

## ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ ПОПЕРЕЧНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШАХ АРГОНУ З SF<sub>6</sub>

**З.Т. Гомокі, В.-Ф.З. Папп, М.М. Повч, Л.Л. Шимон, І.І. Сабов.**

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54.

В області  $\lambda\lambda 120\dots 340\text{нм}$  досліджено випромінювання плазми газового розряду сумішей Ar-SF<sub>6</sub>, He-Ar-SF<sub>6</sub> та Ne-SF<sub>6</sub>. Виявлено, що спектри складаються з смуги  $\lambda 193,3\text{нм}$  ArF<sup>\*</sup>, ВУФ спектральних ліній атомів Si та широкої смуги при  $\lambda > 200\text{нм}$ , яка є суперпозицією  $\lambda\lambda 270\dots 290\text{нм}$  ArF<sup>\*</sup><sub>2</sub>,  $\lambda\lambda 200\dots \lambda 280\text{нм}$  Ar<sup>\*</sup><sub>2</sub> і Ar<sup>+</sup><sub>2</sub>,  $\lambda\lambda 280\dots 340\text{нм}$  S<sub>2</sub> молекулярних смуг. Розглядається механізм утворення в розряді молекул ArF<sup>\*</sup> і можливість створення на базі досліджених сумішей джерела когерентного або широкосмугового спонтанного випромінювання.

При розробці високо інтенсивних газорозрядних когерентних та некогерентних джерел світла для медицини, плазмохімії, екології, мікроелектроніки і т.п. потрібні дані про процеси утворення, збудження та релаксації молекул, канали розподілу вкладеної в газ енергії тощо. Їх можливо отримати дослідженням випромінювання відповідної низькотемпературної плазми. Одним з перспективних джерел випромінювання є газовий розряд на сумішах інертних газів з галогеноносіями. Дослідженню плазми сумішей на базі галогеноміських молекул присвячено чимало наукових робіт. Вони, як правило, направлені на створення потужних ексимерних лазерів [1, 2]. Тому, у сумішах використовувались лише окремі молекули, що містять, наприклад, фтор (F<sub>2</sub>, NF<sub>3</sub>). УФ і ВУФ випромінювання детально не досліджувалось, вивчались лише характеристики плазми при середніх питомих енерговкладах у розряд. У даній роботі у діапазоні  $\lambda\lambda 120\dots 300\text{нм}$  досліджено випромінювання плазми сумішей інертних газів з SF<sub>6</sub> при питомих енерговкладах у розряд  $0,5\dots 2,5\text{МВт/см}^3$ .

Експерименти виконані на установці, що зображена на рис.1. Газовий розряд створювався у комірці 1. Випромінювання вивчалось вакуумним монохроматором з оберненою дисперсією 7Å/мм, реєструвалось фотоелектронним детектором ФЕП-142, з якого сигнал поступав на електронний потенціометр КСП-4.

Частота слідування імпульсів накачки середовища становила 5...10Гц. Імпульси напруги та струму вимірювались ємнісним дільником напруги та каліброваним шунтом і реєструвались швидкодіючим осцилографом С1-108 відповідно.

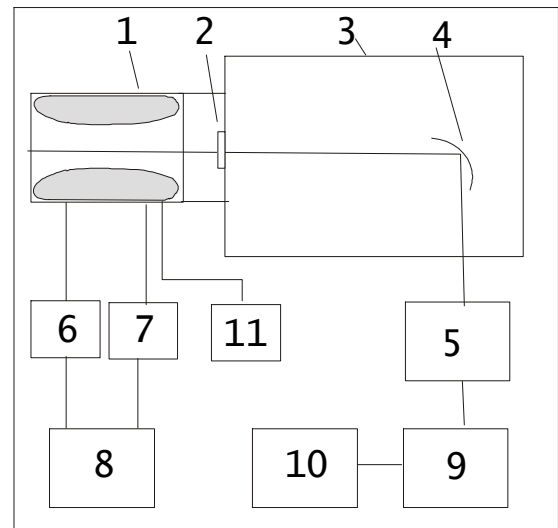


Рис.1. Експериментальна установка для дослідження плазми поперечного розряду.

