

УДК 537.525:539.19

М.С. Кленівський, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпеник

Інститут електронної фізики НАН України

вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017

e-mail: mironkle@rambler.ru

## ЕМІСІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІМПУЛЬСНО-ПЕРІОДИЧНИХ РОЗРЯДІВ У ПАРОГАЗОВИХ СУМІШАХ ІНЕРТНИЙ ГАЗ – ГАЛОГЕНІДИ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ

Досліджено УФ-люмінесценцію ексиплексних молекул, що утворюються у поздовжньому імпульсно-періодичному розряді в нетрадиційних сумішах інертного газу з парою галогенідів лужних металів Хе-NaCl, Хе-KCl, Хе-CsCl, Хе-CsBr, Kr-KCl та Хе-CsCl-CsBr. Отримано люмінесценцію ексиплексних молекул ХеCl\* (308 нм), ХеBr\* (282 нм), KrCl\* (222 нм) та досліджено умови її збудження в парогазових сумішах. При збудженні потрібної суміші Хе-CsCl-CsBr отримано одночасну люмінесценцію ексиплексних молекул ХеCl\* та ХеBr\*, що сприяло розширенню спектрального складу УФ-випромінювання. Досліджено енергетичні параметри розряду в парогазових сумішах та визначено його оптимальні робочі умови.

**Ключові слова:** парогазова суміш, поздовжній імпульсний розряд, УФ-випромінювання, ексиплексні молекули.

### Вступ

Бурхливий розвиток різноманітних новітніх технологій створює високий попит на джерела УФ-випромінювання. Одним з найбільш зручних методів отримання потужного випромінювання у спектральній УФ-області є збудження люмінесценції ексиплексних молекул, а саме – моногалогенідів важких інертних газів.

На даний час створено велику кількість різних джерел УФ-випромінювання, переважно на подвійних газових сумішах, які випромінюють на переходах ексиплексних молекул галогенідів інертних газів. Слід відмітити, що до складу робочих сумішей, які найкращим чином зарекомендували себе на практиці, входять токсичні гази. Тому незважаючи на широкий спектр існуючих газових сумішей, що використовуються для отримання випромінювання ексиплексних молекул, не аби який інтерес все ж представляють дослідження робочих середовищ на нових сумішах, зокрема, нетрадиційних, які б мали подібні емісійні властивості, але

містили б тільки нетоксичні та екологічно безпечні компоненти.

Вперше такого роду суміш була використана у плазмовому джерелі випромінювання [1, 2], де пара NaCl, що служила галогеноносієм, змішувалась з плазмовим потоком інертного газу Хе. При цьому було отримане потужне УФ-випромінювання на переході ексиплексної молекули ХеCl\* (308 нм). Ці дослідження стимулювали виконання роботи [3], в якій проведено розрахункове моделювання енергетичних характеристик робочого середовища на суміші Хе-NaCl зі збудженням електронним пучком і показано, що таке робоче середовище може забезпечувати високі питомі потужності УФ-випромінювання.

Запропонована в роботах [1-3] суміш Хе-NaCl вперше була використана нами для отримання УФ-випромінювання ексиплексних молекул ХеCl\* у високовольтному імпульсно-періодичному розряді [4]. Згодом було показано, що ще з більшою ефективністю молекули ХеCl\* утворюються при збудженні у розряді парогазової суміші Хе-KCl [5]. Ці роботи

якісно засвідчили, що пошук ефективних робочих сумішей інертних газів з галогенідами лужних металів (ЛМ) є дійсно доволі перспективним.

У подальшому з метою пошуку парогазових сумішей, збудження яких в розряді дозволило б отримати більш інтенсивну люмінесценцію ексиплексних молекул, отримати люмінесценцію у більш короткохвильовій області спектру та збагатити спектр випромінювання за рахунок збудження переходів одночасно двох ексиплексних молекул, були проведені дослідження розряду в парогазових сумішах Хе-СsCl [6], Kr-КCl [7], Хе-СsBr [8] та Хе-СsCl-СsBr [9].

В даній роботі проведено порівняльний аналіз та обговорення основних результатів досліджень емісійних характеристик імпульсно-періодичних розрядів у парогазових сумішах криптону та ксенону з галогенідами ЛМ.

