

02;04;07

## Эмиссионные характеристики импульсно-периодического барьерного разряда в смесях гелий–йод и аргон–йод

© А.К. Шуаибов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки, И.В. Шевера

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

(Поступило в Редакцию 16 июня 2010 г.)

Приведены эмиссионные характеристики импульсно-периодического барьерного разряда с импульсами возбуждения субмикросекундной длительности ( $f = 40\text{--}1000\text{ Hz}$ ) в смесях He–I<sub>2</sub>, Ar–I<sub>2</sub>. Исследование выполнено в спектральной области 200–400 nm при давлении рабочей среды 1–100 kPa и парциальном давлении паров йода 130–200 Pa. Проведена экспериментальная оптимизация ультрафиолетового (УФ) излучения плазмы барьерного разряда на полосе 342 nm I<sub>2</sub>(D' → A') и спектральной линии атома йода 206.2 nm в зависимости от парциального давления гелия и аргона, частоты следования импульсов возбуждения и величины напряжения зарядки рабочей емкости модулятора коротких высоковольтных импульсов. Определен вклад спектральной линии излучения 206.2 nm I\* в суммарное УФ-излучение барьерного разряда.

### Введение

Исследование ультрафиолетового излучения плазмы низкой плотности на основе смесей He и Ar с парами йода позволило разработать достаточно мощные и эффективные лампы на переходах атома йода ( $\lambda = 206.2, 183.0, 170.2, 161.8$  и  $150.7\text{ nm}$ ), а также на системе электронно-колебательных полос молекулы йода с максимумом при 342 nm I<sub>2</sub>(D → A) [1–5]. Для накачки использовался продольный тлеющий разряд субмикросекундной длительности. Применение тлеющего разряда позволяет получать значительную среднюю мощность УФ-излучения на переходах атома и молекулы йода, а также полосе излучения 253 nm XeI(B → X) до 30–40 W при коэффициенте полезного действия  $\eta = 8\text{--}12\%$  [6,7]. Возбуждение лампы низкого давления емкостным разрядом позволяет увеличить ресурс работы излучателя в отпаянном режиме от  $10^3$  до  $(2\text{--}3) \cdot 10^3\text{ h}$ , хотя импульсная мощность при этом остается сравнительно малой. При небольшой плотности смесей He–I<sub>2</sub>, Ar–I<sub>2</sub> соотношение между средней мощностью излучения полосы 342 nm I<sub>2</sub>(D' → A') и суммарной мощностью спектральных линий йода (в диапазоне длин волн 210–150 nm) составляло примерно 50 : 50%.

Для ряда оптических технологий, например, таких как сушка лаков и красок, а также в фотомедицине [8,9] необходимы источники ближнего УФ-излучения в спектральном диапазоне 330–390 nm. При этом более коротковолновое излучение на переходе атома йода (206.2 nm) может играть отрицательную роль и необходимо предпринимать специальные меры к устранению его из спектра излучения лампы.

В этом спектральном диапазоне может использоваться излучение лампы барьерного разряда на смеси Ar–N<sub>2</sub> [10], излучение которой находится в спектральном диапазоне 300–390 nm, но оно состоит примерно из 7–10 ярких молекулярных полос, а не сконцентри-

ровано в сравнительно узком диапазоне длин волн. Эффективность УФ-излучателей на молекулах азота по сравнению с эксиплексными лампами в 5–10 раз ниже. Газоразрядные лампы на основе полосы 351–353 nm XeF(B → X) имеют слишком агрессивную рабочую среду на основе молекул фтора [11].

