

УЛЬТРАФІОЛЕТОВА ЛАМПА ЄМНІСНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШАХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ ТА ПАРИ ЙОДУ

О. К. Шуайбов¹, Л. Л. Шимон¹, О. Й. Миня¹, З. Т. Гомокі¹, Г. Г. Калюжна², А. І. Щедрин²

¹ДВНЗ “Ужгородський національний університет”, Україна,

²Інститут фізики НАН України

(Отримано 3 лютого 2010 р.; в остаточному вигляді — 20 січня 2011 р.)

Наведено результати дослідження емісійних характеристик ультрафіолетового джерела випромінювання, яке збуджувалося за допомогою імпульсно-періодичного ємнісного розряду на сумішах гелію, неону і криптону та пари йоду й випромінювало в спектральному діапазоні 180–450 нм. Показано, що основна частина потужності випромінювання лампи сконцентрована в спектральних лініях 183.0 і 206.2 нм атома йоду та $D' - A'$ смугі молекули йоду з максимумом близько 342 нм. Оптимізовано яскравість випромінювання лампи залежно від парціального тиску інертних газів.

Наведено результати розрахунків параметрів плазми розряду на сумішах пари йоду з атомами He і Xe, що становлять інтерес для моделювання кінетики процесів і вихідних характеристик УФ-випромінювача на молекулах йоду, йодиду ксенону й атома йоду.

Ключові слова: ємнісний розряд, ексиплексна лампа, інертний газ, йод, випромінювання, електронні кінетичні коефіцієнти.

PACS number(s): 52.80.Hc

I. ВСТУП

Поздовжній тліючий, мікрохвильовий, бар'єрний і ємнісний розряди в сумішах інертних газів та пари йоду широко використовують для розробок короткохвильових ламп на переходах атома йоду (206.2 нм), молекули йоду (342 нм) і йодиду ксенону (254 нм) [1–15].

Перші спроби створення лампи з використанням атомів йоду зробили автори [4]. Аналізуючи діаграму енергетичних рівнів атома йоду (рис. 1), можна побачити, що вона містить багато інтенсивних спектральних ліній в УФ області спектру від 206.2 нм до більш коротких довжин хвиль. Із діаграми випливає, що інтенсивна спектральна лінія 206.2 нм відповідає переходу $6s\ ^2P_{3/2} - 5p^5\ ^2P_{1/2}$ і не є резонансною. Наступними після цієї спектральної лінії є лінії 187.6, 184.4 та 183.0 нм. Тиск парів йоду при кімнатній температурі був ідеальним при використанні в газовому розряді [4]. Узагальнена модель термів нижніх станів двоатомної молекули йоду I_2^* і переходу $D' - A'$ з максимумом на 342 нм представлена в [16,17].

Найпростіші й потенційно найпотужнішими є джерела випромінювання низького тиску зі збудженням поздовжнім тліючим розрядом [11]. Але електроди таких випромінювачів контактують із робочим середовищем (у тому числі й паровою йоду), що обмежує ресурс роботи цих ламп у газостатичному режимі на рівні близько 1000 годин [7,8,18]. Для збільшення ресурсу роботи УФ-ВУФ-ламп найширше застосування отримало використання безелектродних розрядів у газових сумішах низького тиску на основі інертних газів і галогеновмісних молекул. Для використання в різних оптичних технологіях мікронаноелектроніки й фотохімії становить інтерес розробка імпульсної

безелектродної лампи на основі ексиплексних молекул і галогенів із короткою тривалістю імпульсу випромінювання. Так, у праці [19] наведено результати дослідження коаксіальної двобар'єрної лампи на $B, D - X$ переходах молекули ХеВг (найяскравіша смуга 282 нм) з тривалістю імпульсу випромінювання 4.5 нс та імпульсною потужністю 100 кВт. Тому важливим є дослідження і ємнісного розряду субмікросекундної тривалості на сумішах інертних та галогеновмісних газів для розробки простої УФ-ВУФ-ламп низького тиску. Такий режим запалювання ємнісного розряду маловивчений, оскільки в сумішах Хе(Кг)-Cl₂ при парціальному тиску хлору 300–400 Па він існує у вигляді яскравого струмового шнуру, малопридатного для використання в лампі. Недостатньо досліджені також емісійні характеристики йодовмісної плазми низького тиску в спектральному діапазоні 175–210 нм. Таке випромінювання ще пропускається повітрям і кварцовою оболонкою лампи. У працях [11,14,18] приводяться деякі характеристики ємнісного розряду, який збуджувався від джерела змінної напруги частотою 10–220 кГц і мав тривалість імпульсу випромінювання близько 2 мкс. Але в цих працях основну увагу приділяли оптимізації випромінювання ємнісного розряду на спектральній лінії атома йоду 206.2 нм. Хоча відомо [5], що сумарна інтенсивність випромінювання резонансної спектральної лінії атома йоду — 183.0 нм та ліній 184.4; 187.6 нм може перевищувати інтенсивність випромінювання лінії 206.2 нм. В умовах поздовжнього тліючого розряду постійного струму [8], де в результаті нагрівання кварцової трубки струмом розряду парціальний тиск пари йоду перевищував 100 Па, випромінювання резонансної спектральної лінії атома йоду не проявлялося. Це ймовірно зумовлено її самопоглинанням у плазмі на основі

пари йоду. З ВУФ спектральних ліній атома йоду найбільш інтенсивними були спектральні лінії 150.7; 161.8 і 170.2 нм, сумарна інтенсивність яких перевищувала інтенсивність лінії 206.2 нм [8]. Тому викликає зацікавлення дослідження емісійних характеристик імпульсного ємнісного розряду в сумішах інертних газів із молекулами йоду в області краю пропускання УФ-випромінювання повітрям. Цей спектральний діапазон перебуває в області головного максимуму поглинання молекул ДНК [20]. Остання обставина важлива для розробки ламп з підвищеною бактерицидною ефективністю й високим ресурсом роботи.

