

УДК 621.327

Я.Ю. Джупіна¹, О.К. Шуаїбов²

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Підгірна, 46

¹e-mail: jarynkad@ukr.net

²e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

ІМПУЛЬСНО-ПЕРІОДИЧНА БЕЗРТУТНА ЛАМПА БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШІ КРИТОНУ З ЕЛЕГАЗОМ

У роботі наведені результати експериментальної оптимізації імпульсно-періодичної бар'єрної лампи, що працює на малоагресивній робочій суміші Kr-SF₆ при тисках порядку 21-23 кПа. Досліджено спектральні характеристики розряду та залежності яскравості смуги 248 нм KrF (B→X) від тиску і складу робочої суміші, величини зарядної напруги робочої ємності високовольтного модулятора та частоти повторення імпульсів накачування. Проведено розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів у розряді на суміші Kr-SF₆ при величинах E/N, що відповідають експериментальним значенням параметра E/N для лампи, що досліджувалась.

Ключові слова: бар'єрна лампа, суміш Kr-SF₆, кінетичні коефіцієнти, смуга 248 нм KrF (B→X).

Вступ

Найбільш широко розповсюдженим бактерицидним джерелом випромінювання є лампи на основі пари ртуті, випромінювання яких на резонансній спектральній лінії атома ртуті (254 нм) служить основою багатьох оптичних технологій у фотомедицині, фотобіології, фотохімії та легкій промисловості [1]. Але при утилізації великої кількості відпрацьованих газорозрядних трубок, заповнених парою ртуті, виникають проблеми екологічного та технологічного характеру. Тому актуальним є пошук та оптимізація нових робочих середовищ для УФ – випромінювачів з довжиною хвилі, що близька до $\lambda \sim 250$ нм. У цьому спектральному діапазоні, в якому знаходиться основний максимум поглинання молекул ДНК, найбільш ефективним робочим середовищем є молекули KrF (B), що розпадаються з випромінюванням смуги 248 нм. Але використання молекул чистого фтору і робочих сумішей типу (He, Ar)-Kr-F₂ для утворення молекул KrF (B) небажано через високу агресивність фтору, що призводить до низького ресурсу роботи випроміню-

вачів з відкритими електродами і до втрати прозорості кварцевої колби ламп бар'єрного розряду. Більш перспективним, з точки зору ресурсу роботи лампи, може виявитися застосування неагресивного фторносія, наприклад елегазу або фреону [2,3], хоча у відповідних експлексних лазерах і лампах при цьому спостерігалось зменшення потужності генерації приблизно на порядок.

Для збільшення ресурсу роботи ламп на фторидах важких інертних газів необхідно усунення контакту відкритих електродів розряду з хімічно активною плазмою, що може бути досягнуто в бар'єрному розряді з двома або трьома діелектричними бар'єрами. Оптимізація роботи імпульсно-періодичного випромінювача підвищеної частоти ($f \sim 100$ кГц) з двома плоскими бар'єрами проводилася на сумішах Xe-SF₆ Xe-NF₃ з метою розробки неканцерогенної лампи на основі смуги випромінювання 354 нм XeF(B→X).

Застосування молекул елегазу виявилось успішним і в лампі на моноброміді ртуті, яка є ефективним випромінювачем у біологічно активній зеленій області довжин хвиль.

Використання робочої суміші He-SF₆-

HgBr₂ в одnobар'єрних лампах на основі смуги 502 нм HgBr (B→X) дозволило приблизно на порядок збільшити потужність випромінювання смуги бромиду ртуті в порівнянні з випромінюванням лампи на суміші He-HgBr₂ [4].

Випромінювачі, які могли б стати альтернативними лампам на парі ртуті і використовуватися для стерилізації медичних інструментів, консервації продуктів харчування, очищення води та повітря, в яких прийнятним є потужність випромінювання в спектральній області 245-255 нм і досить великий ресурс роботи, а також неагресивне робоче середовище, вивчені в даній час недостатньо повно [5].

У даній роботі наводяться результати дослідження емісійних характеристик KrF-випромінювача, який збуджувався імпульсно-періодичним бар'єрним розрядом, і результати його оптимізації в залежності від параметрів робочої суміші та розряду.

Умови і техніка експерименту

Для дослідження електричних та емісійних характеристик бар'єрного розряду на суміші криптону з елегазом (SF₆) використовувалась експериментальна установка, описана в роботі [6].

