

02; 04; 07

Выходные характеристики и параметры плазмы газоразрядного ультрафиолетового излучателя низкого давления, работающего на смесях гелий–иод и ксенон–иод

© А.К. Шуаибов,¹ И.А. Грабовая,¹ З.Т. Гомоки,¹ А.Г. Калюжная,² А.И. Щедрин²

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

² Институт физики,
Киев, Украина
e-mail: ashched@iop.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 2 марта 2009 г.)

Приведены выходные характеристики и параметры плазмы мощного газоразрядного источника ультрафиолетового (УФ) излучения, который работает на смесях He–I₂, Xe–I₂ и возбуждается продольным тлеющим разрядом. Давление газовых смесей варьировалось в диапазоне 100–1500 Па, а электрическая мощность разряда находилась в диапазоне 15–250 Вт. Лампа излучала в спектральном диапазоне 200–390 нм на спектральной линии атома иода — 206.2 нм, полосе 253 нм XeI (B–X) и полосе с максимумом 342 нм I₂*.

Для смесей He(Xe)–I₂ с давлением 800–100 Па, близким, по данным нашего эксперимента, к оптимальному, выполнены расчеты функций распределения электронов по энергии и электронных кинетических коэффициентов в зависимости от параметра E/N (E — напряженность электрического поля; N — концентрация частиц в разряде). Расчетные параметры плазмы позволили провести качественный анализ наиболее важных электронных процессов в плазме эксиплексно-галогенного УФ-излучателя и будут в дальнейшем использоваться при численном моделировании кинетики процессов и выходных характеристик УФ-излучателя на смесях гелия или ксенона с молекулами иода.

PACS: 52.80.He

Наиболее мощными и простыми источниками спонтанного ультрафиолетового (УФ) излучения являются лампы на основе смесей ксенона или криптона с хлором, излучающие преимущественно на полосах 308 нм XeCl (B–X) и 222 нм и KrCl (B–X) шириной 5–10 нм [1]. Из-за высокой агрессивности молекул хлора, которая приводит к интенсивному взаимодействию рабочей смеси с электродами (особенно катодом) и кварцевой оболочкой лампы, ресурс работы подобных излучателей не превышает 10–100 ч в квазиотпаянном режиме. Использование менее агрессивных галогеносителей, например молекул иода, позволяет увеличить ресурс работы таких источников УФ-излучения до 500–1000 ч [2–4].

Параметры плазмы, кинетика процессов и выходные характеристики излучателей с накачкой продольным тлеющим разрядом в смесях Xe–Cl₂, Kr–Cl₂, Ar–Xe–Cl₂ приведены в работах [5–7]. В [5,6] применялся упрощенный подход к расчетам функций распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и электронных кинетических коэффициентов (ЭКК), а кинетические модели процессов в плазме на смесях Xe–Cl₂, Kr–Cl₂ включали ограниченное число элементарных процессов в плазме. Систематические расчеты ФРЭЭ и ЭКК для плазмы УФ-излучателей на смесях инертных газов с парами иода отсутствуют.

В настоящей статье представлены результаты разработки и оптимизации выходных характеристик газораз-

рядного УФ-излучателя низкого давления, работающего на смесях He–I₂, Xe–I₂, а также результаты численного моделирования параметров плазмы этих источников УФ-излучения.

1. Выходные характеристики ультрафиолетового источника излучения

Продольный тлеющий разряд в смесях He–I₂, Xe–I₂ зажигался в разрядной кварцевой трубке с внутренним диаметром 1.4 см. Расстояние между полыми цилиндрическими электродами, изготовленными из никеля, равнялось 50 см. Кристаллический иод размещался в специальном отростке, который был установлен за анодом лампы. Более детально конструкция излучателя приведена в работах [3,8].

