

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗБУДЖЕННЯ ЕКСИПЛЕКСУ HgBr* В ГАЗОРОЗРЯДНІЙ ПЛАЗМІ НА СУМІШІ ДИБРОМІДУ РТУТІ ТА ГЕЛІЮ

А.О. Малініна, М.М. Гуйван

Ужгородський національний університет, Україна
88000, Ужгород, вул. Підгірна 46, E-mail: mal@univ.uzhgorod.ua,
m_guivan@rambler.ru

Представлені результати чисельного дослідження ефективності процесу збудження ексіплексу HgBr* в газорозрядній плазмі на суміші диброміду ртуті та гелію. Для дослідження застосовувався чисельний метод із використанням програми "bolsigplus". Визначення ефективності проведено для суміші HgBr₂-He (0.5-99.5%) при загальному тиску 155.8 кПа, в якій експериментально досягнута максимальна потужність випромінювання HgBr*. Чисельне дослідження проведено при значеннях приведеної напруженості поля E/N = 1-100 Тд. Константа швидкості дисоціативного збудження HgBr* (B₂Σ⁺_{1/2}), яка є кількісною мірою ефективності процесу збудження ексіплексу HgBr*, зростає від значень 10⁻¹⁵ до 10⁻¹⁴ м³/с, причому швидкість її зростання більша при E/N = 1-40 Тд. Для умов експерименту, де потужність випромінювання HgBr* була максимальною (E/N = 36,2 Тд), вона складала величину 1,8•10⁻¹⁴ м³/с.

Вступ

Дослідження збудження ексіплексу моноброміду ртуті в газорозрядній плазмі на сумішах парів диброміду ртуті та гелію необхідно для виявлення можливості підвищення ефективності газорозрядних джерел як когерентних, так і не когерентних, що випромінюють в зеленій спектральній області [1]. Дані джерела видимого діапазону спектру привертають увагу дослідників у лабораторіях світу. Це пов'язано з такими їхніми характеристиками, як високі питомі потужності у видимому діапазоні довжин хвиль, можливість працювати в імпульсно-періодичному режимі, можливість перебудови частоти випромінювання.

Серед багатьох фізичних процесів, що протікають у плазмі активного середовища лазерів та ламп на суміші диброміду ртуті та гелію, найважливішу роль виконує процес збудження електронами ексіплексу HgBr*, а саме B²Σ⁺_{1/2}-стану молекули моноброміду ртуті електронами:



Без знання ефективності цього процесу, яка визначається константою швидкості дисоціативного збудження, неможливо розрахувати населеність верхніх лазерних рівнів, а саме B²Σ⁺_{1/2}-стану з коливними числами v'= 0,1 і відповідно складно вести дослідження з цілеспрямованого поліпшення вихідних характеристик лазерів і ламп [2]. У роботі [3] представлені чисельні розрахунки констант швидкостей збудження B²Σ⁺_{1/2}-стану в імпульсному розряді у сумішах диброміду ртуті з гелієм, однак там не враховувався ряд процесів, таких як коливне збудження молекул диброміду ртуті електронами, прилипання електронів до молекул диброміду ртуті, а також дисоціативне збудження електронно-коливних станів D²Σ⁺_{1/2} та X²Σ⁺_{1/2}, що було пов'язано з від-

сутністю даних з ефективних перерізів цих процесів.

У статті представлені результати чисельного розрахунку константи швидкості процесу збудження експлексу HgBr^* для суміші $\text{HgBr}_2\text{-He}$, у якій експериментально досягнута максимальна потужність випромінювання HgBr^* , а також втрат питомих потужностей розряду на пружні та непружні процеси зіткнень електронів з компонентами робочого середовища. Моделювання проведено для значень приведеної напруженості поля $E/N = 1\text{-}100$ Тд.

Результати чисельного моделювання та їх обговорення

Для визначення ефективності збудження $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ стану в плазмі необхідне знання таких параметрів плазми як функції розподілу електронів за енергіями $f(\epsilon)$, ефективного перерізу збудження експлексу, а також температури робочої суміші парів диброміду ртуті та гелію в умовах експерименту, а саме, в газорозрядній плазмі бар'єрного розряду [1, 4].

