ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 7, № 2 (2003) с. 167–174

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 7, No. 2 (2003) p. 167–174

ІМПУЛЬСНО-ПЕРІОДИЧНИЙ ОБ'ЄМНИЙ РОЗРЯД НИЗЬКОГО ТИСКУ НА СУМІШАХ АРГОНУ І КРИПТОНУ З ЕЛЕГАЗОМ

О. К. Шуаібов, Л. Л. Шимон, І. В. Шевера, А. Й. Дащенко
Ужгородський національний університет,
вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000, Україна

(Отримано 10 травня 2002 р.; в остаточному вигляді — 10 жовтня 2002 р.)

Подано результати дослідження просторових, електричних й оптичних характеристик імпульсно-періодичного розряду на газових сумішах Ar/SF_6 та Kr/SF_6. Об'ємний розряд, який не торкається кварцового віконця (вивідної апертури УФ–ВУФ випромінювання), запалювали в системі електродів "сферичний анод — плоский катод" при міжелектродній віддалі 3 см і загальному тиску газових сумішей ≤ 2.0 кПа. Імпульсно-періодичний режим горіння розряду реалізовано за рахунок розвитку у плазмі нестійкости, яка зумовлена порушенням балансу між процесами прилипання та відлипання електронів до молекул елегазу (і продуктів розпаду SF_6 у плазмі). Унаслідок цього імпульсно-періодичний режим горіння розряду встановлювався автоматично при поданні на анод сталої напруги ($U_{\mathrm{ch}} \leq 1.0$ кВ). Роль комутатора у схемі живлення розряду виконує сама плазма об'ємного розряду. Об'ємний розряд викликає інтерес для застосування в імпульсно-періодичній ексимерній лампі низького тиску, яка призначена для використання в мікроелектроніці, полімерній хемії, біотехнологіях і медицині. Установлено, що плазма об'ємного розряду є широкосмуговим джерелом випромінювання на ділянці спектра 150–300 нм. Базові довжини хвиль випромінювання лампи: 193 нм ArF(B–X) і 249 нм KrF(B–X). Частота проходження імпульсів струму розряду змінювалась у діяпазоні 1–120 кГц зі збільшенням середнього струму з 1 до 50 мА і зміною величини ємности зовнішнього конденсатора, який шунтує розрядний проміжок у межах 200–3500 пФ. Наведено результати дослідження ресурсних характеристик випромінювання молекул ArF(B–X) та KrF(B–X) залежно від величини середнього струму розряду.

Ключові слова: імпульсно-періодичний розряд, прилипання, відлипання, домен, аргон, криптон, елегаз, спектр, випромінювання, плазма.

PACS number(s): 52.80.Jm, 52.20.Jm

І. ВСТУП

Поздовжній тліючий розряд сталого струму на сумішах Ar, Kr і Xe з молекулами Cl_2, HCl, NF_3, F_2 і SF_6 при тисках робочого середовища 1–3 кПа широко застосовують у системах накачування ексимерно-галогенних ламп неперервної дії [1–8]. Джерелами накачування таких ламп є високовольтні випрямлячі напруги ($U_{\mathrm{ch}} \geq 5 \div 10$ кВ). Робоча апертура ламп — кварцова розрядна трубка — безпосередньо контактує з плазмою тліючого розряду, що вже при середніх розрядних струмах $I_{\mathrm{ch}} \geq 30$ мА приводить до значного нагрівання лампи і зв'язування галогеномістких сполук кварцом [9]. Збільшення об'єму активного середовища лампи за рахунок переходу до тліючого розряду в широких трубах (з внутрішнім діяметром $D \geq 5$–7 см) обмежено контрагуванням об'ємного розряду та його розшаруванням в електронеґативній плазмі [10]. Тому перспективною є розробка електророзрядної ексимерної лампи низького тиску на основі короткого тліючого розряду, в якому робоча апертура випромінювача (скло, прозоре в спектральному діяпазоні 150–350 нм) безпосередньо не контактує з розрядною плазмою. Уперше в праці [11] була описана подібна лампа на основі газових сумішей Xe/HCl, Xe/Cl_2 ($P \leq 2$ кПа). При виводі УФ випромінювання через сітковий електрод лампи встановлено, що її ефективність $\geq 4\%$, а величина сталої напруги на аноді не переважає 1 кВ. Результатів дослідження спектральних та часових характеристик цієї планарної лампи в статті [11] не подано. Тому викликає значний інтерес розробка ексимерної лампи, яка може працювати в більш короткохвильовому діяпазоні спектра ($\Delta\lambda \leq 270$ нм, що значною мірою забезпечується випромінюванням молекул ArF та KrF зі смугами при $\lambda = 193$ і 249 нм). Особливе зацікавлення викликає розробка найбільш короткохвильової лампи на 193 нм ArF(B–X), випромінювання якої ще пропускає атмосфера. З потужних джерел УФ–ВУФ випромінювання на основі фторидів важких інертних газів найменш дослідженими є активні середовища зі складними, малоаґресивними фтороносіями типу SF_6 та CF_4. У праці [12], де вивчали вихідні характеристики імпульсно-періодичних електророзрядних лазерів на молекулах ArF, KrF і XeF, встановлено, що в них ресурс робочого середовища значно перевищував ресурс роботи відповідних газових сумішей на основі молекул фтору. Це робить актуальними дослідження характеристик короткого об'ємного розряду на сумішах аргону та криптону з молекулами елегазу, оскільки вони важливі для розробок короткохвильових ексимерних ламп з високим ресурсом роботи в газостатичному режимі або в режимі повільної заміни робочої газової суміші. Крім цього, у плазмі на основі таких сильно електронеґативних молекул, як елегаз, завжди є велика ймовірність розвитку нестійкости, яка зумовлена порушенням балансу між процесами прилипання та відлипання електронів до галогеномістких молекул (і продуктів їх розпаду в плазмі) [13]. Ця нестійкість проявляється в модуляції струму, тому розробка чисто стаціонарних ексимерних ламп низького тиску з накачуванням від джерела сталої напруги потребує додаткового дослідження. Найяскравіше подібні ефекти виражаються в газових сумішах з електронеґативними молекулами, у яких висока електронна спорідненість з галогенами [14], що підтверджує актуальність вибору елегазу для утворення фторидів аргону і криптону. Раніше ми досліджували багатоелектродний коронний розряд атмосферного тиску на сумішах He/Ar, Kr, Ar/F_2 і виявили утворення плазмового домену великого об'єму ($\leq 20\,\text{см}^3$), який формувався в ґенераційній ділянці коронного розряду в процесі розвитку прилипальної нестійкости плазми [15]. У нашій статті подано результати дослідження характеристик короткого тліючого розряду низького тиску на сумішах Ar/SF_6 і Kr/SF_6, який можна застосувати в еколого-бактерицидній ексимерній лампі низького тиску.