В области ближнего ультрафиолета перспективным может оказаться использование излучения молекул йодида галлия. На основании полосы излучения молекулы GaI\*, которая занимает спектральный диапазон  $\Delta\lambda = 385\text{--}400\text{ nm}$  с максимумом при 392 nm GaI(A<sup>3</sup>P<sub>0</sub> – X<sup>1</sup>Σ)(0-0), а также интенсивных спектральных линий атома галлия 403.3 и 417.2 nm создана микроволновая лампа низкого давления на смесях Ar–GaI<sub>3</sub>(GaI<sub>2</sub>) ( $p \leq 1300\text{ Pa}$ ) [12]. Она выгодно отличается от лампы барьерного разряда на галогенидах ртути [13] сравнительно низкой температурой разрядной колбы с парами рабочего соединения ( $t \approx 100^\circ\text{C}$ ), по сравнению, например, с лампой на молекулах бромида ртути ( $t \approx 150\text{--}160^\circ\text{C}$ ). Эффективность этой лампы достигает 30–40%. К недостаткам галлиевой лампы при ее использовании в технологиях „мягкого“ ультрафиолета является наличие интенсивных спектральных линий в диапазоне длин волн 250–300 nm.

В работе [14] исследовались характеристики лампы барьерного разряда с рабочей средой на основе аргона, неона и паров йода. Показано, что она излучает преимущественно на полосе 342 nm I<sub>2</sub>(D' → A'); добавка неона на уровне 5% к смеси Ar–I<sub>2</sub> увеличивает эффективность и мощность излучения лампы примерно в 2–2.5 раза при возбуждении разряда импульсами в форме меандра с амплитудой 5.5 kV и длительностью в несколько микросекунд ( $f = 18\text{--}120\text{ kHz}$ ) и электрической мощности разряда  $\sim 70\text{ W}$ .

Для улучшения теплоотвода от барьерного разряда на парах йода перспективным является использование гелия в качестве буферного газа, поскольку при

перегреве лампы и выходе плотности паров йода за оптимальные пределы наблюдается резкое снижение мощности УФ-излучения на полосе 342 нм и спектральной линии 206.2 нм. Но эмиссионные характеристики барьерного разряда в смеси He–I<sub>2</sub> систематически не исследовались, что сдерживает разработку мощных отпаянных ламп барьерного разряда для области „ближнего“ ультрафиолета (полоса 342 нм I<sub>2</sub>(D' → A')). Для увеличения импульсной мощности УФ-излучения полосы 342 нм I<sub>2</sub>(D' → A') перспективным является переход к режиму возбуждения в импульсно-периодическом барьерном разряде субмикросекундной длительности при умеренной частоте повторения импульсов накачки ( $f \leq 1000$  Hz), когда разряд в лампе носит объемный характер и филаменты практически не проявляются. Использование барьерного разряда по сравнению с продольным тлеющим и емкостным разрядами позволяет перераспределить мощность УФ-излучения плазмы в пользу полосы молекулы йода по сравнению с излучением атомов йода, что важно для освоения участка „ближнего“ ультрафиолета.

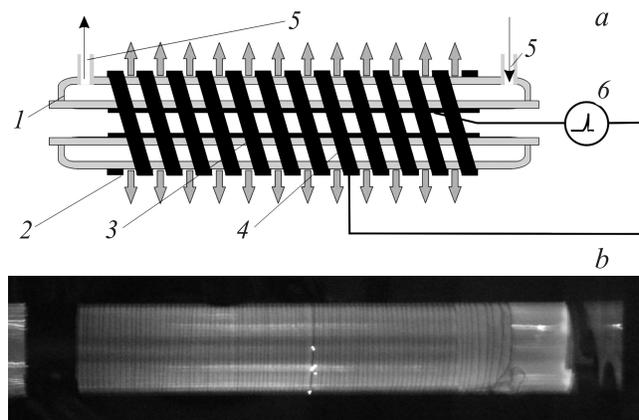
В настоящей работе приведены результаты сравнительного исследования излучательных характеристик импульсно-периодического барьерного разряда в смесях He–I<sub>2</sub> и Ar–I<sub>2</sub>.