Анализ излучения плазмы проводился при помощи монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106. Спектрофотометр предварительно калибровался по величине относительной спектральной чувствительности в диапазоне длин волн 190–450 нм. Для зажигания тлеющего разряда использовался высоковольтный выпрямитель ($I_{\max} = 100$ mA; $U_{\max} = 10$ kV). Лампа охлаждалась потоком воздуха от вентилятора, так что давление паров иода в разрядной трубке не превышало 100–200 Па [9]. Измерение электрических характеристик и мощности

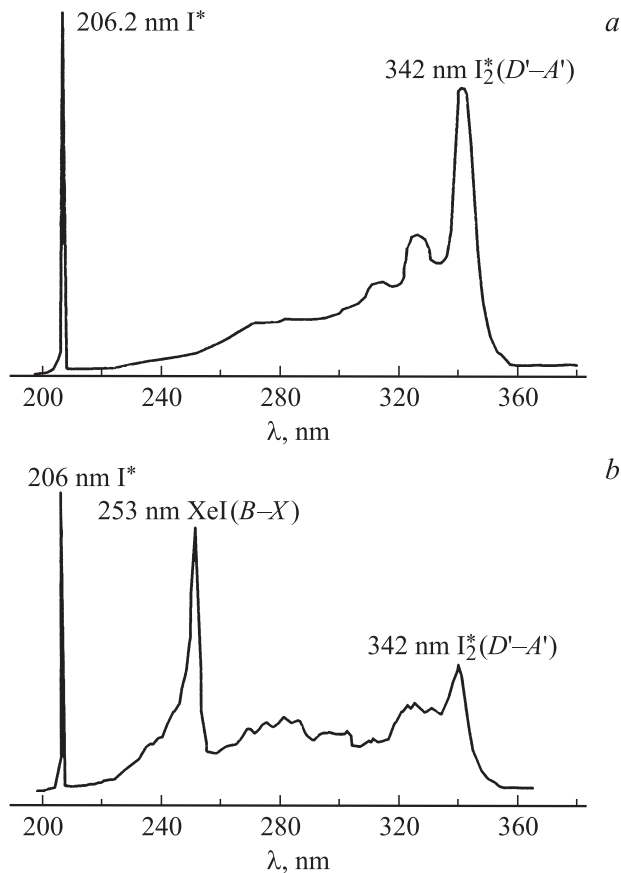


Рис. 1. Спектры излучения УФ-лампы тлеющего разряда на смесях He–I₂ (а) и Xe–I₂ (б) при $P(\text{He, Xe}) = 400$ Па, $P(\text{I}_2) = 100\text{--}200$ Па и токе тлеющего разряда 70 мА.

УФ-излучения лампы проводилось по методике, приведенной в работе [10].

Однородный тлеющий разряд формировался в центральной области разрядной трубки при парциальном давлении инертного газа до 400 Па и токе разряда $I_{CH} > 40$ мА. С увеличением тока от 5 до 50 мА диаметр шнура плазмы в центре разрядной трубки увеличивался от 2 до 12 мм. При увеличении давления инертных газов ($P > 500$ Па) тлеющий разряд и при больших токах ($I_{CH} > 40\text{--}50$ мА) зажигался в форме яркого плазменного шнура в центре разрядной трубки и слабоизлучающей периферийной (пристеночной) плазмы. Такой вид тлеющего разряда является характерным для всех галогенсодержащих газов и определяется процессами разделения плазмы на ион-ионную (центр трубки) и электрон-ионную (пристеночная область) составляющие [11].

Потенциалы зажигания продольного тлеющего разряда в смесях He–I₂, Xe–I₂ при парциальном давлении инертного газа 130–2000 Па находились в диапазоне 3–5 кВ, а напряжение горения тлеющего разряда в нормальной стадии составляло 2.5 кВ (смесь He–I₂) и 3.5 кВ (смесь Xe–I₂).

