

УДК 621.327

М.С. Кленівський, Ю.В. Жменяк, В.А. Кельман, Ю.О. Шпеник
Інститут електронної фізики НАН України, 88017, Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: mironkle@rambler.ru

ЕКСИЛАМПИ НА СУМІШАХ КСЕНОНУ З ПАРАМИ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ

Приведено порівняння характеристик робочих середовищ ексиламп на основі сумішей ксенону з парами деяких хлоридів лужних металів, збуджуваних в поздовжньому імпульсно-періодичному розряді. Також обговорюються механізми утворення ексиплексних молекул та розглядаються переваги досліджуваних паро-газових сумішей над традиційними.

Ключові слова: ексилампа, паро-газова суміш, відновлення галогеноносія, робоче середовище, накопичення галогену, використання галогеноносія.

Вступ

УФ-випромінювання дедалі більше розширює сфери свого використання. Найбільш нагальним є його застосування в питаннях екології. Проте воно непохитно зайняло своє місце і в хімії, фізиці, біології, медицині, мікроелектроніці тощо.

Найбільш широковживаним джерелом УФ-випромінювання є розряд у парі ртуті. Незважаючи на небезпеку, яку несуть ртутні лампи, їх активне використання все ще є переважаючим.

На сьогодні ексилампи вже добре зарекомендували себе як ефективні джерела УФ-випромінювання. Даний клас джерел характеризується високою спектральною ефективністю, оскільки більше 70% всієї потужності оптичного випромінювання сконцентровано в одній відносно вузькій молекулярній смузі з шириною на піввисоті від 2 до 15 нм. Більш того, спектральний максимум випромінювання ексилампи може бути підібраний у відповідності з утворюваною робочою екси-молекулою, енергія випромінюючого фотона якої змінюється в межах 3,5–10 еВ. Однак, як виготовлення, так і транспортування, експлуатація та утилізація традиційних ексиламп на основі сумішей з вмістом токсичного газу галогену потребує вживання вагомих заходів безпеки.

Альтернативою ртутним лампам та традиційним ексилампам автори пропонують робочі середовища на суміші ксенону з парою хлориду лужного металу, збуджувані електричним розрядом, оскільки вони не містять токсичних компонентів і є цілком безпечними для навколишнього середовища.

Техніка і методика дослідження

Дослідження емісійних характеристик робочих середовищ ексиламп виконувалися в однотипних газорозрядних трубках (ГРТ) циліндричної геометрії з плавленого кварцу завдовжки 400 мм та внутрішнім діаметром 16 мм. Коаксіальні електроди були вклеєні з протилежних кінців трубки, між якими розміщувалися керамічні кільця внутрішнім діаметром 12 мм, а в проміжках між ними знаходився порошок хлориду лужного металу. Трубка була оснащена відводом, через який здійснювалась відкачка та напуск ксенону.

Тиск галогеноносія в розрядному об'ємі встановлювався шляхом нагрівання солі хлориду лужного металу до необхідної температури.

Накачка робочих середовищ здійснювалась поздовжнім високовольтним імпульсно-періодичним розрядом, збудження якого реалізовувалось по схемі резонансної перезарядки накопичуваль-

ного конденсатора ємністю 1650 пФ з використанням високовольтного комутуючого тиратрона ТГИ1-2000/35.

Результати та їх обговорення

Вперше використання солей галогенідів лужних металів як галогеноносія для утворення ексиплексних молекул, вочевидь, було реалізовано в роботі [1], введенням пари кухонної солі в надзвуковий потік іонізованого ксенону. Максимальна питома потужність УФ-випромінювання досягала значень 20 Вт/см^3 , а максимальні значення ККД знаходились в межах 2,5-5%. Використання плазмодинамічних потоків інертних газів для отримання неперервної УФ-люмінесценції ексиплексних молекул вперше було проведено в роботах [2, 3], де як галогеноносії використовувались SF_6 -елегаз та CCl_4 -фреон-10.

Пізніше, в роботах [4, 5], вдалося обґрунтувати механізм утворення ексиплексних молекул при взаємодії галогенідів лужних металів з плазмовим потоком інертного газу.

