

04;07;12

Электрические и оптические характеристики плазмы инертных газов в пространственно-неоднородных системах электродов

© А.К. Шуаибов, И.В. Шевера

Ужгородский государственный университет,
294018 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 19 сентября 1996 г.)

Исследуются характеристики униполярного и биполярного коронного разряда в смесях He/Ar/Kr, He/Ar/Xe, He/Kr/Xe при атмосферных давлениях в распределенных по длине системах электродов типа иголки–плоскость и иголки–сетка. Показано, что биполярный коронный разряд может быть использован в системах предионизации лазеров высокого давления на атомах инертных газов. Исследованы спектральные характеристики плазмы и зависимости относительной интенсивности излучения линий Ar(4s–4p), Kr(5s–5p), Xe(6s–6p) от состава, давления рабочих смесей и величины тока коронного разряда.

Плазма на основе смесей атомов тяжелых инертных газов ($R = \text{Ar, Kr, Xe}$) при атмосферных давлениях находит широкое применение в рабочих средах лазеров на $p-d$ -переходах R^* или $B-X$ -переходах галогенидов инертных газов (RX^*) [1-3]. В излучателях данных лазеров часто применяются коронные разряды для предионизации [4], прокачки рабочих сред за счет эффекта электрического ветра [5] и в качестве электрофильтров, служащих для улавливания распыленных частиц из материалов электродов поперечного разряда накачки. Эти применения коронного разряда в квантовой электронике обусловили разработку протяженных систем электродов коронного разряда, соизмеримых с длиной активной среды лазера и непрерывным или импульсно-периодическим режимом питания. Характеристики плазмы на основе тяжелых инертных газов при возбуждении рабочих сред инфракрасных R^* -лазеров со сложным составом рабочей среды в коронном разряде не изучались. Представлены результаты исследования характеристик униполярного и биполярного коронных разрядов отрицательной полярности при стационарном режиме возбуждения трехкомпонентных рабочих сред лазеров высокого давления на атомах Ar, Kr, Xe.

Условия эксперимента

Коронный разряд исследовался в двух протяженных системах электродов, каждая из которых включала два ряда с иголками и никелевую сетку (биполярный разряд) или металлическую пластину униполярного. Системы электродов устанавливались так, что обеспечивалось их независимое питание и одинаковые геометрические условия отбора излучения плазмы в оптических экспериментах. Длина рядов с иголками — 5 см, радиус закругления иголок 0.5 мм. В системе электродов использовалась сетка с размером ячеек 1×1 мм и радиусом проволочек 0.15 мм. Межелектродное расстояние 2 см. Системы электродов коронного разряда разработаны для применения в излучателе миниатюрного R^* - или RX^* -лазера с длиной активной среды $L < 5$ см. КР поджигались с применением высоковольтного выпрямителя ($U = -10$ кВ, $I < 15$ мА), подключенного к иголкам через сопротивление 3.1 МΩ.

Излучение плазмы анализировалось при помощи монохроматора МДР-2, ФЭУ-106, усилителя постоянного тока и самописца. Разрешение спектрометра составляло 0.4...0.8 нм. Калибровка системы регистрации излучения плазмы в УФ диапазоне проводилась с помощью водородной лампы ДВС-25, а в видимом — эталонной лампы СИ 8-200.

Электрические характеристики

Коронные разряды в тройных смесях He/ R_1/R_2 (где $R_1, R_2 = \text{Ar, Kr, Xe}$) при давлениях 100...350 кПа наблюдались в виде однородных, самостоятельных разрядов, заполняющих большую часть разрядной области и перекрывающих все межелектродное расстояние. Генерационные зоны вблизи иголок и сетки были слабо выражены. Поперечное сечение плазмы коронного разряда наблюдалось в виде двух равнобедренных треугольников, вершины которых располагались в области острия иголок, а основание около сетки или металлической пластины. При увеличении напряжения на иголках коронного разряда в одном месте образуется интенсивный анодный стример, что приводит к контрагированию данного разряда.

