ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 5, № 2 (2001) с. 131–138

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 5, No. 2 (2001) p. 131–138

ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНЕ ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ НИЗЬКОГО ТИСКУ НА ХЛОРИДАХ Ar, Kr, Xe і МОЛЕКУЛАХ Cl_2*

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

(Отримано 5 березня 2001 р.; в остаточному вигляді — 6 серпня 2001 р.)

Подано результати систематичних досліджень електричних, спектральних та енерґетичних характеристик стаціонарного джерела випромінювання низького тиску на молекулах ArCl, KrCl, XeCl і Cl_2^*. За активне середовище слугував повздовжній тліючий розряд сталого струму на сумішах He/Cl_2, Ar(Kr, Xe)/Cl_2, Ar/Xe(Kr)/Cl_2 і Ar/Kr/Xe/Cl_2. Багатохвилевий режим роботи джерела випромінювання реалізовано шляхом використання дво- або трикомпонентних сумішей важких інертних газів (Ar, Kr і Xe) з молекулами Cl_2. Розроблене джерело випромінювання можна використовувати в УФ-ВУФ фотометрії, хемії високих енерґій, біофізиці та медицині.

Установлено, що спектр багатохвилевого джерела випромінювання перекриває ділянку 170–310 нм при базових довжинах хвиль 175, 199, 200, 222, 236, 258 та 308 нм. Потужність випромінювання лампи на сумішах Ar/Cl_2, Kr/Cl_2 і Xe/Cl_2 зростала з 2 до 8 Вт при переході від арґонових до ксенонових середовищ. Оптимальний тиск сумішей становив 3–4 кПа, а $P(Cl_2) = 0.25$–0.40 кПа. Лампа на суміші Ar/Kr/Xe/Cl_2 за потужністю і ККД наближається до лампи на суміші Xe/Cl_2. Найбільшої ефективности ($\eta \leq 25$ %) джерела випромінювання досягнуто в тліючому розряді при малих розрядних струмах $I_{\rm ch} \leq 5$ мА.

Ключові слова: електророзрядне джерело випромінювання, хлориди інертних газів, хлор, спектр випромінювання.

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

I. ВСТУП

Вихідні характеристики електророзрядних джерел випромінювання неперервної дії на хлоридах важких інертних газів (KrCl, XeCl) та молекулах хлору ($\lambda = 258$ нм $Cl_2(D'–A')$) найдетальніше оптимізовано лише для подвійних робочих сумішей Xe/Cl_2 та Kr/Cl_2 [1–3]. Такі малоґабаритні ексимерні лампи можуть використовуватись у фотометричних, біохемічних та біофізичних установках, де оптимізація їхніх ґабаритів має важливе значення. Актуальне також збільшення енерґії квантів джерела випромінювання, що можливо при заміні робочих молекул XeCl ($\lambda = 308$ нм) і KrCl ($\lambda = 222$ нм) на молекули ArCl ($\lambda = 175$ нм) або розширення спектрального діапазону відомих ламп за рахунок переходу в багатохвилевий режим роботи за участю молекул ArCl. Такі джерела випромінювання можуть бути використані для стерилізації медичних інструментів та харчових продуктів, оскільки в праці [4] було встановлено, що для знешкодження бактерій найоптимальнішим є використання випромінювання в ділянці 220–160 нм. Подібно до цього ми розробили імпульсно-періодичне багатохвилеве джерело випромінювання на молекулах ArCl/KrCl/Cl_2^*/XeCl, яке дозволяло отримувати випромінювання тривалістю 100–300 нс [5–8]. Основним робочим середовищем цього джерела випромінювання служили суміші Ar/Cl_2, Ar/Xe(Kr)/Cl_2 і Ar/Kr/Xe/Cl_2/H_2 при тисках 10–30 кПа.

У нашій статті подано результати розробки та оптимізації характеристик багатохвилевого джерела випромінювання неперервної дії на основі хлоридів Ar, Kr, Xe і молекул Cl_2^*, яке працює в ділянці 170–310 нм.

II. СТАН РОЗРОБОК ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ ЕКСИМЕРНИХ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

Повздовжній тліючий розряд сталого струму в сумішах важких інертних газів з галогеномісткими молекулами систематично досліджують уже протягом останніх двадцяти років [9–11], що було зумовлено широким використанням такої плазми в хемії високих енерґій, мікроелектроніці та світлотехніці [1, 12–14]. Ці експерименти та числові розрахунки були спрямовані спочатку на дослідження функцій розподілу електронів за енерґією та електричних характеристик плазми тліючого розряду на сумішах Ar, Kr і Xe з молекулами F_2 і Cl_2. Уперше звернуто увагу на високу ефективність утворення молекул XeCl і значну середню потужність випромінювання ($W = 8$ Вт) на $\lambda = 308$ нм у праці [1], де й було запропоновано використовувати такі розряди, як потужні неперервні джерела спонтанного випромінювання ексимерних молекул. Далі ці дослідження розвинуто в працях [15–20]. Тліючий розряд сталого струму запалювали у кварцових розрядних трубках довжиною $L = 170$–280 мм з внутрішнім діаметром 12 мм. При середніх розрядних струмах 20–30 мА, тисках сумішей Kr/Cl_2, Xe/Cl_2, рівних 0.5–1.5 кПа, була отримана середня потужність випромінювання молекул XeCl (D, B–X) та KrCl (D, B–X) на рівні 10–20 Вт при ККД 12–23 %. Детальніше вихідні характеристики електророзрядних ексимерних ламп наведено в таблиці 1. Максимальний ККД XeCl та KrCl джерел випромінювання одержано при порівняно низьких розрядних струмах, коли на електродах розрядної трубки спостерігається найбільший спад напруги. Згідно з класифікацією стадій повздовжнього розряду сталого струму, яка наведена в монографії Ю. П. Райзера [21], ця стадія розряду називається піднормальним тліючим розрядом (ПТР). На вольт-амперній характеристиці тліючого розряду при цьому спостерігається різкий спад напруги зі зростанням розрядного струму.