## Методика, техника и условия эксперимента

Для достижения высокого ресурса излучения в газостатическом режиме лампы, в которой применяются рабочие смеси инертных газов с парами йода, в эксперименте использовался барьерный разряд с двумя диэлектрическими барьерами. В отличие от схемы возбуждения барьерного разряда в лампе (рабочая среда: смесь аргона с парами йода), описанной в работе [14], в настоящей работе для поджига разряда использован высоковольтный модулятор субмикросекундных импульсов на основании водородного тиратрона ТГИ I 1000/25 с частотой повторения импульсов в диапазоне 40–1000 Hz. Применение коротких мощных импульсов накачки позволяет получать повышенную импульсную мощность УФ-излучения на переходах атома и молекулы йода при сравнительно небольших частотах следования импульсов тока.

Для диагностики барьерного разряда в смесях инертных газов и паров йода использовалась экспериментальная установка, которая позволяет исследовать электрические, временные и спектральные характеристики плазмы. Установка состояла из разрядной колбы, высоковольтного импульсно-периодического модулятора, вакуумной газосмесительной системы, монохроматора с фотоумножителем, системы регистрации оптических и электрических сигналов.

Для проведения экспериментов использовалась двухбарьерная разрядная колба, конструкция которой представлена на рис. 1, а. Диаметр внешней трубки с толщи-



**Рис. 1.** Конструкция импульсно-периодической ультрафиолетовой лампы барьерного разряда: 1 — кварцевая колба; 2 — внешний электрод; 3 — внутренний электрод; 4 — разрядный промежуток; 5 — патрубок для откачки и напуска рабочего газа; 6 — высоковольтный импульсно-периодический модулятор (а): общий вид разряда в смеси гелия с парами йода (б).

ной стенки 1.5 мм равнялся 24 мм, внешний диаметр внутренней трубки с толщиной стенки 1.5 мм составлял 12 мм, а междуэлектродное расстояние составляло 4.5 мм, длина колбы — 450 мм. Электродная система изготавливалась с никелевой проволокой, намотанной на внешнюю трубку с шагом 2 мм и общей длиной 150 мм, а во внутренней трубке был расположен алюминиевый цилиндрический стержень соответствующего диаметра и длины. Для совместного излучения на переходе с  $\lambda = 206.2$  и 342 нм I<sub>2</sub>(D' → A') колба разрядного устройства изготавливалась из кварца КУ-1, а для чисто молекулярного излучения полосы йода использовалась аналогичная колба, изготовленная из кварца марки КВ, непрозрачного в спектральной области  $\lambda < 230$ –240 нм.

Импульсно-периодический барьерный разряд, при его возбуждении биполярными высоковольтными субмикросекундными импульсами амплитудой  $\pm 20$ –25 кВ и током до 150 А с небольшой частотой повторения ( $f \leq 1$  kHz), сразу переходил в объемную стадию горения, которая характеризовалась высокой пространственной однородностью (рис. 1, б). Микроарядная стадия горения разряда с присутствием филаментов в эксперименте не проявлялась. Излучение барьерного разряда исследовалось в спектральном диапазоне 200–450 нм с использованием монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106. Измерение контура линии излучения 206.2 нм проводилось с использованием голографической решетки (2400 stroke/mm), что позволило сравнивать интенсивность атомарной линии йода и яркость полос излучения с максимумом при 342 нм. Импульсы разрядного тока и напряжения на электродах регистрировались при помощи малоиндуктивного шунта, емкостного делителя и скоростного осциллографа БЛОР-04.

В процессе оптимизации УФ-излучения разряда варьировались давление инертных газов, частота повторения импульсов накачки и величина напряжения заряда рабочих конденсаторов высоковольтного модулятора. В разрядном устройстве (колбе) помещался кусочек йода особой чистоты весом примерно 0.1–0.2 г. Температурный режим разряда регулировался путем ее охлаждения направленной струей воздуха от вентилятора. Температура наиболее холодной части колбы выбиралась в диапазоне давлений насыщенных паров йода 150–200 Па.

