

УДК 621.373.826.038.823

А.О. Малініна

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54  
e-mail: ant.malinina@yandex.ru

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПРОМІНЮВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ НА СУМІШАХ ПАРІВ ДИБРОМІДУ РТУТІ З ГАЗАМИ

Наведені результати досліджень енергетичних характеристик випромінювання низькотемпературної плазми на сумішах парів диброміду ртуті з азотом, гексафторидом сірки та гелієм. Створення плазми здійснювалось в циліндричному пристрої з об'ємом випромінювання  $\sim 1 \text{ см}^3$  бар'єрним розрядом з імпульсно-періодичною формою напруги з тривалістю та частотою слідування імпульсів 400-600 нс та 3-9 кГц, відповідно. Виявлено умови утворення та випромінювання ексиплексів моноброміду ртуті. Встановлено, що найбільша середня та імпульсна потужність випромінювання досягається в суміші  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$ , і складають значення в режимі саморозігріву суміші 48.8 мВт та 40.6 Вт, відповідно при ККД  $\leq 10\%$ .

**Ключові слова:** низькотемпературна плазма, пари диброміду ртуті, ексиплекс, синьо-зелена спектральна область, гелій, азот, гексафторид сірки, потужність випромінювання.

### Вступ

Дані з енергетичних характеристик випромінювання низькотемпературної плазми на сумішах парів диброміду ртуті з газами надзвичайно важливі для встановлення численних закономірностей, що протікають в плазмі, а також для знаходження шляхів створення ефективних джерел випромінювання [1]. Низькотемпературна плазма є робочим середовищем джерел когерентного і спонтанного ексиплексного випромінювання в синьо-зеленій спектральній області з довжиною хвилі в максимумі інтенсивності  $\lambda_{\text{max}} = 502 \text{ нм}$  [2]. Такі джерела привертають увагу дослідників у зв'язку з високою питомою потужністю випромінювання (одна з найвищих для видимого спектрального діапазону), можливістю працювати в імпульсно-періодичному режимі. Вони потрібні для практичних застосувань, таких як моніторинг повітряного та водного басейнів, дальнометрія морських об'єктів, підводний зв'язок, обробка матеріалів електронної техніки, підвищення ефективності фотосинтезу у

рослинах (в умовах теплиць, космічних станцій, підводних човнів), накачки твердотільних та рідинних лазерів, створення більш ефективних газорозрядних панелей, освітленні об'єктів при проведенні підводних робіт (освоєння родовищ газу та нафти), а також для біотехнології та медицини [2-7].

### Техніка експерименту

Створення плазми здійснювалось в циліндричному пристрої з об'ємом випромінювання  $\sim 1 \text{ см}^3$  бар'єрним розрядом з імпульсно-періодичною формою напруги з тривалістю та частотою слідування імпульсів 400-600 нс та 3-9 кГц, відповідно. Розрядний проміжок і площа випромінювання склали 2,4 мм і  $8 \text{ см}^2$ , відповідно. Дослідження енергетичних характеристик плазми проводилось в сумішах  $\text{HgBr}_2\text{-He}$ ,  $\text{HgBr}_2\text{-N}_2\text{-He}$ ,  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-He}$ ,  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$  на експериментальній установці, що представлена в роботі [8].

### Спектральні характеристики випромінювання плазми бар'єрного розряду

Характерний спектр випромінювання для сумішей HgBr<sub>2</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He з врахуванням спектральної чутливості системи реєстрації приведений на рис. 1, а.

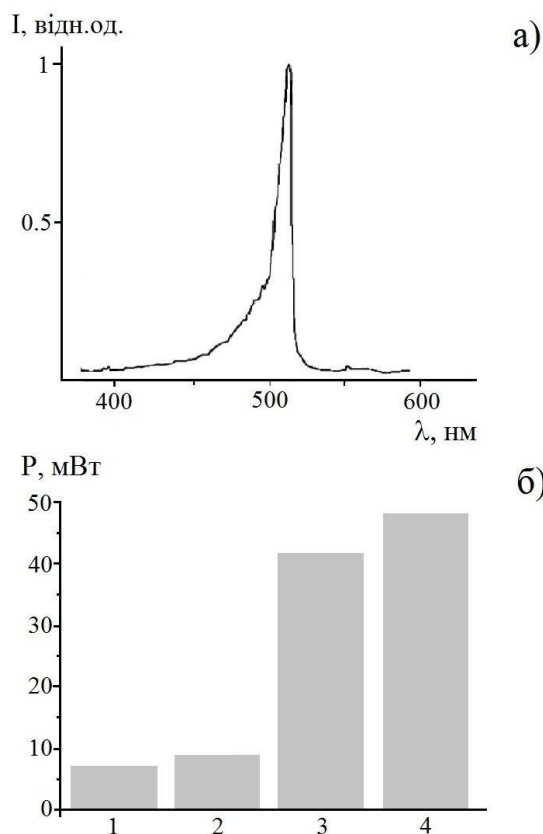


Рис. 1: а) характерний спектр випромінювання плазми на сумішах парів диброміду ртуті з гелієм, азотом та гексафторидом сірки, загальний тиск компонент сумішей 120 кПа, частота слідування імпульсів накачки  $f=6$  кГц, амплітуда імпульсу напруги  $U=9$  кВ; б) діаграма співвідношень між максимальними середніми потужностями випромінювання для сумішей: 1. HgBr<sub>2</sub>-He, 2. HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He, 3. HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He, 4. HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He.