#### Техніка і методика дослідження

Збудження люмінесценції ексиплексних молекул в парогазових сумішах проводилося у вакуумно-герметичній газорозрядній трубці (ГРТ), виготовленій на основі циліндричної трубки з плавленого кварцу внутрішнім діаметром 16 мм і довжиною 300÷400 мм. З протилежних кінців кварцової трубки вклеєно мідні коаксіальні електроди. Вздовж міжелектродного проміжку розміщувалися керамічні кільця, які обмежували діаметр розряду до 12 мм, а в проміжках між ними знаходився порошок солі галогеніду ЛМ. Відкачування ГРТ реалізовувалося до залишкового тиску порядку  $\sim 10^{-2}$  Тор, після чого напускався інертний газ. Для забезпечення зміни тиску пари галогеніду ЛМ у широких межах ГРТ було оснащено резистивним нагрівачем. Контроль температури нагріву порошку галогеніду ЛМ здійснювався термопарою, встановленою між нагрівачем та стінкою ГРТ.

Накачка парогазової суміші в ГРТ здійснювалася високовольтним поздовжнім імпульсно-періодичним розрядом, збудження якого реалізовувалося за схемою резонансного заряду накопичувально-

го конденсатора ємністю 1650 пФ та подальшим прямим його розрядом на ГРТ за допомогою тиратронного комутатора ТГІ1-2000/35. Схемою збудження забезпечувався діапазон робочих частот до 10 кГц.

Реєстрація інтегрованих у часі емісійних спектрів розряду здійснювалася ССД-камерою HS 101H, встановленою на виході спектрального монохроматора MS 7504i. Амплітудно-часові характеристики реєструвалися з використанням ФЭУ-106, сигнал з якого виводився на осцилограф С1-99. На інший канал осцилографа подавався сигнал з датчика струму. Визначення повної середньої потужності УФ-випромінювання розряду здійснювалося калориметром ИМО-2Н із застосуванням світлофільтра УФС 2, після чого проводився перерахунок, який враховував специфіку вимірювання і конструкції ГРТ.

#### Результати та їх обговорення

В роботі досліджені спектральні та амплітудно-часові характеристики випромінювання, а також залежності виходу УФ-люмінесценції ексиплексних молекул від основних факторів та умов збудження розряду.

Типові спектральні характеристики випромінювання імпульсно-періодичного розряду в парогазових сумішах, що досліджувались, приведено на рис. 1.

Спектральний розподіл випромінювання розряду у бінарних парогазових сумішах, що досліджувалися у роботі, не відрізняється суттєво від спектрального складу випромінювання ексиламп на традиційних газових сумішах. Близько 70% потужності УФ-випромінювання розряду зосереджено у смузі  $B \rightarrow X$  робочої ексиплексної молекули. Таким чином, при переході від традиційних на досліджені нами нові робочі суміші спектральний склад УФ-випромінювання розряду залишиться практично незмінним.

Оскільки значення робочих тисків досліджуваних сумішей були невисокими, то процеси коливної релаксації не є надто сильно вираженими і їх роллю практично можна знехтувати. У зв'язку з цим можна

