

04;07;12

## Характеристики многоэлектродного коронного разряда в рабочих средах импульсно-периодических $\text{XeCl}^*$ и $\text{KrCl}^*$ лазеров

© А.К. Шуайбов

Ужгородский государственный университет,  
294000 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 3 марта 1997 г.)

Представлены результаты исследования электрических и оптических характеристик многоэлектродного коронного разряда отрицательной полярности в смесях  $\text{He}/\text{Xe}(\text{Kr})/\text{CCl}_4$ , являющихся рабочими средами импульсно-периодических лазеров на хлоридах инертных газов. Коронный разряд изучался в системе электродов иголки–сетка, длина которой примерно равна длине активной среды лазера. Такой коронный разряд представляет интерес для применения в модулях электрической прокачки рабочих сред  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{KrCl}^*$  лазеров, в рабочих средах которых используются пары жидких углеводородов типа  $\text{CCl}_4$ .

### Введение

Электроразрядные лазеры на хлоридах инертных газов ( $\text{RCl}^*$ ), в состав рабочих смесей которых входят сложные хлорсодержащие молекулы  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{CCl}_4$  [1–4], имеют в некоторых режимах работы более высокие энергетические и ресурсные характеристики, чем при использовании молекул хлористого водорода. Применяемые при этом механические системы поперечной прокачки рабочих смесей характеризуются значительным энергопотреблением, вибрацией и шумом, а также вызывают дополнительное загрязнение рабочей смеси.

В импульсно-периодическом  $\text{XeCl}^*$  лазере, работающем на смеси  $\text{He}/\text{Xe}/\text{HCl}$ , при частотах повторения  $f \leq 70$  Hz возможно использование электрической прокачки со средней скоростью поперечного потока газовой смеси  $\leq 3$  m/s [5]. Данный способ замены горячих агрессивных газовых смесей высокого давления свободен от некоторых недостатков механических систем прокачки и основан на использовании многоэлектродного коронного разряда (КР), равномерно распределенного по длине поперечного разряда импульсно-периодического эксимерного лазера.

В работе [6] приведены результаты исследования некоторых характеристик подобно КР в рабочих средах электроразрядных  $\text{RCl}^*$  лазеров, основанных на использовании в качестве хлорносителя молекул  $\text{HCl}$ .

В настоящей работе приводятся результаты исследования характеристик многоэлектродного КР на смесях  $\text{He}/\text{Kr}(\text{Xe})/\text{CCl}_4$ , зажигаемого в системе электродов иголки–сетка и предназначенного для применения в излучателе миниатюрного импульсно-периодического  $\text{RCl}^*$  лазеров с электрической прокачкой рабочей среды.

### Техника эксперимента

КР зажигался в разрядной камере высокого давления, изготовленной из нержавеющей стали. Система электродов КР устанавливалась на диэлектрическом фланце разрядной камеры и состояла из одного ряда иголок

и никелевой сетки. Длина системы электродов 12 см, а расстояние между остриями иголок и сеткой равнялось 2 см. Радиус закругления острия иголок составлял 0.5 мм, а диаметр проволочек сетки — 0.3 мм. На иголки через внешнее ограничительное сопротивление подавалось постоянное напряжение отрицательной полярности ( $U \leq 12$  kV,  $I_{\text{mid}} \leq 15$  mA). Измерение электрических и оптических характеристик КР проводились при помощи системы регистрации, описанной в работах [6,7]. Оптические исследования излучения плазмы проводились при полном обзоре всего межэлектродного промежутка через входную щель монохроматора. Контрольные эксперименты показали, что основной вклад в излучение плазмы вносят горячие зоны, возникающие вблизи острия иголок. Поэтому с точностью до 5–10% можно считать, что исследуются характеристики горячих зон данного КР.

Многоэлектродный КР в данных экспериментах наблюдался в виде ярких горячих зон (вблизи остриев иголок), мелких горячих зон у сетки и темной или слабосветящейся внешней области КР, расположенной между иголками и сеткой.