Випромінювання плазми у спектральному діапазоні λλ 200-600 нм поступало на вхідну щілину монохроматора МДР-2 з дифракційною решіткою 1200 штрих./мм. На виході монохроматора для детектування випромінювання використовувався фотоелектронний помножувач ФЕУ-106, підключений до підсилювача постійного струму. Фотопомножувач мав найбільш високу чутливість у діапазоні спектру 300-400 нм. Спектри випромінювання лампи та яскравість молекулярних смуг реєструвалися імпульсним фотометром та самописцем КСП-4. Частота слідування імпульсів становила $f \sim 35-1000$ Гц.

Для оцінки енергетичного внеску в плазму розряду реєструвались осцилограми струму і напруги з допомогою шестиканального осцилографа БЛОП-04. За допомогою приладу Кварц-01 та оптичного фільтру УФС-1 вимірювалася

абсолютна середня потужність випромінювання експлексної лампи.

Проведення досліджень у даній роботі пов'язано з вивченням характеристик бар'єрного розряду в сумішах інертних газів з молекулами SF₆ і CCl₄. Експерименти виконані за допомогою ексилампи з трибар'єрним розрядом подібної до тієї, що використовувалась у роботі [7]. Будова лампи представлена на рис. 1.

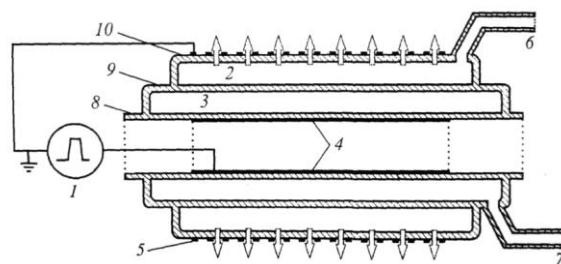


Рис. 1. Будова ексилампи з трибар'єрним розрядом: 1 – джерело живлення; 2, 3 – розрядний проміжок; 4 – суцільний електрод; 5 – перфорований електрод; 6, 7 – патрубки для напускання робочих сумішей; 8, 9, 10 – кварцові трубки (стілки випромінювання). Стрілками показано напрямки випромінювання.

Ексилампа виготовлена з коаксіальних кварцових трубок діаметром 1,4; 2,7 і 3,7 см, довжинами 50, 40 і 30 см. Товщина стінок кварцових трубок складала 1,5-2,5 мм. На поверхні верхньої трубки було встановлено спіралеподібний електрод з нікелевого дроту (крок 0,1 см) довжиною 14 см і діаметром 0,38 мм. Суцільний електрод з дюралюмінію довжиною 28 см і діаметром 1,1 см був розташований всередині трубки. Відкачування і заповнення газовими сумішами робочих об'ємів лампи проводиться за допомогою патрубків діаметром 1 см і довжиною 7 см та вакуумної-газозмішувальної системи.

Оптимізація імпульсно-періодичної експлексної лампи на $\lambda = 248$ нм KrF (B-X)

Проведені дослідження оптичних характеристик плазми трибар'єрного розряду на основі суміші Kr-SF₆. Спектр розряду представлено на рис. 2. Як видно,

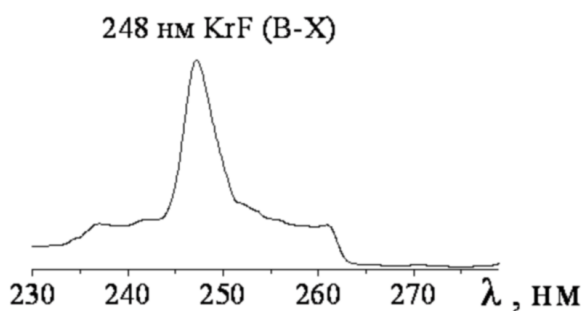


Рис. 2. Спектр випромінювання трибар'єрного розряду на сумішах: Kr-SF₆=20-0,25 кПа у двох об'ємах (U_p=13 кВ, f=80 Гц).

