

02;04;07;12

Образование эксимерных молекул и возбужденных атомов в положительном коронном разряде на смесях He/Xe/SF₆/CCl₄ и He/Kr/SF₆/CCl₄

© А.К. Шуаибов, А.И. Миня, А.И. Дащенко

Ужгородский национальный университет,
88000 Ужгород, Украина
e-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2001 г.)

Приводятся результаты исследования электрических и оптических характеристик коронного разряда положительной полярности в системе электродов иголки–сетка. Разряд излучался в газовых смесях He/Xe(Kr)/SF₆/CCl₄, представляющих интерес для использования в многоволновых эксимерных излучателях. Разряд имел длину, равную длине электродов поперечного разряда эксимерного лазера или лампы, и предназначен для применения в модулях электрической прокачки импульсно-периодических многоволновых излучателей высокого давления. Проведены исследования вольт-амперных и частотных характеристик данного разряда, обзорных спектров излучения генерационных зон и зависимостей относительной интенсивности излучения галогенидов и возбужденных атомов инертных газов от тока коронного разряда. Рассмотрены основные процессы образования галогенидов, а также возбужденных атомов криптона и ксенона в генерационных зонах коронного разряда.

Введение

Импульсные коронные разряды (КР) в смесях инертных и галогенсодержащих газов нашли применение в системах ультрафиолетовой (УФ) предыонизации электро-разрядных эксимерных лазеров (RX*) [1,2]. Менее изученными являются стационарные или квазистационарные КР в рабочих средах RX-лазеров. Данный тип КР, когда его длина примерно равна длине активной среды RX-лазера, может применяться в модулях электрической прокачки газовых смесей лазеров высокого давления [3]. Исследование подобного разряда в смесях He/Xe/(Kr)/HCl доказали, что при отрицательной полярности напряжения питания системы электродов иголки–сетка он может использоваться в качестве системы электрической прокачки, а при положительной полярности напряжений зажигается стримерная корона, непригодная для электрической прокачки [4]. Характеристики многоэлектродного КР отрицательной полярности в смесях He/Xe(Kr) для составов смесей, близких к применяемым в многоволновых излучателях на хлоридах инертных газов, использующих малоагрессивный галогенноситель CCl₄, изучались в [5].

В настоящей работе проведено исследование электрических характеристик положительного КР в смесях He/Xe(Kr)/SF₆/CCl₄ и образования галогенидов и возбужденных атомов ксенона и криптона в его генерационных зонах.

Условия эксперимента

Система электродов (СЭ) КР состояла из 12 игло-лок, установленных в один ряд, и никелевой сетки. Радиус закругления иглолок 0.5 мм, радиус проволок

никелевой сетки 0.15 мм, а межэлектродное расстояние составляло 2 см. СЭ размещалась на диэлектрическом фланце и устанавливалась в отдельную камеру высокого давления. На иглолки подавалось постоянное напряжение положительной полярности. Более детально экспериментальная установка описана в наших работах [4,5].

КР в данных экспериментах существовал в виде ярких генерационных зон, образующихся вблизи острий иглолок. Большая часть разрядного промежутка была темной. В предпробойном режиме при повышенном напряжении наблюдались и генерационные зоны около сетки. Увеличение напряжения питания приводило к появлению стримера около одной из иглолок. Оптические исследования плазмы КР проводились при полном обзоре всей апертуры КР. Основным источником излучения были генерационные зоны, расположенные в области острий иглолок.

Электрические характеристики

Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) положительного КР в смесях инертных газов с молекулами SF₆ и CCl₄ приведены на рис.1. Наибольшие токи КР на неконтрагированной стадии и минимальные потенциалы зажигания разряда получены для ксенонсодержащих сред. Отклонения в форме ВАХ от типичной для КР: $I = \alpha(U - U_0)^2$ [6] связаны со значительным содержанием в исследуемой смеси тяжелых инертных газов и возникающих при этом нелинейностях КР [7]. Данный разряд при этом приобретает часть свойств тлеющего разряда.