II. ТЕХНІКА ТА УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

У статті наведено результати дослідження просторових характеристик плазмових доменів на основі газових сумішей Ar/SF_6 та Kr/SF_6, статичних і динамічних вольт-амперних характеристик (ВАХ), спектрів випромінювання плазми, осцилограм імпульсної складової напруги на розрядному проміжку, осцилограм струму, осцилограм випромінювання плазми та залежности яскравости випромінювання електронно-коливальних смуг ексимерних молекул від величини середнього струму розряду та часу неперервної роботи лампи на вибраних газових сумішах. Основні елементи експериментальної установки та методика досліджень описані в наших статтях [8,16,17]. Об'ємний розряд запалювали в системі електродів "сферичний анод — плоский катод" (рис. 1). Міжелектродна віддаль дорівнювала 3 см. Діяметр катода становив 9 см, а анода (з радіусом заокруглення робочої поверхні 3 см) дорівнював 7 см. Електроди виготовлено з дюралюмінію і встановлено на діелектричному фланці розрядної камери об'ємом 10 літрів. Камера герметично з'єднувалась з півметровим вакуумним монохроматором, у якого було вхідне LiF-віконце. Вакуумний спектрометр прокалібрований за відносною спектральною чутливістю в діяпазоні довжин хвиль 130–350 нм. Точність вимірювання відносної яскравости смуг випромінювання становила 10%, спектральне розділення вакуумного монохроматора — 0.7 нм. Ми також одержали результати часових вимірів яскравости випромінювання плазми в спектральній ділянці 200–700 нм. Ці вимірювання зроблено за допомогою широкосмугового імпульсного осцилографа С1–99. Часове розділення цієї системи реєстрації не переважало 10 нс. Частоту повторення імпульсів струму розряду контролювали за допомогою частотоміра Ч3–57. Первинними перетворювачами при реєстрації осцилограм струму та змінної складової напруги на розряднім проміжку були відповідно малоіндуктивний шунт ($R_{\text{Ш}} = 1$–$5\,\text{Ом}$) та малоіндуктивний ємнісний дільник напруги з коефіцієнтом ділення 400. Точність осцилографічних вимірів становила 10–12%. Просторові характеристики розряду реєстрували фотографуванням з подальшою обробкою зображення на сканері та персональному комп'ютері. Напругу додатної полярности подавали на анод від джерела сталої напруги ($U_{\text{ch}} \leq 1000\,\text{В}$).

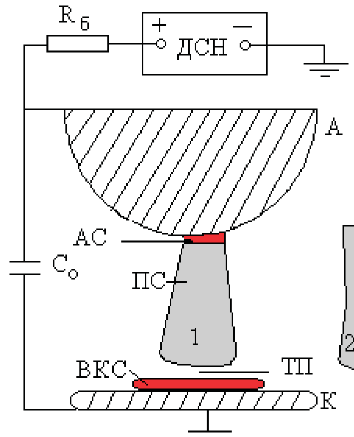

Рис. 1. Система електродів імпульсно-періодичного розряду, схема його живлення й вигляд плазми на сумішах Kr/SF_6 = 160/120 (1) та 640/400 Па (2), де: анод (А), анодне свічення (АС), позитивний стовп (ПС), темний простір (ТП), від'ємне катодне свічення (ВКС), катод (К), джерело сталої наруги (ДСН), баластний опір $R_б$ = 20 кОм, імпульсний конденсатор, який шунтував міжелектродний проміжок (C_0 = 200–3500 пФ).

Для стабілізації розряду та обмеження струму в анодному колі використано опір $R_б = 20\,\text{кОм}$. Джерело живлення розряду дозволяло отримувати середні струми в діяпазоні 1–70 мА. Сумарна ємність системи електродів і їх монтажу (паразитна ємність) не переважала 20 пФ. В окремих експериментах міжелектродний проміжок шунтували набором зовнішніх імпульсних коденсаторів типу КВИ–2 чи КВИ–3 із загальною ємністю 200–3500 пФ.

III. ПРОСТОРОВІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Результати реконструкції зображення плазми (на прикладі розряду на суміші Kr/SF_6) наведено на рис. 1. Об'ємний розряд мав форму усіченого конуса з меншою основою, яка щільно прилягала до яскравого анодного свічення круглої форми. Нижня частина плазмоутворення мала сферичну форму й була відділена від плазми від'ємного катодного свічення темним проміжком величиною 1–9 мм. Діяметр плазми від'ємного катодного свічення (ВКС) в 1.5–2.0 рази перевищував діяметр його прикатодної частини. В електронеґативній плазмі подібні утворення називають доменами, або автосолітонами [14,18]. При фіксованому парціяльному тиску елегазу в суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$ величина діяметрів $d(A)$ і $d(K)$ зменшується в 1.5–3.0 рази зі збільшенням парціяльного тиску криптону від 160 до 1330 Па (табл. 1)

Склад суміші, Па	$d(A)$, мм	$d(K)$, мм
160/120	12	18
640/120	10	15
1300/120	4	12
640/400	5	10

Таблиця 1. Розміри доменів на основі газової суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$.

Збільшення парціяльного тиску елегазу зумовлювало ще сильніше зменшення величин $d(A)$ і $d(K)$, а при $P(\mathrm{SF_6}) \geq 2.0$ кПа розряд починав хаотично переміщуватись по колу на периферійній ділянці системи електродів. Для доменів на основі суміші аргону з елегазом характер залежности просторових параметрів від тиску та складу газових сумішей був подібним до наведеного в таблиці 1.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) розряду показані на рис. 2 і 3. Статичні ВАХ, які відбивають залежність між усередненою в часі напругою (U_{ch}) та середнім струмом розряду (I_{ch}), були близькими за формою до ВАХ поздовжнього розряду сталого струму на суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$ [6]. При струмах $I_{\mathrm{ch}} \leq 15$–20 мА статичні ВАХ відповідали піднормальній стадії тліючого розряду, а при більших розрядних струмах — нормальній стадії горіння тліючого розряду [19]. Збільшення парціяльного тиску аргону з 280 до 800 Па при фіксованому значенні $P(\mathrm{SF_6})$ приводило до збільшення напруги запалювання розряду з 950 В до 1250 В, а величини квазістаціонарної напруги на нормальній стадії тліючого розряду — з 800 В до 950 В. Принципово інша форма ВАХ була отримана, коли брали миттєві значення напруги (U) і струму (I) з відповідних осцилограм (динамічна ВАХ розряду, рис. 3). У початкові моменти часу, коли лише відбувається формування домену в міжелектродному проміжку, струм розряду збільшувався практично з нуля до 4–8 А зі зростанням спаду напруги на розрядному проміжку до 5 кВ (аномальний режим горіння тліючого розряду). У наступні моменти часу струм проходив головний максимум і зменшувався, що спричиняло формування на динамічній ВАХ розряду ділянки з від'ємним нахилом. Подібні ділянки на ВАХ характерні для плазми, яка є в режимі прилипальної нестійкости [14]. Після основного максимуму струму в об'ємному розряді на сумішах $\mathrm{Ar/SF_6}$ їхні вторинні максимуми відбивали (якісно подібну до попередньої) залежність $U = f(I)$.

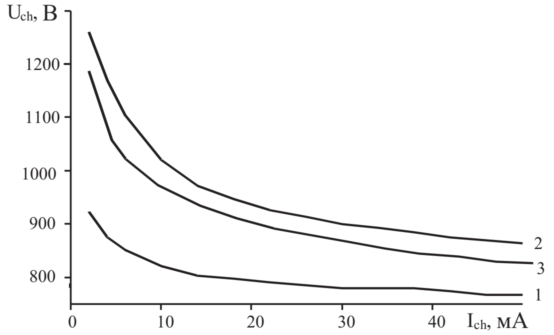

Рис. 2. Статичні ВАХ об'ємного розряду на сумішах $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{SF_6}) = 280/120$ (1), 800/120 (2) та $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6}) = 640/120$ Па (3).

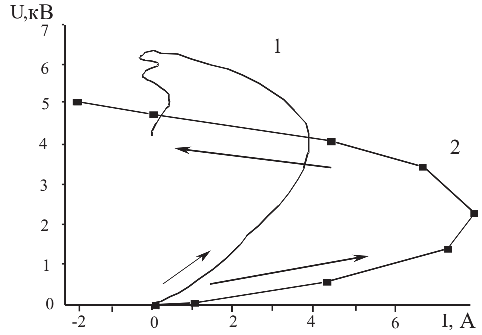

Рис. 3. Динамічні ВАХ об'ємного розряду на сумішах $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{SF_6}) = 400/120$ (1) та $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6}) = 640/120$ Па (2) при $I_{\mathrm{ch}} = 30$ мА.