Звісно ж, метод газодинамічного струменю характеризується високою концентрацією іонів інертного газу в області взаємодії з парою галогеніду лужного металу, що сприяє високій ефективності утворення ексиплексних молекул і, крім того, забезпечує можливість отримання неперервної УФ-люмінесценції. Але такі джерела УФ-випромінювання не є вигідними. По-перше, саме устаткування є складним і непрактичним, а по-друге, воно споживає велику кількість реагентів, які після взаємодії неперервним відкачуванням незворотно виводяться з робочого об'єму. Витрати солі галогеніду лужного металу і інертного газу сягають порядку одиниць грам за секунду. Ще одним недоліком такого методу є значна температура газу, що призводить до зайвих енерговитрат, а також до недоцільного руйнування молекул галогеноносія.

Значний вклад в розвиток даних досліджень зробив Бойченко [6], провівши математичне моделювання робочого середовища на основі суміші Xe-NaCl , збуджуваного електронним пучком. У його розрахунках було показано, що питома потужність УФ-випромінювання може досягати значень 50 Вт/см^3 при ККД 40%.

Дійсно, неабияку зацікавленість по отриманню найвищих енергетичних параметрів джерел УФ-випромінювання представляє збудження сумішей інертного газу з парою галогеніду лужного металу електронним пучком. Однак, на даний момент про проведення такого роду експериментальних спроб нічого невідомо. Безперечно, збудження електронним пучком було б найефективнішим. Проте, з практичної точки зору, більш зручним методом збудження є електричний розряд.

Так, в роботі [7] вперше було отримано УФ-люмінесценцію ексиплексних молекул при збудженні паро-газової Xe-NaCl суміші в поздовжньому імпульсно-періодичному розряді.

Пізніше в роботах [8, 9] було продемонстровано, що ще з більшим успіхом можна застосовувати і хлориди інших лужних металів.

На даний момент як робочі середовища для XeCl -ексиламп авторами апробовано суміші Xe з парами NaCl , KCl та CsCl , збуджуваних в поздовжньому імпульсно-періодичному розряді.

В табл.1 наведено порівняльну характеристику основних параметрів досліджуваних робочих середовищ на суміші ксенону з парою деяких хлоридів лужних металів. Найкращі результати серед апробованих робочих середовищ було досягнуто на основі суміші ксенону з парою хлориду цезію. Значення максимальної середньої питомої потужності УФ-випромінювання $0,22 \text{ Вт/см}^3$ було отримано при наступних умовах: напруга на випрямлячі 6 кВ, частота збудження розряду 8 кГц, тиск ксенону 31 Торр, температура стінок ГРТ 950 К. Слід відмітити, що робоча температура суміші Xe-CsCl в порівнянні з Xe-KCl знизилася на 130 К.

Параметри робочих середовищ на суміші ксенону з парою хлориду лужного металу, збуджуваних в поздовжньому імпульсно-періодичному розряді

Робоча суміш	Тиск ксенону, Торр	Температура стінки ГРТ, К	P , Вт	Питома потужність, Вт/см ³	ККД
Xe – NaCl	30	1100	0,5	0,01	0,2 %
Xe – KCl	21	1080	8,3	0,18	1,2 %
Xe – CsCl	31	950	10	0,22	1 %

Спектральні характеристики випромінювання досліджуваних робочих середовищ цілком аналогічні традиційним. У спектрах випромінювання домінувала $B \rightarrow X$ смуга XeCl^* -молекул з шириною на піввисоті близько 5 нм, вклад якої в загальну потужність УФ-випромінювання сягав 70%. Слід відмітити, що в межах умов експерименту ексиплексні молекули XeCl^* утворювались переважно в найнижчих коливних станах електронного B -терму. Єдиною відмінністю в спектральних характеристиках від традиційних була наявність резонансних дублетних ліній лужних металів, але випромінювальними потужність була низька.

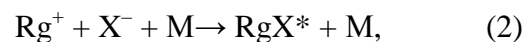
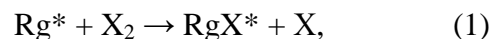
Характерно, що в усіх випадках емісія XeCl^* -молекул розпочиналася фактично одночасно з розвитком струму в ГРТ, хоча значна частина їх випромінювання припадала на післясвічення. Тривалість імпульсу емісії $B \rightarrow X$ переходу XeCl^* -молекул по основі в межах умов експерименту практично завжди перевищувала 1 мкс, в той час, як тривалість імпульсу струму складала 200-400 нс.

Оптимальний тиск ксенону в усіх випадках знаходився приблизно в одних межах 20-30 Торр, що скоріш за все, зумовлено геометрією ГРТ. Як правило, підвищення тиску ксенону завжди призводило до контрагування розряду і зменшення вихідної потужності УФ-випромінювання.