Спектральные характеристики источника УФ-излучения (не приведенные к относительной спектральной чувствительности системы регистрации излучения — $k(\lambda)$) представлены на рис. 1. В излучении тлеющего разряда на смеси He–I₂ выделялись спектральная линия атома иода 206.2 нм и система полос 320–342 нм I₂ (D'–A'). С учетом $k(\lambda)$ при парциальном давлении гелия 400 Па соотношение значений мощности излучения $W(206.2 \text{ нм}), W(342 \text{ нм}) = 52/48\%$. Это соотношение мощностей излучения спектральной линии и молекулярной полосы иода определялось с учетом того, что ширина контура спектральной линии 206.2 нм составляет 0.12 нм. Для лампы на смеси Xe–I₂ характерным было наличие в спектре излучения также полосы с максимумом на 253 нм XeI (B–X). При парциальном давлении ксенона 400 Па соотношение мощностей излучения лампы на переходе с $\lambda = 206.2$ нм атома иода, полосы 253 нм XeI (B–X) и 342 нм I₂ (D'–A') составляло: 100 : 30 : 70 а.и., т.е. и в этом случае около половины

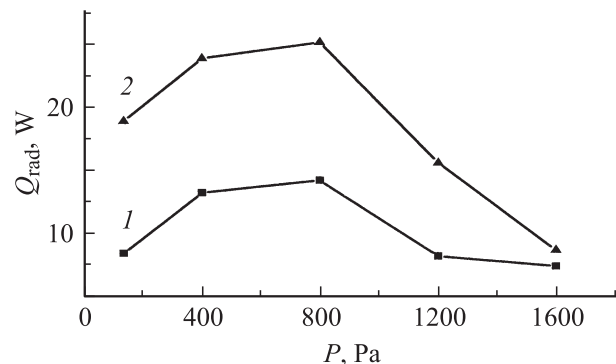


Рис. 2. Зависимость мощности излучения спектральной линии 206.2 нм (1) и полной мощности УФ-излучения лампы на смеси He–I₂ в спектральном диапазоне 200–350 нм (2) от величины парциального давления гелия при $P(\text{I}_2) = 100\text{--}200$ Па и электрической мощности тлеющего разряда 200 Вт.

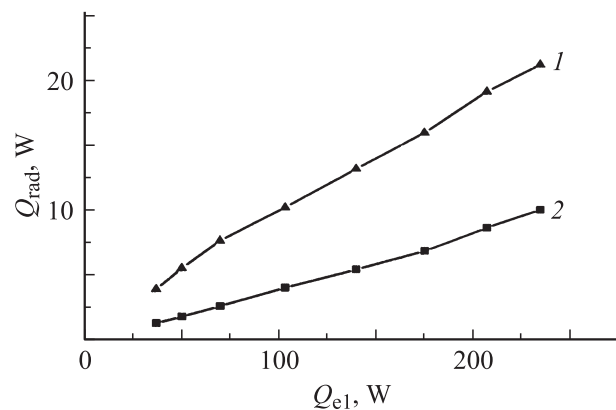


Рис. 3. Зависимость мощности излучения лампы на смеси Xe–I₂ в спектральном диапазоне 200–350 нм (1) и мощности излучения спектральной линии 206.2 нм (2) от электрической мощности тлеющего разряда.

мощности УФ-излучения плазмы было сосредоточено в спектральной линии 206.2 nm, а другая половина — в полосах молекул иода и иодида ксенона.

На рис. 2 и 3 приведены результаты оптимизации мощности УФ-излучения лампы в зависимости от парциального давления инертного газа и мощности, которая вкладывается в плазму тлеющего разряда. Оптимальное парциальное давление гелия находилось в диапазоне 400–800 Па, а ксенона — 400–1200 Па. Увеличение электрической мощности тлеющего разряда от 20 до 160 W приводило к увеличению полной мощности УФ-излучения плазмы с 2.5 до 25 W. Мощность УФ-излучения на переходе атома иода при этом увеличивалась с 1.5 до 10 W (при $P(\text{He}) = 800$ Па). Для УФ-излучения тлеющего разряда на смеси Хе–I₂ получены результаты, близкие по характеру зависимости мощности излучения от мощности, которая вкладывается в плазму, так и по абсолютной величине ($W_{\text{max}} = 22$ W, рис. 3).

Ресурс работы лампы в квазиотпаянном режиме не превышал 500 h. КПД газоразрядного УФ-излучателя на смеси He–I₂ достигал 15–18%, а на смеси Хе–I₂ не превышал 12%.