IV. ОПТИЧНІ, ЧАСОВІ І РЕСУРСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Попередні дослідження яскравости випромінювання в спектральних ділянках 190–300 нм та 300–700 нм, проведені з використанням наборів світлофільтрів, виявили, що яскравість випромінювання у спектральній ділянці 300–700 нм не перевищує 10–15 % від яскравости випромінювання в спектральній ділянці 190–700 нм. Тому випромінювання, яке реєстрували за допомогою імпульсного фотопомножувача "Фотон", в основному, можна віднести до випромінювання фторидів Ar і Kr. Головний внесок у спектри УФ–ВУФ випромінювання плазми належав смугам молекул ArF і KrF (рис. 4.). B–X і D–X смуги фторидів аргону та криптону були значно потовщеними, що приводило до їх взаємного перекриття і формування практично суцільної широкої смуги в діяпазоні 210–260 нм (плазма на основі суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$) і 150–300 нм (плазма на основі суміші $\mathrm{Ar/SF_6}$). Такий вигляд спектрів випромінювання плазми зумовлений незавершеністю процесів коливальної релаксації всередині B і D станів ексимерних молекул при низькому тиску газових сумішей [20]. В умовах цього експерименту ефект перекриття молекулярних смуг випромінювання та формування єдиної смуги в діяпазоні ВУФ–УФ спектра виражений сильніше, ніж у широкосмуговій лампі з накачуванням поздовжнім розрядом [16], оскільки тиск газових сумішей у цьому експерименті зменшено в 3–5 разів.

Максимальна яскравість випромінювання широкої смуги на основі суперпозиції смуг KrF$(D,B$–$X)$ у спектральному діяпазоні 210–270 нм одержана в розряді на сумішах $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6})$ = 400–500/120–150 Па, а для розряду на сумішах аргону й елегазу найоптимальнішими були суміші $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{SF_6})$ = 700–900/80–120 Па. Збільшення величини $P(\mathrm{Ar})$, $P(\mathrm{Kr})$ і $P(\mathrm{SF_6})$ за наведені вище межі викликала значне зменшення яскравости випромінювання домену і зменшення його об'єму. Однією з ознак розвитку нестійкости плазми, яка спричинена порушенням балансу між процесами прилипання й відлипання електронів (коли об'ємний розряд запалювали з використанням джерела сталої напруги), є модуляція струму й випромінювання розряду [14,21]. Тому важливо досліджувати не лише усереднені в часі характеристики об'ємного розряду, а і його часові характеристики. Типові осцилограми імпульсної складової напруги, розрядного струму й випромінювання плазми на сумішах $\mathrm{Ar/SF_6}$ різного складу й тиску наведено на рис. 5. Постійні складові струму й випромінювання плазми відсутні, тому розряд можна вважати імпульсно-періодичним. Амплітуда імпульсів напруги досягала 7–8 кВ при величині сталої напруги на аноді $U_{\mathrm{ch}} \leq 1.0$ кВ.

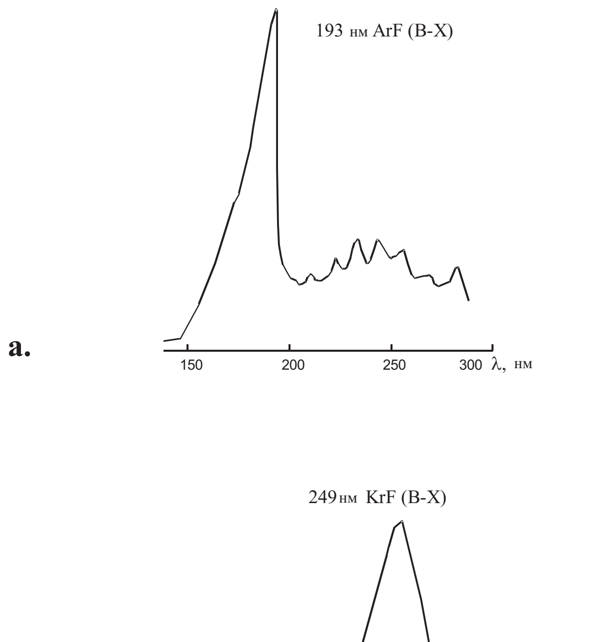

Рис. 4. Спектри випромінювання розрядної плазми на сумішах $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{SF_6})$ = 800/120 (а) та $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6})$ = 400/120 Па (б) (I_{ch} = 30 мА).

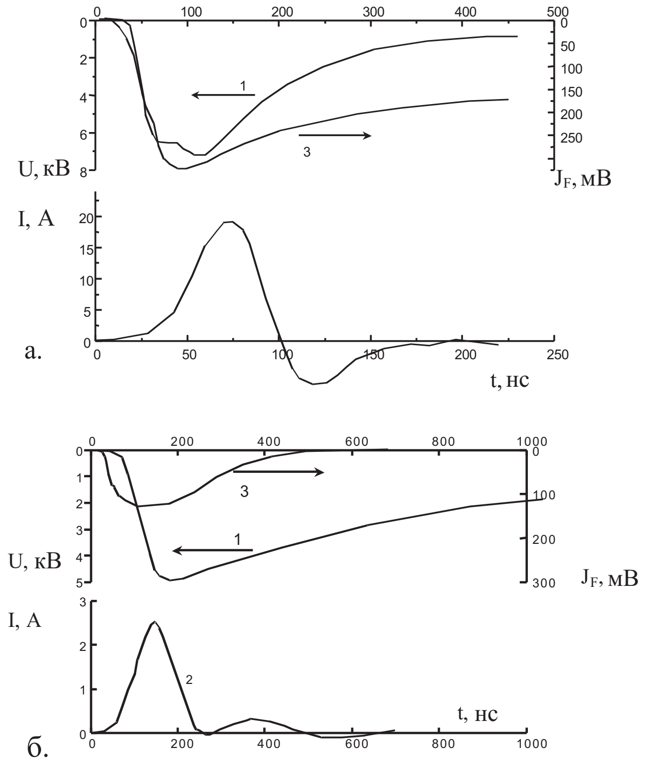

Рис. 5. Осцилограми змінної складової напруги на розряднім проміжку (1), струму розряду (2) та сумарного випромінювання плазми (3) на сумішах $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{SF_6})$ = 160/120 (а), 1330/120 (б) при I_{ch} = 30 мА і C_0 = 220 пФ.