Осциллографические измерения тока и излучения плазмы КР показали что он в основном имеет стационарный характер на пространственно однородной стадии.

Типичные вольт-амперные характеристики коронного разряда в смесях He/ R_1/R_2 приведены на рис. 1. Наиболее однородный коронный разряд существует при повышенных давлениях рабочих смесей и при этом он горит в наиболее широкой области напряжений питания — 2.5 кВ. Начальный участок вольт-амперной характеристики по форме близок к параболе и описыв-

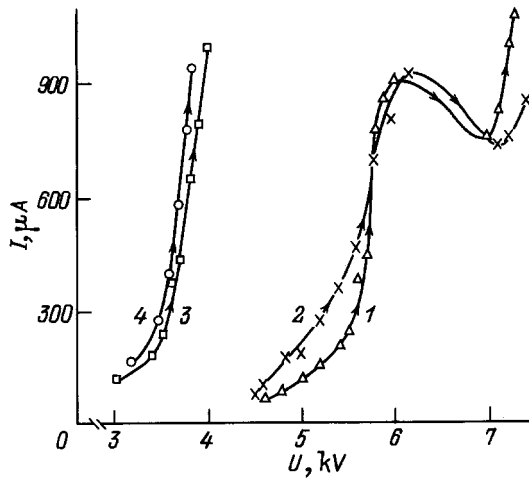


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики коронного разряда отрицательной полярности в смеси He/Kr/Xe (1, 3 — униполярный; 2, 4 — биполярный коронный разряд). 1, 2 — He/Kr/Xe = 294/8.4/0.8 кПа; 3, 4 — 147/4.2/0.4.

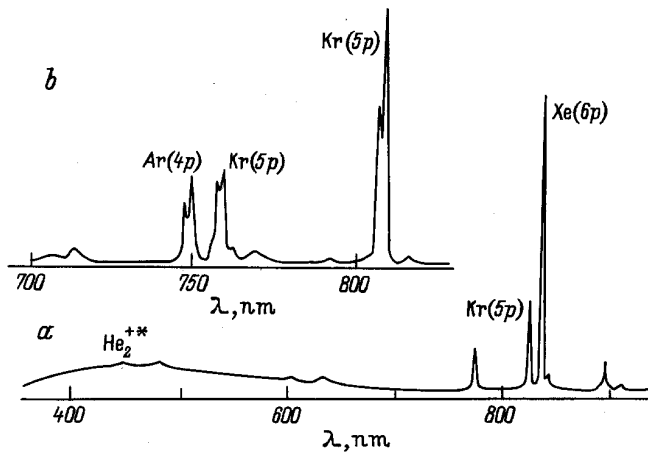


Рис. 2. Спектры излучения биполярного коронного разряда в смесях He/Kr/Xe = 294/8.4/0.8 кПа при $I = 1500 \mu\text{A}$ (а) и He/Ar/Kr = 288/16/1.6 кПа при $I = 900 \mu\text{A}$ (б).

вает вольт-амперную характеристику коронного разряда согласно формуле [6].

$$I \sim (U - U_0)^2,$$

где U_0 — потенциал зажигания коронного разряда.

Немонотонный характер зависимости $I = f(U)$ при повышенных напряжениях (рис. 1, кривые 1 и 2) связан с взаимодействием между плазмой каждого из рядов с иглками между собой. Для одного ряда иглолок ВАХ имеет форму, близкую к параболической. При пониженных давлениях газовых смесей (рис. 1, кривые 3, 4) зависимости $I = f(U)$ приобретают вид, типичный для вольт-амперной характеристики коронного разряда. Ток биполярного разряда всегда выше, чем для униполярного разряда, как и в случае коронного разряда в воздухе [7]. С уменьшением давления смеси резко

уменьшается потенциал зажигания коронного разряда и сужается диапазон его устойчивого существования по напряжению.

