

03;04;12

## Эмиссионные характеристики и электронные кинетические коэффициенты плазмы поперечного объемного разряда в смеси тяжелых инертных газов с молекулами хлора

© А.К. Шуаибов,<sup>1</sup> В.И. Чигинь,<sup>2</sup> Л.Л. Шимон,<sup>1</sup> И.В. Шевера,<sup>1</sup> П.П. Горун,<sup>2</sup> Р.О. Обуховский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ужгородский национальный университет,  
88000, Ужгород, Украина  
e-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

<sup>2</sup> Национальный университет „Львовская политехника“,  
79013 Львов, Украина  
e-mail: vchygin@polynet.lviv.ua

(Поступило в Редакцию 23 апреля 2009 г.)

Приводятся результаты исследования излучения полос монохлоридов аргона, криптона, ксенона и молекул хлора из плазмы поперечного объемного разряда на смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2$ . Представлены результаты оптимизации рабочей смеси импульсного источника излучения в зависимости от давления и парциального состава рабочей смеси и параметров системы возбуждения. Численно решено кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергии, на основании которого получены транспортные характеристики электронов плазмы и удельные потери мощности разряда при разных значениях приведенной напряженности электрического поля. Моделирование параметров плазмы выполнено для четверной смеси, наиболее оптимальной для работы многоволнового источника УФ-ВУФ-излучения. Проведен качественный анализ наиболее важных электронных процессов в многокомпонентной плазме, которые определяют механизмы совместного образования монохлоридов аргона, криптона и криптона в поперечном разряде.

### Введение

Импульсно-периодические лампы на монохлоридах  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$  и молекулах хлора, которые образуются в импульсном объемном разряде, являются источником субмикросекундного УФ-ВУФ-излучения с потенциально наиболее высокой энергией в импульсе излучения [1,2]. Применение в качестве галогеноносителя молекул хлора и пассивирования внутренней части разрядного устройства позволяет достигать ресурса работы на одной смеси  $10^6$ – $10^7$  импульсов. Это делает их перспективными для использования в фотохимии, микроэлектронике и биотехнологиях. Импульсные излучатели с возбуждением объемным разрядом на двойных смесях работают, как правило, на одной из полос  $B-X$  молекул  $RCl$  (где  $R$  —  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ ). Для калибровки импульсных фотоприемников, зондирования плазмы на разных длинах волн в УФ-диапазоне спектра и некоторых других видах применения более предпочтительным является использование многоволновых эксиплексно-галогенных излучателей. Такой режим работы эксиплексно-галогенной лампы достигался нами при использовании разных галогеноносителей ( $\text{SF}_6$  и  $\text{HCl}$  [3]) или сложного галогеноносителя — молекул  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  [4].

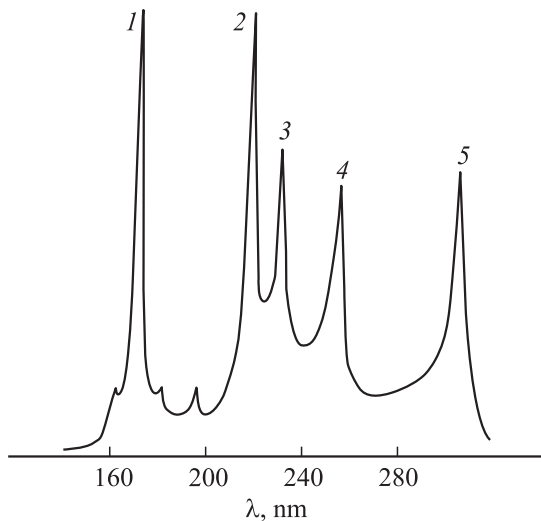
В настоящей работе приводятся результаты исследования УФ-ВУФ-излучения поперечного объемного разряда в смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2$ , в которой реализован способ получения разных эксиплексных молекул путем использования различных инертных газов и единственного галогеноносителя — молекул хлора. Для оптимизированной по давлению и составу четверной газовой смеси

выполнены расчеты функций распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) и электронные кинетические коэффициенты (ЭКК) в зависимости от приведенной напряженности электрического поля в поперечном объемном разряде.

### Экспериментальное исследование выходных характеристик эксиплексно-галогенного излучателя

Поперечный объемный разряд (ПОР) зажигался в объеме  $18 \times 2.2 \times 1.0 \text{ cm}^3$  при расстоянии между электродами 2.2 см. Схема излучателя, методика исследования и условия эксперимента приведены в работах [5–7].

Спектр излучения плазмы ПОР на основе смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2$  приведен на рис. 1. Спектр излучения аппаратный, поскольку не учтена чувствительность системы „фотоумножитель + монохроматор“. Основное излучение сконцентрировано в пределах переходов  $\text{ArCl}(B-X)$ ,  $\text{KrCl}(B-X)$ ,  $\text{Cl}_2(D'-A')$ ,  $\text{XeCl}(B, D-X)$ . При переходе к аналогичной смеси на основе молекул хлористого водорода яркость полос излучения 175 nm  $\text{ArCl}(B-X)$ , 258 nm  $\text{Cl}_2(D'-A')$  уменьшалась в два-три раза. Поперечный разряд устойчиво зажигался при напряжениях разряда рабочей емкости, превышающих 4 kV. При увеличении зарядного напряжения в диапазоне 4–12 kV значение яркости всех молекулярных полос увеличивалось в 2–5 раз. Для получения максимальной яркости суммарного УФ-ВУФ-излучения давление аргона должно находиться в диапазоне 10–14 kPa.