Молекула λ, нм	Робоче середовище (тиск в кПа)	I, мА; U, кВ	L; d, мм	W, Вт	ККД, %	Літ-ра
XeCl; 308	Ne/Xe/HCl=85/10/4.5; ($P = 15$)	30; 3.1	280; 30	0.60	—	[1]
XeCl; 308	$Xe/Cl_2 = 4.8/0.8$; ($P = 0.75$)	30; 3.1	280; 30	7.70	—	[1]
XeCl; 308	$Xe/Cl_2 = 9/1.2$; ($P = 1.36$)	30; 40	280; 12	8.80	14	[15]
KrCl; 222	Kr/Cl_2=18/2; ($P = 2,66$)	16; 4.2	280; 12	6.30	14	[15]
XeCl; 308	Xe/Cl_2=6/0.25; (P=0.83) Xe/Cl_2=18/1; ($P = 2.53$)	35; 1.5	170 ; 12	19.0 10.3	10	[2] [2]
XeCl; 308	Xe/Cl_2=3/1; ($P = 0.4$)	150;-	350; 60 $1/2(d_2$–$d_1) = 2.5$–8.8	110.0	11.5	[16]
KrCl; 222	Kr/Cl_2=10/1; ($P = 0.8$)	300;-	350; 60 $1/2(d_2$–$d_1) = 2.5$–8.8	130.0	14	[16]
Cl_2; 258	He/Cl_2=1/1; ($P = 0.8$)	200;-	350; 60 $1/2(d_2$–$d_1) = 2.5$–8.8	40.0	6	[16]
XeBr; 282	Xe/CH_3Br=3/1; ($P = 0.53$)	$\leq$50; 2.5	600; 40	3.0	2.5	[17]
KrBr; 206	Kr/CH_3Br=3/1; ($P = 0.80$)	50; 2.5	600; 40	0.9	—	[17]
KrCl; 222	Kr/Cl_2=3/1; ($P = 1.2$)	100; 2.5-4.5	200-800; 9-60	12.0	6	[3]
XeCl; 308	Xe/Cl_2=60/1; ($P = 0.8$)	5; 6	400; $1/2(d_2$–$d_1) = 2.5$–4.5;	7.0	27	[18]
KrCl; 222	$Kr/Cl_2 = 40/1$; ($P = 0.8$)	3-4; 5	400; $1/2(d_2$–$d_1) = 2.5$–4.5;	8.0	30	[18]
XeF; 353	$Xe/NF_3 = 3/1$; ($P = 1.2$)	30; 4	200; 400; 9	6.0	3	[19]
XeF; 353	$He/Xe/NF_3 = 5/3/1$; ($P = 1.2$)	50; 7	200; 400; 9	20.0	6	[19]

Таблиця 1. Характеристики ексимерних джерел спонтанного випромінювання низького тиску з накачкою тліючим розрядом сталого струму (L, d — довжина і внутрішній діаметр розрядної трубки, W — середня потужність випромінювання).

Збільшення об'єму плазми тліючого розряду за рахунок збільшення діаметра розрядної трубки обмежено контраґуванням розряду в електровід'ємних газових сумішах типу $Kr(Xe)/Cl_2$, а зростання величини розрядного струму обмежено значним нагріванням електродів та стінок розрядної трубки. При цьому різко зменшується ресурс роботи ексимерної лампи, що зумовлено хемічним зв'язуванням галогену матеріялом електродів та зростанням швидкости дифузії хлору в скло [20]. Оскільки застосування водяного охолодження зовнішнього боку розрядної трубки неможливе (через неї відбувається вивід УФ-випромінювання лампи), то було використано коаксіяльну розрядну систему, яку успішно застосовували в імпульсних лампах на основі розряду через діелектрик [22], потужних імпульсно-періодичних азотних лазерах [23] та в ВУФ лампах на інертних газах з накачуванням імпульсним розрядом [24]. У подібних лампах використовують дві кварцові трубки різних діяметрів ($d_1 < d_2$), які розміщені коаксіяльно одна в другій. Тліючий розряд сталого струму запалюється в проміжку між трубками і має форму пустотілого циліндра. Оптимальна величина такого проміжку, яка дорівнює $1/2 \times (d_2–d_1)$, становить 2.5–4.5 мм при $d \le 60$ мм та міжелектродній віддалі 350–600 мм. Таким чином, середня потужність XeCl- і KrCl-ламп сталого струму була доведена до 40–130 Вт при ККД ≤ 14%. Максимальна величина ККД ($\eta = 27–30$%) отримана в коаксіяльній розрядній трубці при низьких струмах ($I_{ch} \le 10$ мА; режим ПТР), але величина потужности випромінювання лампи при цьому не переважала 8 Вт. При накачуванні тліючим розрядом суміші He/Cl_2 на $\lambda = 258$ нм $Cl_2(D'–A')$ одержано потужність 40 Вт з ККД, рівним 6 % [16]. Про ексимерні лампи сталого струму на інших молекулах (або інших переходах молекул Cl_2, KrCl, XeCl) є лише окремі уривкові дані, а їхні вихідні характеристики значно поступаються XeCl- і KrCl-джерелам випромінювання на сумішах Xe/Cl_2 та Kr/Cl_2.

