

04;07;12

Электроразрядный ультрафиолетовый эксимерно-галогенный излучатель на смеси гелия и ксенона с парами иода

© А.К. Шуаибов, И.А. Грабовая

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

(Поступило в Редакцию 18 июля 2003 г.)

Исследованы характеристики малогабаритной ультрафиолетовой (УФ) лампы низкого давления, излучающей на резонансной линии атома иода (206 nm), иодиде ксенона (253 nm) и димерах иода (342 nm). Накачка лампы проводилась продольным тлеющим разрядом постоянного тока при межэлектродном расстоянии 19 см. Рабочей средой излучателя служили газовые смеси He/J₂ и He/Xe/J₂ при общем давлении 50–1500 Па. Приводятся результаты оптимизации электроразрядной эксимерно-галогенной лампы в зависимости от давления и состава газовых смесей, а также мощности, вкладываемой в разрядную плазму. Показано, что суммарная мощность УФ излучения в спектральном диапазоне 200–350 nm со всей рабочей апертуры лампы достигает 5–7 W при КПД ≤ 5%.

Введение

В настоящее время значительное развитие получили различные оптические технологии в области микроэлектроники, экологии и медицины, связанные с использованием мощных источников спонтанного или лазерного излучения [1,2]. Это значительно стимулировало исследование эмиссионных характеристик плазмы разного типа электрических разрядов низкого и среднего давления в смесях инертных газов и молекул галогеносителей. Наиболее мощные и эффективные эксимерно-галогенные лампы были разработаны на основе тлеющего разряда постоянного тока, которые выборочно или полностью перекрывали спектральный диапазон 160–353 nm [3–15]. Но такие лампы детально исследованы только при работе на смесях тяжелых инертных газов с молекулами Cl₂ и HCl. Эти рабочие среды являются достаточно агрессивными, поэтому ресурс работы соответствующих излучателей с оголенными металлическими электродами в газостатическом режиме не превышает 50–100 h [3]. При разогреве катода лампы уже при разрядных токах, превышающих 20–30 mA, наблюдается сильное уменьшение концентрации хлоросодержащих газов горячими электродами. Поэтому для увеличения ресурса работы отпаянных эксимерно-галогенных ламп до 1000 и более часов приходится использовать менее эффективные и технически более сложные способы накачки с использованием емкостного и барьерного разрядов [15–17]. Исходя из этого, актуальным является переход к менее агрессивным, чем хлор, молекулам Br₂, J₂, которые позволяют увеличить как ресурс излучения эксимерно-галогенных ламп постоянного тока, так и дополняют излучение полос эксимерных молекул и димеров галогенов излучением резонансной линии 206 nm J^{*}I. В недавно опубликованной работе [18] сообщалось о достижении ресурса

работы отпаянной иодной лампы с накачкой тлеющим разрядом до 1000 h. Основное внимание в данной работе было уделено исследованию излучения резонансной линии атома иода (206 nm). Условия образования молекул XeJ^{*} и J₂^{*} и их вклад в суммарное излучение лампы постоянного тока оставались не изученными.

В настоящей работе приводятся результаты исследования выходных характеристик эксимерно-галогенной лампы, работающей на смесях He/J₂ и He/Xe/J₂ с накачкой тлеющим разрядом.

Условия и техника эксперимента

Продольный тлеющий разряд постоянного тока зажигался в кварцевой трубке, прозрачной до 190 nm. Расстояние между катодом и анодом составляло 19 см. Внутренний диаметр разрядной трубки равнялся 1.4 см. В лампе использовались полые цилиндрические электроды из листового никеля длиной 1.5 см и внешним диаметром 1.4 см. Кристаллы иода размещались в специальном отростке за анодом (рис. 1).

Оптические характеристики плазмы тлеющего разряда регистрировались при помощи фотоумножителя ФЭУ-106 и дифракционного монохроматора МДР-2 (решетка 1200 штрихов на mm). Фотоумножитель и мо-

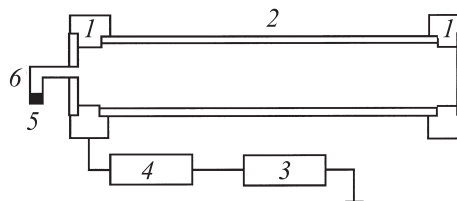


Рис. 1. Схема эксимерно-галогенной лампы: 1 — электроды, 2 — кварцевая трубка, 3 — высоковольтный блок питания, 4 — ограничительное сопротивление, 5 — кристаллический иод, 6 — отросток для иода.