### Эмиссионные характеристики плазмы

На рис. 2 представлен спектр излучения плазмы импульсно-периодического барьерного разряда в смеси He–I<sub>2</sub> ( $p = 40$  кПа), который приведен к относительной спектральной чувствительности системы регистрации излучения. Наиболее ярким было излучение полосы молекулы йода с максимумом при  $\lambda = 342$  нм I<sub>2</sub>(D' → A'), которая дополнялась узкой спектральной линией атома йода — 206.2 нм. Оценки ширины этой спектральной линии, проведенные в режиме медленного сканирования спектра с использованием голографической решетки и узких входной и выходной щелей ( $\Delta h = 0.05$  мм), показали, что она равняется  $\sim 0.1$  нм. Это позволило сравнить интенсивность спектральной линии 206.2 нм и суммарную яркость электронно-колебательных полос молекулы йода, за которую принималась площадь под кривой в спектральном диапазоне 300–350 нм. Таким образом, было установлено, что отношение  $I_{\max}(206.2 \text{ нм}) : I_{\max}(342 \text{ нм})$  для оптимальной смеси Ar–I<sub>2</sub> (рис. 3, 4) составляло примерно 5:250 а.е., а для гелиевой смеси 4:175 а.е. В спектре излучения барьерного разряда в смеси Ar–I<sub>2</sub> регистрировались и полосы OH(C → A) с максимумом в области  $\lambda \approx 309$  нм, яркость которой была лишь в 2–3 раза ниже яркости полос молекулы йода. Присутствие небольшого

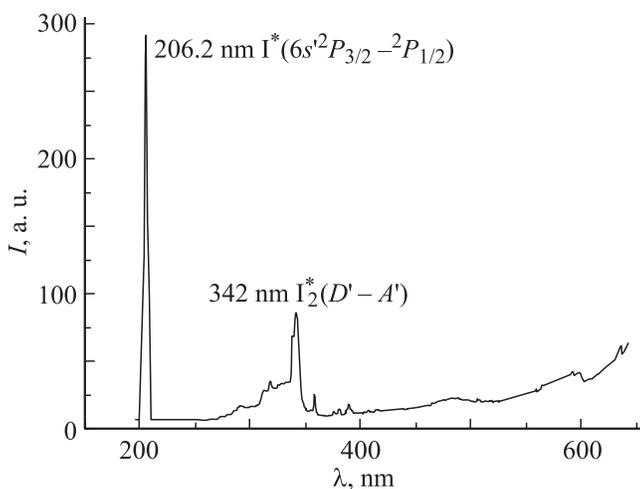


Рис. 2. Спектр излучения лампы барьерного разряда на основе смеси He–I<sub>2</sub> при  $p(\text{He}) = 40$  кПа.

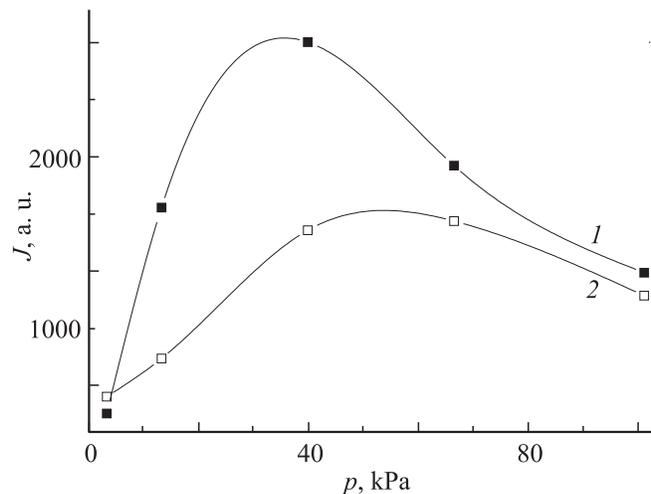


Рис. 3. Зависимость яркости излучения спектральной полосы молекулы йода 342 нм I<sub>2</sub>(D' → A') лампы на основе смесей Ar–I<sub>2</sub> (1) и He–I<sub>2</sub> (2) от давления инертных газов ( $U_{\text{ch}} = 13$  кВ;  $f = 80$  Гц).