По осі ординат відкладена відносна інтенсивність випромінювання смуги. Спостерігаються тільки системи молекулярних смуг з максимумом випромінювання на  $\lambda$  502 нм відповідно для всіх сумішей в спектральному діапазоні довжин хвиль 350-600 нм. Співвідношення максимальних середніх потужностей випромінювання в системі смуг для кожної суміші представлені на рис. 1, б. Дослід-

ження впливу парціального тиску буферного газу гелію на спектри випромінювання розряду показали, що вони відрізняються кількістю електронно-коливних смуг випромінювання, поведінкою інтенсивності в короткохвильовій частині спектрального діапазону та інтенсивністю на довжинах хвиль 502 нм. При значенні парціального тиску гелію 120 кПа загальна ширина (на напіввисоті) системи молекулярних смуг електронного переходу менша на 20%, а інтенсивність випромінювання  $\lambda$  502 нм більша на 20%, ніж для парціального тиску гелію 40 кПа. При менших тисках гелію спектр протяжніший в короткохвильовій області. Ідентифікація спостережуваних молекулярних смуг випромінювання виявила, що вони відносяться до електронно-коливного переходу  $V^2\Sigma^+_{1/2} \rightarrow X^2\Sigma^+_{1/2}$  двоатомних ексиплексних молекул HgBr\* при  $v'=0\div 5$ ,  $v''=15\div 30$  [9], де  $v'$ ,  $v''$  – коливні квантові числа електронних станів V та X, відповідно. При цьому найбільша інтенсивність в системі належить смугам  $(0, v'')$ -прогресії, де  $v''=22\div 17$ .

### Залежності потужності випромінювання ексиплексних молекул HgBr\* від складу суміші і умов накачки

На рис. 2 представлені результати експериментальних досліджень залежності середньої потужності випромінювання ексиплексу HgBr\* від парціального тиску компонентів сумішей. Діапазон зміни парціальних тисків гелію, азоту, гексафториду сірки та парів диброміду ртуті складав: 40-150 кПа, 0-10 кПа, 0-200 Па, 0.1-9 кПа, відповідно. Відносна похибка вимірів потужності випромінювання складала 5%.

Як видно з рис. 2 для всіх сумішей спостерігається збільшення потужності випромінювання до максимального значення, а в подальшому, із зростанням парціального тиску компонент суміші, зменшення потужності. Необхідно відмітити, у всіх сумішах наявний гелій, парціальний тиск якого був вибраний на основі даних залежності потужності ви-