**Рис. 1.** Спектр излучения плазмы поперечного объемного разряда в смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2 = 90.67-3.89-3.89-1.55\%$  при  $P_{\text{sum}} = 15.44$  кПа. 1 — 175,  $\text{ArCl}(B-X)$ , 2 — 222,  $\text{KrCl}(B-X)$ , 3 — 236,  $\text{XeCl}(D-X)$ , 4 — 258,  $\text{Cl}_2^*$ , 5 — 308 nm,  $\text{XeCl}(B-X)$ .

Аргон в смеси играет роль эксиплексообразующего газа для молекул  $\text{ArCl}$ , а для других молекул он является буферным газом.

Максимальная яркость излучения полосы 236 nm  $\text{XeCl}(D-X)$  наблюдалась при парциальном давлении аргона, меньшем 3 кПа, что может быть связано с релаксацией заселенности молекулы с  $D$  состояния в  $B$  при увеличении давления газовой смеси. Увеличение парциального давления ксенона приводило к уменьшению яркости полос излучения 236, 222 и 175 nm и росту яркости полосы 308 nm  $\text{XeCl}(B-X)$ . Получение соизмеримых по яркости полос в исследуемой плазме ПОР было возможно при парциальном давлении ксенона и криптона 0.2–0.5 кПа. Оптимальное парциальное давление хлора составляло 0.2–0.4 кПа.

Энергия в импульсе многоволнового источника УФ-ВУФ-излучения достигала 0.5–1.0 Дж при использовании четверной смеси оптимального состава при давлении 15–20 кПа. Коэффициент полезного действия излучателя достигал 10%. Ресурс работы многоволнового излучателя в газостатическом режиме составлял  $10^4$  импульсов.

Как известно [8], на начальной стадии ПОР основной реакцией образования эксиплексных молекул является „гарпунная“ реакция вида  $R(m) + \text{Cl}_2 = \text{RCl} + \text{Cl}$  [9] (где  $R$  — Ar, Kr, Xe). В дальнейшем при атмосферном давлении газовых смесей основной становится реакция ион-ионной рекомбинации:  $R^+ + \text{Cl}^- + (R) = \text{RCl}^* + (R)$ . При понижении давления газовых смесей из 100 до 10 кПа константа скорости ион-ионной рекомбинации уменьшается примерно на порядок, поэтому вклады обеих реакций в образование эксиплексных молекул в плазме ПОР на двойных смесях могут быть соизмеримыми по величине. Для газоразрядной плазмы сложного состава (тройные, чет-

верные смеси) распределение интенсивности в спектре излучения лампы будет существенно определяться передачей энергии от метастабильных атомов аргона и криптона атомам ксенона (криптона), находящимся в основном состоянии. Поэтому важным является расчет ЭКК для плазмы смесей инертных газов с молекулами хлора сложного состава (тройные, четверные смеси). В некоторых случаях наблюдается увеличение выходной мощности эксиплексных ламп при добавке небольшого количества атомов легких инертных газов (He, Ne) к основной смеси вида  $R_1-R_2-R_3-M$  (где  $M$  — молекула галогенонесителя), причины которого в настоящее время не установлены. Это делает актуальным исследование параметров и характеристик плазмы на основе смесей вида:  $\text{He}(\text{Ne})-R_1-R_2-R_3-\text{Cl}_2$ .

## Численное моделирование

Информацию о параметрах плазмы ПОР обычно получают путем решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям. На основе расчетов ФРЭЭ определяют электронные кинетические коэффициенты, к которым относятся транспортные характеристики электронов плазмы, удельные потери мощности разряда на основные электронные процессы и их константы скорости в зависимости от параметра  $E/P$ , где  $E$  — напряженность электрического поля, а  $P$  — давление смеси.

В связи с тем что большинство программ решения кинетического уравнения Больцмана, используемых для расчетов ФРЭЭ и ЭКК в плазме эксиплексных лазеров и ламп, которые доступны широкому кругу пользователей, имеют ограничение на количество газов смеси, нами была разработана собственная программа решения кинетического уравнения Больцмана для ФРЭЭ. Кроме того, базы по эффективным сечениям электронных процессов часто являются устаревшими и неполными.