1-газорозрядна комірка, 2-LiF-віконце, 3-монохроматор, 4-дифракційна ґратка, 5-фотоелектронний помножувач ФЕП-142, 6-дільник напруги, 7-струмовий шунт, 8-осцилограф С1-108, 9-підсилювач постійного струму, 10-потенціометр КСП-4, 11-генератор імпульсних напруг.

Циліндрична комірка 1 (рис.2.) діаметром 40мм і довжиною  $L=120\text{мм}$  виготовлена з капролактаму, яка від спектрометра відокремлена LiF-вікном. Посеред

неї розташовані нікелеві електроди, між якими утворюється розряд з

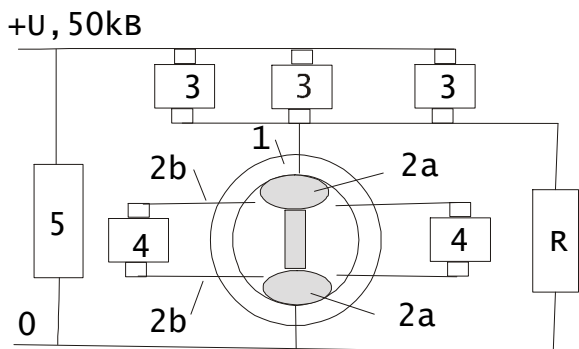


Рис.2. Схема комірки для збудження поперечного розряду

1- газорозрядна камера; 2-електродна система: а- основні електроди, б-електроди іскрової предіонізації; 3-накопичувач з ємностей К-15-10,  $C_n=20$  нФ; 4- загострюючі і предіонізуючі конденсатори з КВИ-3;  $C_3 + C_n = 8$ нФ; 5- комутатор-тіратрон ТГИ-1000/25 або розрядник РУ-65.

об'ємом  $0,2 \dots 1 \cdot 1,5 \cdot 12 \text{ см}^3$ . Плазма одержується накачкою газового середовища імпульсним генератором (ГН), аналогічним тому, що використовуються для створення активних середовищ ексімерних лазерів з питомою потужністю до  $2,5 \text{ МВт/см}^3$ . Накопичувальна ємність зібрана з конденсаторів КВИ-3, а при  $P_{\text{нак}} \geq 2,5 \text{ МВт/см}^3$  передбачено використання ємності КМЧ-50-0,1 і комутатора-розрядника РУ-65. Комірка може бути використана і для дослідження плазми багатокомпонентних сумішей інертних газів з різними галогеноносіями, в тому числі активного середовища більшості УФ-лазерів, так як у названих системах питома потужність, що вкладається в плазму, має величину  $0,5 \dots 1,5 \text{ МВт/см}^3$ . Замітимо, що на даній установці, можливо вивчення процесів у плазмі і при потужностях, що вкладаються в розряд більших, ніж  $2,5 \text{ МВт/см}^3$ .

### Результати та їх обговорення

У роботі досліджувалось випромінювання плазми сумішей  $\text{Ar-SF}_6$  і  $\text{Ar-Ne}$ ,

$\text{Ne, Kr-SF}_6$  в ультрафіолетовій і ВУФ-областях спектру. Емісійні спектри отримані для різних компонентних складів сумішей при загальному тиску газу  $p=70 \dots 800 \text{ мм рт. ст.}$  На рис.3 наведено спектр суміші  $\text{Ar-SF}_6$ . Як видно, у діапазоні  $\lambda 170 \dots 270 \text{ нм}$  спостерігаються дві інтенсивні молекулярні смуги з максимумами при  $\lambda 193,3 \text{ нм}$  і  $\lambda 248 \text{ нм}$  та декілька спектральних ліній. Перша з смуг належить відомому лазерному переходу ( $B^2\Sigma \rightarrow B^2X$ ) молекули  $\text{ArF}$ . Її висока інтен-