нохроматор калибровались по величине относительной спектральной чувствительности в спектральном диапазоне 190–400 нм. Тлеющий разряд в лампе зажигался с использованием высоковольтного выпрямителя, рассчитанного на работу при среднем токе ≤ 50 мА и напряжении ≤ 25 кВ. Кварцевая трубка вакуумировалась перед заправкой инертными газами до остаточного давления 5–7 Па. Разрядная трубка охлаждалась вентилятором так, что температура отрустка с иодом была близка к комнатной и при максимальном энерговыделении в разряд не превышала ее более чем на 10–15 градусов. Давление паров иода в эксперименте оценивалось по наиболее холодной части разрядной трубки и в процессе работы не превышало 100–200 Па [19]. Измерение электрических характеристик разряда и полной мощности УФ излучения лампы проводилось по методике, приведенной в наших работах [20,21].

Характеристики лампы

Однородный тлеющий разряд постоянного тока в смесях инертных газов с парами иода формировался при давлении $P(\text{He})$ и $P(\text{Xe}) \leq 150$ –200 Па и среднем токе ≥ 30 –40 мА. При уменьшении тока тлеющего разряда с 50 до 3–5 мА на фоне слабого диффузного разряда наблюдался яркий плазменный шнур, диаметр которого уменьшался от 10 до 2 мм. При давлении инертного газа, превышающем 1 кПа, разряд во всем исследованном диапазоне токов существовал в форме плазменного шнура на фоне однородного слаботокового тлеющего разряда, что соответствует существованию исследуемого разряда в режиме динамического контрагирования.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) тлеющего разряда в смесях He/J_2 и $\text{He}/\text{Xe}/\text{J}_2$ представлены на рис. 2. ВАХ исследуемого разряда в смеси He/J_2 были близкими к ВАХ поднормальной стадии, а в смеси HeXe/Cl_2 они соответствовали слабовыраженной

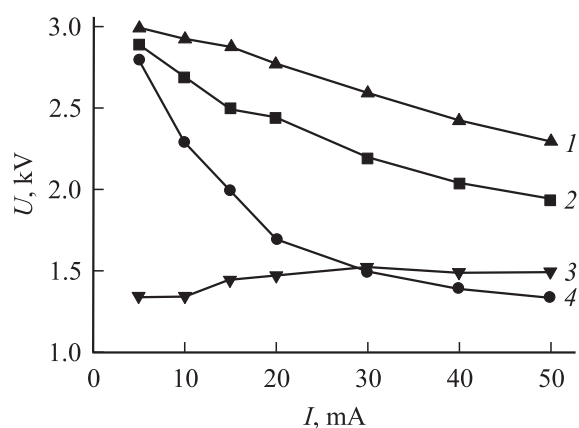


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока на смесях He/J_2 (1, 2, 4) и $\text{He}/\text{Xe}/\text{J}_2$ (3), где $P(\text{He}) = 130$ (1), 400 (2), 1600 Па (4) и $P(\text{He})/P(\text{Xe}) = 400/120$ Па (2).

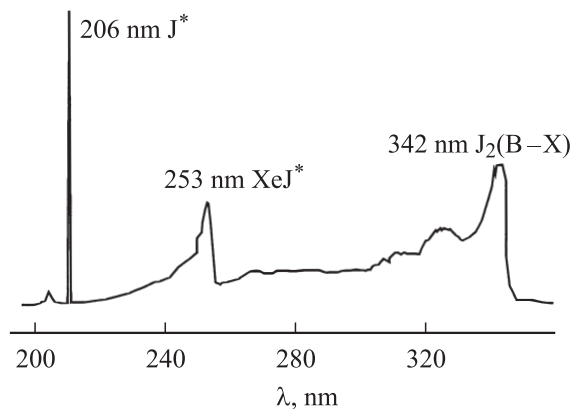


Рис. 3. УФ спектры излучения плазмы тлеющего разряда на смеси He/J_2 при $P(\text{He}) = 400$ Па и $\text{He}/\text{Xe}/\text{J}_2$ при $P(\text{He})/P(\text{Xe}) = 400/120$ Па.