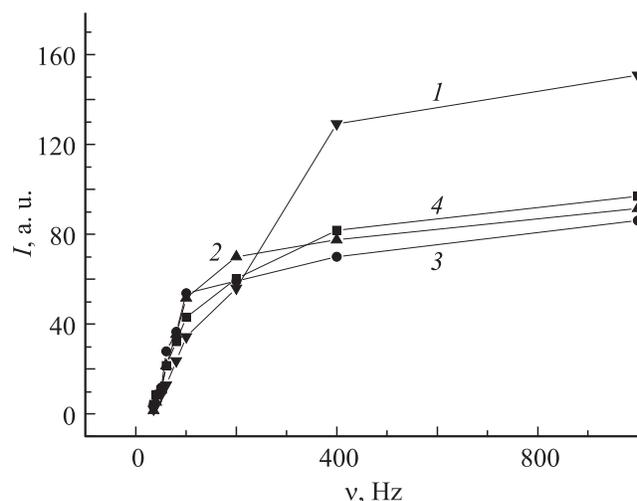


Рис. 4. Зависимости максимальной яркости излучения полосы молекулы йода (342 нм) от частоты следования импульсов накачки при разных давлениях гелия (1 — 13, 2 — 39, 3 — 66, 4 — 100 кПа).

количества паров воды ( $p \leq 5$ –10 Па) связано, вероятно, с использованием аргона технической чистоты. В этом случае излучение полос — маркер молекулы йода в спектральном диапазоне 270–335 нм было полностью подавлено системой полос гидроксила.

В отличие от лампы низкого давления с возбуждением газовой смеси He–I<sub>2</sub> в продольном тлеющем разряде, где отношение  $I_{\max}(206.2 \text{ нм}) : I_{\max}(342 \text{ нм})$  составляло примерно 50:50% [15], в лампе барьерного разряда вклад интенсивности излучения атомов йода значительно уменьшается.

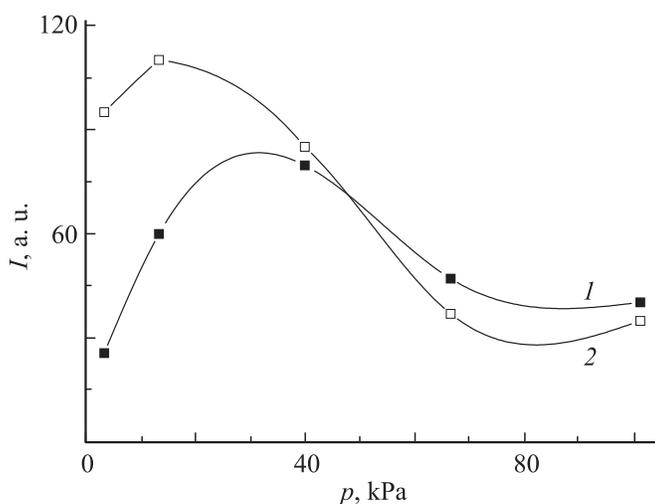
Замена колбы лампы, изготовленной из кварца марки КУ-1, на аналогичную колбу, изготовленную из

кварца марки КВ, позволяет практически полностью подавить излучение на  $\lambda = 206.2 \text{ nm}$ . Это делает такую лампу перспективной для использования в дерматологии и некоторых технологических процессах фотохимии.

