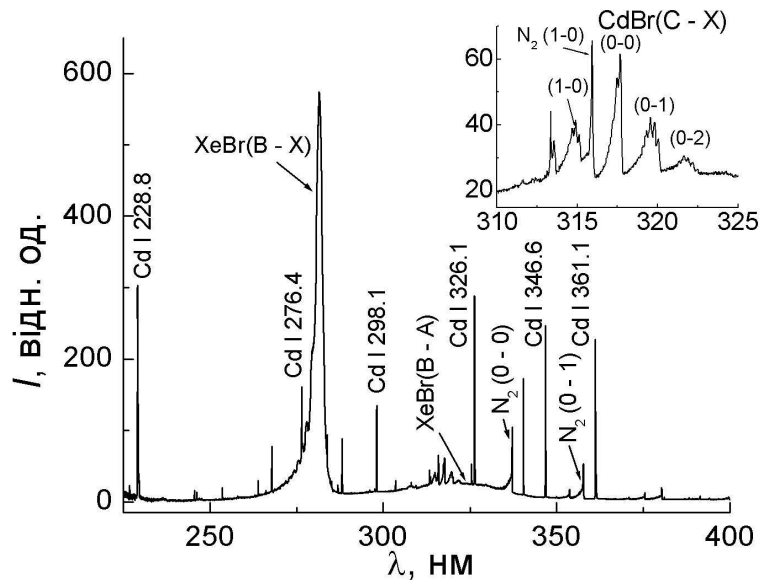


Рис. 2. Оглядовий спектр випромінювання бар'єрного розряду в УФ області на суміші  $\text{CdBr}_2/\text{Xe} = 1.8 \text{ Па}/85 \text{ кПа}$ . На вставці приведена частина спектру в діапазоні 310–325 нм.

Інтенсивність смуги  $\text{XeBr}(B \rightarrow X)$  у міру збільшення температури середовища падала. Але навіть при  $360^\circ\text{C}$  вона була вищою за інтенсивність випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  при 797 нм в 15 разів. Оскільки спектральна напівширина смуги  $\text{XeBr}(B \rightarrow X)$  складає всього 2 нм, яскравість випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  була більша в 2 рази, ніж яскравість випромінювання  $\text{XeBr}(B \rightarrow X)$ . Крім того, спостерігалися інтенсивні лінії кадмію  $5p \rightarrow 5s$  (228.8, 276.4, 298.1, 326.1, 346.6 і

361.1 нм), а на фоні смуги  $\text{XeBr}(B \rightarrow A)$  спостерігалися смуги  $\text{CdBr}(C \rightarrow X)$ .

У спектрах випромінювання БР на сумішах  $\text{CdBr}_2/\text{Ne}$  та  $\text{CdBr}_2/\text{Ar}$ , окрім випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  і ліній кадмію, у видимій та ближній ІЧ області спостерігалися атомарні лінії буферного газу (неону чи аргону), інтенсивність яких суттєво зменшувалася у міру розігрівання робочого середовища. Крім того, в діапазоні 315–322 нм спостерігалися смуги  $\text{CdBr}(C \rightarrow X)$ . У суміші з аргоном розряд

горів білим кольором, подібно до суміші з ксеноном.

У спектрі випромінювання БР на суміші парів диброміду кадмію з азотом в УФ області спостерігалися смуги молекулярного азоту, які відповідають переходу  $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$  другої позитивної системи  $N_2$ , а також при температурах до

$100^\circ\text{C}$  смуга  $\text{Br}_2^*$  з максимумом при  $\lambda = 292$  нм. У видимому діапазоні спостерігалось випромінювання молекул  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  і ліній кадмію. Слід зазначити, що інтенсивність ліній кадмію в УФ і видимому діапазоні була значно нижча, ніж в інших сумішах. Колір розряду мав рожевий відтінок.

Таблиця.

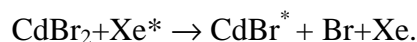
Яскравість смуги випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  в бар'єрному розряді на сумішах парів диброміду кадмію з газами

Суміш	Парціальні тиски компонентів	Яскравість $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$ , відн. од.
$\text{CdBr}_2/\text{Ne}$	1.6 Па/100 кПа	0.32
$\text{CdBr}_2/\text{Ar}$	1.6 Па/100 кПа	0.2
$\text{CdBr}_2/\text{Xe}$	1.8 Па/100 кПа	1
$\text{CdBr}_2/\text{N}_2$	1.8 Па/100 кПа	0.25
$\text{CdBr}_2/\text{Xe}/\text{Ne}$	1.8 Па/85 кПа/15 кПа	0.94
$\text{CdBr}_2/\text{Xe}/\text{Kr}$	1.8 Па/8 кПа/92 кПа	0.45

Інтенсивність атомарних ліній і яскравість молекулярних смуг сильно залежали від температури робочої суміші. Інтенсивність ліній кадмію росла з підвищенням температури, тоді як інтенсивність атомарних ліній буферних газів і яскравість смуги молекулярного бромиду падала. Це обумовлено зменшенням температури електронів в розряді з підвищенням концентрації легко іонізованих частинок, зокрема молекул диброміду кадмію і атомів кадмію, що приводило до зміни ефективності збудження ліній буферного газу. Слід зазначити, що в спектрах сумішей, які не містять азот, смуги другої позитивної системи азоту спостерігалися внаслідок горіння розряду (паразитного) в повітрі між зовнішньою поверхнею кварцової трубки і сіткою.

