ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 4, № 3 (2000) с. 291–297

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 4, No. 3 (2000) p. 291–297

КОРОННИЙ РОЗРЯД У РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ ЛАЗЕРІВ НА ФТОРИДАХ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ ТА МОЛЕКУЛАХ Й АТОМАХ ФТОРУ

О. К. Шуаібов, Л. Л. Шимон, О. Й. Миня
Ужгородський державний університет,
вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000, Україна

(Отримано 17 квітня 2000 р.)

Подано результати дослідження характеристик додатного та від'ємного коронних розрядів у системі електродів "голки–сітка" для типових робочих середовищ ексимерних лазерів на B – X переходах фторидів інертних газів, лініях $F(3s-3p)$ та електророзрядного лазера на $F_2(D'-A')$. Вивчено осцилограми струму коронного розряду, залежності частоти повторення імпульсів струму від напруги на голках і вольт–амперні характеристики розрядів в сумішах інертних газів з молекулами фтору (He/F_2, $He/R/F_2$, де R — Ar, Xe, Kr). Досліджено спектри випромінювання ґенераційних зон коронних розрядів та залежностей інтенсивности випромінювання ліній атомів фтору, важких інертних газів та їхніх монофторидів від струму коронного розряду. Цей коронний розряд рівномірно розподілений по довжині активного середовища електророзрядного лазера з накачуванням поперечним розрядом, тому він становить інтерес для використовування в модулях електричного прокачування і системах УФ передйонізації лазерів високого тиску.

Показано, що додатний коронний розряд у сумішах $He/R/F_2$ найбільш оптимальний для використання в системах електричного прокачування, а від'ємний — як джерело УФ випромінювання. У від'ємному коронному розряді на суміші He/F_2 ґенераційна зона є селективним джерелом червоного випромінювання на переходах $F(3s-3p)$, для прокачування цієї суміші також більш оптимально застосовувати від'ємний коронний розряд.

Ключові слова: коронний розряд, низькотемпературна плазма, інертний газ, фтор, вольт–амперні характеристики, випромінювання.

PACS number(s): 52.80.–s, 52.20.Jm

I. ВСТУП

Суміші інертних газів атмосферного тиску з молекулами фтору є робочими для імпульсно–періодичних лазерів на $3s-3p$ переходах атомів фтору [1, 2], молекулярного лазера на $\lambda = 157$ нм $F_2(D'-A')$ [3, 4], а також ексимерних лазерів на 351 нм XeF^*, на 249 нм KrF^* і 193 нм ArF^* [5, 6]. Застосування в складі робочих середовищ цих лазерів молекул фтору часто приводить через високу аґресивність робочих середовищ до зменшення ресурсу роботи механічних систем прокачування газових сумішей та додаткового забруднення. Крім того, використання діяметральних вентиляторів або компресорів для прокачування газових сумішей через міжелектродний проміжок лазера характеризується значним споживанням електроенерґії та супроводжується шумами й вібрацією випромінювача. У [7] показано, що при частотах проходження імпульсів ґенерації N_2 і $XeCl^*$–лазерів, менших за 70 Гц, можливе застосування електричного прокачування, дія якого базується на ефекті "електричного вітру", що виникає в коронному розряді (КР). Дослідження характеристик подібних розрядів ми проводили для робочих середовищ лазерів високого тиску на молекулах N_2 і CO [8], атомах інертних газів [9] і для ексимерних лазерів на хлоридах інертних газів [10]. В усіх цих середовищах КР існував у вигляді точкових ґенераційних зон (ҐЗ) і темної зовнішньої області, і вони характеризувались порівняно слабкою електровід'ємністю компонент газового середовища. Характеристики багатоелектродних КР у сумішах інертних газів із сильно електровід'ємними молекулами типу F_2 раніше не вивчались.

У нашій праці подано результати дослідження характеристик багатоелектродних додатного та від'ємного коронних розрядів у робочих середовищах лазерів на атомах і молекулах фтору та монофторидів інертних газів.

II. ТЕХНІКА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Блок–схема для дослідження багатоелектродного КР показана на рис. 1а. КР запалювали в розрядній камері (1) за допомогою джерела постійної напруги (4) (±10 кВ, 3 мА), що під'єднувалось через баластний опір (2) ($R_б$ = 1–3 МОм). Приготування робочих сумішей здійснювали безпосередньо в камері (1) за допомогою вакуумної газозмішувальної системи (8) за два етапи: 1 — відкачування, 2 — напуск газів.