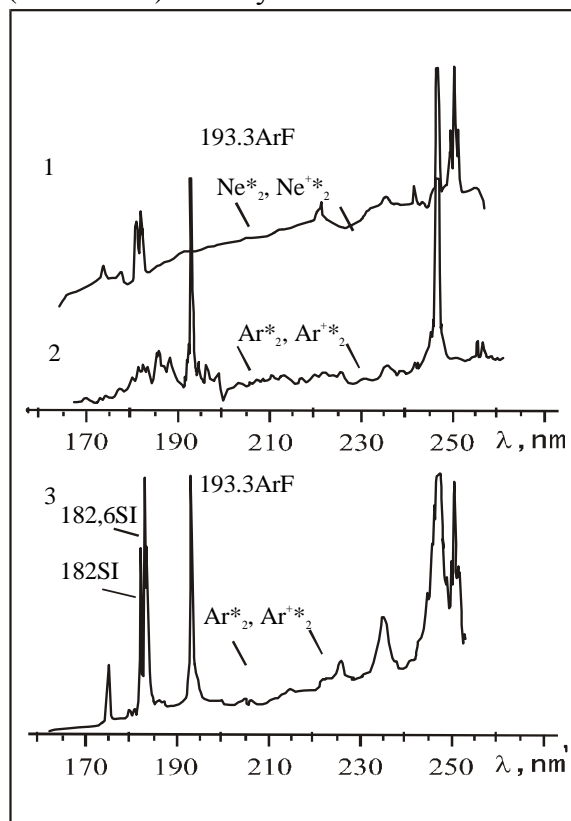
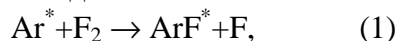


Рис.3. УФ-спектри випромінювання сумішей інертних газів та елегазу.

1- суміші  $\text{Ne-SF}_6=100-3$  при  $p_{\text{зар.}} = 500 \text{ мм рт. ст.}$ ; 2- суміші  $\text{Ne-Ar-SF}_6 = 736-70-7$  при  $p_{\text{зар.}} = 813 \text{ мм рт. ст.}$ ; 3-суміші  $\text{Ar-SF}_6 = 70-7$  при  $p_{\text{зар.}} = 77 \text{ мм рт. ст.}$ ;

сивність свідчить про ефективне утворення у плазмі вказаної ексімерної молекули. На основі аналізу результатів експериментів, літературних даних [3-5] і величин констант швидкостей реакцій можна рахувати, що  $\text{ArF}^*$  утворюється переважно двома шляхами



і



До збудження молекул  $\text{ArF}^*$  приводять і реакції  $\text{Ar}^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow \text{ArF}^* + \text{M}$  і  $\text{Ar}_2^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar} + \text{M}$ . Однак, вони є головними у системах з електронно-променевою накачкою газу.

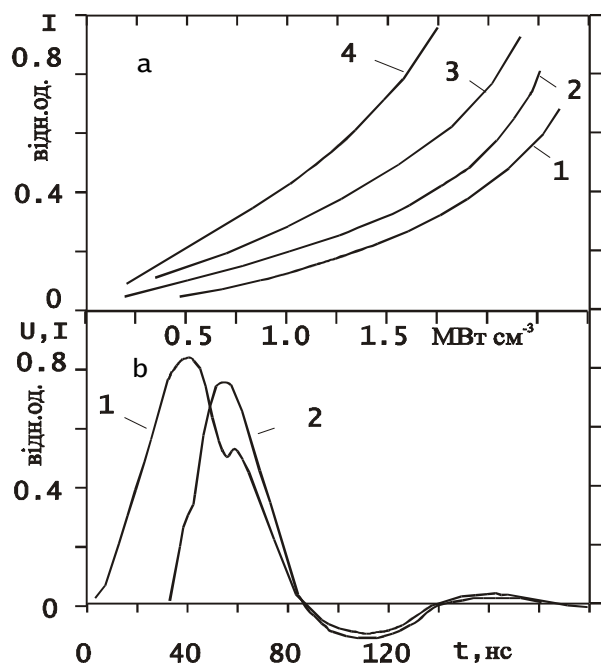


Рис.4. а- залежність інтенсивності смуги  $\lambda 193,3\text{nm}$   $\text{ArF}$  від складу та тиску суміші  $\text{He-Ar-SF}_6 = 100-10-1$ : 1- $p_{\text{заг}} = 50$  мм рт.ст.; 2-  $p_{\text{заг}} = 150$  мм рт.ст.; 3-  $p_{\text{заг}} = 250$  мм рт.ст. 4- $p_{\text{заг}} = 330$  мм рт.ст.; б- електричні характеристики плазми: 1- імпульс напруги між робочими електродами; 2- імпульс струму через розряд.