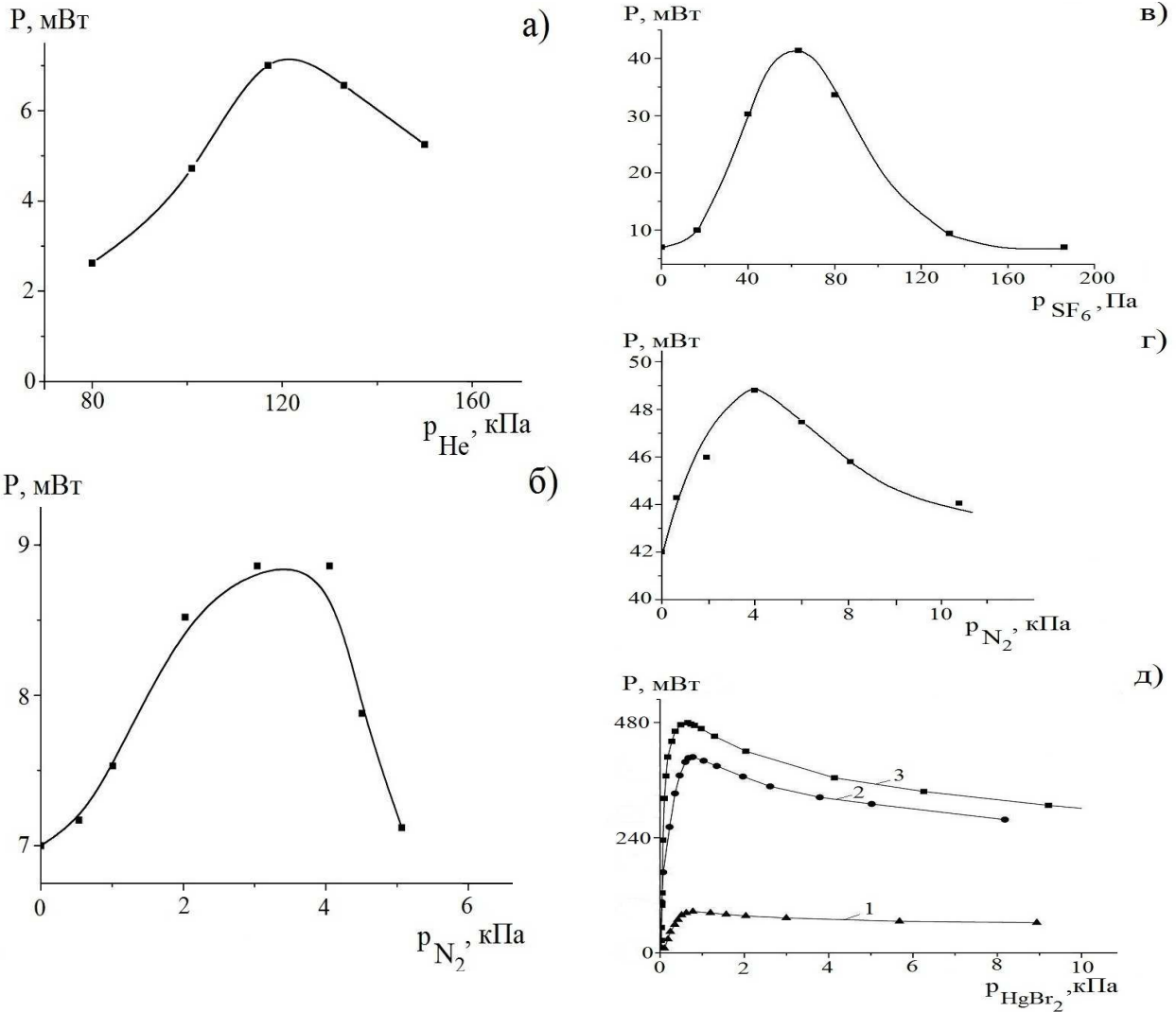
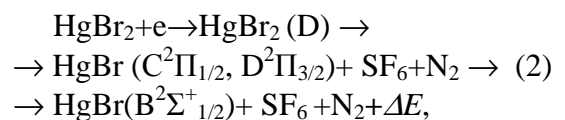
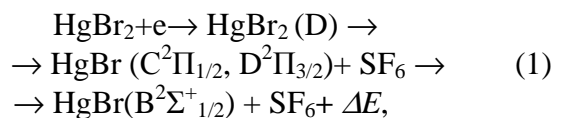


Рис. 2. Залежність середньої потужності випромінювання плазми на суміші: а)  $\text{HgBr}_2\text{-He}$  від тиску гелію, б)  $\text{HgBr}_2\text{-N}_2\text{-He}$  від тиску азоту, в)  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-He}$  від тиску гексафториду сірки, г)  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$  від тиску азоту, д) 1 -  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$ , 2 -  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-He}$ , 3 -  $\text{HgBr}_2\text{-N}_2\text{-He}$  від тиску парів диброміду ртуті.

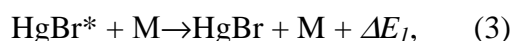
промінювання ексиплексних молекул  $\text{HgBr}^*$  від парціального тиску гелію (рис. 2,а) і який є 118-120 кПа.

Хід залежності потужності випромінювання ексиплексу  $\text{HgBr}^*$  (див. рис. 2) від парціального тиску гелію, азоту, гексафториду сірки, диброміду ртуті відповідно пояснюється наступними процесами: збільшенням концентрації електронів при збільшенні парціального тиску  $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{HgBr}_2$  в суміші; зміною частки енергії розряду, що витрачається на нагрів робочої суміші, середньої енергії електронів, константи швидкості збудження ексиплексу  $\text{HgBr}^*$  в залежності від значення параметра  $E/N$ , а також процесом гасіння  $\text{B}^2\Sigma^+_{1/2}$ - стану молекули  $\text{HgBr}^*$  при зіткненні з атомами гелію, молекулами

азоту, гексафториду сірки та диброміду ртуті [1, 2]. Значне збільшення потужності випромінювання в сумішах парів диброміду ртуті з гексафторидом сірки і гелієм (рис. 2, в), а також в чотирьохкомпонентній суміші з добавкою азоту (рис. 2, г) пов'язано з процесом гасіння вище лежачих енергетичних станів ( $\text{C}^2\Pi_{1/2}$ ,  $\text{D}^2\Pi_{3/2}$ ) з передачею заселеності на  $\text{B}^2\Sigma^+_{1/2}$  - стан:



де  $\Delta E$  – різниця енергій збудження C, D і В- станів молекули моноброміду ртуті [10]. Процес гасіння  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стану молекули  $HgBr^*$