2. Результаты численного моделирования

На рис. 4 представлены функции распределения электронов по энергиям, рассчитанные в смесях He–I₂ с давлением 800–100 Па, Хе–I₂ с давлением 800–100 Па при различных значениях электрического поля в разряде. Функции распределения рассчитывались из уравнения Больцмана в двучленном приближении [12] с учетом процессов транспортного рассеяния электронов на компонентах смеси, а также неупругих процессов возбуждения и ионизации инертного газа и галогена, диссоциации и диссоциативного прилипания электронов к молекулам иода. При этом использованы сечения упругих и неупругих столкновений электронов с атомами He и Хе, представленные в работах [13–15] и [13,14,16,17] соответственно. Сечения взаимодействия электронов с молекулами иода приведены в [18] или аналогичны тем, что использовались в статье [19].

Из сравнения приведенных функций распределения видно, что по мере перехода от гелия к ксенону происходит снижение доли высокоэнергетических электронов в разряде. Это связано с тем, что пороги возбуждения и ионизации ксенона (8.3 и 12.1 eV соответственно) существенно ниже, чем гелия (19.8 и 22.5 eV), поэтому обрезание „хвоста“ ФРЭЭ в смеси на основе ксенона происходит при более низких значениях энергии.

Скорость дрейфа и средние значения энергии электронов, рассчитанные в указанных смесях в зависимости от величины электрического поля в разряде, приведены на рис. 5. Очевидно, что максимальные значения средней энергии наблюдаются в смеси на основе гелия, характеризующейся выраженным высокоэнергетическим

хвостом ФРЭЭ. Снижение концентрации гелия в смеси и замена его на ксенон приводят к резкому обрезанию ФРЭЭ при энергиях, близких к порогу возбуждения ксенона, и соответственно уменьшению средней энергии электронов в разряде.

Максимальные дрейфовые скорости электронов наблюдаются в смеси на основе гелия и падают по мере его замены на ксенон. Этот факт объясняется более интенсивным рассеянием электронов на ксеноне (сечения транспортного рассеяния электронов на атомах ксенона в интервале энергий до 25 eV на 1–2 порядка превышают аналогичные значения для гелия). Более интенсивное рассеяние в ксеноне приводит к уменьшению направленной скорости движения электронов в этом газе.

В табл. 1 и 2 отражено распределение мощности, вкладываемой в разряд, по наиболее важным электронным процессам (выраженное в процентах). Такими процессами являются возбуждение и ионизация инертных газов и молекул галогена, а также диссоциация и диссоциативное прилипания электронов к молекулам иода, ступенчатая ионизация инертных газов, а также иода. Затраты мощности на процессы с участием ато-

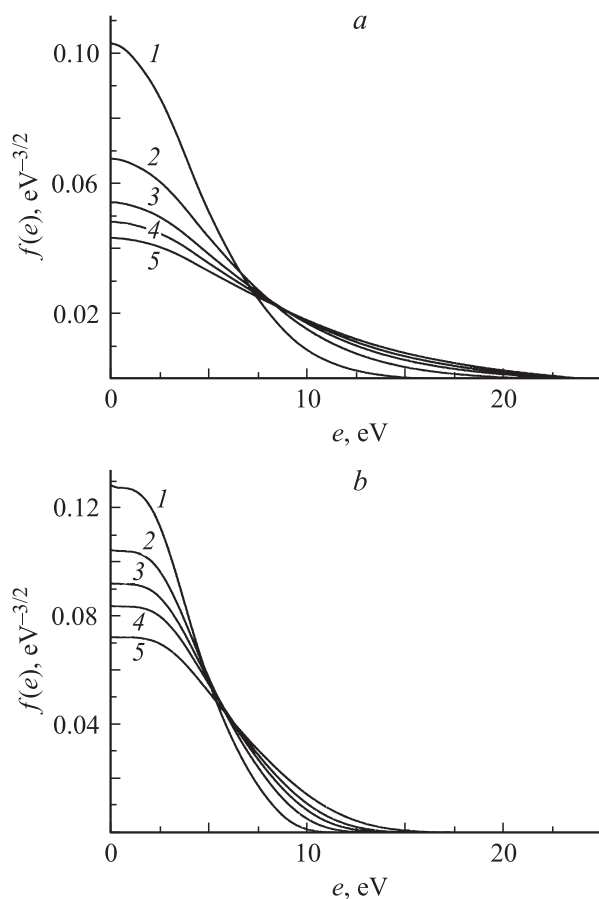


Рис. 4. ФРЭЭ в смесях $p(\text{He})-p(\text{I}_2) = 800-100$ Па (а) и $p(\text{Xe})-p(\text{I}_2) = 800-100$ Па (б), рассчитанные при различных значениях параметра E/N : 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150, 4 — 200, 5 — 300 Td.