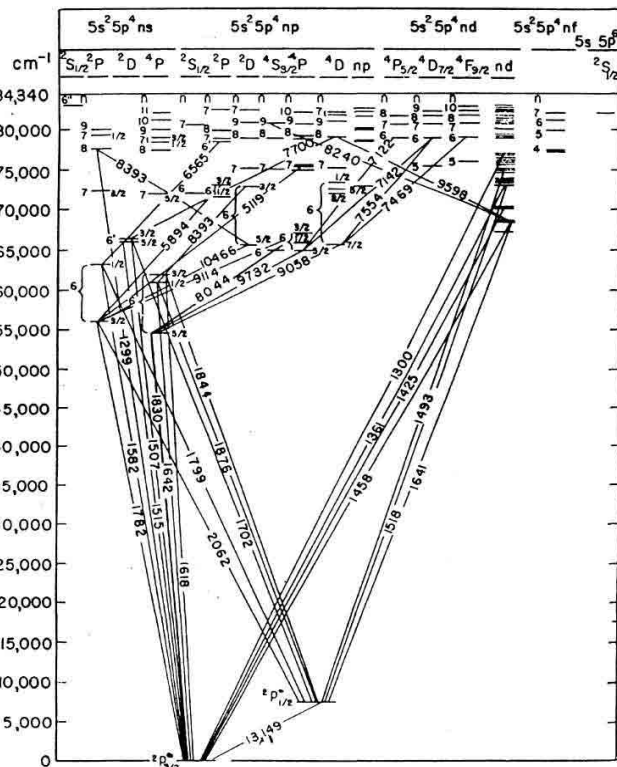


Рис. 1. Діаграма енергетичних рівнів атома йоду [4].

Проте існує також ряд технологічних процесів, де необхідно використовувати більш довгохвильове ультрафіолетове випромінювання зі спектрального діапазону 300–390 нм. Такі джерела випромінювання можна розробити на основі молекул монофториду ксенону (353; 311 нм) або $D' - A'$ -смуги молекули йоду (342 нм). Робочі суміші лампи на основі молекул XeF^* включають сильноагресивні молекули фтору, що зменшує ресурс роботи випромінювача в газостатичних умовах. Тому перспективнішим є застосування в подібних лампах випромінювання молекул йоду. Ці лампи необхідні для використання в технологічних лініях із затверднення лаків і фарб на полімерній основі [21], а також в реакторах фотолітичного окислення [22].

Параметри плазми й кінетику процесів у таких ВУФ-УФ-випромінювачах раніше не вивчали, що стримує оптимізацію роботи ємнісних ламп низького тиску в різних робочих середовищах.

У цій статті наведено результати експерименталь-

ного й теоретичного дослідження характеристик та параметрів плазми лампи з накачуванням імпульсним ємнісним розрядом, яка працює на сумішах He, Ne, Ar, Kr з молекулами йоду й випромінює на спектральних лініях 183.0 і 206.2 нм атома йоду та смуги 342 нм $I_2(D' - A')$.

II. ТЕХНІКА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджували емісійні й електричні характеристики ємнісного розряду на експериментальній установці, схема якої зображена на рис. 2. У працях [8,9,23–25] описана методика й техніка дослідження експлексно-галогенних ламп із збудженням поздовжнім тліючим та ємнісним розрядами. Основними вузлами експериментальної установки були газорозрядна трубка з високоякісного кварцу, імпульсне високовольтне джерело живлення, вакуумна газозмішувальна система, а також система реєстрації оптичних й електричних характеристик імпульсного ємнісного розряду.

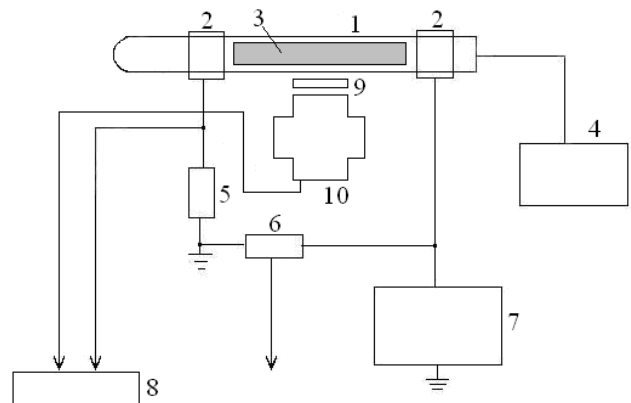


Рис. 2. Схема дослідження характеристик ємнісного розряду: кварцова трубка (1), електроди (2), плазма ємнісного розряду (3), вакуумна газозмішувальна система (4), шунт, для вимірювання струму (5), дільник напруги (6), імпульсне високовольтне джерело живлення (7), імпульсний широкопasmовий осцилограф 6ЛОР-04 (8), світлофільтр (9), електронний лінійний помножувач або коаксiальний фотоелемент (10).