Функции распределения электронов по энергии —  $f_0(\varepsilon)$  в плазме газового разряда находились путем численного решения уравнения Больцмана, представленного в двучленном приближении. Для стационарного случая это уравнение имеет следующий вид:

$$-\frac{1}{3} \left( \frac{E}{N} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left( \frac{\varepsilon}{\sum_i \frac{N_i}{N} Q_{Ti}} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) - \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[ 2 \sum_i \frac{N_i}{N} \frac{m}{M_i} Q_{Ti} \varepsilon^2 \left( f_0 + T \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \right] = S_{eN}, \quad (1)$$

где

$$S_{eN} = \sum_i \frac{N_i}{N} \left[ \left( \varepsilon + \varepsilon_{thri} \right) Q_i \left( \varepsilon + \varepsilon_{thri} \right) f_0 \left( \varepsilon + \varepsilon_{thri} \right) - \varepsilon Q_i(\varepsilon) f_0(\varepsilon) \right] - \sum_i \frac{N_{at}}{N} \varepsilon Q_{ati}(\varepsilon) f_0(\varepsilon)$$

является интегралом столкновений, который описывает неупругие взаимодействия электронов с атомами и молекулами;  $\varepsilon$  — энергия электрона,  $T$  — температура газа,  $N_i$ ,  $M_i$ ,  $Q_{Ti}$  — концентрации атомов и молекул, их массы и эффективные сечения транспортного рассеяния,  $m$ ,  $e$  — масса и заряд электрона,  $E$  — напряженность электрического поля в разряде,  $N$  — полная концентрация частиц рабочей смеси при данном давлении газовой смеси.  $Q_i$  и  $\varepsilon_i$  являются соответственно сечениями и пороговыми энергиями процессов возбуждения, а также ионизации атомов и молекул,  $Q_{at}$  — сечение прилипания электронов к электроотрицательным молекулам, концентрация которых —  $N_{at}$ . Условие нормировки функции распределения имело традиционную форму:

$$\int_0^{\infty} \varepsilon^{1/2} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1$$

Уравнение (1) в общем случае является неоднородным уравнением второго порядка с варьируемыми коэффициентами:

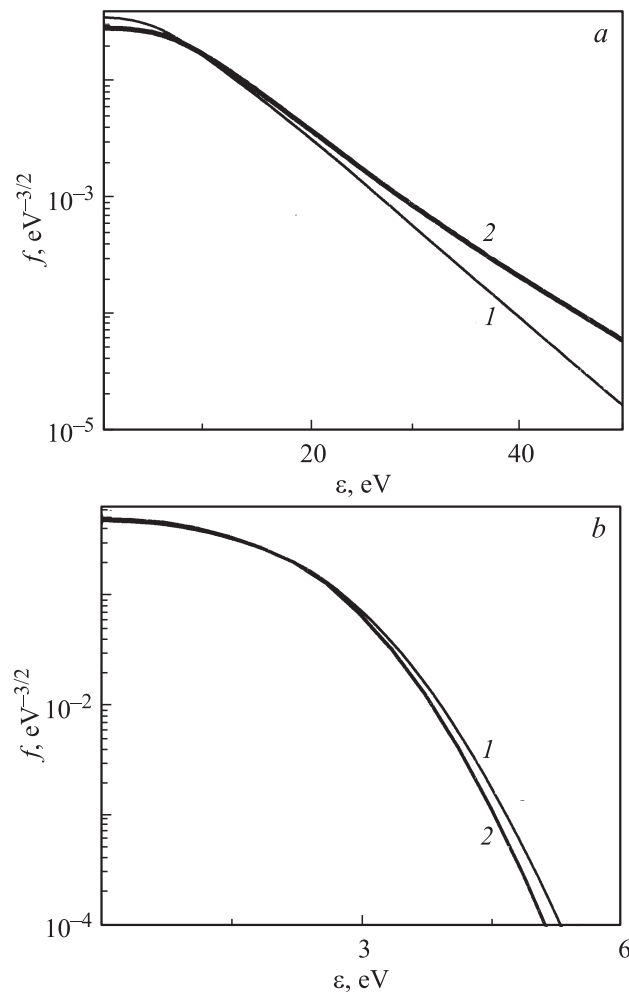
$$P(x)f'' + Q(x)f' + R(x)f = \varphi(x). \quad (2)$$

При решении уравнения (2) был использован метод замены производных конечными разностями и метод прогонки для сложных систем [11].

Электронные кинетические коэффициенты рассчитывались для разряда в смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> = 14–0.6–0.6–0.24 кПа, которая, по данным эксперимента, близка к оптимальным средам УФ-ВУФ-лампы. При выполнении расчетов использовалась разработанная нами программа. Контрольные расчеты проводились с использованием программы BOLSIG [12], свободно распространяемой в Интернете, которые сравнивались с нашими результатами. Значения ЭКК рассчитывались по формулам, приведенным в обзоре [13]. Диапазон изменения параметра  $E/P$  включал все  $E/P$ , реализованные экспериментально в процессе оптимизации выходных характеристик УФ-ВУФ эксиплексно-галогенного излучателя. При решении кинетического уравнения Больцмана учитывались процессы упругого рассеяния электронов, диссоциативного прилипания, колебательного возбуждения — Cl<sub>2</sub> ( $\nu = 1$ ), возбуждения электронных состояний атома аргона и молекулы хлора ( $B^3\Pi_i$ ,  $C_1\Pi_i$ ,  $B^3\Pi_i + C_1\Pi_i$ ), а также ионизации молекул хлора и атомов аргона.