Таким чином, з огляду літератури, присвяченої розробці та характеристикам ексимерних джерел випромінювання сталого струму, випливає, що найбільш потужними й ефективними є лампи на $\lambda = 222$ нм KrCl, 308 нм XeCl, які працюють на сумішах $Kr(Xe)/Cl_2$ ($P = 0.5–1.0$ кПа); розробки та характеристики джерел випромінювання на $\lambda = 175$ нм $ArCl(B–X)$ (робочі суміші типу $Ar/Cl_2(CF_2Cl_2)$) відсутні; не досліджені характеристики багатохвилевих ексимерних ламп сталого струму на основі складних газових сумішей типу $Ar/Kr/Xe/Cl_2$ та інших; відсутні також дані з параметрів ексимерних джерел випромінювання в коротких розрядних трубках малого діяметра.

III. МЕТОДИКА, ТЕХНІКА ТА УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

У цій праці досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) тліючого розряду, потужність, яка вноситься в розряд ($W_{ел} = I_{ch} U_{ch}$, де I_{ch}, U_{ch} — величини струму й напруги на електродах розрядної трубки), спектральні характеристики випромінювання, залежність яскравости молекулярних смуг від складу й тиску робочої суміші, величина абсолютної потужности УФ-ВУФ випромінювання ($W_в$) та ККД джерела випромінювання ($\eta = W_в/W_{ел} \times 100\%$).

Вимірювали величину повної потужности випромінювання з усієї поверхні джерела шляхом виділення на робочій поверхні трубки невеликої ділянки діяметром d, яка розміщена на віддалі L від головки приладу "Кварц-01" (рис. 1). При $L > 10\ d$ її можна розглядати як точкове джерело випромінювання [3]. Геометричний фактор отримано у вигляді, близькому до закону Манжена [25], він становив $4\sin^{-2}\beta$ (де $\beta = \mathrm{arctg}\ z/2L$, z — діяметр вхідного отвору приладу "Кварц-01", L — віддаль від робочої поверхні до головки джерела випромінювання (рис. 1.). Між діяфрагмою й вимірювальною головкою "Кварц-01" встановлювали світлофільтр з коефіцієнтом пропускання 0.99 в ділянці $\Delta\lambda = 260-400$ нм для запобігання реєстрації видимого та інфрачервоного випромінювання плазми тліючого розряду. З урахуванням повної поверхні джерела випромінювання формула для визначення потужности УФ-ВУФ випромінювання набуває вигляду:

$$W_в = S_\Sigma/S_d\, 4\sin^{-2}\beta\, k_ф^{-1}\, k_1\, k_2\, W_0,$$

де: S_Σ — повна робоча поверхня джерела випромінювання, S_d — площа діяфрагми, $k_ф = 0.99$, k_1 і k_2 — спектральні коефіцієнти, пов'язані з обмеженим спектральним діяпазоном роботи приладу "Кварц-01" і її спектральною чутливістю, відмінною від 1.0 у робочій ділянці спектра, а W_0 — показ приладу "Кварц-01" у ватах.

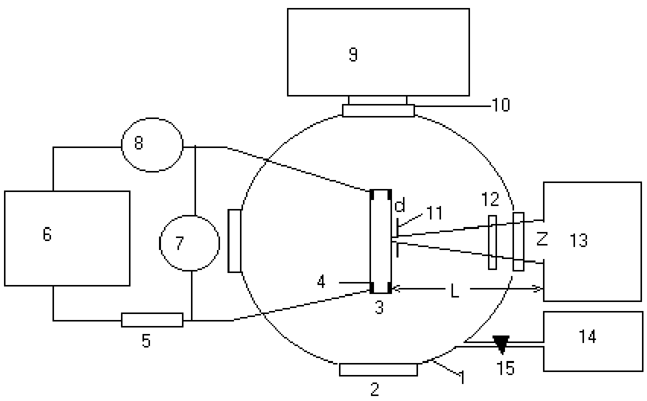


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки: 1 — буферна камера, 2 — кварцові вікна, 3 — розрядна трубка, 4 — нікелеві електроди, 5 — баластний опір $r_б = 0.1$ МОм, 6 — високовольтний випрямляч, 7 — кіловольтметр, 8 — міліамперметр, 9 — вакуумний спектрометр, 10 — віконце з CaF_2, 11 — діяфрагма, 12 — фільтр, 13 — вимірювач середньої потужности випромінювання "Кварц-01", 14 — вакуумна й газозмішувальна система, 15 — вакуумний кран.

Тліючий розряд сталого струму отримували в тонкостінній кварцовій чи сапфіровій трубці з внутрішнім діяметром 5 мм і міжелектродною віддалю 100 мм. Катод й анод розрядної трубки виготовлено з листового нікелю у формі циліндрів довжиною по 10 мм і зовнішнім діяметром 5 мм. Розрядну трубку з відкритими торцями помістили в буферній камері з

CaF_2-віконцем і трьома кварцовими вікнами діаметром 50 мм. Камера через віконце з CaF_2 була приєднана до півметрового вакуумного спектрометра. Центр розрядної трубки встановлювали на одному рівні з центром вхідної та вихідної щілин вакуумного спектрометра. Система реєстрації випромінювання та її відносне калібрування в ділянці 165–350 були такими, як і в наших працях [5–8, 26].

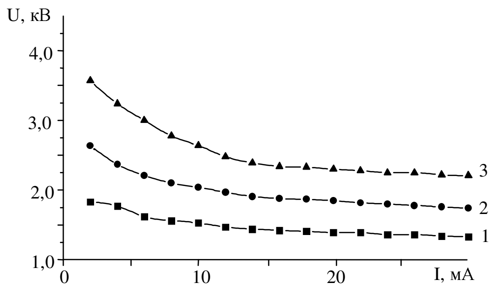
Розряд запалювали при допомозі високовольтного випрямляча з параметрами: $U \leq 30$ кВ та $I_{\mathrm{ch}} \leq 100$ мА. Унаслідок значного нагрівання розрядної трубки та її електродів величина I_{ch} не перевищувала 30 мА.