Таблица 1. Относительные затраты мощности на электронные процессы в смеси $p(\text{He})-p(\text{I}_2)$ при давлении 800–100 Па

$E/N, \text{Td}$	Возбуждение He, %	Ионизация He, %	Возбуждение I_2 , %	Прилипание I_2 , %	Диссоциация I_2 , %	Ионизация I_2 , %
50	0.28	$5.06 \cdot 10^{-5}$	21.6	0.206	65	12.7
100	1.64	$4.26 \cdot 10^{-4}$	13.5	$5.99 \cdot 10^{-2}$	56	28
150	2.38	$6.62 \cdot 10^{-4}$	11	$3.96 \cdot 10^{-2}$	51.5	35
200	2.72	$7.76 \cdot 10^{-4}$	10.6	$3.34 \cdot 10^{-2}$	49	37
250	2.89	$8.35 \cdot 10^{-4}$	10	$3.07 \cdot 10^{-2}$	48	38
300	2.99	$8.69 \cdot 10^{-4}$	10	$2.93 \cdot 10^{-2}$	48	39

Таблица 2. Относительные затраты мощности на электронные процессы в смеси $p(\text{Xe})-p(\text{I}_2)$ при давлении 800–100 Па

$E/N, \text{Td}$	Возбуждение Xe, %	Ионизация Xe, %	Возбуждение I_2 , %	Прилипание I_2 , %	Диссоциация I_2 , %	Ионизация I_2 , %
50	42.5	0.103	29	0.92	27	$1.42 \cdot 10^{-2}$
100	59	2.17	14	0.23	24	0.233
150	65	5.97	8.95	0.10	19.6	0.575
200	66	9.87	6.46	$5.84 \cdot 10^{-2}$	16.5	0.905
250	66	13	5	$3.78 \cdot 10^{-2}$	14	1.20
300	65	16	4.06	$2.65 \cdot 10^{-2}$	12	1.47

Таблица 3. Скорость электронных процессов в плазме на смеси $p(\text{He})-p(\text{I}_2)$ при давлении 800–100 Па

$E/N, \text{Td}$	50	100	150	200	250	300
Возбуждение He	$6.03 \cdot 10^{-13}$	$1.14 \cdot 10^{-11}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$	$3.45 \cdot 10^{-11}$	$4.03 \cdot 10^{-11}$	$4.4 \cdot 10^{-11}$
Ионизация He	$9.46 \cdot 10^{-17}$	$2.6 \cdot 10^{-15}$	$6.18 \cdot 10^{-15}$	$8.69 \cdot 10^{-15}$	$1.03 \cdot 10^{-14}$	$1.13 \cdot 10^{-14}$
Возбуждение I_2	$1.43 \cdot 10^{-9}$	$2.91 \cdot 10^{-9}$	$3.75 \cdot 10^{-9}$	$4.19 \cdot 10^{-9}$	$4.44 \cdot 10^{-9}$	$4.59 \cdot 10^{-9}$
Ступенчатая ионизация I_2	$2.71 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$7.88 \cdot 10^{-8}$	$8.86 \cdot 10^{-8}$	$9.4 \cdot 10^{-8}$	$9.72 \cdot 10^{-8}$
Прилипание I_2	$6.94 \cdot 10^{-10}$	$6.59 \cdot 10^{-10}$	$6.65 \cdot 10^{-10}$	$6.73 \cdot 10^{-10}$	$6.79 \cdot 10^{-10}$	$6.83 \cdot 10^{-10}$
Диссоциация I_2	$2.66 \cdot 10^{-9}$	$7.46 \cdot 10^{-9}$	$1.05 \cdot 10^{-8}$	$1.21 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$1.36 \cdot 10^{-8}$
Ионизация I_2	$3.57 \cdot 10^{-10}$	$2.64 \cdot 10^{-9}$	$4.85 \cdot 10^{-9}$	$6.24 \cdot 10^{-9}$	$7.06 \cdot 10^{-9}$	$7.58 \cdot 10^{-9}$
Возбуждение I	$8.22 \cdot 10^{-10}$	$2.13 \cdot 10^{-9}$	$2.96 \cdot 10^{-9}$	$3.4 \cdot 10^{-9}$	$3.65 \cdot 10^{-9}$	$3.8 \cdot 10^{-9}$
Ионизация I	$1.17 \cdot 10^{-9}$	$5.95 \cdot 10^{-9}$	$9.97 \cdot 10^{-9}$	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$1.37 \cdot 10^{-8}$	$1.46 \cdot 10^{-8}$
Ступенчатая ионизация I	$6.62 \cdot 10^{-8}$	$9.8 \cdot 10^{-8}$	$1.14 \cdot 10^{-7}$	$1.21 \cdot 10^{-7}$	$1.25 \cdot 10^{-7}$	$1.28 \cdot 10^{-7}$