Усереднені вольт–амперні характеристики (ВАХ) КР вимірювали за допомогою мікроамперметра (3) УСМ та кіловольтметра (5) С196 із класом точности 2.5 та 1.0 відповідно. Час запису ВАХ складав близько 1 хв. З певної напруги амперметр починав реєструвати струм, потім з деяким дискретним збільшенням напруги на голках фіксувалися значення струму. Це тривало доти, поки при деякій напрузі (напрузі пробою) на одній з голок не виникав стример. Спостерігали при цьому ріст струму в колі, а напруга на системі електродів сильно падала. Після цього встановлювали знову деяку напругу, що менша за напругу пробою, і запис ВАХ повторювали в зворотному напрямку. Таким чином, вимірювали ВАХ десятки разів, щоб отримати достовірні дані та статистичну оброку результатів. Потім протягом 30–50 хв знімали інші характеристики, а відтак знову повторювали запис ВАХ як у напрямку збільшення напруги на голках, так і у напрямку її зменшення. Величина робочих напруг КР залежно від тиску та складу сумішей змінювалася в межах 4–10 кВ, а струм КР змінювався від мікроамперів до міліамперів.

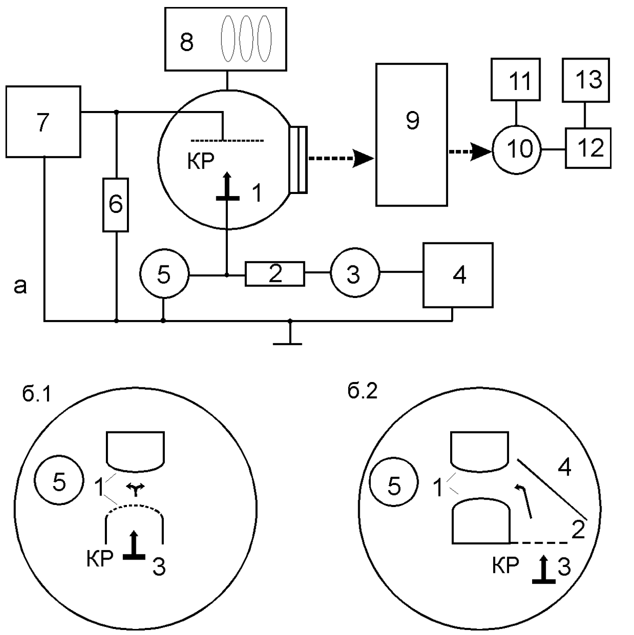

Рис. 1. а. Блок–схема установки для дослідження характеристик багатоелектродного КР: 1 — електророзрядний модуль високого тиску на базі КР; 2 — обмежувальний резистор (R = 1–3 МОм); 3 — мікроамперметр; 4 — високовольтний блок живлення КР; 5 — кіловольтметр; 6 — резистор R = 1.1 кОм; 7 — осцилограф С1–79; 8 — вакуумна газозмішувальна система; 9 — монохроматор МДР–2; 10 — фотоелектронний помножувач ФЭУ–106; 11 — блок живлення ФЭУ–106; 12 — підсилювач У5–9; 13 — електронний потенціометр. б. Переріз випромінювача високого тиску з модулем електричного прокачування робочого середовища (два варіанти): 1 — лазерні електроди; 2 — нікелева сітка; 3 — лінійка з голками; 4 — спрямовуюча пластина; 5 — холодильник.

Оптичні характеристики плазми КР вивчали за допомогою монохроматора МДР–2. Випромінювання плазми ґенераційної зони, що виводилось через вікно розрядної камери, проходило оптичну систему монохроматора і детектувалось фотоелектронним помножувачем ФЭУ–106, підсилювалось приладом (12) У5–9 і реєструвалось потенціометром КСП–4. Час запису спектрів та залежностей інтенсивности випромінювання від величини струму КР складав 30–50 хв, залежно від кількости записів оглядових спектрів або окремих ділянок, що нас цікавили. Калібрування оптичної системи реєстрації проводили в ділянці 200–1000 нм за допомогою водневої лампи ДВС–25 та теплової лампи СИ8–200.

Імпульсні та частотні характеристики плазми КР вивчали спадом напруги на опорі (6) за допомогою осцилографа (7) С1–79. Резистор (6) величиною $R_{н}$ = 1.1 кОм підключали послідовно в коло КР. Залежно від складу сумішей осцилограми струму КР містили постійну та імпульсну складову, а в деяких випадках мали чисто імпульсний або постійний характер.

Модуль для одержання коронного розряду складався з розрядної камери, діелектричного фланця, на якому монтували систему електродів. Система електродів (СЕ) КР містила один ряд голок та нікелеву сітку. Густина голок у ряді дорівнювала: 1 голка на 1 см довжини. Голки радіусом заокруглення кінців 0.5 мм виготовлено з нержавіючої сталі. Нікелева сітка мала комірки розміром 0.1 × 0.1 см і виготовлена з дротинок діяметром 0.03 см. Довжина СЕ дорівнювала 11 см, а міжелектродна відстань — 2 см. Розрядна камера виготовлена з нержавіючої труби діяметром 20 см і висотою 15 см і розрахована на тиски до 10 атм. Камера обладнана кварцевими віконцями, які встановлені попарно у взаємноперпендикулярних напрямках. Розрядна камера обладнана манометром, а також краном для під'єднання до вакуумної газозмішувальної системи. Детальніше конструкцію випромінювача з КР та систему реєстрації описано в працях [10, 11].