В експерименті використовували циліндричні розрядні трубки з кварцу марки “КУ”, у якого пропускання в спектральному діапазоні 180–210 нм становило не менше 70%, а також трубки з кварцу “КВ”, через який не проходило УФ-випромінювання з довжиною хвилі менше 250 нм. Довжина трубки дорівнювала 40 см, а внутрішній діаметр — 1 см. На зовнішній поверхні трубки встановлювали два кільцеві електроди з нікелевої фольги шириною 2 см так, міжелектродна відстань становила 6 см, а решту частини розрядної трубки використовували як буферний об’єм для суміші пари йоду з інертними газами. Кристали йоду високої чистоти завантажували в частину

розрядної трубки, що була за електродом, на який подавали імпульси високої напруги. В процесі експерименту розрядну трубку охолоджували потоком повітря від вентилятора. Оцінки температури найхолоднішої частини розрядної трубки при $f = 100$ Гц показали, що тиск пари йоду не перевищує 50...60 Па. Для збудження розряду застосовували джерело високовольтних наносекундних імпульсів на основі модулятора з водневим тиратроном й імпульсним кабельним трансформатором. Джерело живлення давало змогу отримувати на газорозрядному проміжку цуги загасаючих коливачь загальною тривалістю до 400 нс і максимальною амплітудою 25–30 кВ. Тривалість півхвилі напруги по основі становила 30–40 нс. Частота повторення імпульсів могла варіюватися в діапазоні 10–100 Гц.

Випромінювання ємнісного розряду досліджували в спектральному діапазоні 200–450 нм з використанням монохроматора МДР-2 і фотопомножувача ФЕУ-106. Випромінювання плазми ємнісного розряду в спектральному діапазоні 180–300 нм аналізували за допомогою однометрового вакуумного монохроматора, виготовленого за схемою Сейя-Наміоки [26]. Обернена лінійна дисперсія монохроматора становила 0.7 нм/мм. Для детектування випромінювання застосовувалися фотопомножувачі ФЕУ-142 і ФЕУ-154, які були підключені до підсилювача постійного струму й електронного потенціометра. В експерименті вакуумний монохроматор не відкачувався, тому нижня межа його чутливості була в інтервалі 175...180 нм. Цю межу визначали пропусканням короткохвильового випромінювання повітрям і кварцовою оболонкою лампи. Калібрування спектрометра за величиною відносної спектральної чутливості в спектральному діапазоні 175–300 нм проводили за випромінюванням електричного розряду у водні.

Імпульсне випромінювання плазми ємнісного розряду реєстрували за допомогою електронного лінійного помножувача ЕЛУ-14 ФС або коаксialного фотоелемента ФЕК-22 СПУ з використанням швидкісних осцилографів 6 ЛОР-04 або С1-99. Імпульси напруги на розрядному проміжку реєстрували за допомогою малоіндуктивного ємнісного дільника, а імпульси струму — з використанням малоіндуктивного шунта струму.

ІІІ. ОПТИЧНІ Й ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЄМНІСНОГО РОЗРЯДУ

При тисках гелію й неону в діапазоні 0.1–10 кПа плазма ємнісного розряду заповнювала весь міжелектродний проміжок і частину розрядної трубки за електродами. На відміну від імпульсного ємнісного розряду на сумішах Kr, Хе з молекулами хлору при його парціальному тиску 300–500 Па, де розряд стискається в тонкий плазмовий шнур, для досліджуваних робочих середовищ стає можливою розробка імпульсної лампи УФ-ВУФ на основі випромінювання атомів йоду з потенційно високим ресурсом роботи

в газостатичному режимі. Основними чинниками, що сприяють цьому, є перехід до нижчого парціального тиску та менш електронегативного галогеноносія, а також відсутність у робочій суміші атомів важких інертних газів. Важливим є також вдале розташування найбільш інтенсивних спектральних ліній атома йоду (рис. 1) у спектральному діапазоні, прозорому для повітря і кварцової оболонки випромінювача.

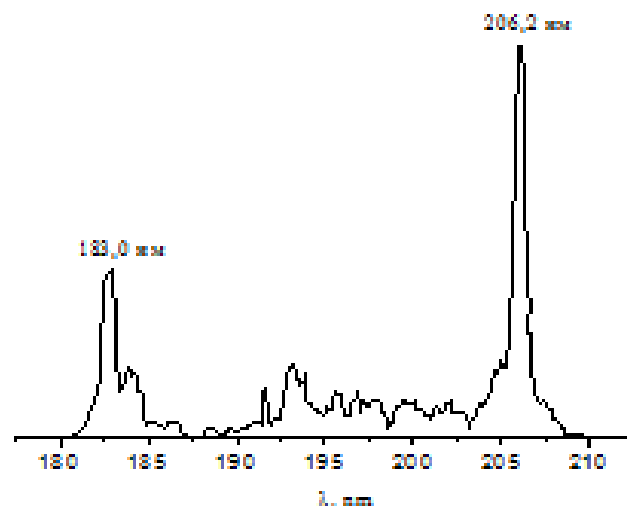


Рис. 3. Спектр випромінювання ємнісного розряду на суміші P(He)–P(I₂)=1330–(50–60) Па при частоті повторення імпульсів збудження $f = 100$ Гц.