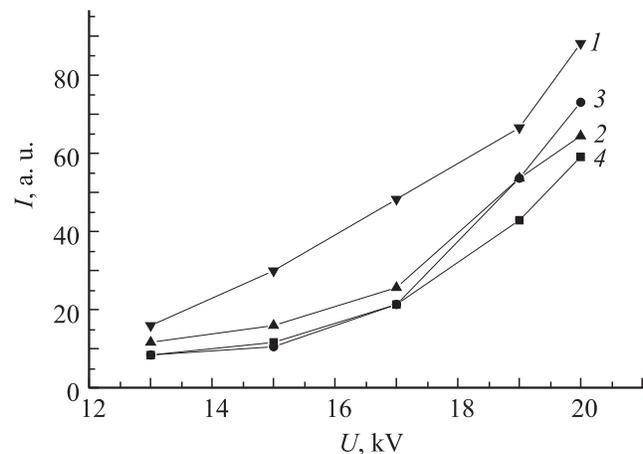
На рис. 3 и 5 приведены зависимости интенсивности излучения спектральной линии  $206.2 \text{ nm}$  и молекулярной полосы  $342 \text{ nm}$   $I_2(D' \rightarrow A')$  (в одинаковых относительных единицах) от парциального давления гелия и аргона. Для разряда в аргоновой смеси интенсивности излучения спектральной линии  $\lambda = 206.2 \text{ nm}$  достигала максимума при  $p(\text{Ar}) = 20 \text{ kPa}$  и была примерно в 1.4 раза ниже интенсивности этой же линии излучения в плазме на основе смеси  $\text{He}-I_2$ , где максимум излучения достигался при более высоком давлении гелия ( $p(\text{He}) = 30 \text{ kPa}$ ).

При давлениях инертных газов, не превышающих  $50 \text{ kPa}$ , интенсивность излучения спектральной линии  $206.2 \text{ nm}$  в разряде на основе смеси  $\text{Ar}-I_2$  была на  $10-15\%$  ниже, чем в гелиевой смеси. Для яркости полос излучения молекул йода с  $\lambda_{\text{max}} = 342 \text{ nm}$  наблюдалась противоположная картина: для разряда в газовой смеси на основе аргона (при  $p(\text{Ar}) = 60 \text{ kPa}$ ) она была выше примерно в 1.4 раза выше, чем для разряда в смеси  $\text{He}-I_2$  (при том же давлении гелия).

Таким образом, оптимальные значения давления гелия и аргона в импульсно-периодическом УФ-излучателе барьерного разряда, которые необходимы для получения максимальной интенсивности излучения спектральной линии атома йода и яркости полос йода, сильно зависят как от рода буферного газа, так и вида излучения (излучение атома или молекулы). По сравнению с данными работы [14], где наблюдался широкий пологий максимум суммарного УФ-излучения лампы на парах йода в диапазоне давления аргона  $12-50 \text{ kPa}$ , характер зависимости мощности излучения в исследуемом ре-



**Рис. 5.** Зависимости интенсивности излучения спектральной линии атома йода  $206.2 \text{ nm}$  лампы барьерного разряда, работающей на смесях  $\text{Ar}-I_2$  (1) и  $\text{He}-I_2$  (2), от давления инертных газов ( $U_{\text{ch}} = 13 \text{ kV}$ ;  $f = 80 \text{ Hz}$ ).



**Рис. 6.** Зависимость максимальной яркости излучения полосы молекулы йода ( $342 \text{ nm}$ ) от величины напряжения на высоковольтном модуляторе при разных давлениях гелия (1 — 13, 2 — 39, 3 — 66, 4 — 100 kPa).

жиме работы лампы был более резким с максимумом при  $p(\text{Ar}) = 40 \text{ kPa}$ .

На рис. 4 и 6 представлены результаты оптимизации мощности излучения барьерного разряда на молекулярной полосе йода с  $\lambda_{\text{max}} = 342 \text{ nm}$  в зависимости от частоты следования импульсов тока (при  $U = 15 \text{ kV}$ ) и напряжения на рабочем конденсаторе высоковольтного модулятора импульсов (при  $f = 40 \text{ Hz}$ ) в смеси гелия с парами йода. Для зависимостей мощности полосы молекулы йода от частоты следования импульсов максимальная мощность УФ-излучения получена при  $p(\text{He}) = 13 \text{ kPa}$  в диапазоне частот  $f = 400-1000 \text{ Hz}$  (рис. 4). Характер этой зависимости показывает, что в диапазоне частот  $f = 40-400 \text{ Hz}$  она является примерно линейной, а при более высоких частотах наблюдается насыщение мощности УФ-излучения молекул йода, возможно связанное с увеличением плотности паров йода (перегрев рабочей среды излучателя). Моделирование кинетики процессов в лампе тлеющего разряда, работающей на смеси  $\text{He}-I_2$  ( $p(\text{He}) = 400 \text{ kPa}$ ), показало, что при давлении насыщенных паров йода, превышающих  $230 \text{ Pa}$ , наблюдается резкое уменьшение мощности полосы УФ-излучения молекул йода [16].