За яскравість окремої смуги випромінювання приймали площу під відповідною кривою на діяграмній стрічці самописця, яка була попередньо виправлена з урахуванням відносної спектральної чутливости системи "вакуумний монохроматор + фотопомножувач".

IV. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Типові ВАХ тліючого розряду на сумішах He/Cl_2 та важких інертних газів з хлором подано на рис. 2. Повздовжній тліючий розряд на суміші He/Cl_2 заповнював увесь внутрішній об'єм лише при тисках суміші ≤ 4 кПа й парціяльному тиску $Cl_2 \leq 1.0$ кПа. При вищих тисках робочої суміші і збільшенні в ній умісту хлору тліючий розряд стискався до центра розрядної трубки в плазмовий шнур діяметром 1–2 мм. При $I_{\mathrm{ch}} \leq 10$ мА величина спаду напруги на електродах (U_{ch}) зменшувалась зі зростанням розрядного струму. При більших значеннях I_{ch} розряд переходив у нормальний режим горіння і величина U_{ch} практично не залежала від I_{ch}. Зростання парціяльного тиску Cl_2 і загального тиску суміші приводило до збільшення потенціялів запалювання розряду, величини U_{ch} і потужности розряду ($U_{\mathrm{ch}} \times I_{\mathrm{ch}}$). Розряд на сумішах важких інертних газів з молекулами Cl_2 існував у вигляді слабко- та сильнострумових стадій, перехід між якими здійснювався стрибком при $I_{\mathrm{ch}} = 0.5$–2.0 мА. При зменшенні тиску суміші Xe/Cl_2 до 0.5–0.7 кПа в розряді формувались стоячі страти. Зі зменшенням I_{ch} від 10 до 3 мА страти рівномірно заповнювали весь міжелектродний проміжок. Такий режим запалювання тліючого розряду становить інтерес для розробки неперервного джерела випромінювання, яке здатне наносити реґулярні геометричні фіґури на поверхні фоточутливих в УФ діяпазоні спектра матеріялів і виготовлення спеціяльних фотошаблонів. ВАХ тліючого розряду використовували для отримання величини потужности, яка вноситься в плазму розряду й ККД джерела випромінювання ($\eta = W_{\text{в}}/W_{\text{ел}} \times 100\,\%$).

Спектр випромінювання плазми на суміші He/Cl_2 (рис. 3) в УФ-ВУФ ділянці був близьким до відповідного спектра випромінювання поперечного об'ємного розряду наносекундної тривалости [27,28] та максимуму неперервного випромінювання Cl_2^* при $\lambda = 200$ нм [29, 30] і містив електронно-коливні смуги з $\lambda_m = 258$ нм $Cl_2(D'$–$A')$, (180–195), $Cl_2('\Sigma$–$'\Pi)$.



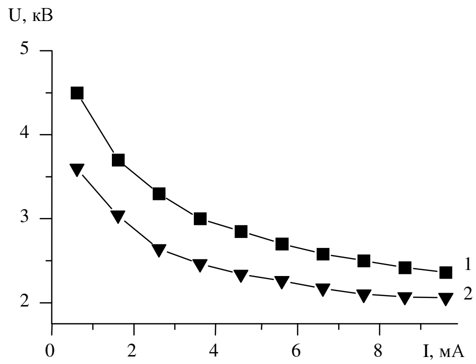


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики тліючого розряду сталого струму на сумішах He/Cl_2 (а): 1.33/0.27 (1), 1.33/0.67 (2) і 1.33/1.33 кПа (3) та $Kr/Xe/Cl_2$ (б): 2.8/0.8/0.4 (1) і 2.8/0.8/0.12 кПа (2).

Половина потужности УФ-ВУФ випромінювання плазми була сконцентрована в діяпазоні $\lambda \leq 200$ нм. Спектри випромінювання плазми тліючого розряду на сумішах важких інертних газів з молекулами Cl_2 складались з яскравих смуг на B–X та D–X переходах моногалогенідів Ar, Kr, Xe і характеристичних смуг хлору (рис. 4). За рахунок часткового перекриття потовщених смуг це джерело випромінювання наближалося до широкосмугового з $\Delta\lambda = 170$–310 нм. Додавання малих домішок азоту або повітря до сумішей Ar/Cl_2, $Ar/Xe/Cl_2$ (при малому парціяльному тиску хлору ≤ 0.04 кПа) дозволяє отримувати, крім ексимерних смуг та смуг молекул Cl_2^*, також і систему вузьких смуг молекул азоту в ділянці 200–280 нм. Розшифровка спектрів показала, що найінтенсивніші додаткові смуги належать до третьої системи Каплана $N_2(A^3\Sigma_u^+$–$E)$ і четвертої позитивної системи $N_2(B^3\Pi_g$–$D^3\Sigma_u^+)$. Для збільшення рівномірности перекриття спектра за допомогою смуг молекул азоту в діяпазоні 200–280 нм, коли їхні яскравості сумірні з яскравостями ексимерних смуг, уміст азоту в робочих сумішах не повинен перевищувати 50–150 Па.

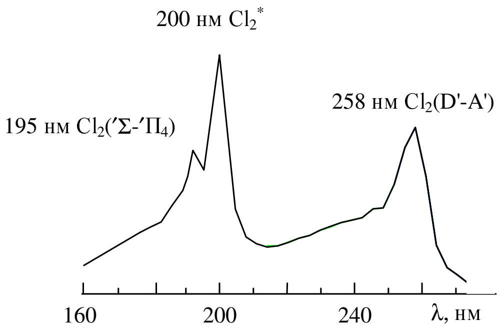


Рис. 3. Спектр випромінювання плазми тліючого розряду в суміші He/Cl_2.