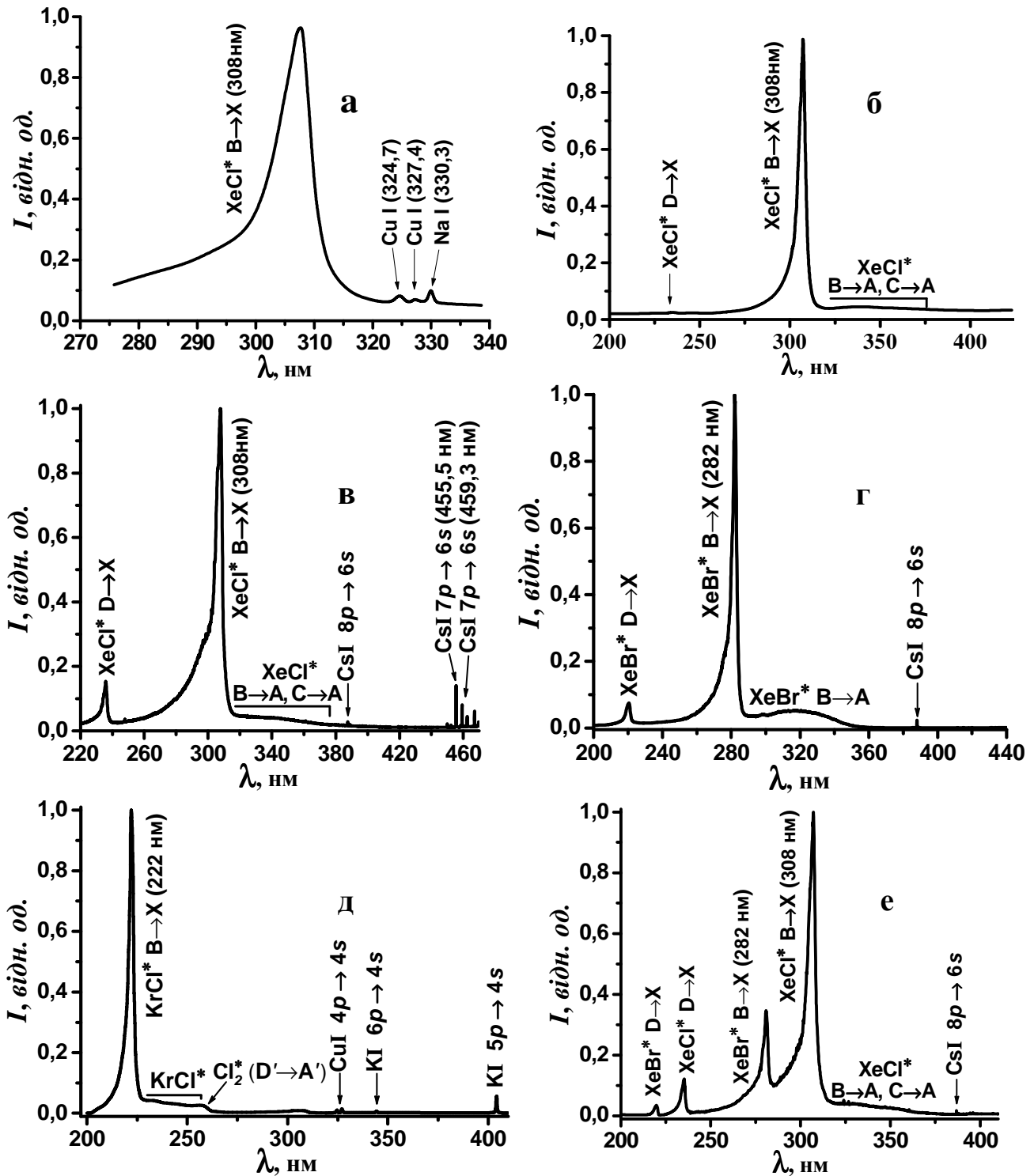


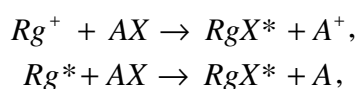
Рис. 1. Інтегровані у часі спектри люмінесценції поздовжнього імпульсно-періодичного розряду: а) суміш Xe-NaCl,  $U_B = 5$  кВ,  $I_B = 100$  мА,  $f = 4$  кГц,  $p(\text{Xe}) = 21$  Тор,  $T = 1035$  К; б) суміш Xe-KCl,  $U_B = 4,6$  кВ,  $I_B = 100$  мА,  $f = 5$  кГц,  $p(\text{Xe}) = 30$  Тор,  $T = 1060$  К; в) суміш Xe-CsCl,  $U_B = 5$  кВ,  $I_B = 155$  мА,  $f = 6$  кГц,  $p(\text{Xe}) = 30$  Тор,  $T = 950$  К; г) суміш Xe-CsBr,  $U_B = 4$  кВ,  $I_B = 160$  мА,  $f = 7$  кГц,  $p(\text{Xe}) = 20$  Тор,  $T = 950$  К; д) суміш Kr-KCl,  $U_B = 5$  кВ,  $I_B = 100$  мА,  $f = 4$  кГц,  $p(\text{Xe}) = 45$  Тор,  $T = 1130$  К; е) суміш Xe-CsBr-CsCl,  $U_B = 4$  кВ,  $I_B = 180$  мА,  $f = 7$  кГц,  $p(\text{Xe}) = 20$  Тор,  $T = 950$  К.