Таблица 4. Скорость электронных процессов в плазме на смеси $p(\text{Xe})-p(\text{I}_2)$ при давлении 800–100 Па

$E/N, \text{Td}$	50	100	150	200	250	300
Возбуждение Xe	$5.29 \cdot 10^{-11}$	$2.82 \cdot 10^{-10}$	$6.55 \cdot 10^{-10}$	$1.14 \cdot 10^{-9}$	$1.72 \cdot 10^{-9}$	$2.39 \cdot 10^{-9}$
Ионизация Xe	$8.84 \cdot 10^{-14}$	$7.09 \cdot 10^{-12}$	$4.15 \cdot 10^{-11}$	$1.17 \cdot 10^{-10}$	$2.4 \cdot 10^{-10}$	$4.12 \cdot 10^{-10}$
Ступенчатая ионизация Xe	$2.16 \cdot 10^{-7}$	$2.59 \cdot 10^{-7}$	$2.85 \cdot 10^{-7}$	$3.05 \cdot 10^{-7}$	$3.21 \cdot 10^{-7}$	$3.35 \cdot 10^{-7}$
Возбуждение I_2	$4.79 \cdot 10^{-10}$	$8.7 \cdot 10^{-10}$	$1.18 \cdot 10^{-9}$	$1.46 \cdot 10^{-9}$	$1.71 \cdot 10^{-9}$	$1.94 \cdot 10^{-9}$
Ступенчатая ионизация I_2	$6.34 \cdot 10^{-9}$	$1.41 \cdot 10^{-8}$	$2.08 \cdot 10^{-8}$	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$3.26 \cdot 10^{-8}$	$3.79 \cdot 10^{-8}$
Прилипание I_2	$7.65 \cdot 10^{-10}$	$7.2 \cdot 10^{-10}$	$6.92 \cdot 10^{-10}$	$6.72 \cdot 10^{-10}$	$6.57 \cdot 10^{-10}$	$6.46 \cdot 10^{-10}$
Диссоциация I_2	$2.71 \cdot 10^{-10}$	$9.1 \cdot 10^{-10}$	$1.6 \cdot 10^{-9}$	$2.3 \cdot 10^{-9}$	$3.01 \cdot 10^{-9}$	$3.72 \cdot 10^{-9}$
Ионизация I_2	$9.83 \cdot 10^{-14}$	$6.13 \cdot 10^{-12}$	$3.23 \cdot 10^{-11}$	$8.68 \cdot 10^{-11}$	$1.74 \cdot 10^{-10}$	$2.99 \cdot 10^{-10}$
Возбуждение I	$1.28 \cdot 10^{-10}$	$3.4 \cdot 10^{-10}$	$5.51 \cdot 10^{-10}$	$7.56 \cdot 10^{-10}$	$9.55 \cdot 10^{-10}$	$1.15 \cdot 10^{-9}$
Ионизация I	$5.05 \cdot 10^{-12}$	$7.82 \cdot 10^{-11}$	$2.54 \cdot 10^{-10}$	$5.24 \cdot 10^{-10}$	$8.76 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-9}$
Ступенчатая ионизация I	$4.06 \cdot 10^{-8}$	$5.45 \cdot 10^{-8}$	$6.36 \cdot 10^{-8}$	$7.09 \cdot 10^{-8}$	$7.7 \cdot 10^{-8}$	$8.24 \cdot 10^{-8}$