Імпульс напруги мав короткий передній (≤ 150 нс) і довгий (≥ 1500 нс) задній фронт. Струм розряду формувався і досягав максимальної величини протягом переднього фронту імпульсу напруги. Збільшення парціяльного тиску аргону з 160 до 1330 Па (при фіксованому $P(\mathrm{SF_6})$, рис. 5) приводило до збільшення тривалости імпульсів струму (по основі осцилограми) з 100 до 250 нс, але їхня амплітуда при цьому зменшувалась майже на порядок. Амплітуда змінної складової напруги і яскравість УФ випромінювання також значно зменшувались. Більша частина імпульсу випромінювання плазми знаходилась у ближньому післясвіченні розрядного струму, що може бути зумовлено рекомбінаційним механізмом утворення ексимерних молекул. При збільшенні $P(\mathrm{SF_6})$ до 360 Па тривалість імпульсів випромінювання скорочувалась до 300 нс, а сам імпульс складався з першого максимуму, який корелював з максимумом імпульсу струму, та другого основного максимуму, що знаходився в ближньому післясвіченні розряду при t = 150–170 нс. Зростання тиску суміші $\mathrm{Ar/SF_6}$ зумовлювало переміщення імпульсу фотоструму на ділянку, де є максимум струму. Часові характеристики (U, I та J_f) об'ємного розряду на суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$, були подібними до наведених характеристик розряду в суміші $\mathrm{Ar/SF_6}$. Вплив величини ємности конденсатора C_0, який шунтував розрядний проміжок, на часові характеристики об'ємного розряду в суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$ показано на рис. 6. При малому значенні C_0 (≤ 20 пФ) тривалість імпульсів струму не переважала 40 нс, а його амплітуда досягала 7 А. Зі збільшенням C_0 до 900 пФ час досягнення максимуму струму суміщався з часом досягнення максимуму імпульсу напруги, а величина струму зростала до 40 А при тривалості 150 нс.

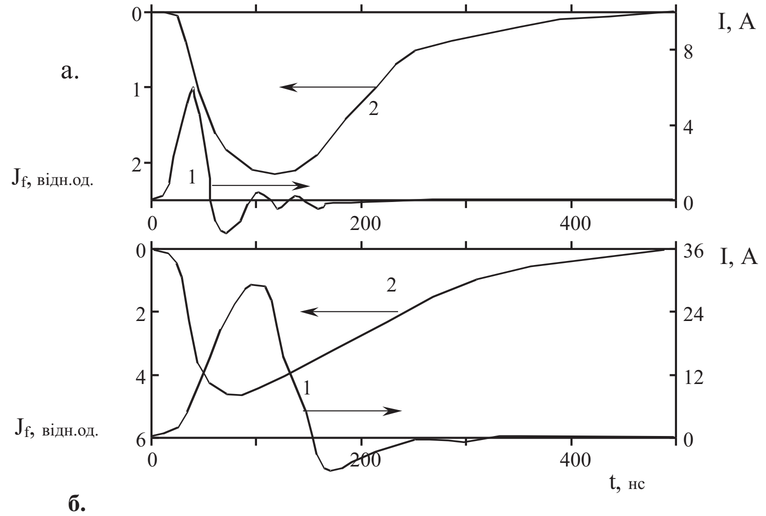

Рис. 6. Осцилограми струму розряду (1) й сумарного випромінювання плазми (2) розряду на суміші $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6})$ = 160/120 Па при C_0 = 20 (а) та 900 пФ (б).

Таким чином, цей конденсатор виконував роль ємнісного накопичувача у схемі живлення імпульсно-періодичного розряду, у якому роль комутатора виконує сама плазма об'ємного розряду низького тиску. Тривалість імпульсів випромінювання при цьому змінювалась мало і дорівнювала 500 нс, але при C_0 = 900 пФ збільшувалась тривалість його заднього фронту до 400 нс. Подальше збільшення ємности C_0 до 3500 пФ викликало ще більше зростання амплітуди та тривалости струму, але об'ємний розряд у сумішах $\mathrm{Ar(Kr)/SF_6}$ був стійким лише при низьких тисках ($P \leq 200$ Па). Максимальна частота повторення імпульсів (при $I_{\mathrm{ch}} = 50$ мА) при збільшенні C_0 від 20 до 3500 пФ зменшувалась з 50 до 2–3 кГц. На рис. 5 і рис. 6. наведені лише найхарактерніші осцилограми U, I та J_f (як правило, з максимальним значенням амплітуди). У реальному ж експерименті спостерігали широкий дискретний набір осцилограм (до 10–15 осцилограм), форми яких були подібними, а величина амплітуди приймала окремі дискретні значення, що характерно для автохвиль (автосолітонів) [18]. Амплітуда імпульсів змінювалась у межах 30–95% від максимального значення U, I та J_f. Залежність яскравости випромінювання смуги 249 нм $\mathrm{KrF}(B\text{–}X)$ від величини середнього струму об'ємного розряду зростала без ознак насичення (рис. 7). Швидкість збільшення яскравости в діяпазоні струму 2–50 мА зростала зі збільшенням парціяльного тиску криптону. При неперервній роботі розрядного пристрою ≥ 1 год система електродів і робоча суміш відчутно нагрівались. Тому для збільшення I_{ch} необхідно застосувати примусове водяне охолодження електродів лампи й газової суміші. Ресурсні характеристики випромінювання смуги 193 нм $\mathrm{ArF}(B\text{–}X)$ при різних значеннях I_{ch} подані на рис. 8. Коли струм помірний (≤ 10 мА), яскравість B–X смуги випромінювання молекули ArF плавно зменшувалась на 70% від свого максимального значення і при t = 40–50 хв виходила на плато, де ще 2–3 год рівень величини яскравости випромінювання був не меншим ніж 20% від $J^{\max}$ (при t = 1 хв). Якщо $I_{\mathrm{ch}} \geq 30$ мА, в перші 10 хвилин виявлено включення нових каналів формування молекул ArF, які можуть бути пов'язані з додатковими реакціями рекомбінації йонів $\mathrm{Ar^+}$ з від'ємно зарядженими радикалами, що утворюються з розпадом молекул $\mathrm{SF_6}$ у плазмі. Для цих додаткових каналів характерним є вищий середній рівень електричної потужности об'ємного розряду. Коли t = 10–40 хв, величина $J^{\max}$ зменшувалась на 60% і виходила на слабку залежність від часу.