вважати, що випромінювання ексиплексних молекул, в основному, відбувається з тих же коливних рівнів, на яких вони і утворилися. Аналіз структури  $B \rightarrow X$ -смуги випромінювання ексиплексних молекул

показує, що в межах умов експерименту в спектрі емісії домінують переважно переходи з найнижчих коливних рівнів електронного  $B$ -стану. Відтак можна стверджувати, що і заселення ексиплекс-

них молекул відбувається переважно поблизу дна потенціальної ями електронного  $B$ -терму.

Цілком очевидно, що за даних умов утворення ексиплексних молекул може відбуватися тільки за рахунок бінарних процесів, а тричастинкова реакція іон-іонної рекомбінації не може давати суттєвого внеску в генерацію ексиплексних молекул. Утворення ексиплексних молекул у такому випадку відбувається за рахунок реакцій заміщення [1-3], які одночасно протікають нейтральним та іонним каналами, ефективно долучаючи до процесу як збуджені атоми, так і іони інертного газу



де  $AX$  – молекула галогеніду ЛМ,  $A$  – атом ЛМ,  $Rg$  – атом інертного газу,  $RgX$  – молекула галогеніду інертного газу.

Відмітимо, що при збудженні суміші  $Xe-CsCl$  у розряді [6] досягнуто більшу середню потужність люмінесценції ексиплексних молекул  $XeCl^*$  (308 нм), ніж у сумішах  $Xe-NaCl$  [4] та  $Xe-KCl$  [5]. Що стосується потрібної суміші  $Xe-CsBr-CsCl$ , то її використання дозволило вперше для такого класу сумішей отримати одночасну люмінесценцію ексиплексних молекул  $XeCl^*$  та  $XeBr^*$ . При цьому, інтенсивність випромінювання ексиплексних молекул  $XeCl^*$  виявилася відчутно вищою.

Однією з особливостей спектральних характеристик досліджуваних парогазових сумішей, на відміну від традиційних, є наявність в них резонансних ліній атомів ЛМ. Емісія резонансних ліній ЛМ зумовлена, головним чином, ефективним збудженням електронами розряду атомів ЛМ, які вивільняються в плазмі розряду як побічний продукт реакцій утворення ексиплексних молекул, а також при дисоціації молекул галогеніду ЛМ. Хоча у спектрах присутні лінії атомів ЛМ, інтегральна енергія, яка випромінюється ними за оптимальних умов, є незначною і фактично не понижує енергетичних характеристик УФ-випромінювання розряду.

На рис. 2 приведені часові форми імпульсу струму в ГРТ та імпульсу емісії

переходу  $B \rightarrow X$  ексиплексних молекул для сумішей  $Xe-NaCl$ ,  $Xe-CsCl$  та  $Xe-CsBr$ . Тривалість імпульсу струму за основою складала 200-500 нс. Тривалість імпульсу емісії перевищувала 1 мкс для всіх випадків, за винятком суміші  $Xe-NaCl$ . Випромінювання ексиплексних молекул бере початок майже одночасно з розвитком струму в ГРТ, а максимум пікової потужності випромінювання ексиплексних молекул досягається під час протікання струму. Значна частина енергії випромінювання ексиплексних молекул майже для всіх сумішей (за винятком  $Xe-NaCl$ ) припадає на післясвічення розряду. Це свідчить про те, що протягом імпульсу збудження йде активна генерація і накопичення збуджених атомів та іонів інертного газу, значний резерв яких після закінчення імпульсу збудження підтримує подальше протікання реакцій утворення ексиплексних молекул.

Для кожної з розглянутих парогазових сумішей проведені дослідження залежностей виходу УФ-люмінесценції ексиплексних молекул від таких найбільш вагомих факторів: тиску інертного газу, температури нагріву галогеніду ЛМ, частоти слідування імпульсів збудження та напруги збудження розряду. Проведеними дослідженнями визначено оптимальні умови збудження УФ-люмінесценції розряду в парогазових сумішах, при яких досягається її максимальна середня потужність.

У таблиці приведено порівняння енергетичних параметрів розряду в парогазових сумішах при визначених оптимальних робочих умовах. Зокрема, приведені значення оптимальних робочих тисків інертного газу та температури стінки ГРТ, що відповідає оптимальній температурі нагріву солі галогеніду ЛМ.