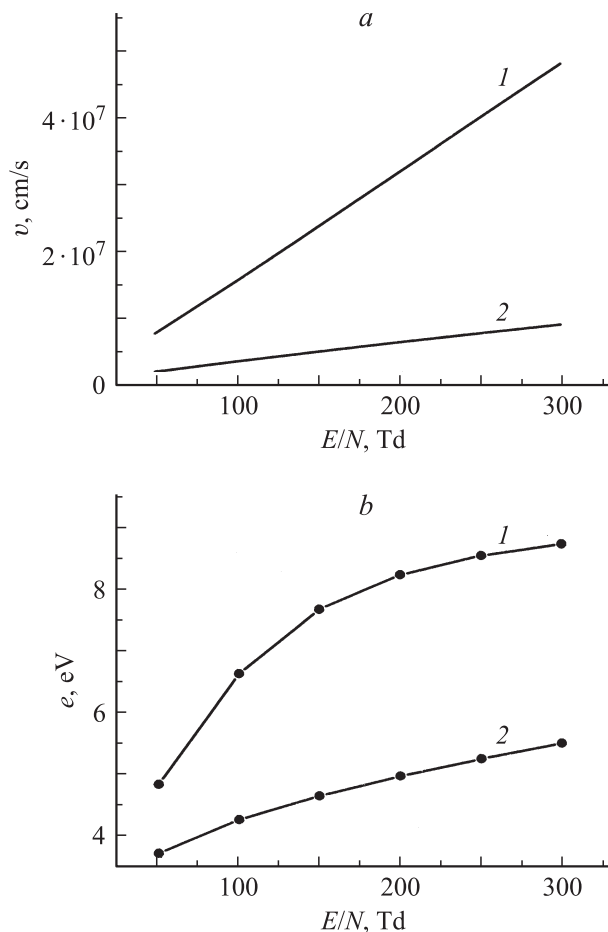


Рис. 5. Зависимости скоростей дрейфа (а) и средних энергий (б) электронов в смесях $p(\text{He})-p(\text{I}_2) = 800-100 \text{ Pa}$ (1) и $p(\text{Xe})-p(\text{I}_2) = 800-100 \text{ Pa}$ (2) от величины параметра E/N поля.

марного иода не принимались во внимание. Это связано с тем, что, во-первых, концентрации атомарного иода и возбужденных атомов и молекул существенно зависят от времени горения разряда и, во-вторых, их величины на несколько порядков ниже, чем концентрации исходных компонент смеси (He, Xe, I₂).

Видно, что в связи со слишком высокими порогами возбуждения и ионизации атомов гелия подавляющая часть мощности в смеси He-I₂ расходуется на реакции с участием галогена. Незначительные затраты мощности на процесс прилипания электронов к галогену объясняются очень низким порогом этого процесса, близким к нулю. Увеличение электрического поля приводит к росту числа быстрых электронов в разряде и возрастанию роли процессов ионизации иода, возбуждения и ионизации гелия.

В смеси на основе ксенона затраты мощности на возбуждение и ионизацию инертного газа существенно выше. Сравнимые пороги процессов с участием ксенона и иода приводят к тому, что при низких полях мощность распределяется между ними примерно поровну. По мере

увеличения электрического поля доля энергии, расходуемой на реакции с участием инертного газа, возрастает.

Значения скоростей основных электронных процессов в рассмотренных смесях в зависимости от величины электрического поля в разряде представлены в табл. 3 и 4.