### Электрические характеристики

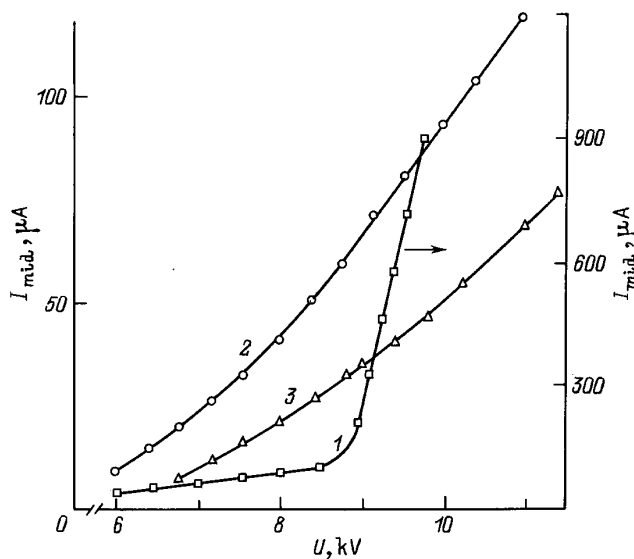
По сравнению с аналогичным КР в двойных смесях (без примесей хлорсодержащих молекул) в исследуемых средах отсутствует интенсивный тлеющий разряд во внешней области, а максимальная величина тока разряда на неконтрагированной стадии уменьшается на один–два порядка. Ток КР при этом определяется не величиной балластного сопротивления, а плотностью электроотрицательных молекул в смеси [6]. С превышением определенной, критической величины напряжения на иголках КР контрагируется, что проявляется в образовании анодного стримера возле одной из иголок.

Усредненные вольт-амперные характеристики (УВАХ) КР в смесях инертных газов с молекулами  $\text{CCl}_4$  приведены на рис. 1. Полученные УВАХ не

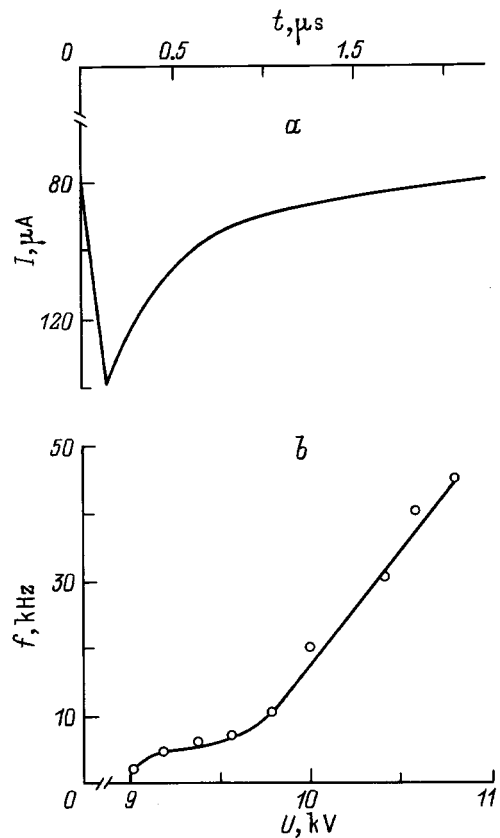
описываются зависимостями типа  $I = \alpha(U - U_0)^2$  (где  $\alpha$  — постоянная,  $U_0$  — потенциал зажигания разряда), наиболее типичными для КР [8]. На УВАХ КР в смеси He/CCl<sub>4</sub> видны две разные стадии КР, характеризующиеся своими пороговыми напряжениями и скоростями роста тока КР. Эти стадии отличаются линейными зависимостями типа  $I_{mid} = \beta(U - U_0)$ . Величины  $U_0$  и  $\beta$  для слаботочной и сильноточной стадии КР в смеси He/CCl<sub>4</sub> составляют соответственно  $U_0^1 = 5.5$  kV,  $\beta^1 = 50 \mu\text{A/kV}$  и  $U_0^2 = 8.75$  kV,  $\beta^2 = 1000 \mu\text{A/kV}$ . В тройных смесях наблюдалась только слаботочная стадия КР, и в этом случае форма УВАХ более близка к линейной.

Отличия полученных УВАХ от типичных для КР связаны с проявлением нелинейностей КР в инертных газах [9], из которых следует, что в данных средах возможно получение разряда со свойствами промежуточными между коронным и тлеющим разрядами. Гистерезис УВАХ в отличие от УВАХ КР в смесях He/Kr(Xe) практически отсутствует, что может быть связано с тушением метастабильных атомов  $R(m)$  галогенсодержащими молекулами [10,11].

Скорость прокачки газов в КР  $v \sim (I)^{1/2}$  [12], поэтому она будет выше в ксенонсодержащих средах при минимальном содержании молекул CCl<sub>4</sub>. Увеличение содержания CCl<sub>4</sub> выше 0.13 кПа нежелательно из-за уменьшения эффективности работы эксимерного лазера [3,4]. При уменьшении давления тройной смеси до 100 кПа сужается диапазон устойчивого существования КР по величине напряжения, а ток КР увеличивается в 1.5 раза. Зависимости  $I_{mid} = f(U)$  становятся при этом квадратичными.