Гистерезис на ВАХ практически отсутствовал, хотя в КР на двойных смесях типа He/Xe(Kr) он наблюдался [8]. Это обусловлено уменьшением концентрации

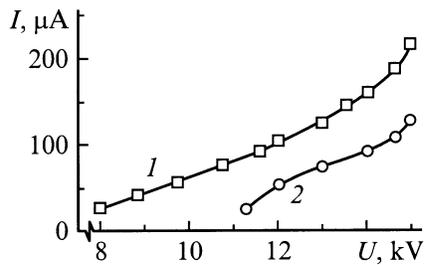


Рис. 1. Усредненные вольт-амперные характеристики положительного коронного разряда в смесях: 1 — He/Xe/SF₆/CCl₄ = 300/1.6/0.2/0.02 кПа, 2 — He/Kr/SF₆/CCl₄ = 300/13/0.2/0.02 кПа.

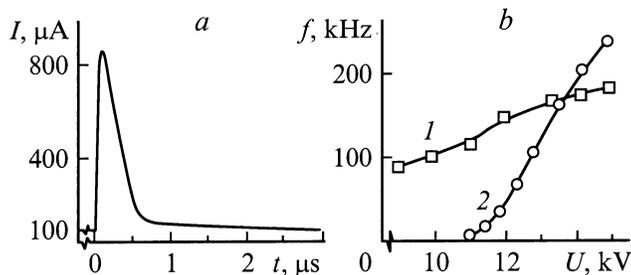


Рис. 2. Форма импульсов тока КР (а) и зависимость частоты повторений импульсов тока от величины напряжения питания (б): а — He/Kr/SF₆/CCl₄ = 300/13/0.2/0.02 кПа; U = 13 кВ; б — He/Xe/SF₆/CCl₄ (1), He/Kr/SF₆/CCl₄ (2).

возбужденных атомов тяжелых инертных газов, вступающих в реакции тушения (в том числе и с образованием эксимерных молекул RCl*, RF*) с молекулами SF₆, CCl₄ [9,10].

Так как скорость электрической прокачки газовых смесей $v \approx (I)^{1/2}$ [11], то она будет выше в ксенонсодержащих средах при минимальном содержании в смесях галогенсодержащих молекул. В исследуемых средах максимальный ток КР определялся концентрацией галогенносителей и слабо зависел от величины ограничительного сопротивления в системе питания разряда.

Типичная форма импульса тока КР и зависимость частоты их повторения от напряжения на иголках приведены на рис. 2. Большая часть тока КР является непрерывной. На фоне непрерывного тока наблюдались импульсы субмикросекундной длительности частотой 1–225 kHz. Наибольшая амплитуда импульсов тока (~ 1 мА) получена в КР на смеси He/Kr/SF₆/CCl₄, а в ксенонсодержащей среде она не превышала 0.15 мА. Поскольку исследованные смеси отличались только содержанием атомов тяжелых инертных газов, то импульсы тока КР, вероятно, связаны с дрейфом положительных ионов (типа Xe⁺, Xe₂⁺ и др.) через внешнюю область КР по направлению к металлической сетке. Отношение амплитуд тока КР было примерно равным отношению концентраций атомов криптона и ксенона в исследуемых смесях. Наибольшая частота повторения импульсов тока КР получена для криптонсодержащей среды. Зависимо-

сти частоты повторения импульсов тока КР от величины напряжения питания имели плавно возрастающий характер и наблюдались во всей области существования устойчивой стадии исследуемого разряда.