Для знаходження оптимальних умов виходу випромінювання на смузі  $\lambda 193,3\text{nm}$  були досліджені залежності імпульсу напруги на проміжку і струму через розряд, інтенсивності смуги від величини вкладеної у розряд питомої потужності  $W$  та компонентного складу газу (див. рис.4). Як видно, вихід енергії з плазми в області  $W = 0.25 \dots 1.25 \text{ МВт/см}^3$  росте лінійно, а при більших вкладених у розряд енергіях нелінійно. Насичення потужності вихідного випромінювання при збільшенні загального тиску суміші від 50 мм рт.ст. до 730 мм рт.ст. і потужностях вкладених у плазму до  $2,5 \text{ МВт/см}^3$  не було досягнуто.

Характерною особливістю отриманих нами спектрів є наявність в області  $\lambda > 200\text{nm}$  широких смуг випромінювання,

інтенсивність яких, з збільшенням загального тиску суміші, росте. Їх походження однозначно інтерпретувати важко. Вони можуть бути викликані накладанням випромінювання різних молекул. На наш погляд, в області  $\lambda 200 \dots \lambda 280 \text{ nm}$  поява широкої смуги у сумішей, що вміщують аргон пов'язана, в основному, з молекулами  $\text{Ar}_2^*$  і  $\text{Ar}^+_{2,2}$ , а у випадку використання в якості буферного газу неону – з  $\text{Ne}^*_{2}$  і  $\text{Ne}^+_{2}$ . Ймовірно присутня також смуга молекул  $\text{ArF}_2^*$  з максимумом при  $\lambda \lambda 270 \dots 290 \text{ nm}$ . Підтвердженням цього є відомий факт[2] можливості реакціям (1) і (2) закінчуватись утворенням як  $\text{ArF}^*$ , так і  $\text{ArF}_2^*$ , а також спостереження нами раніше аналогічних смуг для молекул  $\text{KrF}_2^*$  і  $\text{XeF}_2^*$  у сумішах  $\text{He-Kr-SF}_6$  і  $\text{He-Xe-SF}_6$  відповідно.

Можлива також присутність випромінювання різних фрагментів і радикалів. Так, мас-спектрометричні дослідження [6] показали на можливість утворення у розряді  $\text{SF}_5^+$ ,  $\text{SF}_4^+$ ,  $\text{SF}_3^+$ ,  $\text{SF}_2^+$  та інших радикалів. Однак, з одного боку наявна інформація про спектри, молекулярних константах, тощо цих радикалів недостатні для однозначного аналізу умов їх появи у спектрах розряду, що містить  $\text{SF}_6$ . Задача ускладнюється тим, що наші дослідження виконані при не порівняно вищих енерговкладах у розряд, ніж у [7] для яких спектроскопічні дані практично відсутні. Відносно випромінювання фрагментів  $\text{F}$  і  $\text{F}_2$  слід зазначити, що найбільш інтенсивні атомні лінії фтору[8] ( $\lambda \lambda 80,7 \dots 97,77\text{nm}$   $\text{F}$ ) розташовані за границею пропускання  $\text{LiF}$ -віконця та чутливості експериментальної установки при, а інтенсивність свічення молекули  $\text{F}_2$  ( $\lambda 158\text{nm}$ ) завдяки реакції (2) є низьким.

Однак, з часом на стінках камери і на електродній системі, накопичується сірка. Наші дослідження показали, що в діапазоні  $\lambda \lambda 270 \dots 340\text{nm}$  з'являється широка смуга випромінювання молекули  $\text{S}_2$ . Аналогічну смугу спостерігали і в наукових роботах [7,9,10]. Підтвердженням присутності сірки у камері є також наявність при тисках до 100мм рт.ст.) атомарних

ліній SI (див. рис.3а) в області  $\lambda\lambda 180...185\text{nm}$ .