Порівняння результатів показує, що для газорозрядного  $XeCl$ -випромінювача найбільш перспективною парогазовою сумішшю з поміж апробованих є суміш  $Xe-CsCl$ . У цьому випадку було отримано максимальне значення середньої потужності УФ-випромінювання та найнижче оптимальне значення робочої температури, що складають, відповідно, ~10 Вт та ~950 К. Відповідна питома потужність УФ-випромінювання розряду в суміші  $Xe-CsCl$

складала  $\sim 0,22 \text{ Вт/см}^3$ , що відповідає значенню ККД  $\sim 1\%$ .

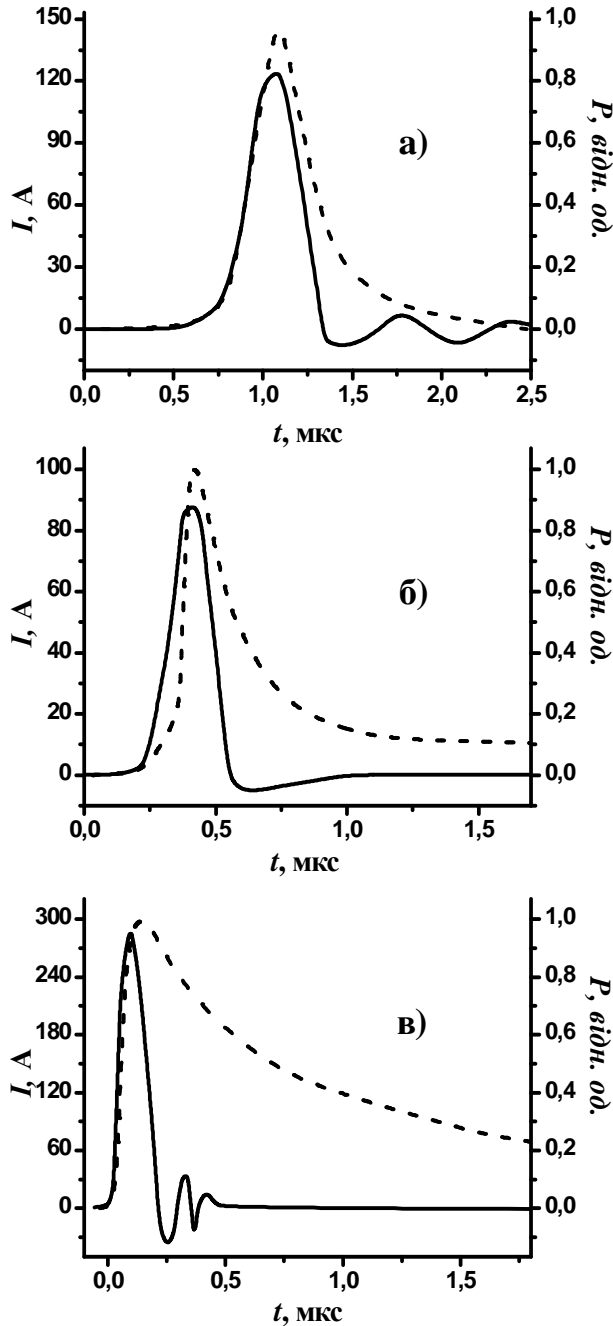


Рис. 2. Часові залежності імпульсів струму в ГРТ (суцільна лінія) та емісії переходу  $B \rightarrow X$  робочих ексиплексних молекул (штрихова лінія): а) суміш Xe-NaCl,  $U_B = 5 \text{ кВ}$ ,  $f = 4 \text{ кГц}$ ,  $p(\text{Xe}) = 21 \text{ Тор}$ ,  $T = 1035 \text{ К}$ ; б) суміш Xe-CsCl,  $U_B = 5 \text{ кВ}$ ,  $f = 4 \text{ кГц}$ ,  $p(\text{Xe}) = 40 \text{ Тор}$ ,  $T = 930 \text{ К}$ ; в) суміш Xe-CsBr,  $U_B = 4 \text{ кВ}$ ,  $f = 7 \text{ кГц}$ ,  $p(\text{Xe}) = 20 \text{ Тор}$ ,  $T = 958 \text{ К}$ .