де M – частинки ( $HgBr_2$ ,  $N_2$ ,  $SF_6$ , He), що гасять  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стан моноброміду ртуті при зіткненні,  $\Delta E_I$  – дефект енергії процесу. Ефективність цього процесу гасіння визначається константою швидкості ( $k_r$ ) [2]. Вона знаходилась з даних залежності оберненої величини інтенсивності випромінювання ексиплексу від концентрації кожної компоненти суміші у відповідності з методикою, яка наведена в роботі [11]. Результати її визначення представлені в таблиці 1. Як видно з табличних даних ефективність процесу гасіння ексиплексних молекул моноброміду ртуті молекулами диброміду ртуті, азоту та гексафториду сірки залежить від складу суміші. Для чотирьохкомпонентної суміші ( $HgBr_2$ - $SF_6$ - $N_2$ -He) характерне менше значення константи швидкості гасіння молекулами диброміду ртуті, ніж для трьохкомпонентних сумішей  $HgBr_2$ - $SF_6$ -He та  $HgBr_2$ - $N_2$ -He (реакції 1, 2 і 3 таблиця 1). Така ж закономірність спостерігається і для ефективності гасіння ексиплексних

молекул моноброміду ртуті молекулами азоту (реакції 4 і 5, таблиця 1). В чотирьохкомпонентній суміші константа швидкості гасіння ексиплексних молекул моноброміду ртуті молекулами азоту має менше значення, ніж для трьохкомпонентної суміші. Найбільша ефективність гасіння ексиплексних молекул моноброміду ртуті спостерігається при гасінні їх молекулами гексафториду сірки (реакція 6, таблиця 1). Константа швидкості гасіння цього процесу має значення  $(71,07 \pm 14,2) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Закономірність зменшення ефективності гасіння ексиплексних молекул моноброміду ртуті молекулами диброміду ртуті викликана процесами (1) і (2) та



де  $N_2^*$ - молекули азоту, що збуджені в метастабільний стан  $A^3\Sigma^+_u$  та стан  $V^3\Pi_g$ , які додатково заселяють  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стан ексиплексних молекул моноброміду ртуті [2]. Для реакції 2 (див. таблицю 1) процес гасіння (1) вище лежачих енергетичних станів (C і D) молекулами гексафториду сірки з передачею заселеності на  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стан більш ефективний, ніж процес (4) заселення цього стану ексиплексних молекул

Таблиця 1

### Параметри реакцій гасіння

№	Реакція гасіння	Суміш	$k_r \times 10^{10}, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$
1	$HgBr^* + HgBr_2$	$HgBr_2:Sf_6:N_2:He$	$0,22 \pm 0,04$
2	$HgBr^* + HgBr_2$	$HgBr_2:Sf_6:He$	$0,24 \pm 0,05$
3	$HgBr^* + HgBr_2$	$HgBr_2:N_2:He$	$0,29 \pm 0,06$
4	$HgBr^* + N_2$	$HgBr_2:Sf_6:N_2:He$	$0,04 \pm 0,01$
5	$HgBr^* + N_2$	$HgBr_2:N_2:He$	$0,55 \pm 0,11$
6	$HgBr^* + SF_6$	$HgBr_2:Sf_6:He$	$71,1 \pm 14,2$

моноброміду ртуті в результаті зіткнення метастабільних молекул азоту (стан  $A^3\Sigma^+_u$ ) з молекулами диброміду ртуті. Тому константа швидкості його (див. таблицю 1, реакція 2) має менше значення, ніж у

реакції 3 (таблиця 1). Закономірність у ефективності гасіння в реакціях 5 і 6 (таблиця 1) пов'язана з різницею в молекулярних вагах молекул гексафториду сірки та азоту – для молекул з молеку-

лярною вагою більш близькою до молекулярної ваги моноброміду ртуті ефективність гасіння вища [12]. Така ж закономірність для констант швидкостей гасіння стану ексиплексних молекул моноброміду ртуті спостерігалася в дослідженнях авторів робіт [13, 14] в інших сумішах парів диброміду ртуті та гелію. Процес гасіння 4 (таблиця 1) найменш ефективний, що пов'язано як з процесами (1), (2) та (4) підзаселення  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стану