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики отрицательного коронного разряда в смесях инертных газов с молекулами CCl<sub>4</sub>. 1 — He/CCl<sub>4</sub> = 220/0.13 кПа; 2 — He/He/CCl<sub>4</sub> = 220/2, 8/0, 13 кПа; 3 — He/Kr/CCl<sub>4</sub> = 220/16/0, 13 кПа.



**Рис. 2.** Форма импульсов тока (а) и зависимость частоты их повторения от величины напряжения на иглоках (b) для КР в смеси He/Xe/CCl<sub>4</sub> = 220/2, 8/0, 13 кПа.

На рис. 2 приведены форма импульса тока КР и зависимость частоты повторения импульсов от величины напряжения на иглоках. Для КР в тройных смесях длительность импульсов тока на полувысоте составляет 0.3...0.5 μs. Импульсы тока КР наблюдались на фоне постоянного тока. Как видно из рис. 2, b, импульсы тока КР в тройных смесях проявляются только на предконтрактной стадии разряда, а их частота повторений, как и в средах на основе молекул HCl [6], достигает 30–40 kHz. В КР на двойной смеси импульсы тока по ширине достигали 1.5 μs и наблюдались только в области  $\Delta U = 6-8$  kV, а на сильноточной стадии КР ток был непрерывным.

### Оптические характеристики

Спектры излучения плазмы горячих зон КР в двойной и тройной смеси приведены на рис. 3. Для КР на смеси He/CCl<sub>4</sub> в УФ области спектра наблюдается образование молекул Cl<sub>2</sub>\* (λ 258 nm) и радикалов CCl\* (λ 278 nm). При этом наиболее интенсивной является полоса излучения Cl<sub>2</sub>. Континуум в области λλ 450–850 nm, происхождение которого связано с распадом радикалов CCl<sub>3</sub> или C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>, наблюдавшийся в разряде постоянного

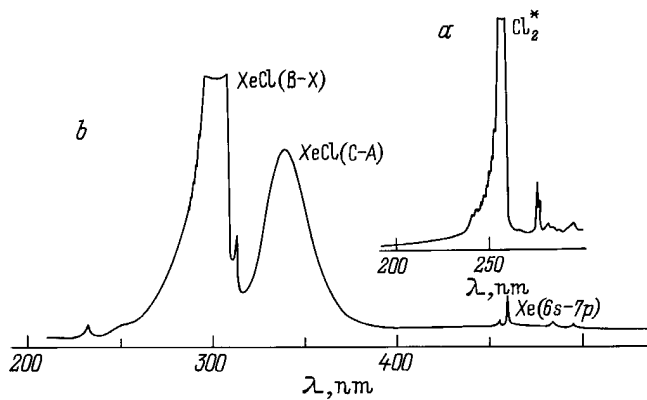


Рис. 3. Спектры излучения плазмы КР в смесях He/CCl<sub>4</sub> (a) и He/He/CCl<sub>4</sub> (b).

тока при низких давлениях в [13,14], отсутствует. По данным [13] в первичных актах распада молекул CCl<sub>4</sub> под действием электронов образуются преимущественно радикалы CCl<sub>2</sub>, CCl<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup> и атомы Cl<sup>\*</sup>, а радикалы CCl<sup>\*</sup> образуются в результате вторичных реакций. Низкая интенсивность излучения полосы CCl<sup>\*</sup> (по сравнению с излучением Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup>) связана с быстрыми реакциями его гибели в столкновениях с другими радикалами или молекулами Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup>.

Исследование обзорных спектров плазмы КР в тройной смеси (рис. 3, b) в диапазоне λλ 200–1000 nm показало, что основными являются полосы излучения λ 308 nm HeCl (B–X), λ 222 nm KrCl (B–X) и более слабые широкие полосы λ 330 nm HeCl (C–A) и λ 230 nm KrCl (C–A). В ближней ИК и видимой областях спектра наиболее интенсивные линии излучения наблюдались на переходах Kr (5s–6p, 5p) и He (6s–7p, 6p). Линии излучения с состояний, лежащих выше энергии первого колебательного состояния молекулярных ионов R<sub>2</sub><sup>+</sup>, и возбужденных ионов тяжелых инертных газов отсутствовали.

Такой характер распределения интенсивности в линейчатом спектре излучения может быть вызван заселением p-состояний атомов Kr и Xe в реакциях диссоциативной рекомбинации [15] и при возбуждении электронным ударом [16,17].