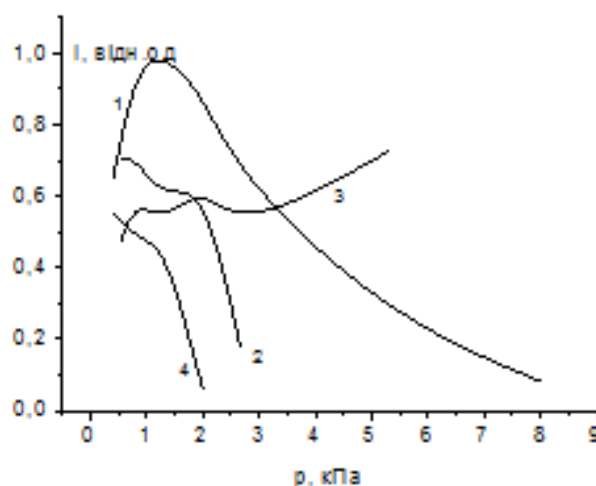
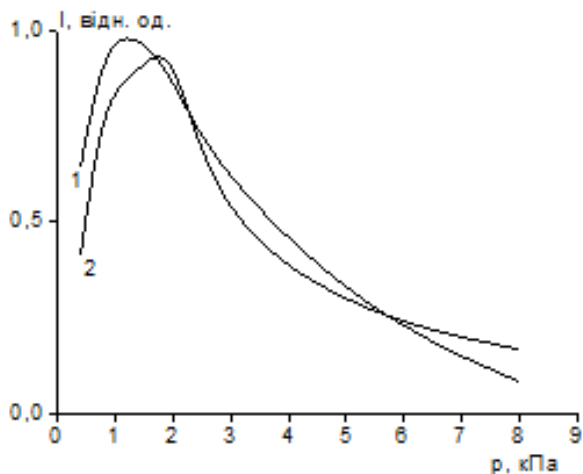


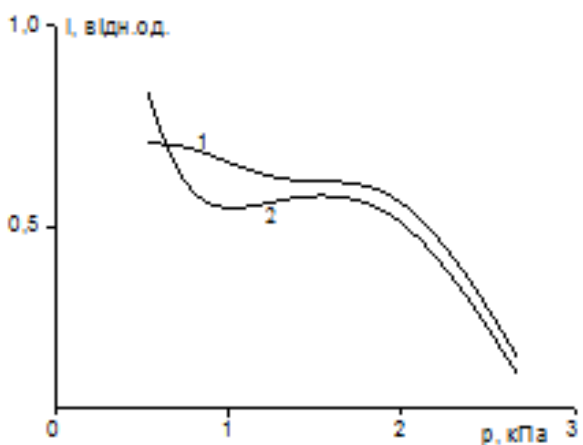
Рис. 4. Залежність інтенсивності спектральної лінії 183.0 нм в імпульсному ємнісному розряді на подвійних сумішах інертних газів із парою йоду від парціального тиску гелію (1), неону (2), аргону (3) і криптону (4).

Спектр випромінювання плазми ємнісного розряду в суміші He–I₂ (без урахування відносної спектральної чутливості ФЕУ-142 і вакуумного монохроматора $k(\lambda)$) зображений на рис. 3. У розряді в сумішах на основі неону спектр випромінювання мав такий же вигляд, тільки відрізнялися інтенсивності спектральних ліній атома йоду. Основна частина ультрафіолетового випромінювання плазми ємнісного розряду представ-

лена випромінюванням спектральних ліній атома йоду: 183.0; 184.0; 187.6 і 206.2 нм. Із урахуванням $k(\lambda)$ сумарна інтенсивність випромінювання спектральних ліній атома йоду в розряді на сумішах He(Ne)-I₂ у спектральному діапазоні 180–200 нм приблизно дорівнювала інтенсивності спектральної лінії 206.2 нм.



а



б

Рис. 5. а. Залежність інтенсивності спектральних ліній 183.0 (1) і 206.2 нм (2) в розряді на суміші Ne-I₂ від парціального тиску гелію; б. Залежність інтенсивності спектральних ліній 183.0 (1) і 206.2 нм (2) в розряді на суміші Ne-I₂ від парціального тиску неону.

Контрольні експерименти з імпульсним емнісним розрядом на подвійних сумішах Ag(Kr)-I₂ показали, що ефективність важких інертних газів у досліджуваній лампі була в 3–4 рази нижчою порівняно із застосуванням легких інертних газів. При цьому плазмовий шнур у центрі розрядної трубки також був відсутній. Так, для прикладу, залежність інтенсивності випромінювання спектральної лінії 183.0 нм від парціальних тисків інертних газів показана на рис. 4. Залежність інтенсивності випромінювання спектральних ліній 183.0 і 206.2 нм від парціального тиску гелію зображена на рис. 5а, а неону — на рис. 5б.