Основными носителями тока в униполярном коронном разряде являются электроны, а в биполярном разряде ток состоит из электронов и положительных ионов R_2^+ ,двигающихся в противоположных направлениях. При этом они вступают в реакцию диссоциативной рекомбинации, в результате которой происходит частичная нейтрализация зарядов в плазме и появление селективно возбужденных атомов R^* [8].

1. Оптические характеристики

Типичные спектры излучения плазмы КР в смесях He/R₁/R₂ приведены на рис. 2. Спектры представлены без учета спектральной чувствительности системы регистрации (k_λ). Для обзорных спектров излучения плазмы коронного разряда в смесях He/R₁/R₂ характерно наличие континуума в диапазоне 200...800 нм с максимумом в области 400...500 нм и отдельных линий излучения на переходах Ar(4s–4p), Kr(5s–5p) и Xe(6s–6p). В таблице приведены наиболее интенсивные линии излучения и их относительные интенсивности (исправленные на k_λ) для типичных режимов работы униполярного коронного разряда.

Исследование излучения плазмы коронного разряда в гелии показало, что непрерывное излучение разряда связано с наличием гелия. По данным [9], оно отождествляется с переходами He⁺ ($C^3\Pi_u - A\Sigma_u^+$). С уменьшением давления гелия или смеси He/R₁/R₂ до 100...150 кПа интенсивность излучения континуума гелия резко уменьшается.

В спектрах излучения КР в смеси He/Ar/Xe линий Ar(4s–4p) не зарегистрировано, а сам спектр излучения, аналогичный спектрам коронного разряда на смеси

Наиболее интенсивные линии излучения атомов тяжелых инертных газов, наблюдавшиеся в спектрах излучения униполярного коронного разряда в смесях He/R₁/R₂ и их относительные интенсивности

| λ , nm | Переход | I/k_λ , a.u. |
|---|----------------------------|----------------------|
| He/Ar/Kr = 288/16/1.6 кПа, $I = 800 \text{ мкА}$ | | |
| 750.4 ArI | $4s'[1/2]_2^0 - 4p[1/2]_0$ | 2 |
| 810.4 KrI | $5s[3/2]_2^0 - 5p[5/2]_2$ | 11 |
| He/Ar/Xe = 286/16/1.6 кПа, $I = 1200 \text{ мкА}$ | | |
| 823 XeI | $6s[3/2]_2^0 - 6p[3/2]_2$ | 10 |
| 882 XeI | $6s[3/2]_2^0 - 6p[5/2]_3$ | 8 |
| He/Kr/Xe = 294/8.8/0.8 кПа, $I = 900 \text{ мкА}$ | | |
| 810.4 KrI | — | 7 |
| 823 XeI | — | 18 |
| 882 XeI | — | 17 |
| 759 KrI | $5s[1/2]_1^0 - 5p[1/2]_0$ | 1 |

He/Xe. Это указывает на эффективную передачу энергии от атомов Ar^* атомам Xe. Линии излучения RI с вышележащих электронных состояний, ионные линии R^{+**} и полосы излучения димеров R_2^* в исследованном диапазоне длин волн не обнаружены.

Линии излучения R^* (по сравнению с линиями He^*) уширены и смещены в длинноволновую область спектра. Наблюдалось также расщепление их на компоненты в зависимости от разрядных условий. Расщепление линий излучения RI наблюдалось в припороговой области напряжений, когда плотность пространственного заряда в коронном разряде максимальна. Такой характер поведения спектров излучения плазмы коронного разряда может быть связан с проявлением внутривлазменного эффекта Штарка и доплеровским уширением линий излучения "горячих" атомов R^* , образующихся в результате процесса диссоциативной рекомбинации и уносящих избыточную энергию реакции [10]. Зависимости относительной интенсивности излучения линий 882 nm XeI, 810 nm KrI и 750 nm ArI от величины тока КР представлены на рис. 3 и 4. Как видно из рис. 3, интенсивность излучения линии 882 nm XeI в смеси He/Ar/Xe выше в униполярном коронном разряде, чем в биполярном разряде для однотипных сред и она увеличивается с уменьшением давления смеси. Для смеси He/Kr/Xe интенсивность излучения этой линии больше в средах высокого давления. Вероятно, в этом случае проявляется передача энергии от Kr^* атомам Xe, в результате