В диапазоне парциальных давлений гелия  $39-100 \text{ kPa}$  (рис. 4) зависимости от частоты следования импульсов тока были подобными, а мощность УФ-излучения слабо увеличивалась с ростом парциального давления гелия. Перегрев рабочей смеси наступал в этом случае в диапазоне частот следования импульсов накачки  $f = 100-200 \text{ Hz}$ . Подобные закономерности прослеживаются и для зависимостей мощности УФ-излучения от величины зарядного напряжения, которые имели форму, близкую к параболической (особенно сильно это выражено для диапазона  $p(\text{He}) = 39-100 \text{ kPa}$ ). Такой характер этих зависимостей показывает, что при увеличении запасаемой энергии  $E_{\text{cont}} \propto U^{-2}$ , а также

соответственно и энерговклада в разряд, при повышенных давлениях гелия наблюдается примерно линейная зависимость выхода УФ-излучения на полосе молекулы йода от величины энерговклада. Увеличение зарядного напряжения  $U$  от 13 до 20 кВ позволяло увеличить мощность излучения примерно в 5–6 раз.

Таким образом, исследование эмиссионных характеристик импульсно-периодического источника УФ-излучения с накачкой барьерным разрядом показало, что в основном он излучает на полосе 342 нм молекулы йода, излучение спектральной линии 206.2 нм атома йода не превышает 2% от мощности молекулярной полосы йода; оптимальное парциальное давление аргона составляло  $\sim 40$  кПа, а гелия  $\sim 60$  кПа; эффективность рабочей среды на основе аргона была примерно в 1.4 раза выше, чем гелиевой; мощность излучения УФ-лампы увеличивается с ростом частоты от 40 до 1000 Нз в 12–14 раз и в 5–6 раз — при увеличении зарядного напряжения; работа УФ-излучателя является критической в зависимости от температуры и требует более эффективного охлаждения разрядной колбы.

## Список литературы

- [1] *Ломаяев М.И., Тарасенко В.Ф.* // Prog. SPIE. 2002. Vol. 4747. P. 390–398.
- [2] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 4. С. 66–69.
- [3] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А.* // Опт. и спектр. 2005. Т. 98. № 4. С. 558–561.
- [4] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А., Миня А.И., Гомоки З.Т.* // Опт. и спектр. 2008. Т. 105. № 5. С. 750–754.
- [5] *Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т., Ласлов Г.Е.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 1. С. 147–151.
- [6] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А., Гомоки З.Т., Каложная А.Г., Щедрин А.И.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 12. С. 97–102.
- [7] *Sosnin E.A., Erofeev M.F., Tarasenko V.F.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 3194–3201.
- [8] *Ломаяев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.Ф., Тарасенко В.Ф.* и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [9] *Sosnin E.A., Oppenlander T., Tarasenko V.F.* // J. Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Rev. 2006. Vol. 17. P. 145–163.
- [10] *Авдеев С.М., Соснин Э.Ф.* // Опт. и спектр. 2009. Т. 106. № 1. С. 14–20.
- [11] *Пикулев А.А., Цветков В.М.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 10. С. 83–86.
- [12] *Smith D.J., Michael I.D., Midha V., Cotzas G.M., Sommerer T.J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. 3842–3856.
- [13] *Малинина А.А., Гуйван Н.Н., Шуаибов А.К.* // ЖПС. 2009. Т. 76. № 5. С. 752–759.
- [14] *Авдеев С.М., Соснин Э.Ф., Тарасенко В.Ф.* // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 1. С. 107–110.
- [15] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А.* // ПТЭ. 2005. № 1. С. 119–121.
- [16] *Щедрин А.И., Каложная А.Н.* (частное сообщение). Институт физики НАН Украины. Киев, 2010.