Типичные зависимости средних интенсивностей излучения молекулярных полос и линий атомов Kr, Xe от величины среднего тока КР представлены на рис. 4 и 5. Все эти зависимости имеют линейный вид. Из молекул наиболее эффективно образуются эксимерная молекула KrCl (B) и наименее эффективно молекулы Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup>. Интенсивность излучения на переходах Xe (6s–6p), Kr (5s–5p) более чем на два порядка превышает интенсивность излучения с более высоколежащих состояний (рис. 5). Интенсивность излучения атомов Xe и Kr на ИК переходах в КР на смесях He/Xe(Kr) (сравнимые по величине с приведенными на рис. 5) достигались в чистых инертных газах только при средних токах КР

1 mA. При этом ток КР был в основном непрерывным. Это указывает на эффективную столкновительную очистку метастабильных Xe (6s) и Kr (5s) состояний в КР на тройных смесях. Константы скорости тушения для Xe (6p) молекулами CCl<sub>4</sub> находятся в пределах 7.3–7.8 · 10<sup>-10</sup> cm<sup>3</sup>/s, а для метастабильных состояний Xe (6s) они составляют 6.3 · 10<sup>-10</sup> cm<sup>3</sup>/s [11].

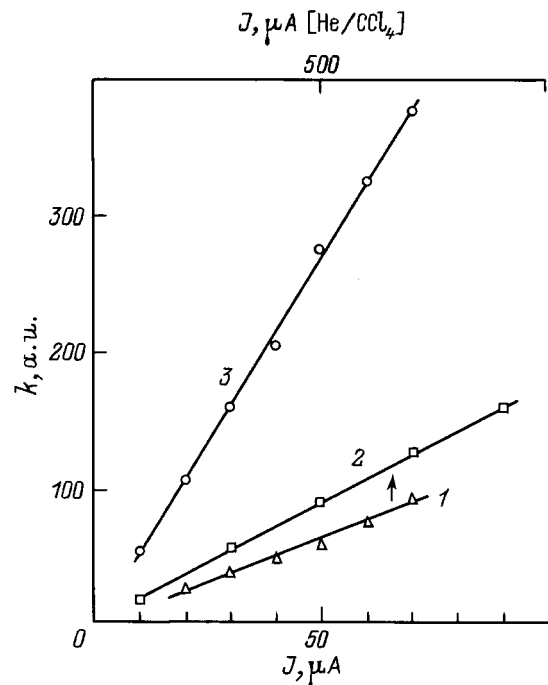


Рис. 4. Зависимости относительной интенсивности полос излучения молекул от величины среднего тока КР. 1 — λ = 258 nm Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup>, He/CCl<sub>4</sub>; 2 — 308 nm HeCl (B–X), He/He/CCl<sub>4</sub>; 3 — λ = 222 nm KrCl (B–X), He/Kr/CCl<sub>4</sub>.

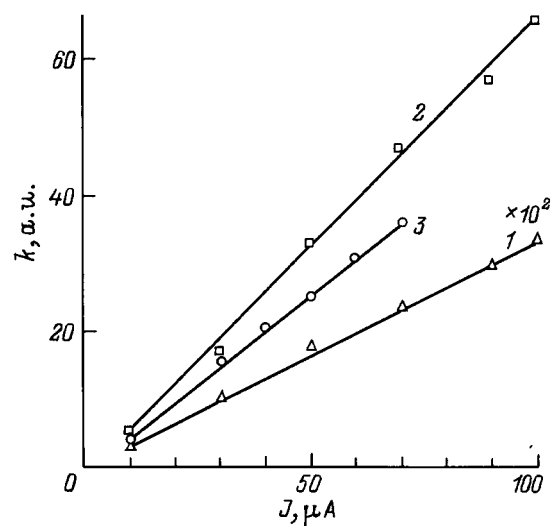
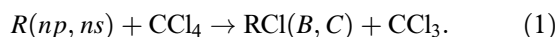


Рис. 5. Зависимости относительной интенсивности излучения линий Xe<sup>\*</sup> и Kr<sup>\*</sup> от величины среднего тока КР. 1 — λ = 467 nm Xe (6s–7p); 2 — λ = 823 nm Xe (6s–6p); 3 — λ = 810 nm Kr (5s–5p).

Плазма в горячей зоне КР сильно обогащена метастабильными атомами инертных газов, что связано со специфическим видом функции распределения электронов по энергии в КР, которая обрезана со стороны высоких энергий. Концентрация ионов в КР значительно ниже концентрации метастабильных и возбужденных на низлежащие энергетические состояния атомов [18]. Поэтому в горячих зонах КР превалирующей реакцией образования эксимерных молекул может быть "гарпунная" реакция:



Для атомов ксенона коэффициент ветвления реакции тушения Хе ( $6p, 6s$ ) молекулами  $\text{CCl}_4$  с образованием  $\text{XeCl}(B, C)$  в процессе с участием Хе ( $6p$ ) значительно выше (0.6–0.7), чем для Хе ( $6s$ ) (0.24). Одинаковый характер, зависимости интенсивности излучения полосы  $\text{XeCl}(B-X)$  и линий на переходах Хе ( $6s-6p$ ) также косвенно подтверждает образование эксимерной молекулы в "гарпунной" реакции.