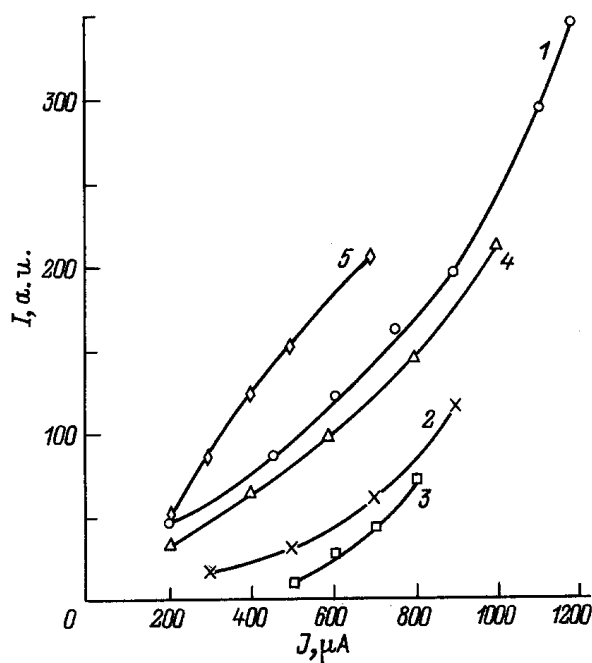


Рис. 3. Зависимости относительной интенсивности излучения плазмы коронного разряда на переходе 882 nm XeI в смесях. 1 — He/Kr/Xe = 294/8.4/0.8 kPa (биполярный), 2 — 147/4.2/0.4 kPa (биполярный), 3 — He/Ar/Xe = 286/16/1.6 kPa (биполярный), 4 — 143/8/0.8 kPa (биполярный), 5 — 143/8/0.8 kPa (униполярный).

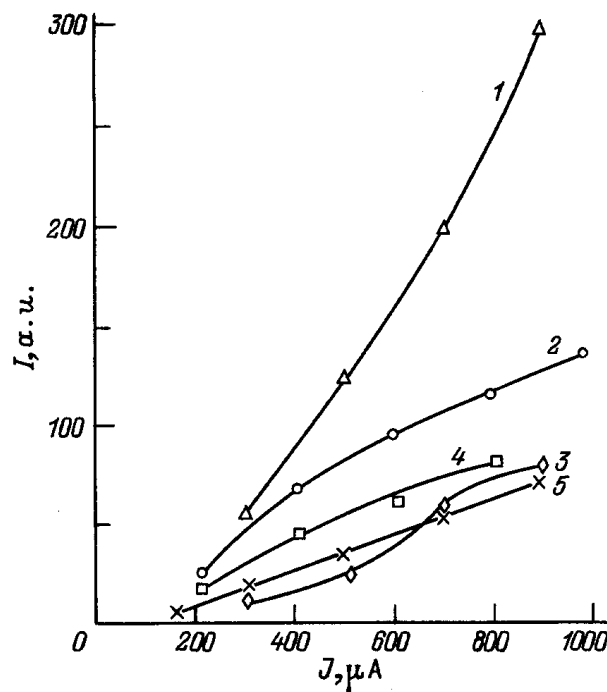


Рис. 4. Зависимости относительных интенсивностей излучения плазмы униполярного коронного разряда на переходах 810 nm KrI (1, 2, 4, 5) и 750 nm ArI (3) в смесях. 1, 3 — He/Ar/Kr = 144/8/0.8 kPa; 2 — 288/16/1.6 kPa; 4 — He/Kr/Xe = 147/4.2/0.4 kPa; 5 — 294/8.4/0.4 kPa.