Значення яскравості смуги випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  в БР на робочих сумішах різного складу приведені в таблиці. Потужність, що розсіюється в контурі генератора, складала 8.7 Вт при частоті слідування імпульсів 10 кГц. Як видно з таблиці, оптимальною з точки зору максимального виходу  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  була суміш  $\text{CdBr}_2/\text{Xe}$ . Це свідчить про те, що, крім дисоціативного збудження молекул диброміду кадмію електронним ударом,

істотним каналом утворення ексиплексних молекул  $\text{CdBr}^*$ , імовірно, є реакція взаємодії ксенону в метастабільному стані  $^3P_2$  з молекулами диброміду кадмію:



### Висновки

Таким чином, дослідження спектральних характеристик бар'єрного розряду атмосферного тиску на сумішах парів диброміду кадмію з інертними газами або молекулярним азотом виявило інтенсивне широкосмугове випромінювання молекул  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  у області 400–820 нм з максимумом при  $\lambda = 797$  нм. Крім того, в спектрах присутнє інтенсивне випромінювання в УФ області: спектральні смуги молекули  $\text{XeBr}(B \rightarrow X)$ ,  $\lambda = 282$  нм), лінії атомів кадмію при 228.8, 326.1, 346.6 і 361.1 нм, відповідно. Оптимальною для отримання максимального виходу випромінювання  $\text{CdBr}(B \rightarrow X)$  є суміш  $\text{CdBr}_2/\text{Xe}$ . При температурі вище  $250^\circ\text{C}$  випромінювання розряду в даній суміші було сріблясто-білого кольору. Показана можливість керування спектральним

складом випромінювання розряду за рахунок зміни температури робочої суміші.

Бар'єрний розряд атмосферного тиску на сумішах парів диброміду кадмію з ксеноном може бути використаний для створення ексилампи білого кольору.

### Література

1. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
2. Соснин Э.А. Закономерности развития газоразрядных источников спонтанного излучения: Руководство для разработчика. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. – 106 с.
3. Александров А.Ф. Рухадзе Ф.Ф. Физика сильноточных электроразрядных источников света. М.: Атомиздат, 1976. – 184 с.
4. Бакшт Ф. Г., Лапшин В.Ф. // Журн. технической физики, 1997. – Т. 67. – № 9. – С. 22.
5. Eliasson B, Kogelschatz U. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1991. V. 19. – p. 309.
6. Смирнов Б.М. // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 5. С. 495.
7. Шуаибов А.К., Дашенко А.И., Шевера И.В. // Квантовая электроника, 2002. – Т 32. – № 3. – С. 279.
8. Хьюбер К.П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. Часть 1: Пер. с англ. Под ред. Соболева Н.Н. М.: Мир, 1984. – 408 с.
9. Гуйван Н.Н., Малинин А.Н. // Оптика и спектроскопия, 2005. – Т. 99. – № 5. – С. 733.
10. Гуйван Н.Н., Малинин А.Н. // Теплофизика высоких температур, 2006. - Т. № 3. – С 1.
11. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. Свойства неорганических соединений. Справочник. Л.: Химия, 1983. – 392 с.
12. Pearse R.W., Gaydon A.G. The identification of molecular spectra. Third edition.-L.: Choptman Holl LTD, 1963. - 347 p.

## EMISSION SPECTROSCOPY OF THE EXCIPLEX RADIATOR ON MIXTURES OF CADMIUM DIBROMIDE WITH GASES

**M.M. Guivan**

Uzhhorod National University,  
Faculty of physics, department of quantum electronics,  
Voloshina str., 54, Uzhhorod 88000, Ukraine

The spectral characteristics of gas discharge plasma operated with the mixtures of cadmium dibromide vapors with gases (Ne, Ar, Kr, Xe and N<sub>2</sub>) at atmospheric pressure have been presented. Excitation was carried out by the AC-driven dielectric barrier discharge at the frequency up to 140 kHz. An exciplex radiation of CdBr(*B*→*X*, *C*→*X*) as well as XeBr(*B*→*X*, *B*→*A*) (in the mixtures with xenon) have been revealed. The XeBr(*B*→*X*) emission dominates in the spectra at the working temperature up to 200<sup>0</sup>C. The subsequent increase of the temperature results in predominance of the CdBr(*B*→*X*) radiation. The maximum intensity of the CdBr(*B*→*X*) emission was observed for CdBr<sub>2</sub>/Xe mixture. A discharge colour was silver-white when temperature of this mixture was over 250<sup>0</sup>C.