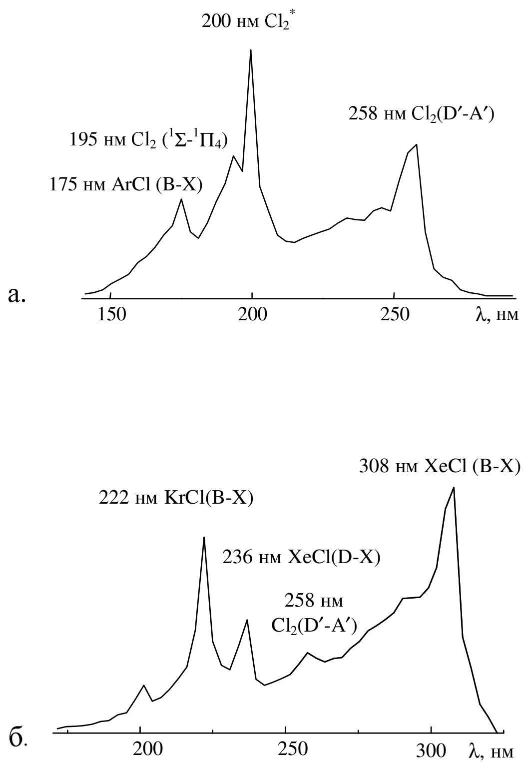


Рис. 4. Спектри випромінювання плазми тліючого розряду в суміші Ar/Cl_2 (а) та $Kr/Xe/Cl_2$ (б).

V. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ СУМІШЕЙ ТА ЕНЕРҐЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Оптимізацію яскравости УФ-ВУФ випромінювання лампи проводили залежно від тиску і складу робочих сумішей та величини розрядного струму. Для лампи на суміші He/Cl_2 оптимальний парціяльний тиск хлору перебував у межах 0.6–1.0 кПа (рис. 5). Для стадії однорідного тліючого розряду, коли загальний тиск суміші не переважав 2 кПа, оптимальна величина парціяльного тиску гелію дорівнювала 0.7 кПа, а для контраґованого розряду вона досягала 6 кПа. В останньому випадку в плазмовому шнурі формується йон-йонна плазма, у якій практично повністю відсутні вільні електрони [31, 32]. Існування такої плазми в електровід'ємних газах зумовлено особливостями дифузії від'ємних йонів (у цьому випадку Cl^-) й електронів. Рекомбінація йонів Cl^- і Cl^+ у такій плазмі може бути важливим каналом утворення молекул Cl_2*, що й визначало спектр випромінювання плазми в УФ ділянці спектра. Яскравости смуг з $\lambda_m = 258$ і 200 нм були рівні між собою в режимі однорідного розряду, а в контраґованому розряді яскравість смуги 258 нм була в 2.5 раза вищою за яскравість смуги 200 нм.

У розряді на суміші $He/Cl_2 = 1.33/0.53$ кПа залежність яскравости смуги випромінювання з $\lambda = 258$ нм від величини розрядного струму була лінійно зростаючою, а для смуги $\lambda = 200$ нм вона досягла насичення при $I_{\rm ch} \geq 20$ мА. Для контраґованого розряду на суміші $He/Cl_2 = 4.0/0.2$ кПа при $I_{\rm ch} = 20$–25 мА спостерігалась стрибкоподібна зміна стану розряду (режим йон-йонної плазми), у результаті якої яскравість смуги 258 нм продовжувала зростати, а смуги 200 нм — насичувалась і зменшувалась.

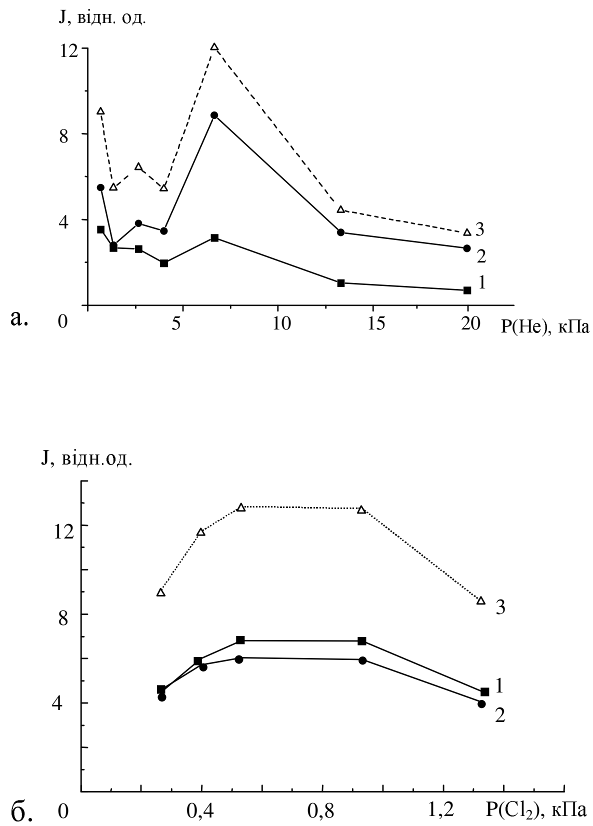


Рис. 5. Залежність яскравости випромінювання смуг з $\lambda_m = 200$ нм (1), 258 нм (2) й сумарної яскравости випромінювання плазми на суміші He/Cl_2 у спектральному діяпазоні 160–280 нм (3) від величини парціяльного тиску He при $P(Cl_2) = 0.2$ кПа (а) та хлору при $P(He) = 1.33$ кПа (б) ($I_{\rm ch} = 20$ мА).

