

04:07

Возбуждение атомов железа в плазме эксимерных излучателей с накачкой поперечным разрядом

© А.К. Шуайбов, Л.Л. Шимон, А.И. Дащенко, Ю.Ю. Неймет

Ужгородский государственный университет,
294000 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 15 июня 1999 г.)

Приведены результаты исследования оптических характеристик плазмы поперечного разряда в смесях He/Xe(Kr)/HCl(CF₂Cl₂) с малыми примесями паров железа, полученными при разрушении рабочих поверхностей металлических электродов. Показано, что атомы железа эффективно возбуждаются спонтанным излучением молекул KrCl ($\lambda = 22$ nm) и XeCl ($\lambda = 308$ nm) в наносекундном поперечном разряде.

В мощных поперечных разрядах наносекундной длительности часто наблюдается распыление материала, из которого изготовлены электроды [1]. В импульсно-периодическом режиме работы ($f \geq 5$ Hz) это может приводить к паразитному запылению оптических окон электроразрядных эксимерных излучателей (ЭЭИ). Однако и сама плазма паров железа представляет интерес для получения стимулированного излучения в УФ области спектра. Так, в [2] при накачке паров железа излучением KrF лазера с $\lambda = 249$ nm была получена генерация на $\lambda = 299.95$, 305.16 и 304.04 nm FeI. Поэтому представляет интерес исследование возможности применения и мощного спонтанного излучения эксимерных молекул для возбуждения атомов железа.

В данной работе приведены результаты исследования оптических характеристик плазмы ЭЭИ с примесями паров железа, полученных при распылении электродов в импульсном поперечном разряде. Эксперименты проведены с двумя модификациями систем получения разряда: система типа сеточный катод–сплошной анод с УФ предыонизацией и система со сплошными металлическими электродами и искровой предыонизацией. Сплошной анод изготовлен из нержавеющей стали. Радиус кривизны его рабочей поверхности составлял 1.7 см, а длина 17 см. Катодом служила плоская сетка из нержавеющей стали с ячейками 1×1 mm. Межэлектродное расстояние составляло 20 mm [3]. Предыонизация разрядного промежутка производилась при помощи импульсного коронного разряда, зажигаемого между остриями иголок и сеткой-катодом на 100–150 ns раньше основного разряда. В системе электродов с искровой предыонизацией объем поперечного разряда составлял $18 \times 2.2 \times 0.7$ cm (где 2.2 cm — межэлектродное расстояние). Искровая предыонизация осуществлялась от двух рядов искровых разрядников [4]. Генератор импульсного напряжения включал C – C₀ схему с перезарядом конденсатора емкостью 30 nF на конденсатор с C₀ = 9.4 nF и тиратронный коммутатор. Измерение разрядных и оптических характеристик плазмы проводилось на лазерном диагностическом комплексе, описанном в [3,4].

На рис. 1 приведен обзорный спектр излучения плазмы поперечного разряда в смесях инертных газов с

молекулами HCl для излучателя с коронной предыонизацией. Во всех подобных спектрах присутствовали линии излучения FeI. Излучение FeI проявлялось только при наиболее оптимальных условиях, необходимых для создания эксимерных молекул. К снижению интенсивности излучения на переходах FeI приводили снижение содержания молекул HCl в рабочей среде и уменьшение давления. Наиболее интенсивные линии излучения атомов железа с учетом спектральной чувствительности системы регистрации приведены в таблице. Интенсивность излучения линий FeI достаточно велика ($\leq 5\%$ от яркости полос RX), что может быть использовано для расширения спектрального диапазона работы эксимерных ламп. Такие излучатели могут использоваться для анализа плазмы паров железа с разрешением во времени ≤ 100 ns. Спектр излучения паров железа и диаграмма энергетических уровней FeI указывают на возможность оптического возбуждения низколежащих энергетических состояний железа УФ излучением RX. Энергии квантов излучения на B–x переходах KrCl 5.57 eV, а для XeCl — 4.96 eV. Данных энергий достаточно лишь для заселения верхних состояний Fe* через низколежащие возбужденные состояния FeI, которые возбуждаются электронами разряда. В данной системе электродов кроме разогрева катодных пятен на сплошном электроде и сетке источни-

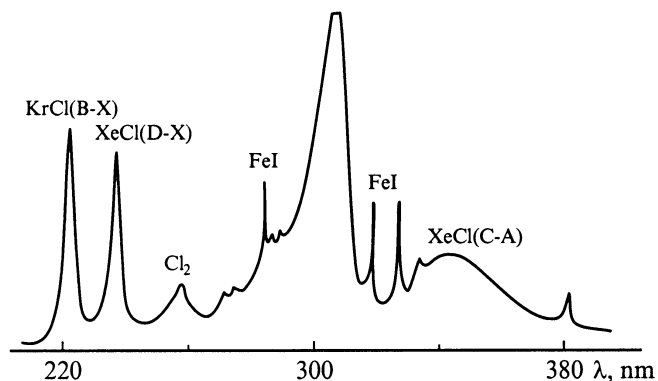


Рис. 1. Обзорный спектр излучения плазмы поперечного разряда с коронной предыонизацией в смеси He/Kr/Xe/HCl = 200/1.6/0.4/0.4 kPa.