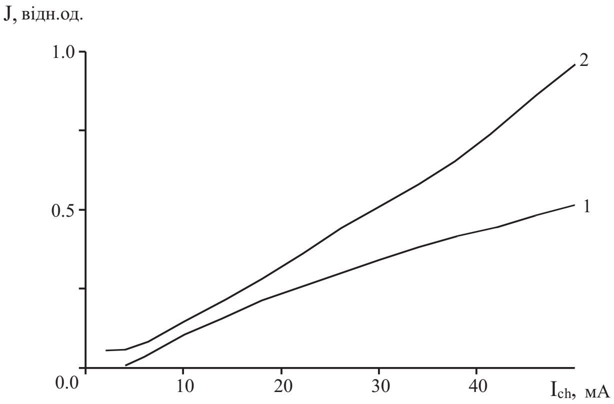

Рис. 7. Залежність яскравости випромінювання смуги 249 нм $\mathrm{KrF}(B\text{–}X)$ від величини середнього струму розряду в сумішах $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6})$ = 200/120 (1) і 400/120 Па (2).

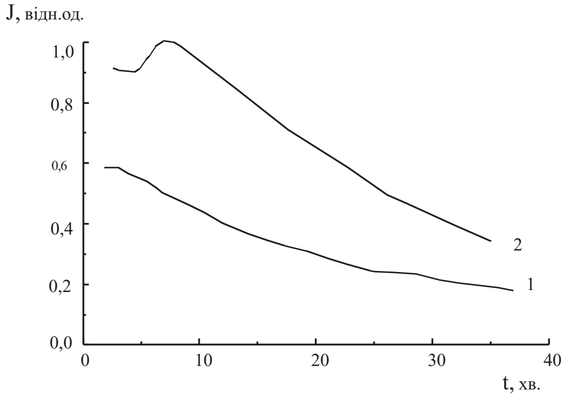

Рис. 8. Залежність яскравости випромінювання смуги 193 нм ArF(B–X) від часу горіння розряду на суміші $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{SF_6}) = 800/120$ Па при $I_{\mathrm{ch}} = 10$ (1) і 30 мА (2).

При малих розрядних струмах $I_{\mathrm{ch}} = 1$–4 мА ресурс роботи ArF-випромінювача досягав 5 годин. Коли застосовували заміну відпрацьованої газової суміші $\mathrm{Ar/SF_6}$ зі швидкістю $v \leq 0.05$ літр/хв, можливою була стійка робота ексимерного випромінювача і при $I_{\mathrm{ch}} = 4$–15 мА. Ресурсні характеристики випромінювання смуги 249 нм KrF(B–X) при $I_{\mathrm{ch}} = 30$ і 50 мА наведені на рис. 8. За рахунок використання робочого газу — Kr "високої чистоти" — і роботи на УФ спектральній ділянці (в порівнянні з ArF) ресурс роботи на суміші $\mathrm{Kr/SF_6}$ був вищим, ніж в аргономісткій суміші. У перші 5 хв роботи яскравість випромінювання зменшувалась на 50% і виходила на плато. Якщо $I_{\mathrm{ch}} \leq 30$ мА, ресурс роботи на одній суміші досягав 3–4 години, а при $I_{\mathrm{ch}} = 4$–6 мА він переважав 10 годин. Збільшити ресурс можна, використовуючи гази "високої чистоти", покращуючи вакуумні умови роботи лампи, а також проводячи "гаряче" пасивування внутрішніх елементів випромінювача в чистому фторі. Оцінки повної потужности УФ–ВУФ випромінювання показали, що максимальна її величина на системі смуг KrF(D, B–X) досягає 1.5–2.0 Вт, а на системі смуг ArF(B–X; C–A) вона не переважала 0.5–0.7 Вт. Коефіцієнт корисної дії лампи не перевищував 5%.