аномальной стадии тлеющего разряда. С увеличением $P(\text{He})$ в смеси He/J_2 разряд переходит в режим динамического контрагирования, потенциал зажигания разряда уменьшается, а скорость спада напряжения с увеличением разрядного тока возрастает. В связи с наличием в плазме значительного количества отрицательных ионов и разными скоростями диффузии электронов и отрицательных ионов иода в направлении радиуса разрядной трубки в ее центральной части происходит формирование ион-ионной плазмы, что приводит к значительному различию в формах ВАХ в электроотрицательных и электроположительных газовых средах. В тлеющем разряде на смеси Xe/J_2 при $P(\text{Xe}) = 130$ –1600 Па наблюдалась аналогичная картина трансформации формы ВАХ в зависимости от величины $P(\text{Xe})$, только скорость спада напряжения с увеличением тока разряда была в 2–3 раза меньше (ВАХ при токах $I_{\text{ch}} \geq 20$ мА были более пологими и близкими к ВАХ нормального тлеющего разряда). Небольшие примеси ксенона к смеси He/J_2 приводили к двукратному снижению потенциала зажигания разряда (кривая 3 на рис. 2) и формированию плато на ВАХ в диапазоне $I_{\text{ch}} = 20$ –50 мА.

Спектры излучения плазмы тлеющего разряда в смеси He/J_2 и $\text{He}/\text{Xe}/\text{J}_2$ представлены на рис. 3. В плазме на основе смеси гелия с парами иода выделялись резонансная линия атома иода с $\lambda = 206$ нм и система полос молекул $\text{J}_2(\text{B-X})$ в диапазоне 320–342 нм, а в разряде на тройной смеси к ним присоединяется и полоса 253 нм $\text{XeJ}(\text{B-X})$. В тлеющем разряде на смеси He/J_2 при $P(\text{He}) = 400$ Па распределение мощности УФ излучения было таким: $I(206 \text{ нм})/I(342 \text{ нм}) = 52/48\%$, а в смеси $\text{He}/\text{Xe}/\text{J}_2$ при $P(\text{He})/P(\text{Xe}) = 400/120$ Па оно составляло $I(206 \text{ нм})/I(253 \text{ нм})/I(342 \text{ нм}) = 54/9/37\%$. За счет довольно большой ширины полос излучения молекул XeJ^* и J_2^* значительная часть УФ излучения плазмы в лампе представлена в виде молекулярных полос.

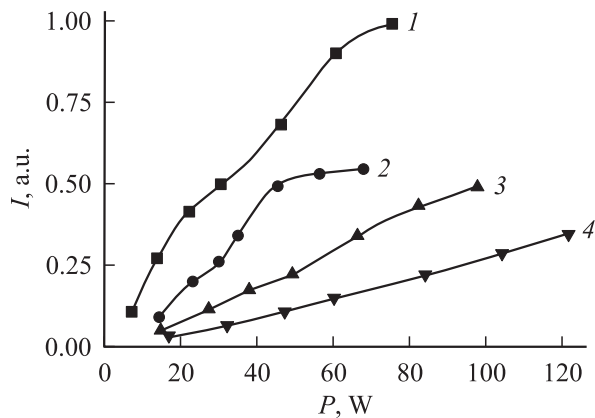


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения резонансной линии атома йода 206 nm от величины мощности, вкладываемой в тлеющий разряд, на смесях He/Xe/J₂ (1) и He/J₂ (2–4), где $P(\text{He})/P(\text{Xe}) = 400/120$ (1); $P(\text{He}) = 1600$ (2), 400 (3), 130 Pa (4).

Зависимость интенсивности излучения резонансной линии йода от величины мощности, вложенной в разряд, представлена на рис. 4. Все эти зависимости (за исключением кривых для явно выраженного режима динамического контрагирования тлеющего разряда в смеси He/J₂) имели возрастающий характер, близкий к линейному. При увеличении $P(\text{He})$ и особенно при добавках ксенона в рабочую смесь увеличивается скорость роста интенсивности излучения спектральной линии 206 nm. Такой характер поведения интенсивности излучения в зависимости от состава рабочих смесей может быть обусловлен повышением температуры наиболее холодной части разрядной трубки в определенных газовых смесях и увеличением плотности паров йода. Из рис. 3 также следует, что с увеличением давления смеси He/J₂ (и переходом в режим контрагирования) эффективность образования возбужденных атомов йода в плазменном шнуре увеличивается.

Типичные зависимости амплитуды полос излучения молекул XeJ* и J₂* в зависимости от величины электрической мощности тлеющего разряда представлены на рис. 5. Для плазмы на смеси He/Xe/J₂ наибольшей была амплитуда полосы 342 nm J₂(B–X). В разряде на тройной смеси зависимости амплитуды полос от величины энерговклада в плазму были линейно возрастающими с разными коэффициентами скорости роста при токах $I_{\text{ch}} = 5\text{--}20\text{ mA}$ и $25\text{--}50\text{ mA}$. Максимальное увеличение амплитуды полос молекул XeJ* и J₂* было получено при малых токах тлеющего разряда. В разряде на смеси He/J₂ наибольшая яркость полосы 342 nm наблюдалась при $P(\text{He}) = 130\text{ Pa}$, а ее скорость роста уменьшалась с увеличением парциального давления гелия в смеси.