На рис. 1б показано переріз розрядної камери випромінювача високого тиску з поперечним накачуванням та два варіянти розміщення багатоелектродного КР. У першому варіянті КР виконує функції передйонізатора та (або) модуля електричного прокачування, а другий — демонструє використання його лише як модуль електричного прокачування.

III. ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОННИХ РОЗРЯДІВ

У роботі вивчали часові характеристики струму КР, залежності частоти повторення імпульсів струму від напруги на голках, вольт–амперні характеристики КР в сумішах He/F_2 та $He/R/F_2$ при тисках у діяпазоні 100–350 кПа. Проведено спектроскопічну діягностику випромінювання плазми ґенераційних зон КР та досліджено залежності відносних інтенсивностей випромінювання збуджених атомів і ексимерних молекул від величини струму КР.

КР у сумішах інертних газів з молекулами фтору складався з суцільної ґенераційної зони, що утворюється поблизу всіх кінцівок голок, і темної зовнішньої области. Ґенераційна зона КР в суміші He/F_2 існує у формі яскравого плазмового шнура довжиною

11 см і діяметром 0.5–1.0 см. В ексимерних середовищах колір ґенераційних зон був зеленим (суміші на основі ксенону) або синьо–голубим (суміші на основі аргону і криптону). Розміри ґенераційної зони збільшувалися зі зростанням напруги на голках аж до появи стримера біля однієї з голок. Суцільний (у вигляді плазмового шнура) характер ґенераційних зон КР у сумішах інертних газів з молекулами фтору, на відміну від точкових ґенераційних зон, що виникають у сумішах He/Xe(Kr)/HCl [10], сприяє утворенню більш однорідного поперечного потоку робочих середовищ F^*, F_2^* і RF*–лазерів порівняно з іншими лазерами високого тиску [7–10]. Ґенераційні зони додатного КР у суміші He/F_2 мали поперечні розміри в 2–3 рази менші, ніж у від'ємному КР в цій же суміші.

Основною особливістю досліджуваних сумішей є значна величина константи швидкости дисоціятивного прилипання електронів до молекул F_2 ($v = 0$), яка приблизно на два порядки більша, ніж до молекул HCl ($v = 0$) і CO [12, 13]. Уперше на особливості поведінки щільної низькотемпературної плазми на основі сумішей He/R/F_2 було звернено увагу в праці [14], присвяченій розробці моделі УФ передйонізації в електророзрядних лазерах на фторидах інертних газів (RF*). Згодом ці дослідження отримали розвиток у працях [15, 16]. Так, згідно з даними [15, 16], у плазмі на сумішах інертних газів з молекулами фтору велика частина електронів за короткий проміжок часу (≤ 1 нс) перетворюється в йони F^- (реакція дисоціятивного прилипання електронів до молекул F_2). У від'ємному КР створений резервуар йонів F^- виштовхується електричним полем голок (з від'ємним потенціялом) у напрямку сітки. У процесі дифузії йонів F^- (через відлипання від них електронів) відбувається рівномірна передйонізація об'єму в ділянці кінцівок голок. Найефективнішим механізмом відлипання електронів від йонів F^- є фотовідлипання під дією УФ випромінювання з $\lambda \leq 360$ нм [16]. Цей ефект запропоновано використовувати для передйонізації в RF*–лазерах, і він називається NIAP (negative ion assisted preionisation) технікою передйонізації. Густина електронів (n_e), які продукуються внаслідок звільнення від йонів, та врахування втрат на прилипання дається виразом [15]:

$$n_e = 10^{-8} I [F^-], \tag{1}$$

де $[F^-]$ — густина йонів фтору, а I — інтенсивність УФ–випромінювання в Вт/см^2, що сприяє звільненню електронів від йонів і може бути як ґенероване, власне, самим активним середовищем, так уведене ззовні, наприклад, лазерне випромінювання з довжиною хвилі < 360 нм.

Джерелом УФ–випромінювання, яке може ефективно руйнувати йони F^- в КР на сумішах He/R/F_2, є випромінювання на $\lambda = 193$ нм ArF*, 249 нм KrF* і 351 нм XeF*, а в КР на суміші He/F_2 — це $\lambda = 157$ нм $F_2(D' - A')$.

Умови реалізації NIAP–схеми формування ґенераційних зон додатного КР несприятливі, оскільки в цьому випадку йони F^- частково нейтралізуються позитивно зарядженими вістрями голок, тому ґенераційні зони мають малі поперечні розміри та інтенсивність випромінювання їх суттєво менша, ніж для ґенераційних зон від'ємного КР. Це може дозволити використовувати ҐЗ від'ємного КР як джерела УФ передйонізації лазерів високого тиску. При цьому КР може виконувати одночасно як функції системи електричного прокачування, так і системи УФ передйонізації імпульсно–періодичних лазерів на атомах F^* і молекулах F_2^*, RF*. Для оптимізації контуру прокачування в таких лазерних випромінювачах необхідно застосовувати перфоровані (із сітки) анод і катод поперечного розряду, щоб забезпечити вільний доступ у міжелектродний проміжок лазера випромінювання УФ передйонізації, і система електродів повинна бути прозорою для поперечного потоку газової суміші. При цьому автоматично реалізується найоптимальніші геометричні умови розміщення УФ передйонізатора і модуля електричного прокачування [17]. Контрольний експеримент із дослідження КР на сумішах He/SF_6 і He/R/SF_6 (для яких вихід неґативних йонів атомів фтору значно нижчий, ніж у КР на сумішах інертних газів з молекулами F_2) показав, що ҐЗ цього КР формуються у вигляді набору окремих точкових ҐЗ і NIAP–схема УФ передйонізації тут не реалізується.