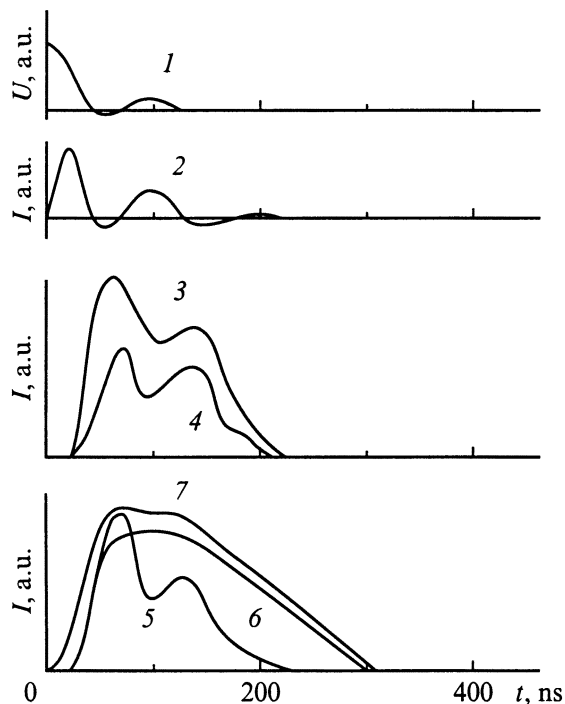


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и излучения (3–7) плазмы поперечного разряда с искровой предыонизацией в смеси He/Kr/CF₂Cl₂ = 7/4/0.08 кПа; 3 — 222 nm KrCl, 4 — 249 nm KrF, 5 — 258 nm Cl₂, 6 — 318.8 nm FeI, 7 — 516.5 nm C₂ (A–X).

ком паров железа могут быть и горячие зоны коронного разряда системы предыонизации. В таком случае пары железа вносятся в разрядный промежуток за счет электрического ветра, формируемого в коронном разряде [5].

В типичной системе электродов с автоматической искровой предыонизацией для плазмы на смеси He/Kr/CF₂Cl₂ также отмечено излучение атомов FeI (см.

Наиболее интенсивные линии атомов железа в плазме эксимерных излучателей

λ , nm	I , a.u.	E_{low} , eV	E_{up} , eV	Переход
Излучатель с коронной предыонизацией				
Смесь He/Xe/HCl				
270.8	1.00	–	–	–
283.8	0.25	0.99	5.35	$a^5F_2 - y^5G_2^0$
317.8	0.10	2.40	6.30	$z^7D_5^0 - f^7D_4$
326.5	0.11	0.09	3.89	$a^5D_5 - z^3D_3^0$
332.9	0.20	3.26	6.99	$b^3H_5 - u^3H_5^0$
344.7	0.24	2.20	5.79	$a^5P_2 - y^3P_2^0$
Излучатель с искровой предыонизацией				
Смесь He/Kr/CF ₂ Cl ₂				
292.9	1.00	2.20	6.41	$a^5P_2 - y^5F_2^0$
294.1	0.52	0.09	4.30	$a^5D_2 - y^5F_1^0$
304.8	0.59	0.09	4.16	$a^5D_2 - y^5D_3^0$
318.9	0.52	2.48	6.37	$z^7D_1^0 - e^5G_2$
323.1	0.27	2.45	6.29	$z^7D_3^0 - f^5D_2$

таблицу). Для более детального исследования излучения атомов железа были проведены временные измерения интенсивности излучения RX, FeI и продуктов распада молекул CF₂Cl₂ (рис. 2). Из таблицы следует, что энергии квантов молекул KrCl и KrF, образующихся в данной плазме, достаточно лишь для ступенчатого заселения Fe*. Осциллограммы регистрировались при $U = 15$ kV и $f = 3$ Hz. Максимальная величина разрядного тока была ≤ 15 kA. Все линии излучения атомов железа характеризовались одинаковым поведением во времени. При этом наблюдалась корреляция во времени между излучением молекул RX и атомов Fe*, что указывает на значительный вклад оптической накачки в заселение высоколежащих возбужденных состояний FeI. В средах на основе молекул CF₂Cl₂ соотношение яркости излучения молекул KrCl/KrF/Cl₂ составляло соответственно 9/1/1 и связано в основном с практически таким же соотношением плотности отрицательных ионов Cl⁻, F⁻, которые образуются в результате диссоциативного прилипания электронов к CF₂Cl₂ [6,7].

Таким образом, исследование плазмы электроразрядных эксимерных излучателей выявило существование в спектрах излучения отдельных линий атомов Fe, образующихся при распылении электродов в основном и вспомогательном разрядах. Наиболее вероятным механизмом заселения высоколежащих возбужденных состояний железа является оптическая накачка излучением эксимерных молекул атомов FeI, которые находятся на низколежащих энергетических уровнях. Мощное спонтанное излучение RX может быть использовано для получения неравновесного излучения на отдельных переходах атомов Fe в УФ диапазоне спектра.

Список литературы

- [1] Бабич Л.Л., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 49–82.
- [2] Yoshida H., Ninomada H. // Opt. Commun. 1994. Vol. 107. N 1–2. P. 71–76.
- [3] Шуаибов А.К., Миня А.И. // ЖПС. 1997. Т. 64. № 4. С. 523–527.
- [4] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Миня А.И. // Укр. физ. журн. 1998. Т. 43. № 1. С. 27–32.
- [5] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [6] Pejcev V.M., Kurepa M.V., Cadez I.M. // Chem. Phys. Lett. 1979. Vol. 63. N 2. P. 301–304.
- [7] McCorkle D.L., Christodoulides A.A., Christophorou L.G. et al. // J. Chem. Phys. 1980. Vol. 72. N 7. P. 4049–4057.