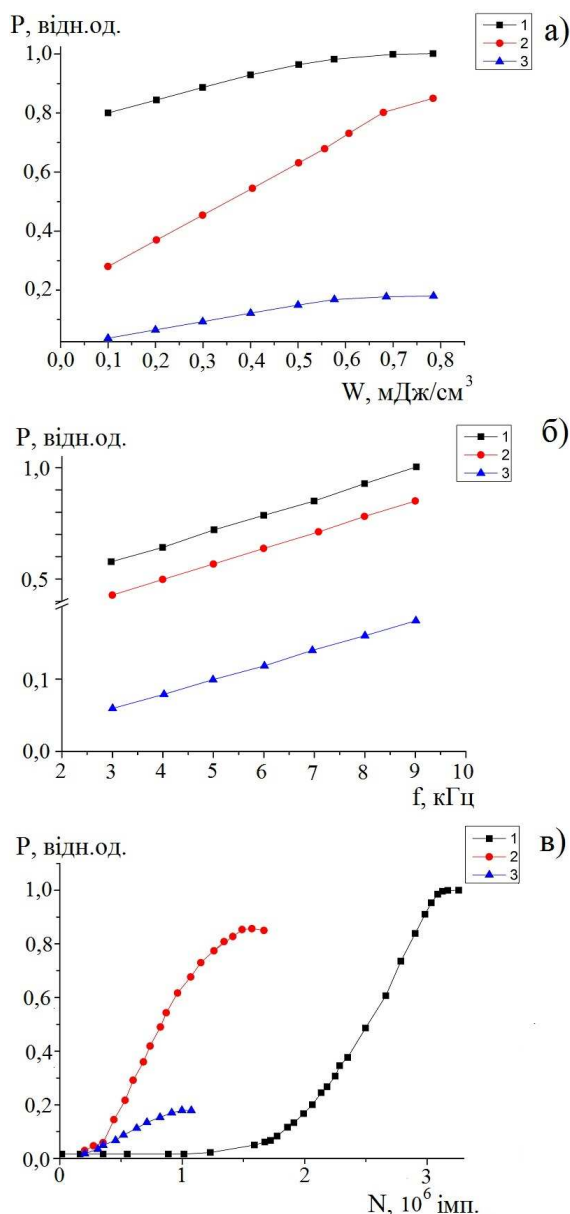


Рис. 3. Залежність середньої потужності випромінювання бар'єрного розряду від: а) енергії, що запасється на ємності діелектрика, б) частоти слідування імпульсів накачки, в) загальної кількості імпульсів для суміші: 1 – HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He, 2 – HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He, 3 – HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He.

ексиплексних молекул моноброміду ртуті, так і з меншою молекулярною вагою молекул азоту в порівнянні з молекулами диброміду ртуті та гексафториду сірки. Що стосується процесу гасіння  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стану ексиплексних молекул моноброміду ртуті гелієм, то він малоефективний ( $k_r < 10^{-14} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) [13, 14].

Результати досліджень потужності випромінювання у відносних одиницях від енергії та частоти слідування імпульсів накачки, а також від кількості імпульсів роботи суміші представлені на рис. 3, а, б, в. При збільшенні енергії, що запасється на ємності 7 пФ діелектрика (кварцове скло) від 0.1 мДж/см<sup>3</sup> до 0.8 мДж/см<sup>3</sup>, пропорційно збільшується і середня потужність випромінювання. Швидкість росту потужності випромінювання від енергії, яка запасється на ємності діелектрика, для кожної суміші різна, що пов'язано з різним перерозподілом енергії розряду на пружні та непружні процеси, що протікають у плазмі в залежності від складу суміші [1]. Найбільша середня потужність досягається для чотирьохкомпонентної суміші HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He. Пропорційне збільшення потужності спостерігається і при зміні частоти слідування імпульсів від 3 кГц до 9 кГц. Ріст середньої потужності випромінювання (рис. 3, в) більш інтенсивний для сумішей HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He та HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He (криві 1, 2), ніж для суміші HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He, що може бути пов'язано зі збільшенням впливу процесу гасіння на заселеність V- стану зі зростанням числа імпульсів і, відповідно, температури суміші.

### Імпульсні характеристики плазми бар'єрного розряду

Результати досліджень часових характеристик випромінювання ексиплексних молекул HgBr\* та струму розряду при частоті слідування імпульсів накачки  $f = 6000 \text{ Гц}$  для сумішей HgBr<sub>2</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He представлені на рис. 4. Спостерігається коливний режим вводу енергії джерела накачки у плазму. Максимальні значення амплітуди імпульсів напруги та струму

складали 9 кВ та 10 А, відповідно. Коливна структура імпульсу струму пов'язана з багатократною розрядкою ємності діелектрика за час імпульсу напруги з амплітудою достатньою для пробою

розрядного проміжку [15]. Відміна в коливній структурі імпульсів струму на передньому та задньому фронті зв'язана з протилежними напрямками проходження