V. ПРОЦЕСИ В ПЛАЗМІ НА СУМІШАХ ВАЖКИХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ З МОЛЕКУЛАМИ ЕЛЕГАЗУ

Коротко розгляньмо основні процеси формування молекул RF (де R — Ar, Kr) у плазмі об'ємного розряду низького тиску на сумішах виду $R/\mathrm{SF_6}$. За аналогією з мікрохвильвим розрядом низького тиску ($P \leq 5$ Па) в сумішах $(\mathrm{He})/\mathrm{Kr(Xe)/SF_6}$ [21,22], а також ураховуючи результати чисельного моделювання плазми імпульсного об'ємного розряду на сумішах інертних газів з молекулами $\mathrm{SF_6}$ [23–25], в умовах нашого експерименту основними є такі процеси утворення ексимерних молекул:

$$R^+(^2P_{3/2}) + \mathrm{SF_5^-} \to R\mathrm{F}(B) + \mathrm{SF_4}, \qquad (1)$$

$$R^+(^2P_{3/2}) + \mathrm{SF_5^-} \to R\mathrm{F}(C) + \mathrm{SF_4}, \qquad (2)$$

$$R^+(^2P_{1/2}) + \mathrm{SF_5^-} \to R\mathrm{F}(B) + \mathrm{SF_4}, \qquad (3)$$

$$R^+(^2P_{1/2}) + \mathrm{SF_5^-} \to R\mathrm{F}(D) + \mathrm{SF_4}. \qquad (4)$$

Для криптономісткої плазми співвідношення констант швидкости реакцій $k(1')/k(2') = 0.62/0.38$, а $k(3')/k(4') = 0.05/0.95$ (де штрихами позначено реакції, аналогічні до системи реакцій (1)–(4), у якій у лівій частині, замість йона $\mathrm{SF_5^-}$, знаходиться йон $\mathrm{SF_6^-}$) [21,22]. Із цих реакцій випливає, що основний внесок в утворення фторидів важких інертних газів дає реакція йон-йонної рекомбінації, швидкість якої залежить від типу основного електронного стану позитивного йона. Чисельне моделювання нерівноважної електророзрядної плазми на основі елегазу виявило, що густина від'ємних йонів $\mathrm{SF_6^-}$ у плазмі на порядок менша, ніж йонів $\mathrm{SF_5^-}$ [24], що й послужило основою для вибору їх як основних електронеґативних йонів для процесів йон-йонної рекомбінації (1)–(4). Плазма імпульсного розряду є йон-йонною, тобто в неї густина вільних електронів на 2–3 порядки нижча від густини від'ємних йонів елегазу, які в реакціях рекомбінації між собою і приводять до утворення молекул ArF* та KrF*.

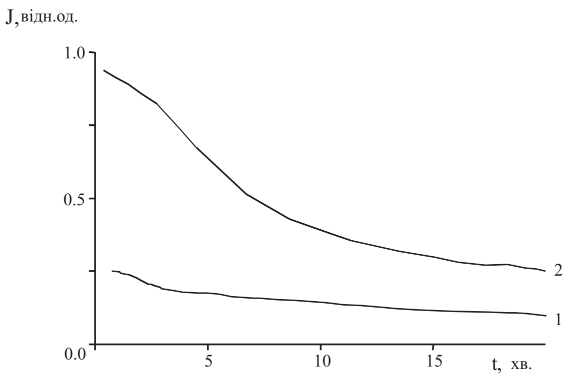

Рис. 9. Залежність яскравости випромінювання смуги 249 нм KrF від часу горіння розряду в суміші $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{SF_6}) = 400/120$ Па при $I_{\mathrm{ch}} = 30$ (1) та 50 мА.

VI. ВИСНОВКИ

Таким чином, дослідження характеристик короткого об'ємного розряду низького тиску на сумішах аргону і криптону з елегазом показало, що при подачі на розрядний проміжок сталої напруги ($U_{\mathrm{ch}} \leq 1$ кВ) розряд запалюється виключно в імпульсно-періодичному режимі й існує у формі доменів (або автосолітонів). На динамічній вольт-амперній характеристиці розряду виявлено ділянку з від'ємним нахилом, яка пов'язана з розвитком прилипальної нестійкости плазми. Плазмові автосолітони є джерелом широкосмугового УФ–ВУФ випромінювання на переходах молекули ArF* та KrF* на спектральних ділянках 150–300 нм та відповідно 200–260 нм. Для отримання максимальної яскравости широкосмугового короткохвильового випромінювання ексимерних молекул найоптимальнішими були газові суміші $P(\mathrm{Ar})/P(\mathrm{Cl_2})$ = 600–900/60–120 Па і $P(\mathrm{Kr})/P(\mathrm{Cl_2})$ = 400–500/120–150 Па. Шунтування розрядного проміжку зовнішнім імпульсним конденсатором ємністю C_0 = 200–3500 пФ дозволяло керувати параметрами імпульсів струму й випромінювання в широких межах: ΔI_{ch} = 6–36 А, Δt = 75–150 нс, частота повторення імпульсів була в межах 1–120 кГц. Зі збільшенням середнього струму розряду з 1 до 50 мА яскравість випромінювання молекул ArF* і KrF* та частота повторення імпульсів струму зростали. Ресурс випромінювання ексимерних молекул збільшувався зі зменшенням середнього струму розряду і при роботі в газостатичному режимі досягав 5–10 годин. Повна потужність УФ–ВУФ випромінювання розряду досягала 1.5–2.0 Вт на молекулах KrF* і 0.5–0.7 Вт на — ArF* при ККД $\leq 5\%$. Плазма об'ємного розряду є йон-йонною з основними складовими Kr^+, Ar^+ та SF_5^- і SF_6^-, які вступають між собою в реакції рекомбінації з утворенням фторидів аргону та криптону. На основі об'ємного розряду низького тиску можлива розробка "безкомутаторної" імпульсно-періодичної ексимерної лампи для застосувань у полімерній хемії, мікроелектроніці, біотехнологіях, екології та медицині.