## Результаты расчетов параметров плазмы

Характерный вид ФРЭЭ в разряде на смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> при малом и большом значении параметра  $E/P$  ( $10^{-1}$  и  $2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) представлен на рис. 2. Рассчитанные нами ФРЭЭ хорошо согласуются с соответствующими результатами, полученными с использованием программы BOLSIG [12], которая широко



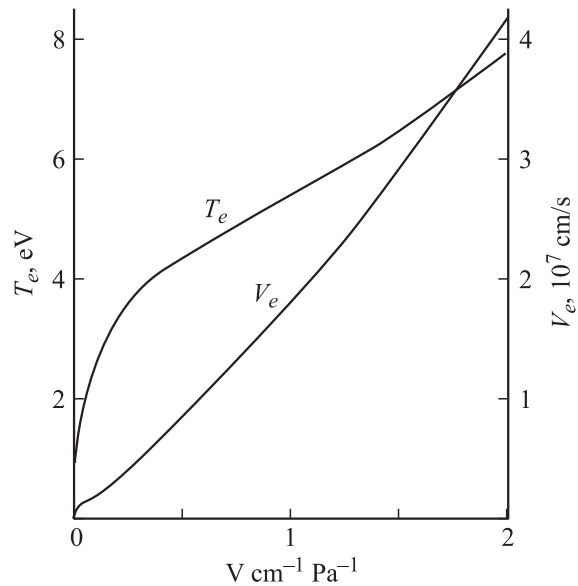
**Рис. 2.** Функции распределения электронов по энергиям в разряде на смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> = 90.67–3.89–3.89–1.55%, рассчитанные при разных величинах параметра  $E/P$  по нашей (1) методике решения кинетического уравнения Больцмана с использованием программы BOLSIG + (2): а —  $E/P = 0.01$ , б —  $2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ .

используется в физике газового разряда многими пользователями. При увеличении параметра  $E/P$  наблюдалось возрастание энергии быстрых электронов разряда и значительное уменьшение плотности электронов низких энергий. Основное количество электронов плазмы имело энергию в диапазоне 1–10 eV. Полученные при расчете ФРЭЭ закономерности коррелируют с нашими расчетами для плазмы тлеющего разряда в смесях Ar–Cl<sub>2</sub> [14], Ar–Xe–Cl<sub>2</sub> [15], которые были рассчитаны также с применением программы BOLSIG [12]. В отличие от программы BOLSIG в базу данных нашей программы были добавлены эффективные сечения процессов ступенчатой ионизации тяжелых инертных газов электронным ударом [16–18].

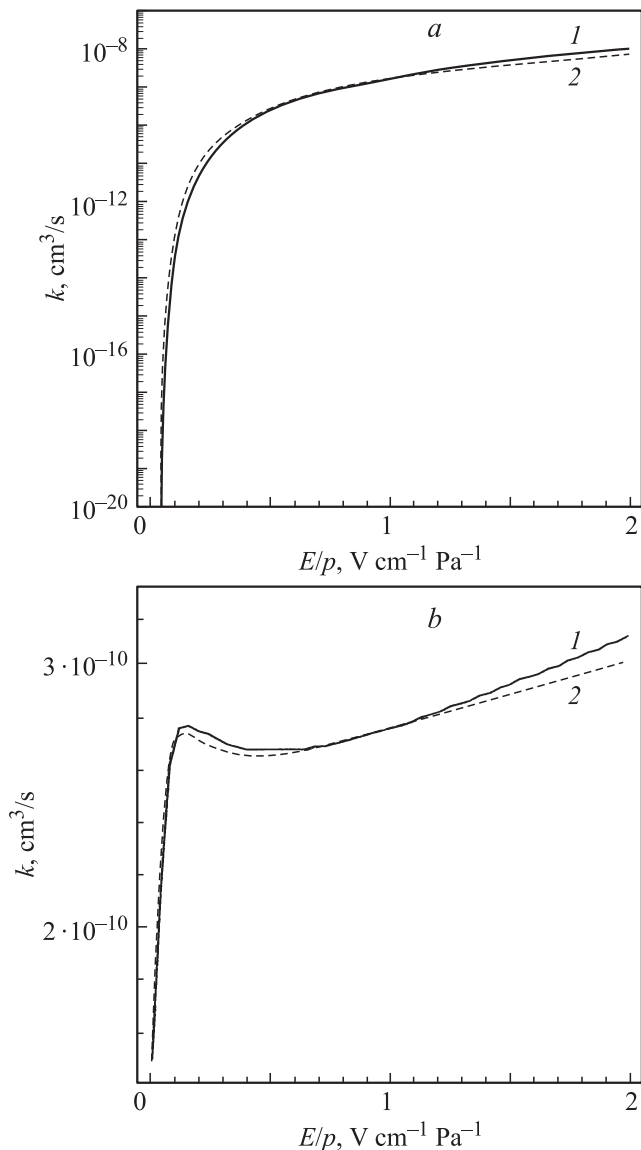
Контрольные зависимости констант скорости ионизации атомов аргона и диссоциативного прилипания электронов к молекулам хлора в разряде на четверной смеси, полученные с использованием нашей программы

и программы BOLSIG [12] (рис. 3), также подтверждают правильность нашей методики расчетов.