Таким чином, у КР на сумішах інертних газів з молекулами фтору автоматично реалізується NIAP–схема формування суцільної, просторово однорідної ҐЗ з поперечним розміром ≤ 1 см. Найоптимальніші умови формування ҐЗ великого об'єму реалізуються у від'ємному КР.

IV. ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Типові осцилограми імпульсів струму додатного і від'ємного КР зображені на рис. 2. У КР на сумішах He/F_2 і від'ємному КР на сумішах He/R/F_2 струм КР є чисто імпульсним, а в додатному КР на потрійних сумішах він складався з постійної та імпульсної частин. При цьому основний внесок у загальний струм додатного КР на робочих середовищах RF*–лазерів вносила постійна складова. Найбільшої амплітуди імпульсів струму (до 20 мА) від'ємного КР досягали в потрійних сумішах. Передній фронт імпульсів струму був коротким (≤ 50 нс), а задній затягнутим до 1 мкс. У додатному КР на суміші He/F_2 імпульс струму складався з двох максимумів і був тривалішим, ніж для від'ємного КР (рис. 2). Основними носіями струму в КР певної полярности є йони тієї ж полярности, які дифундують від ҐЗ до протилежного електрода [18, 19], тому основними носіями струму від'ємного КР є йони F^-, а в додатному КР на суміші He/F_2 це, в основному, F^+ і F_2^+. В додатному КР на потрійних сумішах основними додатно зарядженими йонами стають йони R^+, які швидко трансформуються при атмосферних тисках у молекулярні йони R_2^+. Цьому сприяють великі густини і порівняно низькі потенціяли йонізації атомів важких інертних газів (R). Початкові ділянки осцилограм струму від'ємного КР в сумішах $\mathrm{He/F_2}$ і $\mathrm{He}/R/\mathrm{F_2}$ (рис. 2) характеризують ріст густини йонів $\mathrm{F^-}$ в ділянці їх ефективного утворення (ҐЗ КР), а задні фронти осцилограм відповідають зменшенню густини йонів $\mathrm{F^-}$ внаслідок дрейфу їх до заземленого електрода. З тривалости заднього фронту імпульсів струму від'ємного КР ($\sim$ 1 мкс) і розміру зовнішньої области КР (1–1.5 см) випливає, що середня швидкість дрейфу від'ємних йонів фтору в гелії при тисках 2 атм складає $(1–2)\times10^6$ см/с. Для забезпечення такої швидкости дрейфу йонів $\mathrm{F^-}$ напруженість електричного поля на зовнішній межі ҐЗ повинна складати, за даними рухливости йонів $\mathrm{F^-}$ в He [15, 16], 50–60 кВ/см. Вимірювання швидкости дрейфу йонів $\mathrm{F^-}$ в суміші $\mathrm{He/F_2}$ дали значення: $V_{\text{др}} = (1-3)\times 10^6$ см/с [20].

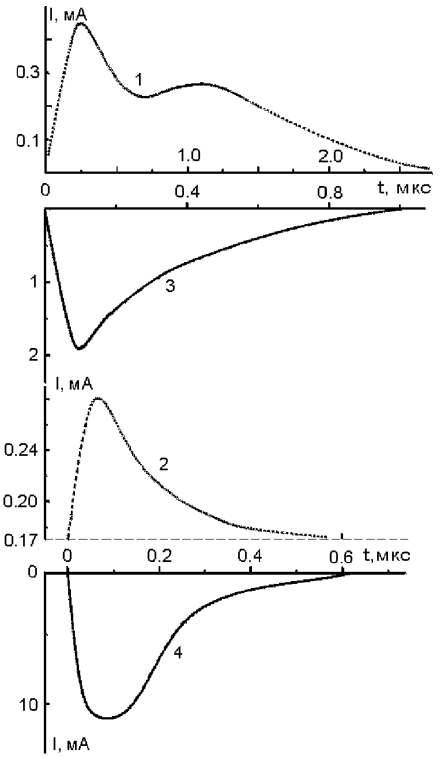

Рис. 2. Осцилограми струму додатного (1,2) і від'ємного (3,4) КР в сумішах: 1,3 — $\mathrm{He/F_2}$ = 200/0.8 кПа; 2,4 — $\mathrm{He/Kr/F_2}$ = 200/6.4/0 кПа.