Максимальна імпульсна потужність випромінювання $B \rightarrow X$ переходу спостерігалась при частотах збудження розряду в межах 3-5 кГц, а максимальна середня потужність – при $f = 8-10$ кГц.

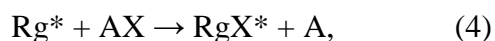
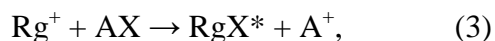
Всі температурні залежності інтенсивності УФ-випромінювання є сильно вираженими, оскільки саме зміною температури встановлюється тиск галогеноносія в робочому об'ємі. Оптимальні значення температури стінки ГРТ, при якій спостерігався максимальний вихід ексиплексних XeCl^* -молекул, також приведені в табл. 1.

У робочих середовищах ексиламп на традиційних сумішах, в яких як галогеноносій використовується газ молекулярного галогену, виділяють головним чином два процеси, що призводять до утворення ексиплексних молекул: гарпунна реакція (1) і реакція іон-іонної рекомбінації (2):



де RgX^* – ексиплексна молекула, Rg – інертний газ, X – атом галогену, M – будь-яка частинка, присутня в плазмі.

У випадку ж суміші інертний газ – пара хлориду лужного металу, утворення ексиплексних молекул здійснюється за рахунок реакцій заміщення, які можуть одночасно протікати двома каналами:



де AX – молекула хлориду лужного металу, A – атом лужного металу.

З реакцій (3), (4) видно, що супутньо з утворенням ексиплексної молекули, вивільняється атом (іон) лужного металу, резонансні лінії якого і реєструються в спектральних характеристиках розряду.

Досліджуваний клас сумішей у порівнянні з традиційними характеризується меншим накопиченням атомарного галогену в розрядному об'ємі, оскільки при утворенні ексиплексних молекул за рахунок реакцій заміщення, його безпосереднє вивільнення відсутнє. Слід відзначити, що механізм утворення ексиплексних молекул за рахунок гарпунних реакцій у сумішах інертного газу з галоген газом не характеризується оптимальним використанням галогеноносія. Можна побачити, що уже навіть при утворенні ексиплексної молекули вивільняється зайвий атом галогену (1). Для ефективного ж утворення ексиплексних молекул за рахунок реакцій іон-іонної рекомбінації (2) наявність у плазмі якомога більшої кількості атомів (негативних іонів) галогену є вкрай бажаною умовою.

Вивільнення ж атомарного хлору в сумішах ксенон – пара хлориду лужного металу, переважною мірою зумовлено радіаційним розпадом ексиплексних молекул після випромінювання нею УФ-фотона, а також дисоціацією молекул хлориду лужного металу. Слід зауважити, що енергія дисоціації хлоридів лужних металів перевищує 4 еВ, коли ж для молекул хлору складає – 2,48 еВ [10]. Більш того, зниженню вмісту атомарного хлору в плазмі розряду сприяє ефективна взаємодія між атомами (іонами) хлору з атомами (іонами) лужного металу, призводячи до повторного утворення (відновлення) молекул галогеноносія.

Слід відмітити, що в роботах [7-9] у спектральних характеристиках розряду не було зареєстровано характеристичну

$D' \rightarrow A'$ смугу молекул хлору. Це якісно свідчить на користь того, що атоми хлору беруть участь у відновленні молекул галогеноносія, а утворення молекулярного хлору в даних умовах є мало ефективним.

Використання сумішей інертний газ – пара хлориду лужного металу як робочих середовищ ексиплексних у порівнянні з традиційними сумішами, до складу яких входить ядовитий газ галоген, має вагомі переваги: нетоксичність галогеноносія і відсутність потреби в його поповненні. Більш того, досліджуваний клас парогазових сумішей не має рівних за ефективністю роботи в умовах підвищених температур.

Відмічені особливості наділяють досліджувані суміші суттєвими перевагами в плані експлуатаційної і екологічної безпеки.

Висновки

Дослідження показують, що робочі середовища на суміші інертний газ – пара галогеніду лужного металу можуть стати альтернативою традиційним сумішам, в яких як галогеноносієм використовується ядовитий газ - хлор. Окрім нетоксичності донора галогену, досліджуваний клас сумішей забезпечує зміною температури можливість зміни концентрації галогеноносія в процесі роботи вже відпаяних ексиплексних, що дає змогу реалізації регулювання потужності випромінювання джерела і ресурсу його роботи.