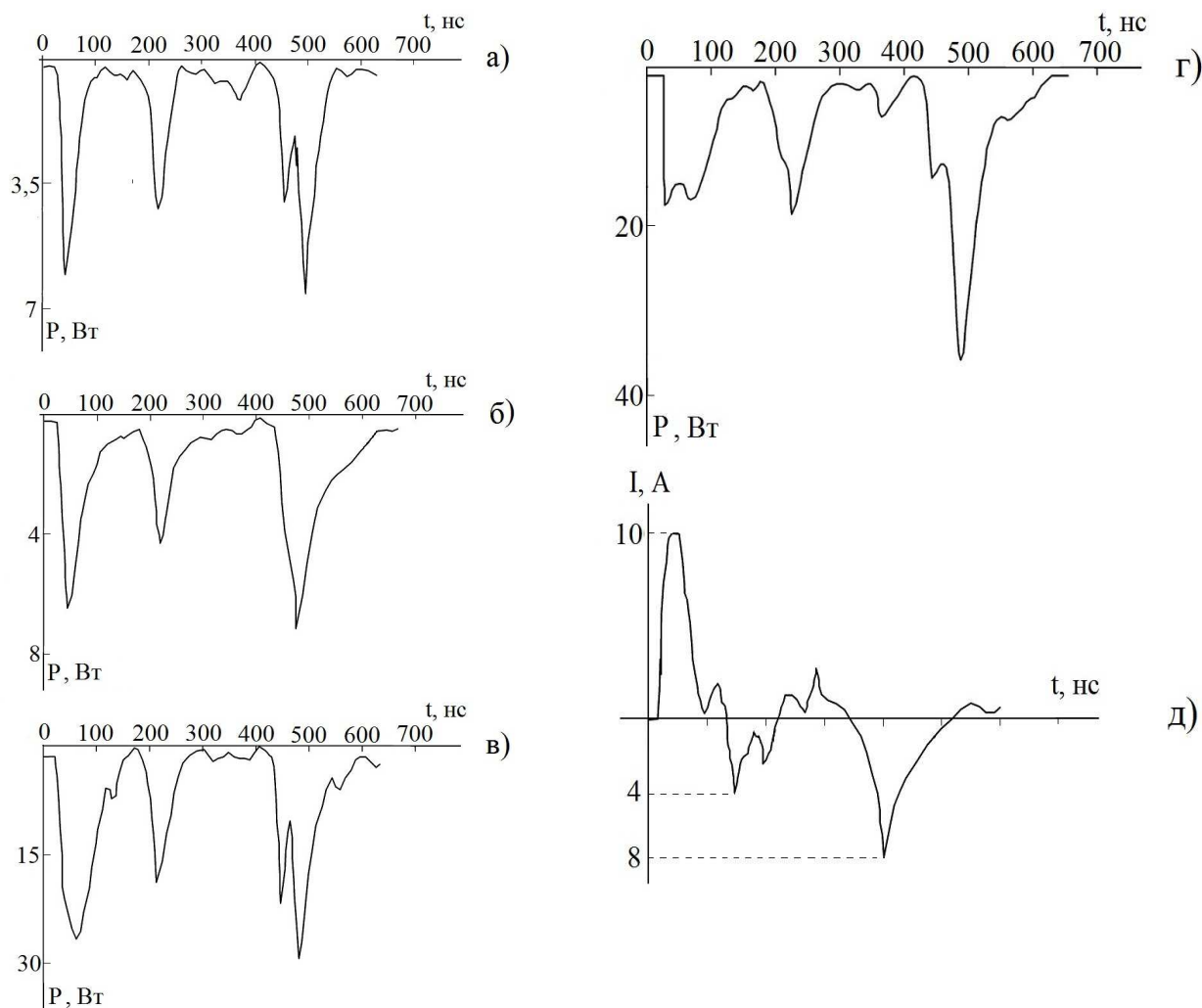


Рис. 4. Імпульсна потужність випромінювання експлексу  $\text{HgBr}^*$  в плазмі на суміші: а)  $\text{HgBr}_2\text{-He}$ , б)  $\text{HgBr}_2\text{-N}_2\text{-He}$ , в)  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-He}$ , г)  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$ , д) імпульс розрядного струму. Частота імпульсів  $f=6$  кГц. Загальний тиск дорівнював 120 кПа, а парціальні тиски  $\text{HgBr}_2=0.1$  кПа,  $\text{N}_2=4$  кПа,  $\text{SF}_6=100$  Па.

струму через газорозрядний проміжок (2.4 мм) і завдяки цьому неоднаковими умовами розсмоктування заряду на внутрішній поверхні діелектрика в умовах однобар'єрного розряду, що використовується в нашому експерименті.

Імпульси струму потрібні, різної полярності, затримка між ними в наших експериментальних умовах дорівнювала 150 нс. Передній фронт становив 10 нс,

тривалість – по 100 нс. Імпульси випромінювання також потрібні зі зсувом по часу 150 нс.

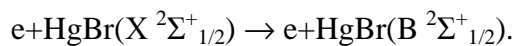
В характеристиках спостерігаються наступні закономірності:

– амплітуда першого імпульсу випромінювання для всіх сумішей більша, ніж амплітуда другого імпульсу, а найбільша амплітуда - третього імпульсу;

– в сумішах, окрім трьохкомпонентної з азотом, спостерігаються допоміжні максимуми в першу чергу на третьому імпульсі;

– амплітуди імпульсів зростають від двохкомпонентної до чотирьох компонентної суміші.