Для оптимізації вихідних характеристик багатохвилевого джерела випромінювання на суміші важких інертних газів з молекулами хлору весь спектральний діяпазон 170–310 нм умовно розділявся на окремі складові з максимумами в ділянці кантів основних ексимерних смуг, так що при їх накладанні одержували вихідні спектри. Типові результати оптимізації складу суміші робочого середовища джерела випромінювання на Xe/Cl_2 ($\lambda = 308/236$ нм) подано на рис. 6. Оптимальний уміст молекул хлору в сумішах ексимерних джерел випромінювання на XeCl, KrCl і ArCl був у межах 0.25–0.32 кПа. Внесок смуги 236 нм XeCl (D–X) у сумарну яскравість УФ випромінювання розряду становив 10–20%. Оптимальний парціяльний тиск Ar, Kr і Xe в подвійних сумішах з хлором знаходився в діяпазоні 2–4 кПа. При цьому він у розряді на подвійних сумішах зростав із зменшенням атомної ваги інертного газу.

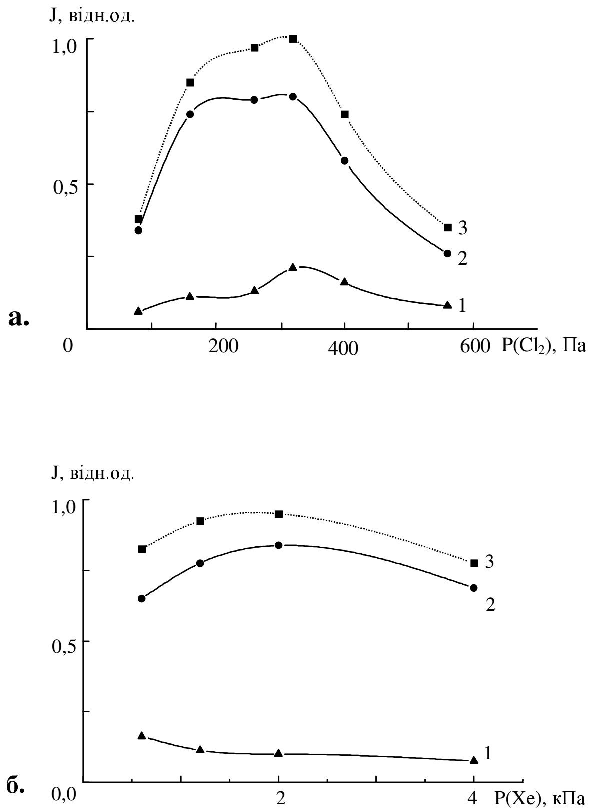


Рис. 6. Залежність яскравости смуг випромінювання XeCl (D, B–X) і сумарної яскравости випромінювання плазми тліючого розряду на суміші Xe/Cl_2 у спектральному діяпазоні 180–340 нм від величини парціяльного тиску хлору при $P(\mathrm{Xe}) = 2.0$ кПа (а) та парціяльного тиску ксенону при $P(\mathrm{Cl_2}) = 80$ Па (б): $\lambda = 236$ нм (1), 300 нм (2) та $\Delta\lambda = 180$–340 нм (3) при ($I_{\mathrm{ch}} = 8$ мА).

У межах величин розрядних струмів 2–20 мА всі залежності яскравости ексимерних смуг випромінювання і смуг молекули хлору мали нарощуваний характер [33, 34]. Найбільшу швидкість зростання яскравости смуг випромінювання ArCl(B–X) і Cl_2(D'–A') (до 30–35% від максимальної яскравости) спостерігали в піднормальному режимі тліючого розряду (I_{ch} = 1–4 мА; рис. 7). При більших розрядних струмах помічали значне нагрівання робочого середовища, електродів та кварцової трубки, що приводило до насичення яскравости та спаду при $I_{\mathrm{ch}} \geq 20$–25 мА. Ресурс роботи хлормістких газорозрядних приладів (ламп або плазмохемічних реакторів з кварцовою робочою камерою) визначається величиною коефіцієнта дифузії хлору в скло, який значно зростає з підвищенням температури кварцової трубки [20], тому при значних струмах необхідно застосовувати примусове охолодження робочої поверхні лампи. Тут може також застосовуватись контраґований тліючий розряд у суміші Ar(Kr, Xe)/Cl_2, оскільки він не торкається внутрішньої стінки розрядної трубки і не приводить до значного нагріву кварцової трубки. Проте в цьому разі повна робоча поверхня лампи значно зменшується ($\approx$ 4–5 рази), що викликає також значне зниження середньої потужности випромінювання.

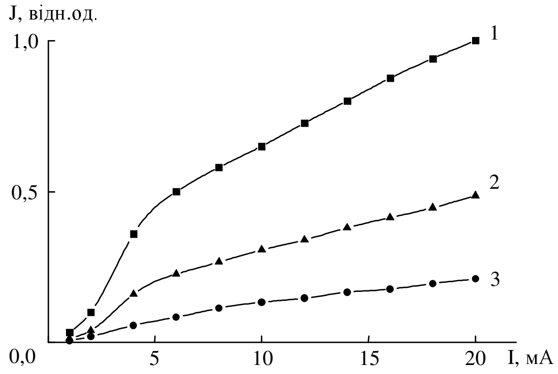


Рис. 7. Залежність яскравости випромінювання плазми на суміші $\mathrm{Ar(Cl_2)} = 4(0.16)$ кПа з $\lambda_m = 175$ нм (1), 200 нм (2) і 258 нм (3) від величини струму тліючого розряду.