Залежності частоти повторення імпульсів струму від'ємного КР в сумішах $\mathrm{He/F_2}$ і $\mathrm{He/Kr/F_2}$ від величини напруги на голках подані на рис. 3. Найбільша частота проходження характерна для від'ємного КР в суміші $\mathrm{He/F_2}$. В додатному КР на суміші $\mathrm{He/F_2}$ частота проходження імпульсів струму при інших рівних умовах зменшувалася приблизно в два рази. У від'ємному КР на потрійних сумішах максимальна частота проходження імпульсів струму зменшувалася з ростом атомної ваги робочого інертного газу — R і в суміші $\mathrm{He/Xe/F_2}$, не переважала 12–14 кГц. Це зумовлено відмінностями в швидкостях дрейфу йонів R^+ і R_2^+, що екранують від'ємно заряджені вістря голок, та $\mathrm{F^-}$, які визначають швидкість зменшення від'ємного заряду в ҐЗ КР [18]. У додатному КР на потрійних сумішах гранична частота проходження імпульсної складової струму КР досягала 160 кГц. У цьому випадку густина від'ємно заряджених йонів фтору була, очевидно, дуже малою для повного запирання міжелектродного проміжку в міжімпульсний період, і ми спостерігали, в основному, постійну складову струму, що являє собою потік додатно заряджених йонів важких інертних газів. Гранична ж частота проходження імпульсної складової струму визначалась рухливістю порівняно легких йонів $\mathrm{F^-}$ в напрямку позитивно заряджених голок.

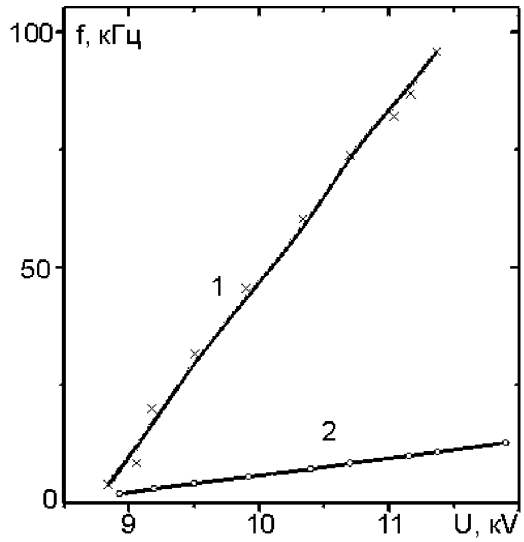

Рис. 3. Залежності частоти повторення імпульсів струму від'ємного КР в сумішах: $\mathrm{He/F_2}$ (1) і $\mathrm{He/Kr/F_2}$ (2) від величини напруги на голках.

Типові вольт–амперні характеристики (ВАХ) КР в подвійних та потрійних сумішах показані на рис. 4. ВАХ КР в суміші $\mathrm{He/F_2}$ складалися з пологої початкової ділянки, близької за характером до лінійної, і різко зростаючої частини, що пов'язана зі стримерним пробоєм міжелектродного проміжку. Для подвійних сумішей однакового складу і тиску швидкість росту струму від'ємного КР в 1.5–2 рази вища для додатного, але потенціял запалювання додатного КР на 2–3 кВ нижче, ніж для від'ємного. У КР на потрійних сумішах величини потенціялів запалювання також відрізнялися для додатного і від'ємного КР, але граничні струми КР з неконтраґованою ґенераційною зоною були приблизно однаковими. Збільшення тиску гелію до 300–350 кПа приводило до росту потенціялів запалювання КР і до розширення діяпазону напруг стійкого існування КР. ВАХ КР на сумішах $\mathrm{He}/R/\mathrm{F_2}$ значно відрізнялися від типових для КР: $I = \alpha(U-U_0)^2$ [21] (де α — константа, U_0 — потенціял запалювання КР). Це зумовлено нелінійностями

КР в інертних газах [22], що найсильніше проявляються при наявності атомів R і надають КР певних властивостей тліючого розряду.

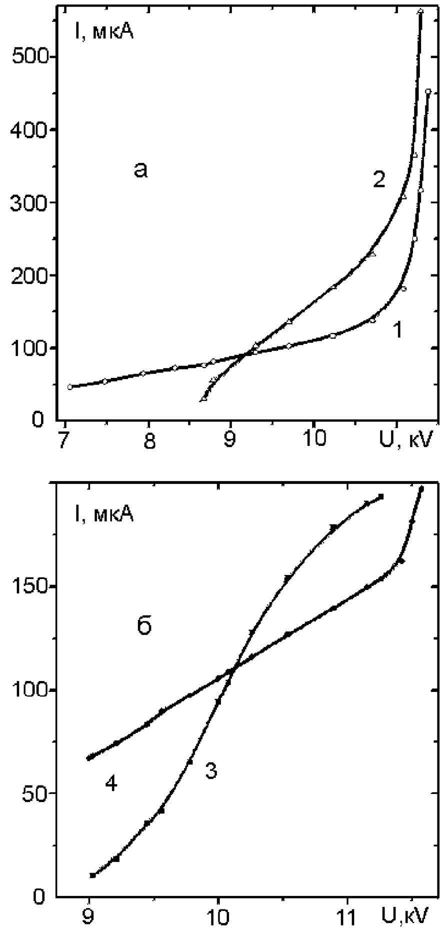

Рис. 4. Вольт–амперні характеристики додатного (1,3) і від'ємного (2,4) КР в сумішах: а) $He/F_2 = 200/0.8$ кПа (1,2); б) $He/Kr/F_2 = 200/6.4/0.8$ кПа (3,4).