Першу закономірність можна пояснити наступним чином. Імпульси накачки створюють молекули HgBr в  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  та  $X^2\Sigma^+_{1/2}$  – станах за рахунок дисоціації молекул HgBr<sub>2</sub> електронним ударом (перший канал). Третій імпульс накачки призводить також до збудження молекул HgBr по першому каналу в  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  та  $X^2\Sigma^+_{1/2}$  – стани, окрім того проходить ще один процес збудження молекул HgBr з основного ( $X^2\Sigma^+_{1/2}$ ) стану, в якому деякий час перебувають молекули монобромиду ртуті, а саме:



Це спричиняє додаткове збільшення амплітуди третього імпульсу випромінювання внаслідок зростання заселеності  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стану подібно до експериментів при низьких частотах та при дослідженні когерентного випромінювання [2, 16]. Друга закономірність в амплітудах імпульсів пов'язана з появою допоміжного імпульсу біля амплітуди третього імпульсу струму, який в свою чергу викликаний струмом негативних іонів SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup>, HgBr<sub>2</sub><sup>-</sup>, HgBr<sup>-</sup>. Третя закономірність пов'язана з процесами гасіння вище лежачих енергетичних станів C та D молекулами гексафториду сірки та азоту з передачею заселеності на  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стан, що і спричиняє збільшення амплітуд імпульсів в трьох- та чотирьохкомпонентних сумішах порівняно з двохкомпонентною [11].

### Висновки

В низькотемпературній плазмі на сумішах парів дибромиду ртуті з азотом, гексафторидом сірки, гелієм, що утворюється за рахунок розряду через діелектрик, ефективно збуджується ексиплекс

HgBr\* при частотах слідування імпульсів накачки 3-9 кГц. Для всіх сумішей спостерігається збільшення потужності випромінювання до максимального значення, а в подальшому, зі зростанням парціального тиску компонент суміші, зменшення потужності. Хід залежності потужності випромінювання ексиплексу HgBr\* від парціального тиску компонент суміші пов'язаний з процесами: збільшенням концентрації електронів при збільшенні парціального тиску He, N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, HgBr<sub>2</sub> в суміші; зміною частки енергії розряду, що витрачається на нагрів робочої суміші, середньої енергії електронів, константи швидкості збудження ексиплексу HgBr\* в залежності від значення параметра  $E/N$ , а також процесом гасіння  $V^2\Sigma^+_{1/2}$  – стану молекули HgBr\* при зіткненні з атомами гелію, молекулами азоту, гексафториду сірки та дибромиду ртуті. Визначена ефективність гасіння ексиплексу HgBr\* молекулами азоту, гексафториду сірки та дибромиду ртуті, яка знаходиться в межах значень  $(0.22-71.1) \cdot 10^{-16}$  м<sup>3</sup>/с.

При збільшенні енергії, що запасується на ємності 7 пФ діелектрика від 0.1 мДж/см<sup>3</sup> до 0.8 мДж/см<sup>3</sup>, пропорційно збільшується середня потужність випромінювання для всіх сумішей. Швидкість росту потужності випромінювання від енергії, яка запасується на ємності діелектрика, для кожної суміші різна, що пов'язано з різним перерозподілом енергії розряду на пружні та непружні процеси, що протікають у плазмі в залежності від складу суміші. Пропорційне збільшення потужності спостерігається і при зміні частоти слідування імпульсів від 3 кГц до 9 кГц.

Найбільша середня потужність та імпульсна досягаються для чотирьохкомпонентної суміші HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He, і які складають значення в режимі саморозігріву суміші 48.8 мВт та 40.6 Вт, відповідно при ККД ≤ 10 %. При застосуванні зовнішнього підігріву цієї суміші середня потужність досягає максимального значення 480 мВт.

Значне збільшення потужності випромінювання ексиплексу HgBr\* в



сумішах парів диброміду ртуті з гексафторидом сірки, азотом і гелієм пояснюється процесом гасіння вище лежа-