На рис. 4 приведены зависимости средней температуры и скорости дрейфа электронов от параметра  $E/P$ . Зависимость для температуры электронов является сильно возрастающей только в диапазоне  $E/P = 0.01-0.25 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , а при  $E/P > 0.25 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  скорость ее увеличения снижается примерно в 5–7 раз. Для значений  $E/P$  порядка  $0.4-0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , которые являются близкими к оптимальным (по данным нашего эксперимента), температура электронов не превышает 4–5 eV. В диапазоне  $E/P = 0.25-2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  температура электронов линейно увеличивалась от 4



**Рис. 4.** Зависимости температуры электронов и скорости дрейфа электронов в разряде на смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> = 90.67–3.89–3.89–1.55% ( $P_{\text{sum}} = 15.44 \text{ kPa}$ ) от значения параметра  $E/P$ .



**Рис. 3.** Зависимости констант скорости ионизации атомов аргона (а) и диссоциативного прилипания электронов к молекулам хлора (б) в разряде на смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> = 90.67–3.89–3.89–1.55%, полученные с использованием нашей программы (1) и программы BOLSIG+ (2).

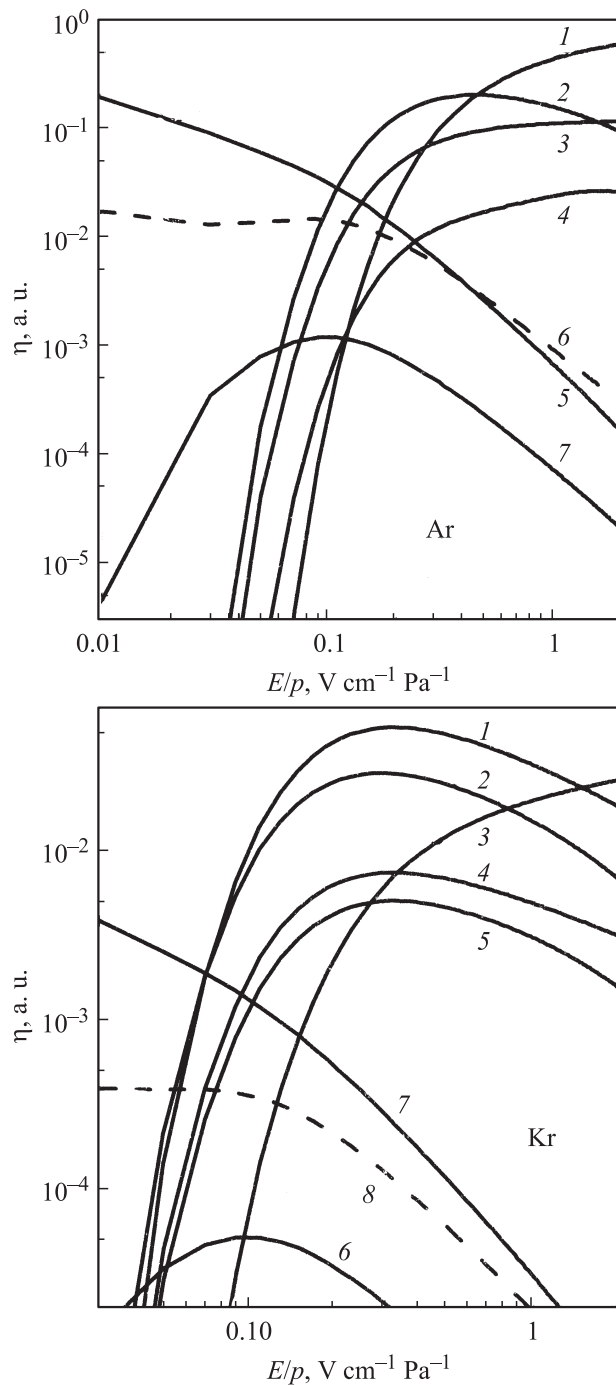
до 8 eV. Скорость дрейфа электронов разряда в диапазоне  $E/P = 0.01-2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  увеличивалась по закону, близкому к линейному от 1 до  $4 \cdot 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

На рис. 5 и 6 представлены зависимости удельных потерь мощности разряда на упругие и неупругие электронные процессы в разряде на смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub>. Для плазмы тяжелых инертных газов удельные потери мощности на упругое рассеяние электронов были наибольшими для атомов аргона. При увеличении параметра  $E/P$  эти потери уменьшались примерно от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$ , что определяется видом эффективного сечения для этого процесса, а также парциальным составом смеси (основным газом в смеси был аргон). Для атомов криптона и ксенона зависимости потерь мощности разряда на упругое рассеяние электронов от величины  $E/P$  были близкими между собой как по величине и форме зависимости, так и по диапазону  $E/P$ , где они проявлялись. Это также обусловлено видом соответствующих эффективных сечений упругого рассеяния электронов и равенством концентрации атомов Kr и Xe в четверной смеси. Потери мощности разряда на упругое рассеяние электронов на молекулах хлора были минимальными и проявлялись только в узком диапазоне  $E/P = 0.01-0.25 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , что связано преимущественно с низким содержанием хлора в рабочей смеси.