Параметри плазми бар'єрного розряду в оптимальних для отримання максимальної потужності випромінювання суміші $\text{HgBr}_2 - \text{He}$ (0.5 - 99.5%) при загальному тиску 155.8 кПа нами визначалися чисельно і розраховувалися як повні інтеграли функції розподілу електронів за енергію (ФРЕЕ) в розряді. ФРЕЕ знаходилися шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана у двочленному наближенні [4]. Розрахунки ФРЕЕ проводилися з використанням програми [5]. На основі отриманих ФРЕЕ визначені середня енергія електронів, константи швидкостей пружного та непружного розсіювання електронів на молекулах диброміду ртуті і атомів гелію, а також втрати потужності розряду на ці процеси в залежності від величини приведеної напруженості електричного поля (E) до загальної концентрації молекул диброміду ртуті і атомів гелію (N). Діапазон змін параметра $E/N = 1\text{-}100$ Тд ($1 \cdot 10^{-17}\text{-}1 \cdot 10^{-15}$ В·см²) включає

величини параметра E/N , які були реалізовані в експерименті. В інтегралі зіткнень електронів з атомами гелію враховано наступні процеси: пружне розсіювання, збудження енергетичних рівнів атома He ($2^3S, 2^1S, 2^3P, 2^1P, 3SPD, 4SPD, 5SPD$) і іонізація атома гелію [5]. Із процесів взаємодії електронів та молекул диброміду ртуті враховано: коливне збудження молекул HgBr_2 , дисоціативне збудження електронних станів моноброміду ртуті ($X^2\Sigma_{1/2}^+, V^2\Sigma_{1/2}^+, D^2\Sigma_{1/2}^+$), прилипання, а також іонізація. Дані з абсолютних величин ефективних перерізів цих процесів, а також їхніх залежностей від енергії електронів узяті з робіт [2, 6].

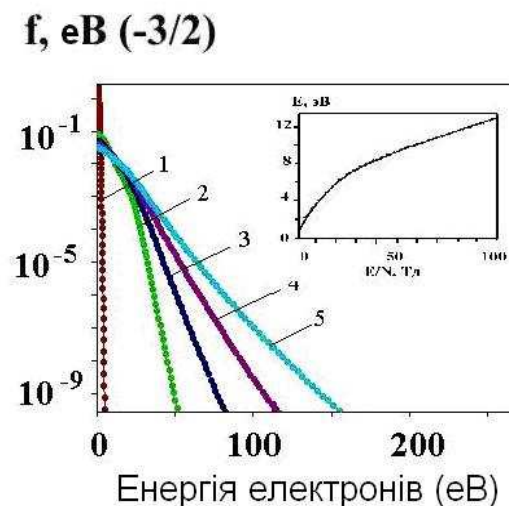


Рис.1. Функції розподілу електронів за енергією в розряді на суміші $\text{HgBr}_2 : \text{He} = 0.5 : 99.5\%$ при різних значеннях параметра E/N : 1 (1), 25,8 (2), 55,5 (3), 75,3 (4), 100 (5) Тд. (у вставці - залежність середньої енергії електронів від параметра E/N).

На рис. 1 наведений характерний вигляд ФРЕЕ для розряду на оптимальній $\text{HgBr}_2 - \text{He}$ (0.5 - 99.5%) робочій суміші (яскравість випромінювання була максимальна) при зміні параметра E/N в діапазоні 1-100 Тд. Збільшення параметра E/N призводить до збільшення кількості «швидких» електронів у розряді та зменшення щільності електронів у діапазоні роботи випромінювача ($E/N = 3 - 30$ Тд). Середня енергія електронів розряду найбільш сильно залежить від параметра E/N

в межах 1 - 20 Тд, при цьому вона лінійно збільшується від 1 до 6 еВ. У діапазоні параметра $E/N = 20 - 100$ Тд середня енергія електронів також збільшується від 6 до 12 еВ, але з меншою швидкістю.