чих енергетичних станів ( $C^2P_{1/2}$ ,  $D^2P_{3/2}$ ) моноброміду ртуті з передачею їх заселеності на  $B^2\Sigma^+_{1/2}$  – стан.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Москва: Наука, 1987. – 592 с.
2. Газовые лазеры / Под редакцией И. Мак-Даниеля и У. Нигэна. – М.: Мир, 1986. – 550 с.
3. Петрухин Е.А., Подсосонный А.С. Электроразрядный HgBr-лазер с УФ предионизацией, объемом активной среды 1л, энергией импульса генерации 1,4 Дж и КПД 0,7%. // Квантовая электроника. – 1990. – Т.17. – №5. – С. 535–536.
4. Малинин А.Н. Оптические характеристики газоразрядной плазмы на рабочих смесях эксимерного HgBr/HgI-излучателя // Квант. электрон. – 2005. – Т. 35. – №3. – С. 243–251.
5. Посудин Ю.И. Лазерная фотобиология. – Киев: Виша школа, 1989. – 247 с.
6. Романенко В.Д., Крот Ю.Г., Сиренко Л.А., Соломатина В.Д. Биотехнология культивирования гидробионтов. – Киев: Институт гидробиологии НАН Украины, 1999. – 264 с.
7. Risk W.P., Gosnell T.R., Nurmikko A.V. Compact Blue-Green Lasers. – England: Cambridge University Press, 2003, – 552 p.
8. Малинина А.А., Гуйван Н.Н., Шимон Л.Л., Шуайбов А.К. Оптические характеристики и параметры газоразрядной плазмы на смеси паров диброміду ртуті, азота и гелия // Физика плазмы. – 2010. – Т. 36. – №9. – С. 858–866.
9. Pears R.W., Gaydon A.G. The Identification of Molecular Spectra. – London: Choptman Holl LT, 1963, – 347 p.
10. Малинина А.А., Шуайбов А.К. Эмиссия эксиплекса моноброміда ртуті в газоразрядной плазме на смеси паров диброміда ртуті, гексафторида серы и гелия // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 110. – №2. – С.218–227.
11. Малинина А.А., Малинин А.Н. Эффективность процесса тушения состояния  $B^2\Sigma^+_{1/2}$  моноброміда и монойодида ртуті дигалогенидами ртуті в газоразрядной плазме на многокомпонентных смесях эксиплексного излучателя // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т. 105. – №1. – С.39–44.
12. Кондратьев В.Н. и Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. – Москва: Наука, 1974. – 558 с.
13. Eden J.G., Waynant R.W. HgBr and HgI B-state quenching rate constants // Appl.Phys. Lett. – 1979. – V.34. – №5. – P. 324–326.
14. Helvajian H., Witting C. Collisional quenching of HgBr ( $B^2\Sigma^+_{1/2}$ ) // Opt. Commun. – 1979. – V.30. – P. 189–192.
15. Акишев Ю.С., Демьянов А.В., Каральник В.Б., Панькин М.В., Трушкин Н.И. Пульсирующий режим диффузной моды барьерного разряда в He // Физика плазмы. – 2001. – Т. 27. – №2. – С. 176–183.
16. Malinin A.N. Excitation of mercury monohalides in the plasma of pulse-periodic discharge in mixtures of mercury dihalides and rare gases // Laser Physics. – 1997. – V.7. – №5. – P. 1032–1040.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2011



A.O. Malinina

Uzhhorod national university, 88000, Uzhhorod, Voloshina Str., 54

e-mail: ant.malinina@yandex.ru

## ENERGY CHARACTERISTICS OF RADIATION OF LOW-TEMPERATURE PLASMA BASED ON MIXTURES OF MERCURY DIBROMIDE VAPOR WITH GASES

The results of studies of energy characteristics of radiation of low-temperature plasma in mixtures of mercury dibromide vapor with nitrogen, sulfur hexafluoride and helium are presented. Creation of plasma was carried out in a cylindrical device with a volume of  $\sim 1 \text{ cm}^3$  by a barrier discharge with a pulse - periodic voltage form with the duration and repetition rate of 400-600 ns and 3-9 kHz, respectively. The conditions of mercury monobromide exciplexes formation and emission are revealed. It is established that the highest average and pulse output power is achieving in a  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$  mixture, and the values in a self-heating mixture mode are 48.8 mW and 40.6 W respectively at an efficiency  $\leq 10 \%$ .

**Key words:** low-temperature plasma, mercury dibromide vapor, exciplexes, blue-green spectral region, helium, nitrogen, sulfur hexafluoride, radiation power.

А.А. Малинина

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

e-mail: ant.malinina@yandex.ru

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА СМЕСИ ПАРОВ ДИБРОМИДА РТУТИ С ГАЗАМИ

Приведены результаты исследований энергетических характеристик излучения низкотемпературной плазмы на смесях паров дибромидов ртути с азотом, гексафторидом серы и гелием. Создание плазмы осуществлялось в цилиндрическом устройстве с объемом излучения  $\sim 1 \text{ см}^3$  барьерным разрядом с импульсно-периодической формой напряжения с длительностью и частотой следования импульсов 400-600 нс и 3-9 кГц, соответственно. Выявлены условия образования и излучения эксиплексов монобромидов ртути. Установлено, что наибольшая средняя и импульсная мощность излучения достигается в смеси  $\text{HgBr}_2\text{-SF}_6\text{-N}_2\text{-He}$ , и составляют значения в режиме саморазогрева смеси 48.8 мВт и 40.6 Вт, соответственно при КПД  $\leq 10 \%$ .

**Ключевые слова:** низкотемпературная плазма, пары дибромидов ртути, эксиплекс, сине-зеленая спектральная область, гелий, азот, гексафторид серы, мощность излучения.