Таким чином, для ефективної роботи модуля прокачування суміші He/F_2 найоптимальнішим є застосування від'ємного КР при $U = 9 - 11$ кВ, а для прокачування потрійних сумішей — додатного КР при $U = 8 - 10$ кВ.

V. ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ҐЕНЕРАЦІЙНОЇ ЗОНИ КР

Спектри випромінювання плазми ҐЗ КР в сумішах He/F_2 і $He/Kr/F_2$ показані на рис. 5. Спектри випромінювання ҐЗ додатного і від'ємного КР у всіх сумішах інертних газів з молекулами F_2 були ідентичними і відрізнялися лише величинами відносних інтенсивностей випромінювання на переходах атомів фтору, важких інертних газів й ексимерних молекул. Найінтенсивнішим було випромінювання ҐЗ від'ємного КР. Основні лінії в спектрі ҐЗ КР на суміші He/F_2, які визначають її колір, належать $3s - 3p$ переходам атомів фтору і є ґенераційними при накачуванні суміші He/F_2 поперечним розрядом [1, 2]. Найінтенсивніша лінія HeI з $\lambda = 706.6$ нм була приблизно на порядок слабшою від ліній на $3s - 3p$ переходах FI, що пов'язано зі специфічним виглядом функції розподілу електронів за енерґією в КР, яка обмежена з боку високих енерґій [23]. Мала ефективність заселення високо розташованих енерґетичних станів HeI робить малоперспективним і розселення нижніх електронних станів HeI за рахунок реакцій з молекулами F_2. Тому створення селективного джерела випромінювання на переходах атомів He з накачуванням КР, як це реалізовано в поперечному розряді [24], неможливо.

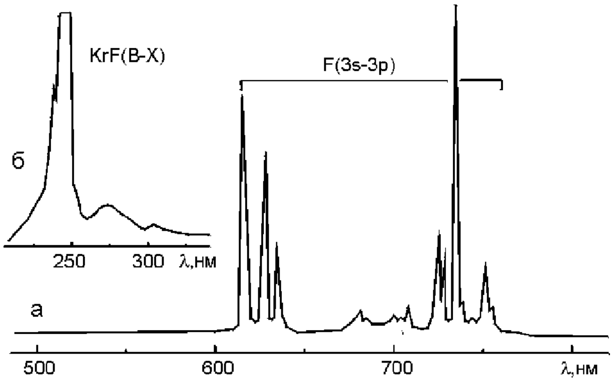

Рис. 5. Спектри випромінювання плазми ґенераційної зони від'ємного КР в сумішах: He/F_2 (1) і $He/Kr/F_2$ (2).

В УФ–спектрах випромінювання ҐЗ багатоелектродних КР в сумішах $He/R/F_2$ основним було випромінювання на 193 нм ArF^*, 249 нм KrF^* і 351 нм XeF^*. У видимій ділянці спостерігалось селективне заселення окремих p–станів атомів важких інертних газів, що випромінюють на переходах $Ar(4s - 5p)$, $Kr(5s - 6p)$, $Xe(6s - 7p)$ в синьо–зеленій ділянці спектра. Це випромінювання і визначало колір ҐЗ КР, хоча його інтенсивність була на один, два порядки нижче від інтенсивности на B – X переходах фторидів інертних газів. У ближній інфрачервоній ділянці спектра найінтенсивнішими були лінії 750 нм ArI, 810 нм KrI, 823 нм і 882 нм XeI на переходах $R(ns - np)$ (де: $n = 4, 5, 6$ відповідно для Ar, Kr, Xe). Але й інфрачервоне випромінювання поступалося за інтенсивністю УФ–випромінюванню $RF(B - X)$.

Залежності інтенсивности випромінювання ліній $F(3s - 3p)$ у КР на суміші He/F_2 і смуги 249 нм у суміші $He/Kr/F_2$ від струму КР зображені на рис. 6 і рис. 7. Залежності інтенсивности випромінювання ліній F^*, R^* і смуг RF^* від струму мали зростаючий характер, за формою близькою до лінійної (за винятком кривої 2 на рис. 6).