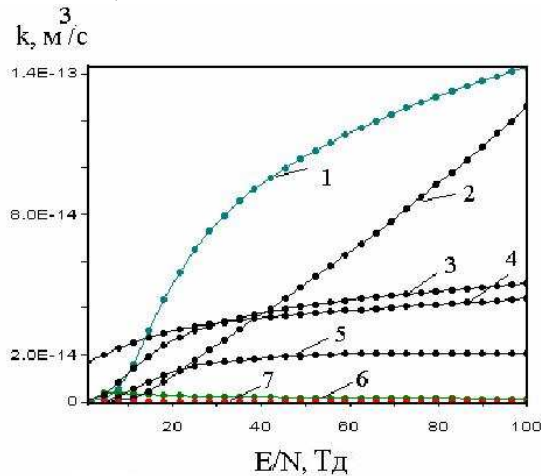


Рис. 2. Константи швидкостей зіткнень електронів з молекулами HgBr_2 :

- 1 - дисоціативне збудження HgBr^* ($D^2\Sigma^+_{1/2}$),
- 2 - іонізація молекул HgBr_2 ,
- 3 - дисоціативне збудження HgBr^* ($X^2\Sigma^+_{1/2}$),
- 4 і 6 - збудження коливних станів молекули HgBr_2 ,
- 5 - дисоціативне збудження HgBr^* ($B^2\Sigma^+_{1/2}$),
- 7 - прилипання електрона до молекули HgBr_2 .

На рис. 2 представлено результати чисельного розрахунку констант швидкостей процесів: коливного збудження диброміду ртуті, дисоціативного збудження електронних станів моноброміду ртуті ($X^2\Sigma^+_{1/2}$, $B^2\Sigma^+_{1/2}$, $D^2\Sigma^+_{1/2}$), дисоціативного прилипання, а також іонізації молекул диброміду ртуті для суміші $\text{HgBr}_2 - \text{He}$ (0.5 - 99.5)%, при співвідношенні компонент якої спостерігається максимальна яскравість випромінювання спектральної смуги ексіплекса HgBr^* . Константи швидкостей характеризуються високими значеннями $k \approx 10^{-14} - 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, що пов'язано з величинами абсолютних ефективних перерізів відповідних процесів. В області параметра $E/N=1-100$ Тд константи швидкості дисоціативного збудження $D^2\Sigma^+_{1/2}$ стану моноброміду ртуті та іонізації диброміду ртуті електронами зростають від значень 10^{-15} до $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$. Для коливного збудження диброміду ртуті і дисоціативного збудження $X^2\Sigma^+_{1/2}$ та $B^2\Sigma^+_{1/2}$

константи швидкостей зростають від величин 10^{-15} до $10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$, а для дисоціативного прилипання електронів до молекули диброміду ртуті - від 10^{-17} до $10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$. В області параметра $E/N = 10-40$ Тд, у якій працює джерело випромінювання, константа швидкості збудження ексіплексу має значення $\geq 1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$. Розподіл питомих втрат потужності розряду на основні процеси при зміні величини параметра E/N в діапазоні 1-100 Тд представлено на рис. 3. Для процесів дисоціативного збудження молекул моноброміду ртуті втрати потужності розряду збільшуються зі зростанням параметра E/N , досягають максимуму 20%, 50% і 70% для електронних станів моноброміду ртуті $B^2\Sigma^+_{1/2}$, $X^2\Sigma^+_{1/2}$, $D^2\Sigma^+_{1/2}$, відповідно, і при подальшому підвищенні параметра E/N зменшуються. Швидкості зростання і падіння витрат потужності розряду на ці процеси і їхні величини пов'язані з характером залежності ефективних перерізів збудження конкретних станів від енергій електронів, їх абсолютних величин, залежністю функції розподілу електронів для різних значень параметра E/N і величини порогової енергії дисоціативного збудження електронних станів молекули моноброміду ртуті. Втрати потужності розряду на коливні збудження, дисоціативне прилипання електронів до молекул диброміду ртуті та пружного розсіювання електронів на атомах гелію значні лише при параметрах $E/N < 10$ Тд, а при збільшенні $E/N (> 10)$ Тд вони різко зменшуються. Втрати потужності розряду на процеси іонізації в розряді найбільш істотні для іонізації молекул диброміду ртуті, що зумовлено меншою величиною їхнього потенціалу іонізації порівняно з потенціалом іонізації атома гелію. Втрати потужності розряду на іонізацію молекул диброміду ртуті починають різко збільшуватися при $E/N > 20$ Тд і для $E/N > 40$ Тд стають вище значень витрат потужності на збудження $B^2\Sigma^+_{1/2}$ -стану моноброміду ртуті. Втрати на непружні процеси для гелію стають помітними для значень параметра $E/N > 30$ Тд, однак їхні значен-