у спектрі, наведеному з поправкою на чутливість системи реєстрації, присутня переважно смуга 248 нм KrF(B→X). Для знаходження оптимальних вихідних характеристик ламп дослідження проводились у широкому діапазоні тисків газів. Зокрема, тиск криптона варіювався в межах 6,67...66,67 кПа, а SF₆ – 0,13...1,33 кПа. Максимальна яскравість смуги 248 нм

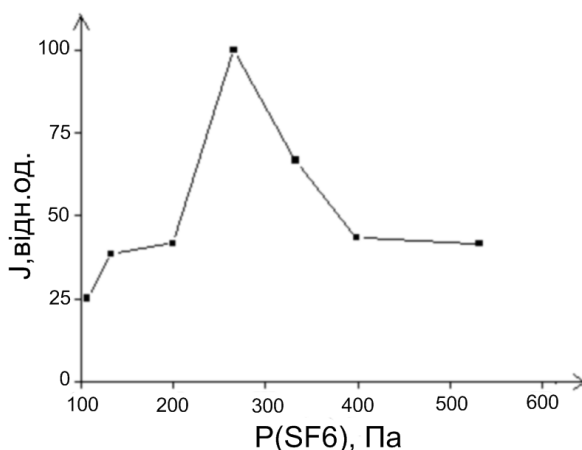


Рис. 3. Залежність яскравості смуги 248 KrF(X-B) від парціального тиску елегазу при P(Kr)= 21,2 кПа.

KrF(B-X) отримана для суміші p(Kr)-p(SF₆)=20-0,25 кПа (рис. 3).

З рис. 4 випливає, що для суміші p(Kr)-p(SF₆) – 21,2-0,26 кПа, відносна яскравість смуги 248 нм KrF при збільшенні напруги на модуляторі імпульсів від U = 13 кВ до U = 19 кВ лінійно зростає; при частотах від 35 Гц до 60 Гц відносна яскравість смуги 248 нм KrF стрімко зростає, а потім спостерігається спад яскравості.

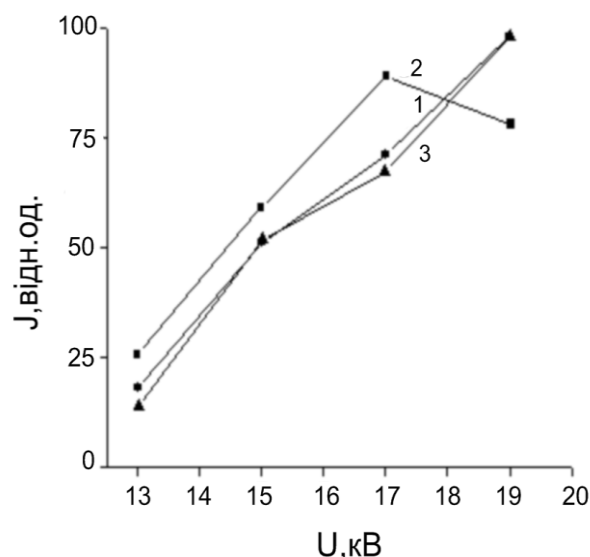


Рис. 4. Залежність яскравості смуги 248 нм KrF від напруги на модуляторі імпульсів (при f=200 Гц) на сумішах: 1 – Kr/SF₆=21,2/0,10 кПа, 2 – Kr/SF₆=21,2/0,26 кПа, 3 – Kr/SF₆=21,2/0,40 кПа.

Зменшення парціального тиску елегазу в бар'єрному розряді на суміші Kr - SF₆ з 0,26 до 0,10 кПа призводило до чисто лінійної залежності яскравості смуги випромінювання з λ=248 нм KrF (B→X) від зарядної напруги.

Збільшення частоти слідування імпульсів струму від 40 до 1000 Гц призводило до зростання яскравості смуги випромінювання молекули KrF (B→X) у вісім разів. В області частот 200-1000 Гц спостерігалась майже лінійна залежність яскравості випромінювання на λ= 248 нм.

Електронно-кінетичні коефіцієнти в розряді на суміші Kr-SF₆

Проведені розрахунки функцій розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) і електронних кінетичних коефіцієнтів (ЕКК) в залежності від параметра E/N (E – напруженість електричного поля, N – концентрація компонент робочої суміші) в розряді на суміші криптона з елегазом. ФРЕЕ розраховувались шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана з використанням програми BOLSIG+ [8].

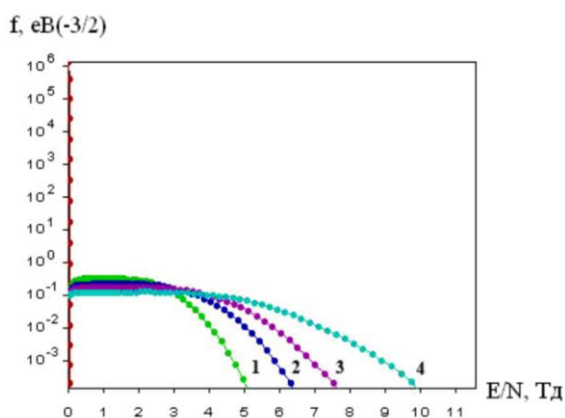


Рис. 5. Функції розподілу електронів за енергією електронів у розряді в суміші Kr - SF₆ = 350 - 0,5 в.о. при різних значеннях параметра E/N: 311 Тд (1), 483 Тд (2), 656 Тд (3), 1000 Тд (4).