Максимальная величина суммарной мощности УФ со всей рабочей апертуры эксимерно-галогенной лампы достигала 5–7 W при КПД ≤ 5%. Ресурс работы лампы на

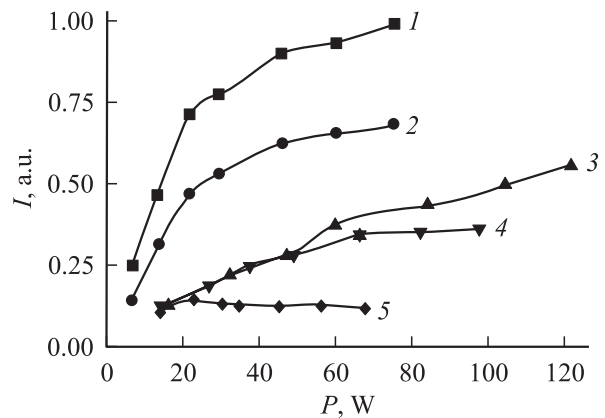


Рис. 5. Зависимость амплитуды полос излучения 342 nm J₂(B–X) (1, 3–5) и 253 nm XeJ(B–X) в тлеющем разряде на смесях He/Xe/J₂ (1, 2) и He/J₂ (3–5), где $P(\text{He})/P(\text{Xe}) = 400/120$ (1, 2); $P(\text{He}) = 130$ (3), 400 (4), 1600 Pa (5).

исследуемых смесях в газостатическом режиме достигал 400–500 часов.

Таким образом, исследование выходных характеристик малогабаритной эксимерно-галогенной лампы на смесях гелия и ксенона с парами йода и накачкой тлеющим разрядом постоянного тока показало, что в данной лампе по сравнению с излучением на $\lambda = 206\text{ nm}$ J*I существенным является и излучение полос 253 nm XeJ(B–X) и 342 nm J₂(B–X); наибольшая мощность суммарного УФ излучения лампы достигает 7 W с КПД ≤ 5%; ресурс работы лампы в газостатическом режиме ≤ 500 h.

Список литературы

- [1] Boyd I.W., Zhang J.-Y. // Materials Research Society. 2000. Vol. 617. P. J4.4.1–J4.4.12.
- [2] Polunin G.S., Kourenkov V.V., Polunina E.G. // J. Refractive Surgery. 1998. Vol. 14. N 2. P. S230–S234.
- [3] Головицкий А.П., Кан С.Н. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 3. С. 604–609.
- [4] Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 2. С. 64–68.
- [5] Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 3. С. 389–392.
- [6] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Квантовая электрон. 2001. Т. 31. № 4. С. 371–372.
- [7] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 8. С. 121–124.
- [8] Шуаибов А.К. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 138–142.
- [9] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 5. С. 753–755.
- [10] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Дащенко А.И. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 12. С. 1147–1152.
- [11] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Дащенко А.И. // Декларационный патент Украины. № 53509 А. Заявлен 20.06.2002. Опубликовано 15.01.2003. БИ. № 1.

- [12] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Дащенко А.И. // Декларационный патент Украины. № 55724 А. Заявлен 24.05.2002. Опубликовано 15.04.2003. БИ. № 4.
- [13] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 2. С. 337–339.
- [14] Шуаибов А.К., Шевера И.В., Дащенко А.И. // ЖПС. 2003. Т. 70. № 1. С. 129–133.
- [15] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [16] Falkenstein Z., Coogan J.J., Sakai Y. // J. Phys. D. 1997. Vol. 30. P. 2704–2710.
- [17] Oda A., Sugawara H., Sakai Y., Akasi H. // J. Phys. D. 2000. Vol. 33. P. 1507–1513.
- [18] Lomaev M.I., Tarasenko V.F. // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4747. P. 390–398.
- [19] Свойства неорганических соединений. Справочник. Л.: Химия, 1983.
- [20] Shuaibov A.K., Shimon L.L., Dashchenko A.I., Shevera I.V. // J. Phys. Stud. 2001. Vol. 5. N 2. P. 131–138.
- [21] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ПТЭ. 2002. № 1. С. 104–106.