Що стосується потужностей УФ-випромінювання, то серед досліджених сумішей

максимальні значення були реалізовані в парогазовій суміші Xe-CsBr. Вихідна середня питома потужність УФ-випромінювання розряду досягає близько  $0,35 \text{ Вт/см}^3$  зі значенням ККД  $\sim 1\%$ .

### Висновки

1. Досліджено люмінесцентні властивості високовольтного імпульсного розряду у нетрадиційних сумішах Xe-NaCl, Xe-KCl, Xe-CsCl, Xe-CsBr, Kr-KCl та Xe-CsCl-CsBr. Вперше при збудженні в розряді сумішей інертного газу з паром галогеніду ЛМ отримано інтенсивну люмінесценцію ексиплексних молекул  $\text{XeCl}^*$  (308 нм),  $\text{XeBr}^*$  (282 нм) та  $\text{KrCl}^*$  (222 нм).
2. З'ясовано, що переважна частина енергії випромінювання ексиплексних молекул припадає на післясвічення розряду. Близько 70% потужності УФ-випромінювання розряду зосереджено у смузі  $B \rightarrow X$  робочої ексиплексної молекули.
3. Визначено енергетичні параметри розряду в парогазових сумішах та досліджено оптимальні робочі умови. У суміші Xe-CsBr досягнуто питому середню потужність УФ-випромінювання розряду  $0,35 \text{ Вт/см}^3$ , що відповідає значенню ККД  $\sim 1\%$ . При збудженні у розряді парогазової суміші Xe-CsCl досягнуто питому середню потужність люмінесценції ексиплексних молекул  $\text{XeCl}^*$  на рівні  $0,22 \text{ Вт/см}^3$ .
4. Вперше при збудженні розряду в суміші Xe-CsCl-CsBr отримано одночасну емісію двох ексиплексних молекул –  $\text{XeCl}^*$  та  $\text{XeBr}^*$ . Досягнуто питомої середньої потужності УФ-випромінювання розряду за рахунок збудження одночасної люмінесценції ексиплексних молекул  $\text{XeCl}^*$  та  $\text{XeBr}^*$  на рівні  $0,25 \text{ Вт/см}^3$ , що відповідає значенню ККД  $\sim 0,7\%$ .

**Енергетичні параметри поздовжнього імпульсно-періодичного розряду в сумішах інертних газів з парами галогенідів ЛМ**

Робоча парогазова суміш	Xe-NaCl	Xe-KCl	Xe-CsCl	Xe-CsBr	Xe-CsCl-CsBr	Kr-KCl
Робоча ексиплексна молекула	XeCl*	XeCl*	XeCl*	XeBr*	XeCl*, XeBr*	KrCl*
$\lambda$ , нм	308	308	308	282	308, 282	222
Температура стінки ГРТ, К	1100÷1150	1090÷1110	940÷960	940÷970	940÷970	1110÷1170
Тиск інертного газу, Тор	30÷40	20÷27	10÷45	10÷35	4÷7	7÷12
Частота збудження розряду, кГц	4÷5	3÷4	7÷10	9÷10	8÷10,5	3÷4
Напруга на випрямлячі, кВ	4,5÷5	5÷6	5÷6	5÷6,5	4÷5,5	8÷9
Повна середня потужність випромінювання розряду, Вт	~0,5	~8,3	~10	~12	~8,5	–
Питома середня потужність, Вт/см <sup>3</sup>	~0,01	~0,18	~0,22	~0,35	~0,25	–
ККД	~0,2%	~1,2%	~1%	~1%	~0,7%	–