которой образуются атомы Xe(6p). Для смеси He/Kr/Xe возможны и процессы рекомбинации с участием гетероядерных ионов $KrXe^+$. В плазме на смеси He/Ar/Xe превалирует процесс тушения Xe(6p) атомами гелия, приводящий к уменьшению интенсивности излучения линии 882 nm XeI. Параметр E/P , как видно из ВАХ, практически не меняется при уменьшении давления в два раза. Аналогичная зависимость интенсивности излучения от давления смеси наблюдалась и для линии 810 nm KrI в КР на смесях He/Ar/Kr и He/Kr/Xe. Все зависимости интенсивности излучения от тока носили возрастающий характер, а их форма менялась от квадратической до линейной.

Наиболее вероятными процессами заселения возбужденных состояний R в данных условиях могут быть реакции диссоциативной рекомбинации и ступенчатого возбуждения. Величина конкретного количественного вклада этих процессов определяется температурой электронов в данной плазме [11]. Так, при небольших $T_e < 0.1$ eV, основным будет диссоциативная рекомбинация, для $0.3 < T_e < 0.8$ eV — ступенчатое возбуждение, а при $T_e > 1$ eV — прямое возбуждение атомов R электронами. При этом значительную роль будут играть процессы диссоциации ионов R_2^+ электронами [12], которые могут приводить к изменению зарядового состава в плазме и увеличению роли процессов, связанных с атомарными ионами R^+ .

Выводы

Исследование электрических и оптических характеристик плазмы униполярного и биполярного коронных разрядов в тройных смесях гелия с атомами Ag, Kr, Xe показало следующее.

Коронный разряд характеризуется высокой однородностью, что может быть использовано в системах УФ предыонизации лазеров высокого давления на атомах тяжелых инертных газов.

Разряд характеризуется гистерезисом зависимости $I = f(U)$ и неустойчивостью в виде одиночного стримера, которая развивается при значительном перенапряжении разрядного промежутка.

В плазме наблюдается селективное заселение определенных состояний R, наиболее типичных для реакции диссоциативной рекомбинации R_2^+ с электронами, линии излучения R^* регистрируются на фоне непрерывного излучения He_2^+ , они уширены и расщеплены на компоненты.

Увеличение давления гелия с 100 до 300 кПа приводило к столкновительной очистке $Xe(6p)$, $Kr(5p)$ в плазме на смесях He/Ag/Kr и He/Ag/Xe, а в смеси He/Kr/Xe процесс тушения данных состояний не является ведущим.

Список литературы

- [1] Басов Н.Г., Данилычев В.А., Дудин А.Ю. // Квантовая электрон. 1984. Т. 11. № 4. С. 1722–1740.
- [2] Газовые лазеры // Под ред. И. Мак-Даниеля, У. Нигэна. М.: Наука, 1991.
- [3] Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В. и др. // Квантовая электрон. 1995. Т. 22. № 12. С. 1884–1886.
- [4] Байцур Г.Г., Кралин В.В., Фирсов К.Н. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 12. С. 1546–1547.
- [5] Баранов А.И., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. // ПТЭ. 1994. № 4. С. 108–111.
- [6] Henson B.L. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 2. P. 709–715.
- [7] Капцов П.А. Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехиздат, 1950.
- [8] Иванов В.А. // УФН. 1992. Т. 162. № 1. С. 35–70.
- [9] Hill P.C. // Phys. Rev. A. 1991. Vol. 43. N 5. P. 2546–2549.
- [10] Иванов В.А., Пенкин Н.П. // ЖПС. 1984. Т. 40. № 1. С. 5–33.
- [11] Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А., Никитин А.Г. // Опт. и спектр. 1991. Т. 71. Вып. 2. С. 235–239.
- [12] Иванов В.А., Приходько А.С. // ЖЭТФ. Т. 100. Вып. 3(9). С. 825–831.