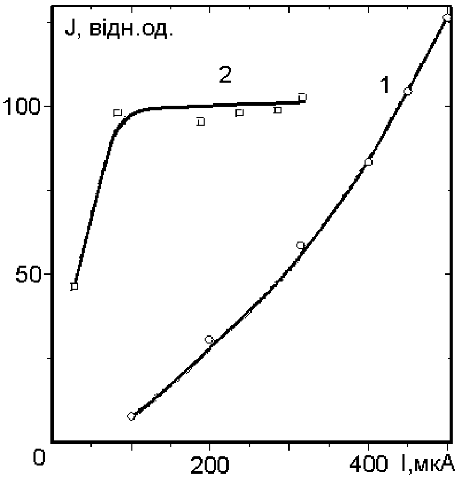

Рис. 6. Залежності відносної інтенсивности випромінювання лінії 740 нм F* від струму додатнього (1) і від'ємного (2) КР.

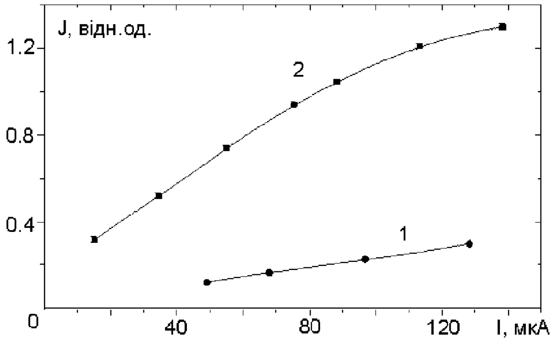

Рис. 7. Залежності відносної інтенсивности випромінювання смуги 249 нм KrF від струму додатного (1) і від'ємного (2) КР в сумішах He/Kr/F_2.

Атоми F($3p$) в щільній електророзрядній плазмі ефективно утворюються в реакціях передачі енерґії від метастабільних атомів He молекулам F_2 [4]:

$$\mathrm{He}^* + \mathrm{F}_2 + (\mathrm{He}) \to \mathrm{F}(3p) + \mathrm{F} + (\mathrm{He}), \tag{2}$$

$$k = 8.2(-30)\ \text{см}^6/\text{с}.$$

У від'ємному КР густина йонів F^-, об'єм ҐЗ та інтенсивність випромінювання на переходах $F(3s-3p)$ більші, ніж у додатному КР. У цьому випадку поряд з реакцією (2) атоми F($3p$) можуть ефективно утворюватися і в процесах рекомбінації йонів He^+ і F^- через утворення ексимерної молекули HeF*, яка має дуже малий час життя (≤ 1 нс) і швидко розпадається в результаті переддисоціяції [25, 26]. Рекомбінаційний внесок у заселення F($3p$), як видно з рис. 6 і ВАХ КР, переважатиме при понижених напругах на голках і відповідно при нижчих значеннях параметра E/N, що характерніше для від'ємного КР.

За даними числового моделювання процесів в електророзрядній плазмі на сумішах He/F_2 [4], атоми F з енерґією верхнього стану в діяпазоні 14–15 еВ роблять основний внесок у заселення D'–стану молекул F_2, що є верхнім рівнем для лазера на $\lambda = 157$ нм $F_2(D'-A')$. Тому насичення залежности інтенсивности лінії $\lambda = 740.0$ нм FI від струму від'ємного КР може бути пов'язано протіканням у КР реакції:

$$\mathrm{F}(3p) + \mathrm{F}_2 \to \mathrm{F}_2(D') + \mathrm{F}. \tag{3}$$

Як випливає з рис. 6, спостереження молекул $F_2(D')$ за випромінюванням у ВУФ ділянці найреальніше очікувати у від'ємному КР при струмах 100–300 мкА. Як видно з дослідження випромінювання ҐЗ КР, у суміші He/F_2 реалізується селективне заселення окремих рівнів $3p$ станів FI, а в КР на сумішах He/R/F_2 — B–станів RF* і окремих рівнів атомів Ar(4p, $5p$), Kr(5p, $6p$), Xe($6p$, $7p$).

При оптимізації конструкції системи електродів КР, складу і тиску газових сумішей на основі ҐЗ від'ємного КР можливо створення простих УФ джерел вимушеного і спонтанного випромінювання, селективних ламп у червоній і ВУФ ділянках на основі суміші He/F_2.

VI. ВИСНОВКИ

Таким чином, дослідження характеристик коронного розряду високого тиску в сумішах He/F_2 і He/(Ar,Kr,Xe)/F_2 показало, що в цих середовищах формується суцільна ґенераційна зона, яка охоплює всі вістря голок. У модулі прокачування робочих середовищ лазерів на переходах $3s-3p$ атома фтору і $D'-A'$ переходах молекул фтору найоптимальнішим є застосування від'ємного КР, а в системі прокачування RF–лазерів — додатного КР. Суцільна, протяжна в довжину форма ґенераційної зони КР пов'язана з автоматичною реалізацією NIAP–технології передйонізації, що створює передумови отримання більш однорідного поперечного газового потоку, ніж у лазерних середовищах на хлоридах інертних газів. Ґенераційна зона від'ємного КР може бути використана як селективна лампа або лазерний випромінювач на $3s-3p$ переходах FI, $\lambda = 157$ нм F_2^*, $\lambda = 193$ нм ArF*, $\lambda = 249$ нм KrF* і $\lambda = 351$ нм XeF*. Викликає інтерес реалізація лазерного випромінювача з УФ передйонізацією від ґенераційної зони від'ємного КР, що служить одночасно і модулем електричного прокачування сумішей інертних газів з молекулами фтору.