Максимальными скоростями обладают процессы с наименьшими порогами — ступенчатая ионизация ксенона и иода, минимальными — реакции возбуждения и ионизации атомов гелия. Для всех процессов характерен рост скорости по мере увеличения электрического поля. Единственным исключением является процесс диссоциативного прилипания электронов к молекулам иода, обладающий практически нулевым порогом, и соответственно не зависящий от числа быстрых электронов в разряде.

Изменение электрического поля в разряде в диапазоне 50–300 Td приводит к росту скорости большинства процессов не более чем на один порядок. Лишь скорость ионизации гелия возрастает при этом на четыре порядка, что связано с ее резкой зависимостью от числа высокоэнергетических электронов в разряде.

Очевидно, что скорость возбуждения и ионизации инертного газа в смеси Xe-I₂ выше, чем в смеси He-I₂ за счет более низких порогов возбуждения и ионизации ксенона. Что касается процессов с участием молекулярного и атомарного иода, их скорость в гелиевой смеси заметно превышает соответствующие значения в смеси на основе ксенона. Это объясняется существенно большим числом высокоэнергетических электронов в разряде на гелиевой смеси, обеспечивающих эффективное возбуждение, ионизацию и диссоциацию молекул иода.

Таким образом, установлено, что продольный тлеющий разряд низкого давления в двойных смесях He-I₂ и Xe-I₂ является мощным и достаточно эффективным источником УФ-излучения на спектральной линии атома иода (206.2 nm) и полосах 253 nm XeI (B-X), 342 nm I₂ (D'-A'). Наибольшая мощность УФ-излучения достигала 20–25 W при коэффициенте полезного действия 10–18%. Ресурс работы источника излучения в газостатическом режиме не превышал 500 h. Полученные при численном моделировании параметры плазмы могут использоваться для качественного объяснения распределения излучения в спектре лампы, а также при расчетах кинетики процессов и ее выходных характеристик.

Авторы выражают благодарность Г.Н. Зверевой за предоставление эффективных сечений взаимодействия электронов с молекулами иода.

Список литературы

- [1] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [2] Lomaev M.I., Tarasenko V.F. // Proc. SPIE 2002. Vol. 4747. P. 390–398.

- [3] Шуаибов О.К., Шимон Л.Л., Грабова А.И. // Журнал фізичних досліджень. 2004. Т. 8. № 4. С. 338–345.
- [4] Шуаибов А.К., Грабовая И.А., Шимон Л.Л. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 3. С. 31–35.
- [5] Voichenko A.M., Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2004. N 1. P. 1–14.
- [6] Voichenko A.M., Lomaev M.I., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2004. N 8. P. 1036–1049.
- [7] Шуаибов А.К., Шевера И.В., Малинина А.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 20. С. 30–36.
- [8] Ультрафіолетова лампа неперервної дії / О.К. Шуаибов, Л.Л. Шимон, І.А. Грабова. Пат. 76008 Україна. Заяв. 04.11.03. Опубл. 15.09.04. Бюл. № 6.
- [9] Свойства неорганических соединений / Справочник. Л.: Химия, 1983. С. 304.
- [10] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ПТЭ. 2002. № 1. С. 104–106.
- [11] Цендин Л.Д. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 12. С. 2318–2322.
- [12] Головинский П.М., Щедрин А.И. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 1. С. 51–56.
- [13] Rejoub R., Lindsay B.G., Stebbings R.F. // Phys. Rev. A. 2002. Vol. 65. P. 042713.
- [14] <http://www.kinema.com/sigmalib.dat>
- [15] Saha H.P. // Phys. Rev. A. 1989. Vol. 40. P. 2976–2990.
- [16] Fons T., Lin C.C. // Phys. Rev. A. 1998. Vol. 58. P. 4603–4615.
- [17] Hutan H.A. // Phys. Rev. A. 1979. Vol. 20. P. 855–859.
- [18] Tam W.-Ch., Wong S.F. // J. Chem. Phys. 1978. Vol. 68. P. 5626–5630.
- [19] Волкова Г.А., Зверева Г.Н. // Опт. и спектр. 2004. Т. 96. № 3. С. 419–427.