При розв'язуванні кінетичного рівняння Больцмана були враховані процеси пружного розсіяння електронів, збудження коливальних рівнів молекули SF₆, електронних станів SF₆ і Kr, прилипання і дисоціативного прилипання електронів до молекул елегазу, а також іонізація SF₆ і Kr. На основі отриманих ФРЕЕ розраховано середні енергії електронів і константи швидкостей в залежності від параметра E/N (1 - 1000 Тд).

Як впливає з рис. 5, збільшення величини параметра E/N призводить до значного розширення ФРЕЕ в області "хвоста": так на рівні $f^{3/2}$ (eV) $\sim 10^{-4}$ енергія швидких електронів у розряді на суміші Kr - SF₆ з мінімальним вмістом елегазу зростала з 5 до 10 eV. Збільшення вмісту елегазу в розряді призводило до збільшення кількості швидких електронів в області "хвоста" ФРЕЕ і зменшення їх при малих величинах енергії електронів (10^{-3} - 10^{-1} eV). Основною причиною такої поведінки ФРЕЕ є ефективні процеси прилипання електронів до молекул SF₆ в області малих енергій електронів плазми бар'єрного розряду.

На рис. 6 наведені залежності констант швидкості електронних процесів у розряді в сумішах Kr - SF₆ від параметра E/N. Найбільшими є константи швидкості пружного розсіяння електронів на молекулах елегазу і атомах кріптоні - $(2 - 4) \times 10^{-13}$ м³/с, збудження коливальних рівнів молекули SF₆ і прилипання електро

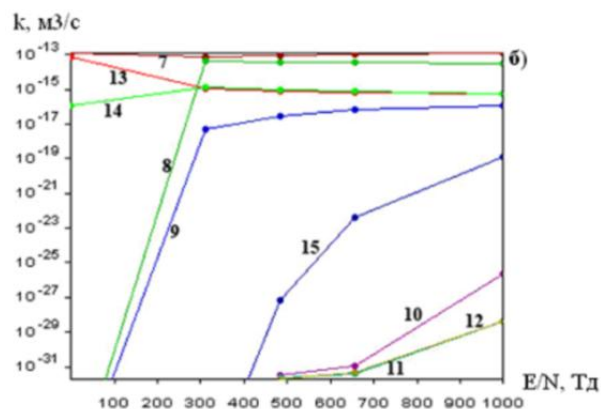
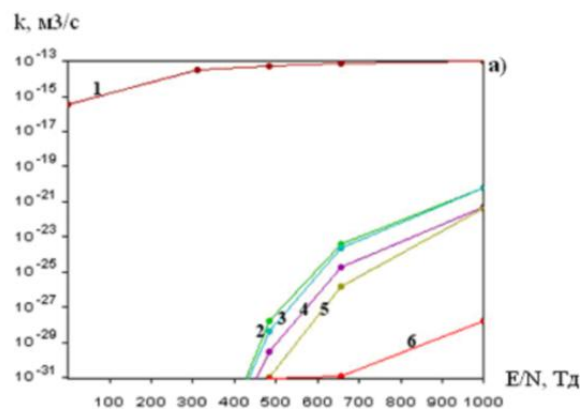


Рис. 6. Залежність констант швидкостей електронних процесів від параметра E/N = 1-1000 Тд у розряді в суміші Kr - SF₆ = 350 - 0,5 в.о. : 1,8 – пружне розсіяння електронів на атомах кріптоні і молекулах SF₆, 2-7 - збудження електронних рівнів кріптоні з E_п від 9,5 eV до 14 eV, 9-13 – збудження молекул елегазу з E_п від 0,1 eV до 14 eV, 14 – дисоціативне прилипання електронів (за виключенням утворення іонів SF₅⁻), 15 – дисоціативне прилипання електрона з утворенням SF₅.

нів до молекул SF₆. Зі збільшенням параметра E/N константи швидкості коливального збудження, прилипання і дисоціативного прилипання значно зменшувались. Константи швидкостей збудження і іонізації атомів кріптоні та молекул елегазу збільшувались з ростом параметра E/N. При збільшенні вмісту елегазу в суміші Kr - SF₆, константи прилипання і дисоціативного прилипання електронів до молекул елегазу значно зростали.