Таким чином, спектр випромінювання сумішей аргону з SF<sub>6</sub> складається з: смуги  $\lambda 193,3\text{nm}$  ArF\* інтенсивність якої із збільшенням загального тиску газу росте; широкої смуги в області  $\lambda > 200\text{nm}$ , що може бути викликана накладанням випромінювання різних молекул – в області  $\lambda 200...280\text{nm}$ , молекулами Ar<sub>2</sub>\* і Ar<sup>+</sup>\*, а в діапазоні  $\lambda\lambda 270...290\text{nm}$  молекулою ArF<sub>2</sub>\*; ліній атомів сірки SI у ВУФ-і та

смуги S<sub>2</sub> з максимумом  $\lambda\lambda 280...340\text{nm}$ . На базі досліджених сумішей можливо створення широкопсмугового джерела спонтанного випромінювання. Наші розрахунки і літературні дані [2,11] показали, що при відповідному збільшенні об'єму розряду можна отримати і лазерну генерацію. Факт накопичування сірки може помітно знизити ресурс джерела випромінювання, створеного на базі досліджуваних вище сумішей.

#### Література:

1. В.Ю. Баранов, В.М. Борисов Ю.Ю. Степанов // Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. – Москва. – Энергоатомиздат. – 1988. – с.216.
2. И. Мак-Даниель, У. Нигэн. // Газовые лазеры. – Москва.–Мир. 1986. – с.548.
3. Н. Н. Nakano et al. // New Electronic Transition Laser system Tech. Rpt. MP-76-99, Stanford. Res. Inst.–1976.
4. М. Rokni. // Appl. Phys. Lett. –1977.– v.31. –79.
5. С.В. Edwards. F. O'Neil M.J. Shaw // Appl. Phys. Lett.–1980.–v.36. –pp.617-620.
6. I. I. Wagner, W.W. Brandt // Plasma Chem. and Plasma Proc. –1981. –v.1 – N2 –p.201—207.
7. В.В. Воробьев. Л.Ю. Елишина. М.И. Кондаков // Химическая Физика. 1992. –т.11.–№10.– с.1414-1421
8. А.П. Стриганов, Г.А. Одинцова // Таблица спектральных линий атомов и ионов – Москва.– Энергоиздат. – 1982, – с.311
9. R.W.B. Pearse, A.G. Gaydon, // The identification of molecular spectra. London.– 1963.–pp. 347
10. R. C. Sce, T.R.Loree. // IEE J. Quant. Electr. –1978. – QE-14.– N12.– p.944-950.
11. В.Н. Ищенко, В.Н. Лисицын, А.М. Ражев // Письма в ЖТФ.– 1976.–т.2.–в.18. – с.839-842

## EMISSION OF RADIATION BY TRANSVERSE DISCHARGE PLASMA OF ARGON AND SF<sub>6</sub> MIXTURES

Z.T. Homoky, V.-F. Z. Papp, M.M. Povch, L.L. Shymon, I. I. Szabo

Uzhgorod State University, 88000, Voloshina str., 54

In  $\lambda\lambda 120...340\text{nm}$  spectral regions the emission of radiation by gas discharge plasma of Ar-SF<sub>6</sub>, He-Ar-SF<sub>6</sub> and Ne-SF<sub>6</sub> mixtures were investigated. Spectrums include the  $\lambda 193,3\text{nm}$  ArF\*, VUV spectral lines of SI atoms and extensive  $\lambda > 200\text{nm}$  bands, which are the superposition of  $\lambda\lambda 270...290\text{nm}$  ArF<sub>2</sub>\*,  $\lambda\lambda 200...280\text{nm}$ , Ar<sub>2</sub>\* and Ar<sup>+</sup>\*,  $\lambda\lambda 280...340\text{nm}$ . S<sub>2</sub> molecular bands. The formation mechanism of ArF\* molecules and possibility to design a coherent or extensive band source of light are discussed.