[1] А. П. Головицкий, С. Н. Кан, Опт. спектроскоп. **75**, 604 (1993).

[2] А. М. Бойченко, А. Н. Панченко, В. Ф. Тарасенко, С. И. Яковленко, Квант. электрон. **23**, 3 (1996).

[3] М. И. Ломаев, А. Н. Панченко, Э. А. Соснин, Журн. тех. физ. **68**, №2, 64 (1998).

[4] А. П. Головицкий, С. В. Лебедев, Опт. спектроскоп. **82**, 251 (1997).

[5] А. К. Шуаибов, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Квант. электрон. **31**, 371 (2001).

[6] А. К. Шуаибов, И. В. Шевера, Журн. прикл. спектроскоп. **69**, №1, 113 (2002).

[7] А. К. Шуаибов, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Опт. спектроскоп. **92**, 760 (2002).

[8] О. К. Шуаібов, Л. Л. Шимон, І. В. Шевера, А. Й. Дащенко, Укр. фіз. журн. **47**, 28 (2002).

[9] В. И. Светцов, А. И. Максимов, А. П. Куприяновская, И. Д. Зимина, Электронная техника. Электроника СВЧ №7, 36 (1977).

[10] С. А. Гуцев, А. А. Кудрявцев, В. А. Романенко, Журн. тех. физ. **65**, № 11, 77 (1995).

[11] Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко, Журн. тех. физ. **67**, №12, 43 (1997).

[12] В. Н. Ищенко, В. Н. Лисицын, А. М. Ражев, Письма журн. тех. физ. **2**, вып. 18, 839 (1976).

[13] В. А. Александров, А. П. Напартович, Усп. физ. наук **163**, №3, 1 (1993).

[14] В. С. Голубев, С. В. Пашкин, *Тлеющий разряд повышенного давления* (Наука, Москва, 1990).

[15] О. К. Шуаібов, Л. Л. Шимон, О. Й Миня, Журн. фіз. досл. **4**, 291 (2000).

[16] О. К. Шуаібов, Л. Л. Шимон, А. Й. Дащенко, І. В. Шевера, Журн. фіз. досл. **5**, 131 (2001).

[17] А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Приборы техн. эксп. №1, 104 (2002).

[18] Б. С. Кернер, В. В. Осипов, *Автосолитоны локализованные сильно-неравновесные области в однородных диссипативных структурах* (Наука, Москва, 1991).

[19] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (Наука, Москва, 1987).

[20] В. В. Дацюк, И. А. Измайлов, В. А. Кочелап, Усп. физ. наук **168**, 439 (1998).

[21] M. Tsuji, M. Furusawa, Y. Nishimura, J. Chem. Phys. **92**, 6502 (1990).

[22] M. Tsuji, M. Furusawa, Y. Nishimura, Chem. Phys. Lett. **16**, 49 (1990).

[23] А. Г. Ястремский, С. Л. Ямпольский, Известия вузов, физика №8, 63 (1999).

[24] Ю. И. Бычков, С. Л. Горчаков, А. Г. Ястремский, Квант. электрон. **30**, 733 (2000).

[25] В. В. Аполлонов, А. А. Белевцев, С. Ю. Казанцев, А. В. Сайфулин *и др.*, Квант. электрон. **30**, 207 (2000).

О. К. ШУАІБОВ, Л. Л. ШИМОН, І. В. ШЕВЕРА, А. Й. ДАЩЕНКО

PULSED-PERIODIC VOLUME DISCHARGE OF LOW PRESSURE ON MIXTURES OF ARGON AND KRYPTON WITH ELEGAS

A. K. Shuaibov, L. L. Shimon, I. V. Shevera, A. Y. Dashchencko
Uzhgorod National Unaversity
46 Pidhirna Str., Uzgorod, UA–88000, Ukraine

The results of the investigation of space, electrical and optical characteristics of pulsed-periodic discharge on Ar/SF_6 and Kr/SF_6 gas mixttures are presented in this paper. A volume discharge not touched with the quarts window (removed apertura UV–VUV radiation) were ignited in the system of electrodes 'spherical anode–plane kathode' under the interelectrode distance of 3 cm and general pressure of mitures < 2.0 kPa. Pulsed-periodic mode of combustion of discharge was recieved by means of the instability development in a plasma, which was caused by a violation of the balance between the processes of attachment and detachment of electrodes to the molecules of elegas (and products of its dissociation in plasma). Due to it pulsed-periodic mode of burning of discharge is set up automatically by feeding on anode a constant voltage ($U_{\rm ch} < 1.0$ kV). The role of commutator in the scheme of feeding discharge is performed by plasma. The volume discharge can be used in the pulsed-periodic excimer lamp of low pressure which is designed for using in microelectronics, polymer chemistry, biotechnology and medicine. It is determined that plasma of volume discharge is a wide band source of radiation in the range of spectrum 150–300 nm. Basis length of waves radiation lamps are 193 nm ArF(B–X) and 249 nm KrF(B–X). The frequency of the following current pulses of discharge changed in the range of 1–120 kHz by increasing the average current from 1 to 50 mA and changing the capacity of exterior condencator (which shunts the discharge gap) within the limits of 200–3500 pF. The results of investigation resources characteristics of radiation molecules ArF(B–X) and KrF(B–X) depending on the value of average current discharge are presented in this paper.