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

- Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В. и др. Экспериментальные исследования образования молекул XeCl\* при взаимодействии плазменного потока Xe с парами NaCl // ЖТФ. – 1993. – № 2. – С. 43-51.
- Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В. и др. Исследования образования эксимерных молекул при взаимодействии плазменного потока инертного газа с парами галогенидов щелочных металлов // ЖТФ. – 1995. – № 5. – С. 9-20.
- Бойченко А.М. Расчетное моделирование эксиплексной XeCl-лампы (308 нм) в смеси Xe-NaCl с накачкой жестким ионизатором // Квант. эл. – 1999. – № 2. – С. 163-167.
- Рийвес Р.Б., Жменяк Ю.В., Светличный Е.А., и др. Источник УФ излучения на основе импульсного разряда в смеси Xe-NaCl // ЖТФ. – 2004. – № 10. – С. 90-93.
- Рийвес Р.Б., Жменяк Ю.В., Кельман В.А. и др. Эксилампа на смеси Xe-KCl // ЖТФ. – 2006. – № 10. – С. 102-105.
- Кленовский М.С., Кельман В.А., Жменяк Ю.В. и др. Электроразрядный источник УФ-излучения на основе парогазовой смеси Xe-CsCl // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – № 5. – С. 117-122.
- Кленовский М.С., Рийвес Р.Б., Кельман В.А. и др. Эксиплексная лампа на парогазовой смеси Kr-KCl // ЖТФ. – 2009. – Т. 79. – № 7. – С. 81-84.
- Klenivskiy M.S., Kel'man V.A., Zhmenyuk Yu.V., Shpenik Yu.O. Electric-discharge source of spontaneous UV radiation based on xenon and cesium bromide gas-vapor mixture // 7<sup>th</sup> International Conference on Reactive Plasmas and 63<sup>rd</sup> Gaseous Electronics Conference. Paris. October 4-8, 2010. – СТР-196.
- Klenivskiy M., Kelman V., Zhmenyuk Yu. and Shpenik Yu. Emission properties of triple Xe/CsBr/CsCl gas-vapor mixture excited by an electric discharge for a two-wave exci-lamp // 30<sup>th</sup> International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG-2011). Belfast, Northern Ireland, UK. – 2011. – D15-035.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2012

M.S. Klenivskiy, V.A. Kelman, Yu.V. Zhmenyak, Yu.O. Shpenik

Institute of Electron Physics NAS of Ukraine

88017, Uzhhorod, Universytetska Str., 21

e-mail: mironkle@rambler.ru

## EMISSION CHARACTERISTICS OF PULSE-PERIODIC DISCHARGE IN THE GAS/VAPOUR MIXTURES OF RARE GAS WITH ALKALI HALIDES

UV luminescence of exciplex molecules forming in the longitudinal pulse-periodic discharge in Xe-NaCl, Xe-KCl, Xe-CsCl, Xe-CsBr, Kr-KCl, and Xe-CsCl-CsBr nontraditional mixtures of rare gas with alkali halide vapours was investigated. The luminescence of XeCl\* (308 nm), XeBr\* (282 nm), and KrCl\* (222 nm) exciplex molecules was obtained and its excitation conditions in the gas/vapour mixtures were investigated. At the excitation of a triple Xe-CsCl-CsBr mixture, a simultaneous luminescence of XeCl\* and XeBr\* exciplex molecules was obtained that promoted extension of the UV radiation spectral composition. The energy parameters of the discharge in gas/vapour mixtures were investigated and the discharge optimal operating conditions were defined.

**Keywords:** gas/vapour mixture, longitudinal pulsed discharge, UV radiation, exciplex molecules.

М.С. Кленовский, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпеник

Институт электронной физики НАН Украины

ул. Университетская, 21, Ужгород, 88017

e-mail: mironkle@rambler.ru

## ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ИНЕРТНЫЙ ГАЗ – ГАЛОГЕНИДЫ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Исследовано УФ-люминесценцию эксиплексных молекул, образующихся в продольном импульсно-периодическом разряде в нетрадиционных смесях инертного газа с парами галогенидов щелочных металлов Xe-NaCl, Xe-KCl, Xe-CsCl, Xe-CsBr, Kr-KCl и Xe-CsCl-CsBr. Получена люминесценция эксиплексных молекул XeCl\* (308 нм), XeBr\* (282 нм), KrCl\* (222 нм) и исследованы условия ее возбуждения в парогазовых смесях. При возбуждении тройной смеси Xe-CsCl-CsBr получена одновременная люминесценция эксиплексных молекул XeCl\* и XeBr\*, что способствовало расширению спектрального состава УФ-излучения. Исследованы энергетические параметры разряда в парогазовых смесях и определены его оптимальные рабочие условия.

**Ключевые слова:** парогазовая смесь, продольный импульсный разряд, УФ-излучение, эксиплексные молекулы.