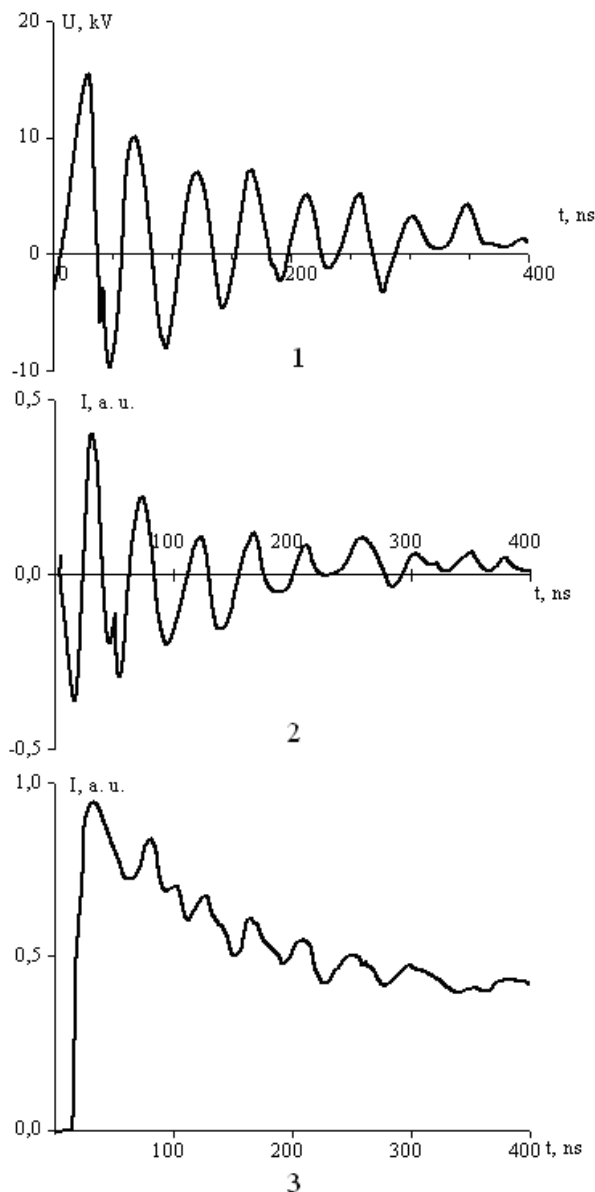


Рис. 6. Осцилограми напруги (1), струму (2) й ультрафіолетового випромінювання плазми (3) розряду на основі суміші P(He)-P(I₂) = 2000 – (50 – 60) Па.

Найбільш оптимальним буферним газом для випромінювача на основі цих спектральних ліній атома йоду був гелій. Оптимальний парціальний тиск гелію був у діапазоні (0.8–2.0) кПа. Зі збільшенням частоти повторення імпульсів від 25 до 100 Гц інтенсивність випромінювання спектральних ліній йоду в сумішах He(Ne)-I₂ зростали на 30–50%. При переході до емнісного розряду на суміші Ne-I₂ інтенсивність випромінювання резонансної лінії атома йоду зменшувалася в 1.5–2.0 рази. Інтенсивність резонансної лінії атома йоду в досліджених сумішах в основному перевищувала інтенсивність спектральної лінії 206.2 нм. Для емнісного розряду на гелієвих сумішах характер поведінки інтенсивності ліній 183.0 і 206.2 нм від парціального тиску гелію однаковий, а для сумішей на основі неону він відрізнявся: при P(Ne) < 0.6 кПа інтенсивність спектральної лінії 206.2 нм була вищою за

інтенсивність лінії 183.0 нм. Найбільш оптимальний тиск неону був у діапазоні 0.5–1.0 кПа. Така відмінність у поведінці інтенсивності випромінювання цих спектральних ліній може зумовлюватися відмінністю електронних кінетичних коефіцієнтів у сумішах на основі гелію й неону, різною кінетикою заселення верхніх робочих рівнів, а також різною теплоємністю буферних газів. Точніші дані з фізики процесів у плазмі ємнісного розряду можна отримати в результаті чисельного моделювання вихідних характеристик випромінювача.

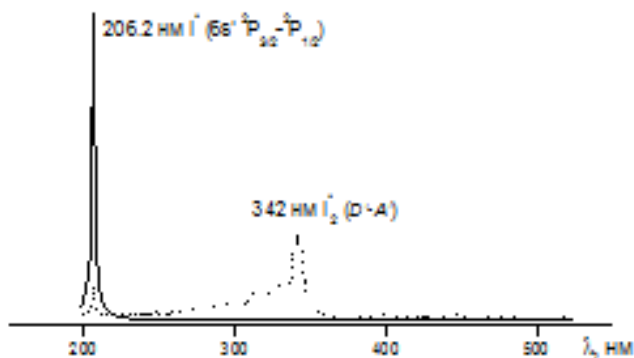


Рис. 7. Спектр випромінювання лампи розряду з оболонкою з кварцу марки “КУ” на суміші P(Ne)–P(I₂)=12000–(100–200) Па; суцільна лінія — апаратний спектр, лінія з окремих крапок — спектр, зведений до $k(\lambda)$.

На рис. 6 наведені осцилограми напруги на електродах розрядної трубки, струму ємнісного розряду і УФ-випромінювання плазми на основі суміші He–I₂. Під час збудження розряду цугом коротких імпульсів сумарна тривалість випромінювання плазми досягає 400 нс. При узгодженні імпульсного джерела збудження з розрядною трубкою тривалість ВУФ-УФ-імпульсів випромінювання атома йоду може бути зменшена на порядок. До того ж самопоглинання резонансної спектральної лінії атома йоду не спостерігається, що дало змогу розширити спектр випромінювання розряду до 183.0 нм.

На рис. 7 зображено спектр випромінювання ємнісного розряду отриманий за допомогою монохроматора МДР-2 і фотопомножувача ФЕУ-106 на суміші P(Ne)–P(I₂) = 12000–(100–200) Па, який не приведений до відносної спектральної чутливості системи реєстрації, — $k(\lambda)$ (суцільна крива) і приведений до $k(\lambda)$ (крива у вигляді окремих крапок). У трубці з кварцу “КУ” основна частина ультрафіолетового випромінювання зосереджена на спектральній лінії атома йоду 206.2 нм і смугі 342 нм молекули йоду. При заміні оболонки лампи на кварц марки “КВ” у спектрі випромінювання лампи спостерігалася тільки смуга молекули йоду. Одночасно втрачалася приблизно половина потужності ультрафіолетового випромінювання ємнісного розряду, яка пов’язана з випромінюванням спектральної лінії 206.2 нм атома йоду.

Залежність яскравості випромінювання спектральної смуги 342 нм I₂ (D' – A') (за однакових умов збудження розряду й рівного парціального тиску па-

ри йоду в лампі) від парціального тиску буферних інертних газів показана на рис. 8. Для роботи лампи на смугі 342 нм I₂ (D' – A') найбільш оптимальними інертними газами є гелій і неон при тиску 15–20 кПа, а за використання важких інертних газів потужність випромінювання лампи на смугі молекули йоду зменшується на порядок. Для випромінювання лампи на спектральній лінії йоду найменш ефективними буферними газами були аргон і криптон.