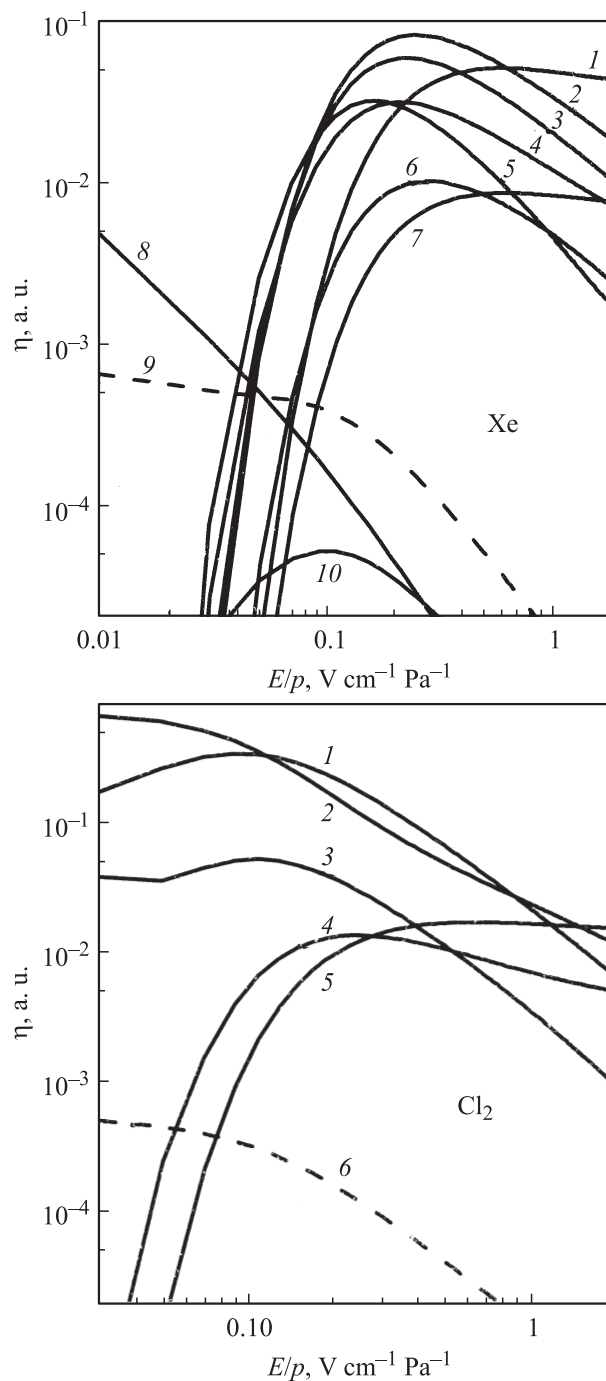
Рассмотрим более детально распределение удельных потерь мощности разряда на неупругие электронные процессы с участием атомов тяжелых инертных газов. Из-за того что парциальное давление аргона  $p(\text{Ar}) \gg p(\text{Kr}, \text{Xe})$ , эффективные сечения электронных процессов для атомов Kr, Xe являются близкими между

собой как по виду энергетической зависимости, так и абсолютной величине, а  $p(\text{Kr}) = p(\text{Xe})$ , то возможно рассматривать зависимости  $\eta(E/P)$  только для атомов криптона и ксенона.

На рис. 5 приведены удельные потери мощности разряда на следующие электронные процессы: для атома аргона — ионизация из основного уровня (1), возбуждение запрещенных 13 уровней (2), возбуждение резонансного



**Рис. 5.** Удельные потери мощности разряда на электронные процессы в плазме на смеси Ar–Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> для атомов аргона и криптона в зависимости от приведенной напряженности электрического поля.



**Рис. 6.** Удельные потери мощности разряда на электронные процессы для атомов ксенона и молекул хлора в зависимости от приведенной напряженности поля.

$4s[3/2]_0^0$  уровня (3), возбуждение запрещенных  $4s[3/2]_0^2$   $4s'[3/2]_0^0$  уровней (4), ступенчатое возбуждение (5), упругое рассеяние (6), ступенчатая ионизация (7); для атома криптона: возбуждение уровня  $5p[1/2]_1$  (1), возбуждение уровня  $5s[3/2]_2^0$  (2), ионизация из основного уровня (3), возбуждение уровня  $5s[3/2]_1^0$  (4), возбуждение уровня  $5s'[1/2]_0^0$  (5), ступенчатая ионизация (6), ступенчатое возбуждение (7), упругое рассеяние (8).

Распределения удельных потерь мощности разряда для атомов Кг и Хе близки между собой как по виду зависимостей от параметра  $E/P$ , так и по значению (рис. 5 и 6).