Домінуючий у досліджуваних сумішах механізм утворення ексиплексних молекул (реакції заміщення) характеризується оптимальним використанням галогеноносія. На відміну від сумішей інертний газ – хлор газ, в яких в утворенні робочих молекул домінує гарпунний механізм, у сумішах інертний газ – пара хлориду лужного металу кількість вивільненого атомарного хлору, що припадає на один утворений УФ-фотон, є вдвічі меншою.

Хоча для повної картини і не вистачає досліджень ефективності робочих середовищ на сумішах ксенону з парами

хлориду літію та рубідію, паро-газова суміш Хе-СsСl, збуджувана імпульсно-періодичним розрядом, вже може бути використана як робоче середовище для

створення ексиплексних джерел УФ-випромінювання, що не містять токсичних і екологічно небезпечних компонентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В. та інші // Тезиси докладов. II Всесоюзный симпозиум по радиационной плазмодинамике. М: МГТУ. – 1991 – Ч. 2. – С. 5-6.
2. Рогулич В.С., Стародуб В.П., Шевера В.С. Излучение эксимеров KrF* и XeF* в плазменной струе // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т.12. – Вып. 10. – С. 606-609.
3. Рогулич В.С., Стародуб В.П., Шевера В.С. К вопросу образования эксимерных молекул в непрерывной плазменной струе // Опт. и спектр. – 1990. – Т.69. – Вып. 4. – С. 756-758.
4. Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф., Любченко Ф.Н., Тюкавкин А.В. Экспериментальные исследования образования молекул ХеСl* при взаимодействии плазменного потока Хе с парами NaCl // ЖТФ. – 1993. – Т.63. – Вып. 2. – С. 43-51.
5. Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф., Любченко Ф.Н., Тюкавкин А.В. Исследования образования эксимерных молекул при взаимодействии плазменного потока инертного газа с парами галогенидов щелочных металлов // ЖТФ. – 1995. – Т.65. – Вып. 5. – С. 9-20.
6. Бойченко А.М. Расчетное моделирование эксиплексной ХеСl-лампы (308 нм) в смеси Хе-NaCl с накачкой жестким ионизатором // Квант. электрон. – 1999. – Т. 20. № 2. – С. 163-167.
7. Рийвес Р.Б., Светличный Е.А., Жменяк Ю.В. Кельман В.А., Шпеник Ю.О. Источник УФ излучения на основе импульсного разряда в смеси Хе-NaCl // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – Вып. 10. – С. 90-93.
8. Рийвес Р.Б., Жменяк Ю.В., Кельман В.А., Шпеник Ю.О. Эксилампа на смеси Хе-КСl // ЖТФ. – 2006. – Т.76. – Вып. 10. – С. 102-105.
9. Кленовский М.С., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Электроразрядный источник УФ-излучения на основе парогазовой смеси Хе-СsСl // ЖТФ. – 2010. – Т.80. – Вып. 5. – С. 117-122.
10. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2011

M.S. Klenivskiy, Yu.V. Zhmenyak, V.A. Kelman, Yu.O. Shpenik
Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine
88017, Uzhhorod, Universitetska Str., 21
e-mail: mironkle@rambler.ru

EXCILAMPS BASED ON MIXTURES OF XENON WITH ALKALI CHLORIDE VAPORS

The characteristics comparison of excilamp working medium based on mixture of xenon with some alkali chloride vapors excited by a longitudinal pulsed-periodic discharge are presented. It is also discussed the mechanisms of exciplex molecule formation as well as the advantages of the investigated gas-vapor mixtures over the traditional ones are considered.

Key words: excilamp, gas/vapor mixture, halogen-carrier restoration, working medium, halogen accumulation, halogen-carrier consumption.

М.С. Кленовский, Ю.В. Жменяк, В.А. Кельман, Ю.О. Шпеник
Институт электронной физики НАН Украины, 88017, Ужгород, ул. Университетская, 21
e-mail: mironkle@rambler.ru

ЭКСИЛАМПЫ НА СМЕСЯХ КСЕНОНА С ПАРАМИ ХЛОРИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Приведено сравнение характеристик рабочих сред эксиламп на основе смесей ксенона с парами некоторых хлоридов щелочных металлов, возбуждаемых в продольном импульсно-периодическом разряде. Также обсуждаются механизмы образования эксиплексных молекул и рассматриваются преимущества исследуемых парогазовых смесей над традиционными.

Ключевые слова: эксилампа, парогазовая смесь, восстановление галогеноносителя, рабочая среда, наработка галогена, расход галогеноносителя.