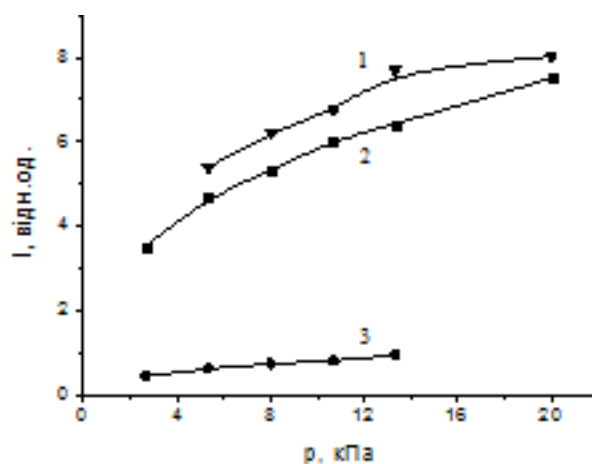


Рис. 8. Залежність яскравості випромінювання спектральної смуги молекули йоду з максимумом на 342 нм від парціального тиску неону (1), гелію (2) і криптону (3) в лампі ємнісного розряду при P(I₂)=100–200 Па.

IV. РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ НА СУМІШАХ ПАРИ ЙОДУ З АТОМАМИ ГЕЛІЮ ТА КСЕНОНУ

У зв’язку з тим, що в потужному імпульсному ємнісному розряді значна частина молекул йоду дисоціює на атоми, при розв’язанні кінетичного рівняння Больцмана методом двочленного наближення [27] для функції розподілу електронів за енергією (ФРЕЕ) передбачалося, що галогеноносії в сумішах представлені молекулами I₂ (50 %) й атомами I (50%), які перебувають в основному стані. Розрахунок ФРЕЕ в розряді на сумішах P(He)–P(I₂)–P(I)= 800–50–50 Па і P(Xe)–P(I₂)–P(I)= 800–50–50 Па при різних значеннях параметра E/N (50–300 Тд) показав, що з переходом від гелієвмісних до ксеноновмісних сумішей відбувається зниження частки електронів із високими енергіями в розряді. Це пов’язано з тим, що пороги збудження та йонізації атомів ксенону (8.3 еВ і 12.1 еВ відповідно) істотно нижчі, ніж для атома гелію (19.8 еВ і 22.5 еВ), тому обрізання хвоста ФРЕЕ в суміші на основі ксенону відбувається при нижчих енергіях. Швидкість дрейфу електронів у розряді на основі суміші He–I₂–I лінійно збільшувалася у діапазоні (1–5) 10⁷ см/с, а в розряді на суміші Xe–I₂–I — в діапазоні (2–8) 10⁶ см/с зі збільшенням параметра E/N від 50 до 300 Тд. При цьому середня енергія електронів зростала від 5.3 до 8.8 еВ (суміш He–I₂–I) і від 4.2 до 7.5 еВ (суміш Xe–I₂–I). Максимальні середні енергії електронів спосте-

рігалися в розряді на основі гелію завдяки яскраво вираженому високоенергетичному хвосту на ФРЕЕ. Заміна в робочих сумішах гелію на ксенон приводила

до різкого обрізання ФРЕЕ при енергіях, близьких до порога збудження атома ксенону, і відповідного зменшення середньої енергії електронів.

| | | | | | | | | |
|---------|--------------|--------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| E/N, Td | Збуд-я He | Іон-я He | Збуд-я I ₂ | Прил-я I ₂ | Дис-я I ₂ | Іон-я I ₂ | Збуд-я I | Іон-я I |
| 50 | 0.45 | 8.28e-5 | 12.9 | 9.56e-2 | 42 | 9.14 | 10 | 25.1 |
| 150 | 2.72 | 7.55e-4 | 6.37 | 2.08e-2 | 29 | 20 | 6.72 | 35 |
| 300 | 3.30 | 9.51e-4 | 5.6 | 1.59e-2 | 27 | 21.6 | 6.16 | 36 |
| E/N, Td | Збудження Xe | Іонізація Xe | Збудження I ₂ | Прилипання I ₂ | Дисоціація I ₂ | Іонізація I ₂ | Збудження I | Іонізація I |
| 50 | 58 | 0.163 | 17 | 0.44 | 17.6 | 1.12e-2 | 6.52 | 0.48 |
| 150 | 72 | 6.8 | 4.75 | 5.05e-2 | 10.7 | 0.33 | 3.0 | 2.22 |
| 300 | 68.6 | 17.3 | 2.09 | 1.31e-2 | 6.56 | 0.78 | 1.66 | 2.94 |

Таблиця 1. Питомі втрати потужності розряду (%) на електронні процеси в сумішах P(He)-P(I₂)-P(I) = 800-50-50 Па і P(Xe)-P(I₂)-(I) = 800-50-50 Па.