Оптические характеристики и процессы

Исследование обзорных спектров излучения плазмы КР показало, что в УФ-области спектра наиболее интенсивными являются полосы 222 nm KrCl*, 249 nm KrF*, 308 nm XeCl* и 351 nm XeF*, а в ближней инфракрасной области — спектральные линии на переходах Kr(5s–5p), Xe(6s–6p). В видимой области наблюдались лишь отдельные спектральные линии на переходах Xe(6s–7p), Kr(5s–6p). Линии излучения с вышележащих состояний атомов Kr и Xe и их однозарядных ионов не наблюдались.

Зависимости относительной интенсивности полос излучения эксимерных молекул от величины тока КР представлены на рис. 3. Для смеси с низким содержанием атомов тяжелых инертных газов зависимости линейны, а при их большем содержании наблюдалось отклонение от линейности.

Наиболее интенсивной является полоса излучения $\lambda = 222$ nm KrCl. Сравнивая эффективность образования хлоридов и фторидов ксенона и криптона в четверных смесях, видим, что интенсивность излучения хлоридов более чем на порядок превышает интенсивность излучения фторидов инертных газов.

Зависимости интенсивности спектральных линий возбужденных атомов ксенона и криптона приведены на рис. 4. Они имеют линейный вид и коррелируют с соответствующими зависимостями интенсивности излучения эксимерных молекул от тока разряда. Соотношение интенсивностей излучения спектральных линий атомов Kr и Xe примерно равно соотношению концентраций данных атомов в плазме КР при одинаковых токах. Исходя из такого поведения интенсивности излучения RCl*, RF* и R(s–p) можно допустить, что в генерационных

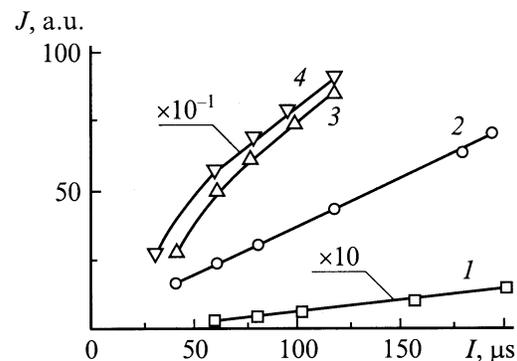


Рис. 3. Зависимости величины средней интенсивности излучения эксимерных молекул от среднего тока КР в смесях He/Xe/SF₆/CCl₄ (1, 2) и He/Kr/SF₆/CCl₄ (3, 4). 1 — 351 nm XeF(B–X), 2 — 308 nm XeCl(B–X), 3 — 249 nm KrF(B–X), 4 — 222 nm KrCl(B–X).

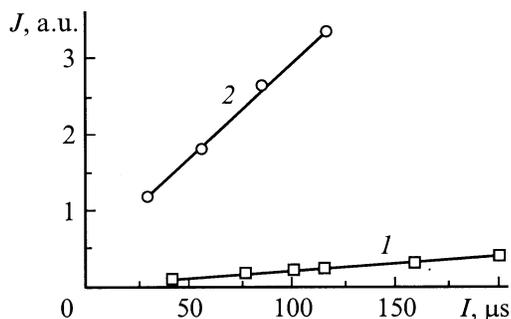
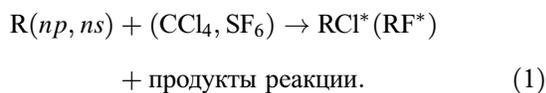


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения линий атомов ксенона и криптона от тока КР в смесях He/Xe/SF₆/CCl₄ (1) и He/Kr/SF₆/CCl₄ (2). 1 — 832 nm Xe(6s–6p), 2 — 810 nm Kr(5s–5p),

зонах данного КР эксимерные молекулы образуются в "гарпунных" реакциях вида:



По данным работ [9,10], константа скорости реакции (1) с молекулами SF₆ равна практически нулю (коэффициент ветвления реакции тушения с образованием эксимерной молекулы равен 0.02), поэтому интенсивность излучения молекул RF* была значительно ниже, чем RCl*. Молекулы RF* в условиях настоящего эксперимента могут образовываться в результате вторичных процессов с участием легких радикалов, возникающих при диссоциации молекулы SF₆ в КР или в результате ион-ионной рекомбинации.