ня для збудження електронних станів не перевищують 10%, а для іонізації - 20%

при $E/N=100$ Тд.

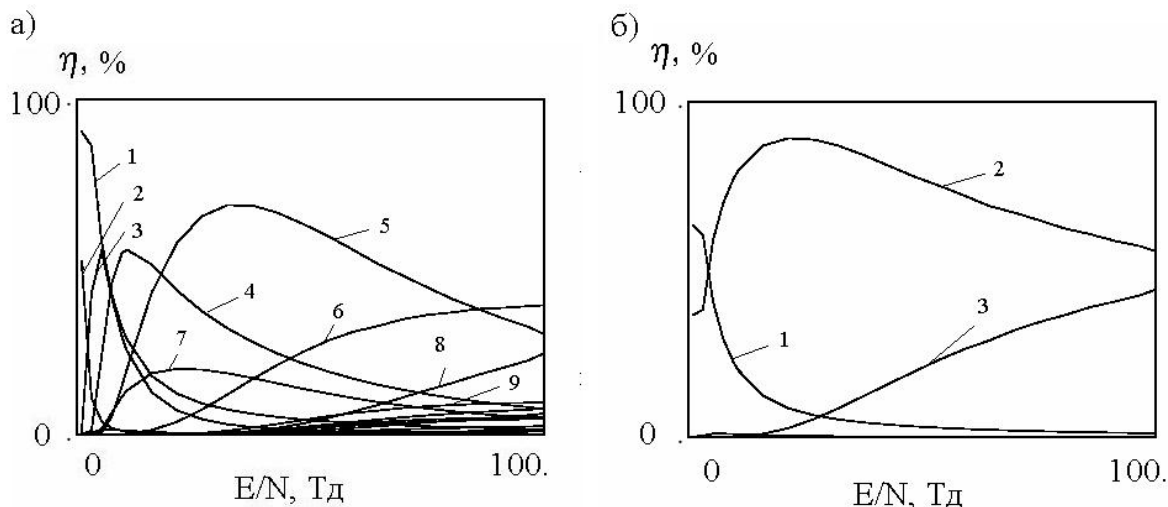


Рис. 3 а) Залежність від параметра E/N питомих втрат потужності розряду на основні електронні процеси в суміші: коливне збудження молекул диброміду ртуті (1), пружне розсіювання електронів на атомах гелію (2), резонансне коливне збудження молекул диброміду ртуті (3), дисоціативне збудження електронних станів молекул моноброміду ртуті $X^2\Sigma_{1/2}^+$ (4), $D^2\Sigma_{1/2}^+$ (5), іонізація молекул диброміда ртуті (6), дисоціативне збудження $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -стану молекул моноброміда ртуті (7), іонізація атомів гелію (8), збудження атомів гелію в 2^3S -стан (9);

б) Залежність загальних питомих втрат потужності розряду від параметра E/N на пружне розсіювання електронів (1), непружні процеси (дисоціативне збудження енергетичних рівнів молекул моноброміду ртуті, коливне збудження молекул диброміду ртуті та збудження енергетичних рівнів атомів гелію) (2), іонізацію молекул моноброміду ртуті та атомів гелію (3).