| E/N, Td | 50 | 150 | 300 |
|--|----------|----------|----------|
| P(He)-P(I ₂)-P(I) = 800-50-50 Па | | | |
| Збудження He | 9.91e-13 | 2.73e-11 | 4.44e-11 |
| Іонізація He | 1.62e-16 | 6.66e-15 | 1.13e-14 |
| Збудження I ₂ | 1.77e-9 | 3.97e-9 | 4.69e-9 |
| Ступінчата іонізація I ₂ | 3.46e-8 | 8.37e-8 | 9.94e-8 |
| Прилипання I ₂ | 6.71e-10 | 6.61e-10 | 6.80e-10 |
| Дисоціація I ₂ | 3.57e-9 | 1.12e-8 | 1.39e-8 |
| Іонізація I ₂ | 5.35e-10 | 5.25e-9 | 7.70e-9 |
| Збудження I | 1.08e-9 | 3.16e-9 | 3.88e-9 |
| Іонізація I | 1.69e-9 | 1.07e-8 | 1.49e-8 |
| Ступінчата іонізація I | 7.54e-8 | 1.18e-7 | 1.30e-7 |
| P(Xe)-P(I ₂)-(I) = 800-50-50 Па | | | |
| Збудження Xe | 7.42e-11 | 7.33e-10 | 2.52e-9 |
| Іонізація Xe | 1.44e-13 | 4.76e-11 | 4.37e-10 |
| Ступінчата іонізація Xe | 2.30e-7 | 2.92e-7 | 3.39e-7 |
| Збудження I ₂ | 5.71e-10 | 1.26e-9 | 2.00e-9 |
| Ступінчата іонізація I ₂ | 7.91e-9 | 2.25e-8 | 3.93e-8 |
| Прилипання I ₂ | 7.51e-10 | 6.84e-10 | 6.41e-10 |
| Дисоціація I ₂ | 3.66e-10 | 1.76e-9 | 3.88e-9 |
| Іонізація I ₂ | 1.59e-13 | 3.69e-11 | 3.17e-10 |
| Збудження I | 1.65e-10 | 6.01e-10 | 1.2e-9 |
| Іонізація I | 7.82e-12 | 2.88e-10 | 1.37e-9 |
| Ступінчата іонізація I | 4.47e-8 | 6.61e-8 | 8.4e-8 |

Таблиця 2. Константи швидкості електронних процесів (см³/с) у сумішах He-I₂-I і Xe-I₂-I.

Найбільші швидкості дрейфу електронів також спостерігалися в розряді на суміші He-I₂-I, що зумовлено інтенсивнішим розсіянням електронів на атомах ксенону (перетин транспортного розсіяння електронів на атомах Хе в інтервалі енергій до 25 еВ на 1-2 поряд-

ки перевищує аналогічний переріз для атома гелію). Інтенсивніше розсіяння електронів в розряді на ксеноновмісній суміші приводить до зменшення направленої швидкості руху електронів у цьому середовищі порівняно з гелієвмісною сумішшю.

У таблиці 1 показано розподіл потужності, що вноситься в розряд, за найбільш важливими електронними процесами (див. також [27]). Такими процесами є збудження та йонізація інертних газів, атомів і молекул галогену, а також дисоціація й дисоціативне прилипання електронів до молекул йоду. Процесів ступінчатої йонізації інертних газів і йоду не брали до уваги. Це пов'язано з тим, що, по-перше, концентрації збуджених атомів і молекул істотно залежать від часу горіння розряду і, по-друге, їхні величини на декілька порядків нижчі, ніж концентрації початкових компонент суміші (Ne, Xe, I₂, I).

Видно, що у зв'язку з дуже високими порогами збудження та йонізації атомів гелію більша частина потужності розряду в суміші Ne–I₂–I витрачається на реакції за участю галогену. Незначні витрати потужності на прилипання електронів до галогену пояснюються дуже низьким порогом цього процесу. Збільшення електричного поля приводить до зростання кількості швидких електронів у розряді та зростання ролі процесів йонізації йоду, збудження та йонізації гелію.

У суміші на основі ксенону витрати потужності на збудження та йонізацію інертного газу істотно більші. Порівнювані пороги процесів за участю ксенону та йоду приводять до того, що при низьких полях потужність розподіляється між ними майже порівну. Зі збільшенням електричного поля частка енергії, що витрачається на реакції за участю інертного газу, зростає.

Значення швидкостей основних електронних процесів у розглянутих сумішах залежно від величини параметра E/N наведені в таблиці 2 (див. також [27]).

Максимальні константи швидкостей притаманні процесам з найменшими порогами — ступінчаста йонізація ксенону й атомарного та молекулярного йоду, мінімальні — реакціям збудження та йонізації атомів гелію. Для всіх процесів характерне зростання констант швидкості зі збільшенням величини приведенного електричного поля. Єдиним винятком є процес дисоціативного прилипання електронів до молекул йоду, що має практично нульовий поріг і, відповідно, не залежний від кількості швидких електронів у розряді.

V. ВИСНОВКИ

Отже, застосування малоагресивного галогеноносія (пари йоду при помірному парціальному тиску), дало змогу отримати порівняно однорідний імпульсний ємнісний розряд, що заповнює весь міжелектродний проміжок без формування плазмового шнура в центрі розрядної трубки. Імпульсний ємнісний розряд у сумішах гелію або неону та пари йоду, окрім випромінювання спектральної лінії 206.2 нм, не менш ефективно випромінює на резонансній лінії атома йоду (183.3 нм). Найбільш ефективним буферним газом був гелій при парціальному тиску (0.8–2.0) кПа. Оптимальний парціальний тиск неону перебував в діапазоні (0.5–1.0) кПа. Використання цугу коротких імпульсів збудження дало змогу отримати тривалість імпульсу випромінювання близько 400 нс. На базі досліджуваного розряду можна розробити лампу низького тиску, яка випромінює в спектральному діапазоні 206.2–183.0 нм. Вона може мати високий ресурс роботи в газостатичному режимі, оскільки розряд є безелектродним, і високу бактерицидну ефективність, оскільки її спектр випромінювання корелюється з головним максимумом поглинання молекул ДНК. При узгодженні джерела збудження ємнісного розряду з розрядною трубкою тривалість світлового імпульсу можна зменшити до 30–40 нс.