При небольших  $E/P$  ( $0.01-0.05 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) основным является процесс возбуждения метастабильного уровня атома аргона (кривая 5, рис. 5). С увеличением  $E/P$  от 0.01 до 1 ( $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) величина  $\eta$  для этого процесса уменьшается примерно на три порядка. При увеличении  $E/P$  в диапазоне  $0.04-0.06 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  достигаются пороги возбуждения высоколежащих разрешенных и запрещенных состояний ArI. Потери мощности разряда на эти процессы достигают в максимуме примерно 10–20% (при  $E/P = 2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ). В интервале значений  $E/P = 0.07-0.08 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  достигается порог ионизации атома аргона электронным ударом с основного состояния. Удельные потери на прямую ионизацию увеличивались (по закону, близкому к экспоненциальному) до  $E/P = 0.2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , где величина  $\eta$  равнялась примерно 10%. При дальнейшем увеличении параметра  $E/P$  наблюдалось насыщение скорости роста  $\eta[\text{Ar}^+]$ . В области  $E/P = 1-2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  величина  $\eta[\text{Ar}^+]$  становится преобладающей (> 90%). Для процесса ступенчатой ионизации атома аргона порог достигался при  $E/P < 0.01 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , максимум наблюдался при  $E/P = 0.07-0.1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , но значения удельных потерь на этот процесс были в целом небольшими (< 0.01%). С увеличением параметра  $E/P > 0.1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  значение удельных потерь на этот процесс уменьшалось по экспоненциальной зависимости.

На рис. 6 приведены удельные потери мощности разряда на следующие электронные процессы: для ксенона — ионизация из основного уровня (1), суммарное возбуждение ( $2s + 3d$ )-состояний (2), суммарное возбуждение ( $6s'[1/2]_0^0 + 6s'[1/2]_0^0 + 2p$ ) уровней (3), возбуждение  $6s[3/2]_1^0$  разрешенного состояния (4), возбуждение  $6s[3/2]_2^0$  резонансного состояния (5), возбуждение  $2p'$ -уровней (6), возбуждение  $\text{Xe}^*$  ( $3 < n < 9$ ) (7), ступенчатое возбуждение резонансного состояния (8), упругое рассеяние (9), ступенчатая ионизация (10); для атомов хлора — возбуждение  $C^1\Pi_i$ -состояния ( $E = 3.12 \text{ eV}$ ) (1), возбуждение  $B_3\Pi_i$ -состояния ( $E = 2.5 \text{ eV}$ ) (2), колебательное возбуждение ( $v = 1$ ) (3), суммарное возбуждение ( $B^1\Pi_i + C^1\Pi_i$ ) состояний (4), ионизация из основного состояния (5), упругое рассеяние (6).

Для более тяжелого инертного газа (Кг или Хе) при  $E/P = 0.01-0.03 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  преобладают потери мощности разряда на процессы ступенчатого возбуждения (хотя величина  $\eta$  для этого процесса небольшая, например для ксенона < 1%). При более высоком значении  $E/P$  ( $0.1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) для ксенона основные потери мощности разряда связаны с прямым возбуждением атома ( $\eta = 90-95\%$ ). С увеличением  $E/P > 0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  преобладающими становятся

потери мощности разряда на прямую ионизацию атома ксенона. Роль процесса ступенчатой ионизации атома ксенона в поперечном разряде с точки зрения потерь энергии небольшая ( $< 10^{-4}$ ).

Из электронных процессов с участием молекулы хлора при низких  $E/P = 0.01-0.1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  наиболее важными каналами потерь мощности разряда являются возбуждение низколежащих электронно-колебательных состояний молекулы хлора (кривые 1–2, рис. 6) и на колебательное возбуждение молекулы  $\text{Cl}_2 v = 1$  (кривая 3, рис. 6). Для более высоких значений параметра  $E/P > 0.1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  потери мощности разряда на эти процессы экспоненциально уменьшаются примерно на 1–2 порядка. Возбуждение высоколежащего электронно-колебательного уровня молекулы хлора (для поперечного объемного разряда  $E = 0.25 \text{ V}$ ; кривая 4, рис. 6) было малоэффективным (максимум  $\eta < 1\%$ ). При  $E/P > 0.2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  потери мощности разряда на прямую ионизацию молекул хлора достигают насыщения (но величина  $\eta$  при этом не превышает 1–2%). В интервале  $E/P > 0.4-0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , оптимальном для работы УФ-ВУФ-излучателя, наиболее значительными являются потери на возбуждение низколежащих уровней и колебательное возбуждение молекулы хлора.

Анализ констант скорости неупругих процессов в газоразрядной плазме на смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2 = 14-0.6-0.6-0.24 \text{ kPa}$  проводился при фиксированном значении параметра  $E/P = 0.1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ . Полученные константы в дальнейшем будут использованы при расчетах кинетики процессов и выходных характеристик УФ-ВУФ-излучателя на хлоридах тяжелых инертных газов и молекул хлора. Для молекул хлора наибольшими были константы скорости возбуждения низколежащих электронно-колебательных состояний, а константы скорости диссоциативного прилипания электронов, колебательного возбуждения —  $k(\text{Cl}_2(v = 1))$  и возбуждения высоколежащих электронных состояний молекулы хлора были на 1–2 порядка ниже. Из процессов неупругого взаимодействия электронов с атомами Ar, Кг и Хе наибольшими были константы скорости ступенчатого возбуждения и ионизации. С уменьшением атомного веса инертного газа разрыв в значении констант скорости прямой и ступенчатой ионизации уменьшался. Из процессов прямого электронного возбуждения атомов тяжелых инертных газов наиболее эффективным является возбуждение резонансных состояний. Увеличение атомного веса инертного газа (от аргона до ксенона) приводило к росту эффективности этого процесса примерно в четыре раза.