Найбільш типові робочі середовища та вихідні характеристики стаціонарних джерел випромінювання зведено в таблиці 2. При низьких тисках газових сумішей основною реакцією утворення хлоридів інертних газів у тліючому розряді є гарпунні реакції [2, 3] типу $\mathrm{Ar} + \mathrm{Cl_2} \to \mathrm{ArCl^*} + \mathrm{Cl}$, а в складних робочих середовищах (суміші типу $Ar/Kr/Xe/Cl_2$) до них ще додаються процеси заміщення інертних газів при утворенні ексимерних молекул та процеси передачі енерґії типу Ar(m), Kr(m) $\to$ Xe [7, 8]. Швидкість реакції заміщення атомів Kr атомами Xe при утворенні молекул KrCl і XeCl в плазмі на суміші Kr/Xe/фреон-12 є значною ($k = 7\times10^{-10}$ см^3/с [35]), тому у формуванні широкосмугового спектра випромінювання плазми на основі складних робочих сумішей вони відіграють чималу роль. У зв'язку з тим, що тиск у досліджуваних джерелах випромінювання низький, роль реакцій йон-йонної рекомбінації в утворенні ексимерних молекул (реакція типу $Ar^{+}+Cl^{-}+(Ar)\rightarrow ArCl^{*}+(Ar)$) повинна бути малою, оскільки швидкість подібних реакцій різко зменшується з пониженням тиску. Для кінцевого з'ясування питання про механізми роботи ексимерних ламп низького тиску доцільно провести числове моделювання кінетики процесів, особливо в складних середовищах типу $Ar/Kr/Xe/Cl_2$. Такі роботи на цю пору нам невідомі. Іншим важливим процесом у досліджуваній плазмі є реакція коливної релаксації в межах B, D станів хлоридів важких інертних газів та D' стану молекули хлору. Саме незавершеність коливної релаксації молекул RCl* і Cl_2^*, що зумовлена низьким тиском робочого середовища [36, 37], дозволяє отримувати широкі смуги випромінювання і формувати на їхній основі єдину суцільну смугу в спектральному діяпазоні 170–310 нм. Високі середні потужності та ККД джерел випромінювання низького тиску на ексимерних молекулах надають їм переваги перед класичними водневими лампами. Ексимерні широкосмугові лампи доцільно використати в спектрометрах поглинання, які працюють на межі УФ-ВУФ діяпазонів довжин хвиль, де, крім водневих ламп, немає інших простих та доступних джерел випромінювання неперервної дії.

Робочі суміші (склад і парціальний тиск в кПа)	$\lambda_{\max}$, нм	W, Вт	η, %
$He/Cl_2 = 0.7/0.6$	185–195/200/258	3	6.0
$Ar/Cl_2 = 4.0/0.16$	175/258	2	7
$Kr/Cl_2 = 3.6/0.16$	199/222/258	3	10
$Xe/Cl_2 = 3.6/0.16$	236/258/308	8	21
$Kr/Xe/Cl_2 = 2.8/0.08/0.16$	199/222/236/258/308	5	15
$Ar/Kr/Cl_2 = 4.0/0.4/0.16$	175/199/222/258	5	15
$Ar/Xe/Cl_2 = 2.8/0.8/0.16$	175/199/236/258/308	3	20
$Ar/Kr/Xe/Cl_2 = 2.0/0.24/0.24/0.08$	175/199/222/236/258/308	6	25

Таблиця 2. Характеристики стаціонарного джерела випромінювання на сумішах інертних газів з молекулами хлору.

VI. ВИСНОВКИ

Дослідження характеристик малоґабаритних ексимерних джерел випромінювання неперервної дії з накачуванням сумішей важких інертних газів з молекулами хлору тліючим розрядом сталого струму показало, що спектральний діяпазон роботи лампи на суміші He/Cl_2 може бути розширений у ВУФ ділянку до 160 нм, а потужність випромінювання та ККД при цьому зростуть у два рази; для джерела випромінювання на системі смуг 258/200/195 нм оптимальний парціяльний тиск хлору (коли розряд однорідно заповнював внутрішній об'єм розрядної трубки) знаходився в межах 0.6–1.0 кПа, а гелію — 1.0–1.3 кПа. Потужність випромінювання в діяпазоні 160–280 нм досягає 3 Вт при ККД 6 % й однаковому внеску в неї смуг 258 нм та 200/195 нм для газових середовищ низького тиску ($P \leq 2.0$ кПа). Основні довжини хвиль багатохвилевого ексимерного джерела випромінювання знаходяться в діяпазоні 170–310 нм ($\lambda\lambda = 175, 199, 200, 222, 236, 258$ та 308 нм), повна потужність УФ-ВУФ випромінювання лампи на сумішах Xe(Kr, Ar)/Cl_2 зменшується з 8 до 2 Вт при зменшенні атомної ваги інертного газу. Оптимальний тиск газових сумішей становив 3–4 кПа при парціяльному тиску хлору 0.25–0.40 кПа. Багатокомпонентні робочі середовища типу $Ar/(Kr)/Xe/Cl_2$ за потужністю випромінювання наближались до вихідних характеристик лампи на суміші Xe/Cl_2 і дозволяли отримувати практично суцільну смугу в діяпазоні спектра 170–310 нм. Найвища ефективність (≤ 25 %) була одержана в піднормальному режимі роботи тліючого розряду на суміші $Ar/Kr/Xe/Cl_2$($I_{\rm ch} \leq 5$ мА). Основними фізичними процесами в досліджуваній плазмі є утворення метастабільних атомів важких інертних газів, гарпунні реакції утворення ексимерних молекул, реакції заміщення важких інертних газів при утворенні ексимерних молекул та процеси коливної релаксації в межах B, D станів RCl і D' стану молекули Cl_2 .

[1] А. П. Головицкий, Письма в журн. тех. физ. **18**, вып. 8, 73 (1992).