Висновки

Дослідження імпульсно-періодичного випромінювача на смузі 248 нм молекули фториду кріптоні і неагресивного

робочого середовища на основі елегазу показало, що найбільш оптимальною є робоча суміш $p(\text{Kr})$ - $p(\text{SF}_6) = (20-40) - (0,25-0,27)$ кПа; середня потужність випромінювання лампи з бічної поверхні досягала 0,5 Вт і може бути збільшена при зростанні частоти імпульсів струму

накачування (при $f > 1$ кГц); оптимальна величина зарядної напруги знаходилася в діапазоні 16-18 кВ. Одержані електронно-кінетичні коефіцієнти будуть у подальшому використовуватися в кінетичній моделі процесів у лампах бар'єрного розряду на суміші Kr-SF_6 .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шуайбов, О.К., Шевера, І.В., Шимон Л.Л., Соснін, Е.А. Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка та застосування. Навчальний посібник. – Ужгород-Томськ: Говерла, 2006. – 224 с.
2. Пикулев А.А., Цветков В.М. Исследование эффективности УФ-излучения лампы барьерного разряда для смеси Xe-SF_6 // ЖТФ. – 2008. – Т.78. – Вып. 10. – С. 83.
3. Пикулев А.А., Цветков В.М. Исследование законов подобия газового разряда при смеси Kr-CCl_4 барьерным разрядом // ЖТФ. – 2010. – Т.80. – Вып. 1. – С. 45.
4. Малинина А.А., Шуайбов А.К. Эмиссия эксиплекса монобромиды ртути в газоразрядной плазме на смеси паров дибромиды ртути, гексафторида серы и гелия // Опт. и спектр. – 2011. – Т.110. – С. 218.
5. Гомокі З.Т., Миня О.Й., Шевера І.В., Шимон Л.Л., Шуайбов О.К. Дослідження імпульсно-періодичної трибар'єрної лампи на сумішах кріптону з молекулами CCl_4 і SF_6 // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2010. – Вып. 28. – С. 145.
6. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Скакун В.С., Тарасеко В.Ф., Шитц Д.В. Источник двухполосного трехбарьерной KrCl-XeBr – эксилампы // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т.34. – Вып.17. – С. 6.
7. <http://www.siglo-kinema.com>.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2011

Y.Y. Dzhupina¹, O.K. Shuaibov²

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Pidgirna Str., 46

¹e-mail: jarynkad@ukr.net

²e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

PULSE-PERIODIC MERCURY-FREE LAMP OF BARRIER DISCHARGE WORKING WITH THE HELP OF KRYPTON AND INSULATING GAS MIXTURE

The results of experimental optimization of pulse-periodic lamp working with the help of low-corrosive working mixture Kr-SF_6 with the pressure equal to 21-23 kPa have been presented in the given article. Spectral characteristic of the discharge and dependence of the 248 nm KrF ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) band brightness on the working mixture pressure and composition and charging voltage of the high-voltage modulator working capacity and pumping pulse frequency has been investigated. Calculations of electronic kinetic coefficients in the discharge on the Kr-Sf_6 mixture with E/N value that is equal to experimental value of E/N characteristics of the lamp which was investigated have been made.

Key words: pulse-periodic lamp, mixture Kr-SF_6 , 248 nm KrF ($\text{B} \rightarrow \text{X}$) band, electronic kinetic coefficients.

Я.Ю. Джупина¹, О.К. Шуайбов²

Ужгородский национальный университет, 88000 Ужгород, ул. Пидгирна, 46

¹e-mail: jarynkad@ukr.net

²e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКАЯ БЕЗРТУТНАЯ ЛАМПА БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСИ КРИПТОН С ЭЛЕГАЗОМ

В работе приведены результаты экспериментальной оптимизации импульсно-периодической барьерной лампы, работающей на малоагрессивной рабочей смеси Kr-SF₆ при давлениях порядка 21-23 кПа. Исследованы спектральные характеристики разряда и зависимости яркости полосы 248 нм KrF (B→X) от давления и состава рабочей смеси, величины зарядного напряжения рабочей емкости высоковольтного модулятора и частоты повторения импульсов накачки. Проведены расчеты электронных кинетических коэффициентов в разряде на смеси Kr-SF₆ при величинах E/N, соответствующих экспериментальным значением параметра E/N для лампы.

Ключевые слова: барьерная лампа, смесь Kr-SF₆, кинетические коэффициенты, полоса 248 нм KrF (B→X).