В таблице представлены константы скорости неупругих электронных процессов в плазме разряда на смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2 = 14-0.6-0.6-0.24 \text{ kPa}$  при  $E/P = 0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ . Обозначения процессов соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 5 и 6.

Таким образом, показано, что УФ-ВУФ-излучатель на основе смеси  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2 = 14-0.6-0.6-0.24 \text{ kPa}$ ,

Константы скоростей электронных процессов,  $\text{cm}^3/\text{s}$ 

Ar		Kr		Xe		Cl <sub>2</sub>	
1	$2.174 \cdot 10^{-10}$	1	$1.579 \cdot 10^{-9}$	1	$1.476 \cdot 10^{-9}$	1	$1.942 \cdot 10^{-8}$
2	$2.747 \cdot 10^{-10}$	2	$9.266 \cdot 10^{-10}$	2	$2.206 \cdot 10^{-9}$	2	$1.1 \cdot 10^{-8}$
3	$1.269 \cdot 10^{-10}$	3	$3.104 \cdot 10^{-10}$	3	$1.494 \cdot 10^{-9}$	3	$1.977 \cdot 10^{-9}$
4	$2.007 \cdot 10^{-11}$	4	$2.417 \cdot 10^{-10}$	4	$9.107 \cdot 10^{-10}$	4	$1.039 \cdot 10^{-9}$
5	$2.246 \cdot 10^{-6}$	5	$1.643 \cdot 10^{-10}$	5	$5.599 \cdot 10^{-10}$	5	$1.333 \cdot 10^{-9}$
6	$2.423 \cdot 10^{-7}$	6	$7.391 \cdot 10^{-8}$	6	$2.747 \cdot 10^{-10}$	6	$3.673 \cdot 10^{-7}$
7	$7.391 \cdot 10^{-8}$	7	$2.246 \cdot 10^{-6}$	7	$2.578 \cdot 10^{-10}$	Прилипание	$2.678 \cdot 10^{-10}$
		8	$2.457 \cdot 10^{-7}$	8	$2.107 \cdot 10^{-6}$		
				9	$3.322 \cdot 10^{-7}$		
				10	$7.391 \cdot 10^{-8}$		

которая возбуждалась поперечным объемным разрядом, излучает в спектральном диапазоне 160–310 nm на системе полос монохлоридов тяжелых инертных газов и молекулы хлора примерно одинаковой яркости. При давлении смеси 15–20 кПа энергия в импульсе УФ-ВУФ-излучения достигала 05–1.0 J при коэффициенте полезного действия порядка 10%. Ресурс работы излучателя в газостатическом режиме составлял  $10^4$  импульсов. Полученные в процессе численного моделирования параметры плазмы качественно объясняют распределение излучения в спектре и могут быть использованы при расчетах выходных характеристик многоволновой эксиплексно-галогенной лампы.

- [13] Словецкий Д.И., Дерюгин А.А. // Химия плазмы: Сб. ст. Вып. 13 / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 240–277.
- [14] Шуаибов А.К., Шевера И.В., Малинина А.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 20. С. 30–36.
- [15] Шуаибов А.К., Малинина А.А. // ЖПС. 2008. Т. 75. № 4. С. 563–567.
- [16] Hutan H.A. // Phys. Rev. A. 1978. Vol. 18. N 2. P. 441–445.
- [17] Hutan H.A. // Phys. Rev. A. 1979. Vol. 20. N 3. P. 855–859.
- [18] Шибкова Л.В., Шибков В.М. Разряд в смесях инертных газов. М.: Физматлит, 2006. 200 с.

## Список литературы

- [1] Бойченко А.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // Квант. электрон. 1996. Т. 23. № 4. С. 344–348.
- [2] Ерофеев М.И., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 10. С. 137–140.
- [3] Шуаибов А.К. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 12. С. 64–67.
- [4] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ТВТ. 2000. Т. 38. № 3. С. 386–389.
- [5] Shevera I.V., Shuaibov A.K., Shimon L.L., Dashchenko A.I., Minja A.I. // Uzh. Univ. Scientif. Herald. Ser. Physics. 2000. Iss. 8. Pt. 2. P. 297–301.
- [6] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Миня О.Й. // Журнал фізичних досліджень. 1999. Т. 3. № 2. С. 157–163.
- [7] Шуаибов А.К., Дащенко А.И. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 101–103.
- [8] Шевера И.В., Шуаибов А.К., Добош В.М., Неймет Ю.Ю. Кинетика процессов в квазистационарном XeCl-лазере. Ужгород, 1989. Укр. НИИНТИ. № 1013. 30 с.
- [9] Пэст В.Э., Трещалов А.В. // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 12. С. 2442–2450.
- [10] Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Свердловск. Изд-во Уральского университета, 1989. 432 с.
- [11] Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.
- [12] < <http://www.siglo-kinema.com> >