Установлено, що імпульсний ємнісний розряд субмікросекундної тривалості в оболонці з кварцу марки "KB" на сумішах інертних газів та пари йоду найефективніше випромінює на смузі 342 нм I₂ ($D' - A'$) при використанні як буферних газів неону й гелію при тиску 15–20 кПа і парціальному тиску пари йоду в діапазоні 100–200 Па. На основі дослідженого розряду можна розробити лампу для обробки поверхонь, на які нанесений шар лаку або фарби на полімерній основі й фотолітичного окислення.

Розраховані транспортні характеристики електронів і константи швидкостей електронних процесів у розряді на сумішах гелію або ксенону та пари йоду можна використати для чисельного моделювання вихідних характеристик лампи імпульсного ємнісного розряду.

-
- [1] А. И. Федоров, Письма Журн. техн. физ. **35**, 81 (2009).
- [2] С. М. Авдеев, Э. А. Соснин, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, Д. В. Шитц, Письма Журн. техн. физ. **34**, 1 (2008).
- [3] М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, Д. В. Шитц, Письма Журн. техн. физ. **22**, 74 (2002).
- [4] P. Harteck, R. R. Reeves, B. A. Thompson, Z. Naturforsch. **19**, 1 (1964).
- [5] G. Liuti, J. E. Mentall, Rev. Shi. Instr. **39**, 1767 (1968).
- [6] U. Gross, A. Ubelis, P. Spietz, J. Burrows, J. Phys. D: Appl. Phys. **33**, 1588 (2000).
- [7] А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, И. А. Грабовая, Письма Журн. техн. физ. **29**, 77 (2003).
- [8] А. К. Шуаибов, И. А. Грабовая, Опт. журн. **72**, 502 (2005).
- [9] А. К. Шуаибов, И. А. Грабовая, Опт. спектроскоп. **98**, 567 (2005)
- [10] Г. А. Волкова, Г. Н. Зверева, Опт. спектроскоп. **96**, 419 (2004).
- [11] М. И. Ломаев и др., Усп. физ. наук **173**, 201 (2003).
- [12] E. A. Sosnin, T. Oppenlander, V. F. Tarasenko, Journ. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev. **7**, 145 (2006).
- [13] T. Oppenlander, E. A. Sosnin, Int. Ultraviolet Ass. News **4**, 16 (2005).
- [14] E. A. Sosnin, M. F. Erofeev, V. F. Tarasenko, J. Phys. D: Appl. Phys. **38**, 3194 (2005).

- [15] О.К. Шуайбов, И. В. Шевера, Л. Л. Шимон, Е. А. Соснин, *Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка і застосування* (Ужгород–Томськ, Видавництво УжНУ “Говерла”, 2006).
- [16] Ч. Брау, *Экцимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (Москва, Мир, 1981).
- [17] В. С. Зуев, Л. Д. Михеев, А. П. Широких, *Квант. электроника* **9**, 753 (1982).
- [18] M. I. Lomaev, V. F. Tarasenko, *SPIE* **4747**, 390 (2002).
- [19] С. М. Авдеев, И. Д. Костыря, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко, *Журн. техн. физ.* **76**, 59 (2006).
- [20] Von C. Sonntag, *Disinfection with UV radiation in Process Technologies for Water Treatment*, edited by S. Stucki (New-York, Plenum Press, 1987).
- [21] Э. М. Баталов, Ю. А. Прочухан, *Вестн. Башкирского ун-та* **1**, 56 (2000).
- [22] *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment* (IWA Publishing: Cornwall, UK, 2004).
- [23] А. К. Шуайбов, И. В. Шевера, *Журн. техн. физ.* **77**, 93 (2007).
- [24] О. К. Шуайбов, О. Й. Миня, З. Т. Гомоки, Л. Л. Шимон, *Імпульсна бактерицидна лампа* (Патент на корисну модель № 34794. Бюл. №16. С.1-6. 5 фіг. 26.08.2008).
- [25] А. К. Шуайбов, А. И. Миня, З. Т. Гомоки, Г. Е. Ласлов, *Журн. техн. физ.* **79**, 147 (2009).
- [26] А. И. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островський, *Техника и практика спектроскопии* (Москва, Наука, 1976).
- [27] А. К. Шуайбов, И. А. Грабовая, З. Т. Гомоки, А. Г. Калюжная, А. И. Щедрин, *Журн. техн. физ.* **79**, 97 (2009).

ULTRAVIOLET CAPACITIVE DISCHARGE LAMP IN MIXTURES OF INERT GASES AND IODINE VAPORS

A. K. Shuaibov¹, L. L. Shimon¹, A. I. Minya¹, Z. T. Gomoki¹, A. G. Kalyuzhnaya², A. I. Shchedrin²

¹*Uzhgorod National University, Ukraine,
e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua*

²*Institute of Physics, NAS of Ukraine,
e-mail: ashched@iop.kiev.ua*

Emission characteristics of an ultraviolet radiation source excited with the help of a pulse-periodic capacitive discharge in the mixtures of helium, neon, and krypton with iodine vapors and emitting in the spectral range of 180–450 nm is investigated. It is shown that the dominant part of the radiation power of the lamp is concentrated in the 183.0-nm and 206.2-nm spectral lines of iodine atom and the $D' - A'$ band of iodine molecule with a maximum close to 342 nm. The radiation intensity of the lamp is optimized with respect to the partial pressure of the inert gases. The parameters of the discharge plasma in the mixtures of iodine vapors with He and Xe atoms are calculated, which is of interest for the modeling of plasma kinetics and output characteristics of UV radiation sources operating on the iodine and xenon iodide molecules and iodine atom.