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

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

[4] И. А. Солошенко, В. В. Циолко, В. А. Хомич, А. И. Щедрин и др. Физика плазмы, **26**, 845 (2000).

[5] А. К. Шуаибов, Письма в журн. тех. физ. **26**, вып. 9, 1 (2000).

[6] А. К. Шуаибов, А. И. Дащенко, Приборы тех. эксп. № 3, 101 (2000).

[7] А. К. Шуаибов, А. И. Дащенко, Квант. электрон. **30**, 279 (2000).

[8] А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Журн. тех. физ. **71**, № 2, 77 (2001).

[9] В. В. Зайцев, Е. Ю. Зверевская, М. И. Зухер, П. Д. Нетягов, Теплофиз. выс. темп. **16**, 1152 (1978).

[10] В. В. Зайцев, П. Д. Нетягов, Н. В. Божко, Теплофиз. выс. темп. **18**, 944 (1980).

[11] В. В. Зайцев, Опт. спектроскоп. **72**, 859 (1992).

[12] Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев, *Применение низкотемперарурной плазмы для травления и очистки материалов* (Энергоатомиздат, Москва, 1987).

[13] А. М. Ефремов, А. П. Куприяновская, В. И. Светцов, Хим. выс. энерг. **27**, 88 (1993).

[14] Э. М. Врублевский, А. В. Гусев, А. Г. Жидков, В. Ю. Киреев и др., Хим. выс. энерг. **24**, 356 (1990).

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

[16] А. Н. Панченко, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко, Письма журн. тех. физ. **21**, вып. 20, 77 (1995).

[17] М. И. Ломаев, А. Н. Панченко, В. Ф. Тарасенко, Опт. атм. и океана **10**, 1271 (1997).

[18] А. Н. Панченко, В. Ф. Тарасенко, Опт. спектроскоп. **84**, 389 (1998).

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

[20] А. П. Головицкий, Письма журн. тех. физ. **24**, вып. 6, 63 (1998).

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

[22] М. М. Гуйван, О. М. Малінін, Л. Л. Шимон, Вісн. Ужгор. ун-ту, сер. фіз. № 4, 12 (1999).

[23] Ю. И. Бычков, М. Н. Костин, В. Ф. Лосев, В. Ф. Тарасенко, Приборы техн. эксп. **4**, 228 (1978).

[24] В. И. Баюнов, Г. А. Волкова, И. В. Подмошенский, Журн. прикл. спектроскоп. **54**, 164 (1991).

[25] М. И. Эпштейн, *Измерения оптического излучения* (Энергоатомиздат, Москва, 1990).

[26] О. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, И. В. Шевера, О. Й. Миня, Журн. фіз. досл. **3**, 157 (1999).

[27] О. К. Шуаибов, Журн. тех. физ. **70**, № 10, 117 (2000).

[28] А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Теплофиз. выс. темп. **38**, 386 (2000).

[29] Spectroscopic Data. vol. 2. Homonuclear Diatomic Molecules (Ed. S. N. Suchard, J. E. Melzer. New. York; Washington; London: IFI/Plenum, 139, 1976).

[30] К. Хьюбнер, Г. Герцберг, *Константы двухатомных молекул.* ч. 1 (Мир, Москва, 1984).

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

[32] Е. А. Богданов, А. А. Кудрявцев, Л. Д. Цендин, Письма журн. тех. физ. **27**, вып. 9, 47 (2001).

[33] А. К. Шуаибов, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Квант. электрон. **31**, № 4, 371 (2001).

[34] А. К. Шуаибов, А. И. Дащенко, И. В. Шевера, Журн. прикл. спектроскоп. **68**, № 2, 275 (2001).

[35] А. К. Шуаибов, В. С. Шевера, Опт. спектроскоп. **47**, вып. 2, 401 (1979).

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

[37] V. V. Datsyuk, I. A. Izmailov, J. Phys. Stud. **4**, 274 (2000).

AN ELECTRODISCHARGE SOURCE OF RADIATION OF LOW PRESSURE ON CHLORINE Ar, Kr, Xe AND Cl_2* MOLECULES

A. K. Shuaibov, L. L. Shimon, A. I. Dashchenko, I. V. Shevera

Uzhgorod National University

46 Pidhirna Str., Uzhgorod, UA–88000, Ukraine

E-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

The results of a comprehensive investigation of electrical, spectral and power characteristics of a stationary source of radiation of a low pressure on ArCl, KrCl, XeCl and Cl_2 molecules are presented in this paper. A longitudinal decaying discharge of a direct current on mixtures He/Cl_2, Ar (Kr, Xe)/Cl_2, Ar/Xe(Kr)/Cl_2 and Ar/Kr/Xe/Cl_2 served as an active medium. A multiwave operation mode of the source of radiation was realized by means of using two or three components mixtures of heavy gases (Ar, Kr and Xe) with molecules Cl_2. The developed emmitter can be used in UV-VUV photometry, chemistry of high energies, biophysics and medicine. It was shown that the spectrum of a multiwave source of radiation overlaps the area of 170–310 nm at base lengths waves of 175, 199, 200, 222, 236, 258 and 308 nm. The power of radiation of the lamp on the mixtures Ar/Cl_2, Kr/Cl_2 and Xe/Cl_2 grew from 2 to 8 W on transition from the Ar of to Xe media. The optimum pressure of mixtures made 3–4 kPa, and $P(Cl_2) = 0.25$–0.40 kPa. The lamps on the mixture Ar/Kr/Xe/Cl_2 by power and effectiveness are very close to those on the mixture Xe/Cl_2. The greatest effectiveness ($\eta \leq 25\,\%$) of the source of radiation was achieved in a decaying discharge at small discharge currents $I_{\rm ch} \leq 5$ mA.