При образовании RCl* в средах на основе молекул CCl₄ возможно протекание прямой реакции (1) с участием CCl₄. Такие реакции наиболее эффективны с атомами Хе(6p). Так, коэффициент ветвления реакции тушения Хе(6p) молекулами CCl₄ с образованием ХеCl(B) составляет 0.6–0.7, а для метастабильных атомов он значительно ниже (0.24) [9].

Роль процессов ион-ионной рекомбинации при образовании RX* в генерационных зонах КР ниже роли "гарпунной" реакции из-за ограничения функции распределения электронов по энергии со стороны высоких энергий и малыми концентрациями положительных ионов инертных газов по сравнению с концентрацией возбужденных атомов R(ns, np) [11,12]. Кроме того, температура электронов в генерационной зоне КР может быть слишком высокой для эффективного протекания реакции рекомбинации ионов Cl⁻ (F⁻) с ионами R⁺ (R₂⁺).

Основными процессами образования атомов Хе(6p, 7p) и Kr(5p, 6p) может быть прямое возбуждение атомов инертных газов электронами, что коррелирует с линейной формой зависимости интенсивности излучения спектральных линий R от тока и с величинами эффективных сечений возбуждения np-состояний атомов ксенона и криптона электронным ударом [13,14].

Другим эффективным процессом заселения R(np) может быть реакция диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов R₂⁺ с электронами [15], но в этом случае ограничивающим фактором является высокая температура электронов в горячих зонах КР.

Плотность тока КР и скорость прокачки газов в данном разряде ограничены неустойчивостью, которая проявлялась в форме катодного стримера. Стример возникал около одной из иглолок при повышении напряжения питания. Увеличение плотности тока КР на однородной стадии наблюдалось при уменьшении содержания галогенсодержащих молекул в газовых смесях.

Выводы

Исследование характеристик многоэлектродного коронного разряда положительной полярности в смесях инертных газов с молекулярными SF₆, CCl₄ и процессов образования возбужденных атомов и молекул показало, что он характеризуется низким энергопотреблением ($W \leq 1$ W) и может использоваться в модулях электрической прокачки многоволновых эксимерных излучателей; наиболее вероятными реакциями образования эксимерных молекул в генерационных зонах коронного разряда являются "гарпунные" реакции, а возбужденных атомов инертных газов — прямой электронный удар.

Список литературы

- [1] Ernst G.J., Nieuwenhuis A.B., Abramski K.M. // IEEE J. Quantum. Electron. 1985. Vol. 21. P. 1127–1130.
- [2] Taylor R.S., Leopold K.E. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 1. P. 22–27.
- [3] Баранов А.И., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. // ПТЭ. 1994. № 4. С. 108–111.
- [4] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В. // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 1. С. 20–24.
- [5] Шуаибов А.К. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 5. С. 48–51.
- [6] Henson P.L. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 2. P. 709–715.
- [7] Belevtsev A.A., Biberman L.M. // Beitr. Plasmaphys. B. 1983. Vol. 23. P. 803–811.
- [8] Шуаибов А.К., Дашенко А.И., Шевера И.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 10. С. 960–965.
- [9] Velasco J.E., Kolts J.H., Setser D.W. // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 65. N 9. P. 3468–3480.
- [10] Ku J.K., Setser D.W. // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. N 11. P. 689–691.
- [11] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [12] Песков В.Д. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 12. С. 2544–2551.
- [13] Фельцан П.В., Запесочный И.П. // Укр. физ. журн. 1968. Т. 13. № 2. С. 205–210.
- [14] Фельцан П.В. // Укр. физ. журн. 1967. Т. 12. № 9. С. 1405–1409.
- [15] Иванов В.А. // Хим. физ. 1990. Т. 9. № 9. С. 1454–1460.