Низькі втрати потужності розряду на процеси непружного зіткнення електронів з атомами гелію порівняно з процесами непружного зіткнення електронів з молекулами диброміду ртуті пов'язані з більш низькими абсолютними значеннями ефективних перерізів цих процесів, великими величинами енергій та їхніх порогів. Загальні втрати енергії газорозрядної плазми (рис. 3 б) на непружні процеси (дисоціативне збудження енергетичних рівнів молекул моноброміду ртуті, коливне збудження молекул диброміду ртуті та збудження енергетичних рівнів атомів гелію) зростають від значення параметра $E/N=1$ Тд, досягають максимуму при $E/N=20-30$ Тд і складають 90%, після чого монотонно зменшуються до значень 50% при $E/N=100$ Тд. Загальні витрати енергії

газорозрядної плазми на іонізацію лінійно зростають від значень параметра $E/N=10$ Тд до 100 Тд та досягають 40%. Втрати на пружне зіткнення зменшуються за експоненціальним законом від 60% для низьких значень параметра ($E/N=1$ Тд) до декількох відсотків в області $E/N=100$ Тд. Втрати потужності розряду на прилипання є незначними й навіть при $E/N=1-20$ Тд не перевищують 1% від сумарних втрат.

Висновки

Таким чином, чисельним моделюванням процесів у газорозрядній плазмі на суміші диброміду ртуті та гелію для оптимальних умов експерименту, тобто для умов, де яскравість випромінювання ексиплексу була найбільшою, знайдено функції розподілу електронів за енергіями, середню енергію електронів, констан-

ти швидкостей зіткнень електронів з молекулами, а також розподіл питомих втрат потужності розряду на основні процеси.

Встановлено кількісну міру ефективності процесу збудження ексиплексу моноброміду ртуті в газорозрядній плазмі на

суміші диброміду ртуті та гелію. Константа швидкості знаходиться в межах значень $(1-2) \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ для області параметру $E/N=10-40 \text{ Тд}$, у якій працює джерело випромінювання.

Література

1. А.Н. Малинин, А.В Поляк, Н.Н. Гуйван, Н.Г. Зубрилин, Л.Л. Шимон // Квантовая электроника 2002. **32**, С. 155 .
2. Газовые лазеры. / Под ред. Мака Даниеля И. и Нигана У. - М.: Мир, 1986. - 550 с.
3. A.N. Malinin. The Main Characteristics of the Plasma of Pulse Glow Discharge in Mixtures of Mercury Dihalide and Rare Gases // Laser Physics.-1998.- V.8, N2 - P.395-406
4. G. J. M Hagelaar and L.C. Pitchford Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models// Plasma Sources Sci Technol v4 (2005) 772-733
5. [2] <http://www.siglo-kinema.com/>
6. Nighan W.L. Kinetic processes in the electronically excited mercuric-bromide dissociation laser // Appl.Phys.Lett.-1980. - V.36, №3.- P .173-175.

EFFICIENCY OF EXCITATION OF HgBr* EXCIPLEX IN THE GAS-DISCHARGE PLASMA IN A MIXTURE OF MERCURY DIBROMIDE AND HELIUM

A.O. Malinina, M.M. Guivan

Uzhgorod National University, st. Pidgirna 46, 88000, Uzhgorod, Ukraine,
mal@univ.uzhgorod.ua

The results of numerical modeling of the efficiency of excitation of HgBr* exciplex in the gas-discharge plasma in a mixture of mercury dibromide and helium are presented. The numerical method is applied using bolsigplus software. The efficiency is determined for the mixture HgBr₂-He (0.5-99.5%) at the total pressure 155.8 kPa, for which the maximum of the radiation power of HgBr* was experimentally achieved. The modeling was carried out for the reduced tension field value $E/N = 1-100 \text{ Тд}$. The dissociative excitation of HgBr* ($B_2\Sigma^+_{1/2}$) rate coefficient which is a quantitative measure of the efficiency of the excitation process, increases from the value of 10^{-15} to $10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$, and its growth is the largest in the range $E/N = 1-40 \text{ Тд}$. For the experimental conditions where the HgBr* radiation power was maximal ($E/N = 36.2 \text{ Тд}$), its value is $1.8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$.