[1] P. L. Chapovsky, S. A. Kochubei, V. N. Lisitsyn, A. M. Razev, Appl. Phys. Lett. **14**, 231 (1977).
[2] J. E. Lawler, J. W. Parker, L. W. Anderson, W. A. Fitzsimmons, IEEE J. Quantum Electron. **15**, 609 (1979).
[3] J. K. Rice, H. A. Kay, J. R. Woodworth, Appl. Phys. Lett. **31**, 31 (1977).
[4] K. Yamada, K. Miyazaki, T. Hasama, T. Sato, Appl. Phys. Lett. **54**, 597 (1989).
[5] M. Shimauchi, Jpn. J. Appl. Phys. **20**, 473 (1981).
[6] D. E. Rothe, R. A. Gibson, Opt. Commun. **22**, 265 (1977).
[7] А. И. Баранов, К. В. Гурков, М. И. Ломаев и др., Приборы техн. эксп. **4**, 108 (1994).
[8] А. К. Шуаибов, А. И. Миня, В. В. Звенигородский, В. С. Шевера, Письма журн. тех. физ. **22**, 73 (1996).
[9] О. К. Шуаібов, Л. Л. Шимон, А. Й. Дащенко, І. В. Шевера, О. Й. Миня, Журн. фіз. досл. **3**, 47 (1999).
[10] А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, И. В. Шевера, Квант. электрон. **24**, 20 (1997).
[11] А. К. Шуаибов, И. В. Шевера, Журн. прикл. спектроскоп. **64**, 246 (1997).
[12] L. G. Christophorov, Contrib., Plasma Phys. **27**, 237 (1987).
[13] D. Kigler, Z. Rosenberg, M. Rokni, Appl. Phys. Lett. **39**, 319 (1981).
[14] J. Hsia, Appl. Phys. Lett. **30**, 101 (1997).
[15] V. R. Osborne, R. J. Winfield, J. M. Green, J. Appl. Phys. **65**, 5242 (1989).
[16] M. R. Osborne, J. M. Green, J. Appl. Phys. **71**, 3127 (1992).
[17] А. К. Шуаибов, Деп. Укр. НИИНТИ № 1356, 30 (1991).
[18] Е. Д. Лозанский, О. Б. Фирсов, *Теория искры* (Атомиздат, Москва, 1975).
[19] И. П. Верещагин, *Коронный разряд в аппаратах электронно–ионной технологии* (Атомиздат, Москва, 1985).
[20] K. J. Nyggard, J. Fletcher, S. R. Hunter, S. R. Foltyn, Appl. Phys. Lett. **32**, 612 (1978).
[21] P. L. Henson, J. Appl. Phys. **52**, 709 (1981).
[22] A. A. Belevtsev, L. M. Biberman, Beitr. Plasmaphys. **23**, 313 (1983).
[23] В. Д. Песков, Журн. тех. физ. **45**, 2544 (1975).
[24] М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, Квант. электрон. **19**, 146 (1992).
[25] L. O. Hocker, J. Opt. Soc. Am. **68**, 262 (1978).
[26] C. B. Collins, F. W. Lee, J. M. Garrol, Appl. Phys. Lett. **37**, 857 (1980).

CORONA DISCHARGE IN WORKING MEDIA OF LASERS ON A FLUORIDE RARE GASES AND MOLECULE AND ATOM FLORINES

A. K. Shuaibov, L. L. Shimon, A. I. Minya
Uzhgorod State University,
46 Pidhirna Str., Uzhgorod, UA–88000, Ukraine

The results of an investigation of positive and negative corona discharge characteristics in the "needles–grid" electrode system, typical of excimer lasers working media on the $B-X$ fluorine transition of the rare gases, $F(3s-3p)$ lines and the electrodischarge laser on $F_2(D'-A')$ are presented. We investigated the oscillograms of the corona discharge current, the dependences of the repetition rate of the current pulses on the voltage at the needles, and the current–voltage characteristics of the discharge in the rare gas mixtures with F_2 molecules (He/F_2, $He/R/F_2$, where R — Ar, Xe, Kr). An investigation of the emission spectra of the generation zones of the corona discharge and the dependences of the emission lines of fluorine atoms, the heavy rare gases and their monofluorides (RF) on the corona discharge current was performed. The given corona discharge is uniformly distributed over the length of the active media of electro–discharge lasers with the pumping transverse discharge, therefore, it is of great interest in using it in electric circulation modules and UV preionisation systems of high–pressure lasers.

It is shown that a positive corona discharge in $He/R/F_2$ mixtures is optimal for using in the electrical circulation modules and that a negative corona discharge is a source of UV emission. In a negative corona discharge in the He/F_2 mixtures the generation zones is a selective source of red emission on the transition $F(3s-3p)$ and the use of a negative corona discharge for electric circulation modules is at the optimum.