В КР не наблюдается характерное для импульсного поперечного разряда увеличение интенсивности излучения  $\text{RCI}^*$  со временем работы разрядного устройства на смесях инертных газов с молекулами  $\text{CCl}_4$ . Это связано с тем, что в плазме  $\text{RCI}^*$  лазеров молекулы  $\text{CCl}_4$  прямо не участвуют в образовании эксимерных молекул. Сначала происходит реакция распада  $\text{CCl}_4$ :



а в дальнейшем образование эксимерных молекул идет по кинетической цепочке  $\text{RCI}^*$  лазеров на рабочих средах с примесями молекул  $\text{HCl}$  [3].

## Выводы

Исследование характеристик многоэлектродного коронного разряда в рабочих средах импульсно-периодических лазеров на хлоридах инертных газов показало, что он характеризуется малым энергопотреблением ( $W \leq 1 \text{ W}$ ) и устойчиво зажигается в смесях типа  $\text{He} / \text{Xe}(\text{Kr}) / \text{CCl}_4$ ; ток разряда и скорость прокачки газовых смесей ограничены развитием неустойчивости при высоком напряжении на иголках; для увеличения скорости прокачки необходимо применять газовые среды, обедненные молекулами  $\text{CCl}_4$  и использовать несколько параллельно включенных модулей прокачки; электрические характеристики и вид КР в значительной степени определяются процессами прилипания электронов к молекулам  $\text{CCl}_4$  и подвижностью соответствующих отрицательных ионов; эксимерные молекулы в горячих зонах КР могут образовываться преимущественно в прямых "гарпунных" реакциях с участием молекул  $\text{CCl}_4$  и атомов Хе ( $6p, 6s$ ), Кр ( $5p, 5s$ ); молекулы  $\text{CCl}_4$  приводят к эффективному расселению метастабильных состояний атомов Хе и Кр и росту интенсивности на ИК переходах Хе ( $6s-6p$ ) и Кр ( $5s-5p$ ).

## Список литературы

- [1] Peet V.E., Treshalov A.B., Slivinski E.B. // Appl. Phys. B. 1991. Vol. 52. P. 234–243.
- [2] Малинин А.Н., Шимон Л.Л., Добош В.М., Хомяк Б.Я. // Квантовая электрон. 1994. Т. 21. № 12. С. 1174–1177.
- [3] Salimbeni R., Matera M., Vannini M., Burlamachi P. // Opt. Commun. 1981. Vol. 39. N 1. P. 75–78.
- [4] Luches A., Nassisi V., Perrone M.R. // Opt. Commun. 1984. Vol. 51. N 5. P. 315–318.
- [5] Баранов А.И., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. // ПТЭ. 1994. С. 108–111.
- [6] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В. // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 2.
- [7] Шуаибов А.К., Миня А.И., Звенигородский В.В., Шевера В.С. // Письма в ЖТФ. Т. 22 Вып. 13. С. 73–78.
- [8] Henson P.L. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 2. P. 709–719.
- [9] Белевцев А.А. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по физике газового разряда. Махачкала: ДГУ. 1988. Ч. 1. С. 15–16.
- [10] Velazco J.E., Koltz J.H., Setser D.W. // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 65. N 9. P. 3468–3488.
- [11] Ки Ж.К., Setser D.W. // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. N 11. P. 689–693.
- [12] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [13] Кравченко Ю.С., Осадчук В.С., Словецкий Д.И., Коровянко В.Н. // ХВЭ. 1989. Т. 23. № 5. С. 444–449.
- [14] Кравченко Ю.С., Осадчук В.С., Словецкий Д.И., Таранов С.В. // ХВЭ. 1989. Т. 23. № 6. С. 539–544.
- [15] Иванов В.А. // УФН. 1992. Т. 162. № 1. С. 35–70.
- [16] Фельцман П.В., Запесочный И.П. // УФЖ. 1968. Т. 13. № 2. С. 205–210.
- [17] Mason N.J., Nevel W.R. // J. Phys. B. 1987. Vol. 20. P. 1357–1377.
- [18] Песков В.Д. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 12. С. 2544–2551.