

04;07;02

О влиянии плотности паров иода на выходные характеристики ультрафиолетовой газоразрядной лампы низкого давления

© А.К. Шуайбов¹, З.Т. Гомоки¹, А.Г. Калюжная², А.И. Щедрин²

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

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

(Поступило в Редакцию 9 ноября 2010 г.)

Приведены результаты исследования влияния плотности паров иода на выходные характеристики ультрафиолетовой лампы с накачкой продольным тлеющим разрядом, которая работала на смеси „гелий–иод“ при ее общем давлении 100–1500 Па. В спектральном диапазоне 320–360 нм основным было излучение полосы с максимумом при $\lambda = 342$ нм $I_2 (D' \rightarrow A')$, а в бактерицидной области преваляло излучение на атомарных линиях иода (183.0, 206.2 нм). Путем численного моделирования проведена оптимизация мощности лампы ультрафиолетового излучения в зависимости от парциального давления паров иода в рабочей смеси.

В связи с проблемами утилизации газоразрядных ультрафиолетовых (УФ) ламп на парах ртути актуальной является разработка новых безртутных источников УФ излучения на электронно-колебательных полосах моногалогенидов инертных газов, а также молекулах галогенидов и спектральных линиях их атомов [1]. Важной также является для таких излучателей и проблема замены в рабочих смесях ламп постоянного тока молекул хлора на менее агрессивные молекулы иода. Ультрафиолетовое излучение этих излучателей с накачкой тлеющим и емкостным разрядами смеси „гелий–пары иода“ сосредоточено в спектральных диапазонах 175–210 и 320–360 нм, а ресурс работы таких ламп достигает 10^3 h [2–4]. Но вопрос точного определения оптимальной концентрации паров иода в лампах низкого давления на смесях инертных газов с парами иода изучен мало. С целью управления спектральными характеристиками этих ламп важно знать оптимальное парциальное давление паров иода для выхода интенсивности излучения атомов и молекул. Экспериментально эти вопросы решить довольно сложно, поскольку в этих источниках значительной является роль саморазогрева от разряда накачки.

В настоящей работе приводятся спектральные характеристики лампы тлеющего разряда с рабочей средой He-I₂ в широкой области спектра и теоретической оптимизации выхода УФ излучения атомов и молекул иода в зависимости от парциального давления паров иода.

Тлеющий разряд зажигался в цилиндрической разрядной трубке из кварца, прозрачного до $\lambda = 190$ нм. Расстояние между анодом и катодом составляло 50 см. Electroдами разряда служили полые цилиндры из никеля длиной 1.5–2.5 см и внешним диаметром 1.4 см. Кристаллический иод высокой чистоты размещался в специальном отростке за анодом разрядной трубки.

Условия и методика эксперимента более детально описаны в работе [5].

Спектры излучения разряда в чистых парах иода и их смеси с гелием представлены на рис. 1, а. Для разряда в чистых парах иода энерговыход был невысоким, как и мощность УФ излучения плазмы. Ресурс работы в отпаянном режиме был ограничен из-за осаждения паров иода на внутренние стенки разрядной трубки, где образовывался налет коричневого цвета.

Не исправленный на относительную чувствительность системы регистрации (k_λ) спектр УФ излучения разряда в смеси He-I₂ приведен на рис. 1, б. В спектре излучения такого разряда выделялись спектральная линия атома иода 206.2 нм и система полос молекулы иода в спектральном диапазоне 320–342 нм. При $p(\text{He}) = 400$ Па распределение мощности УФ излучения плазмы составляло: $W(206.2 \text{ нм}) - W(342 \text{ нм}) \approx 50 - 50\%$. На рис. 1, в представлен спектр более коротковолнового излучения тлеющего разряда в смеси He-I₂ (спектр не приведен к k_λ). Интенсивности спектральных линий атома иода 150.7 и 161.2 нм были соизмеримы с интенсивностью линии 206.2 нм. Оптимизация величины парциального давления гелия находилась в диапазоне 400–800 Па. Зависимости мощности УФ излучения плазмы тлеющего разряда от величины электрической мощности разряда имели возрастающий вид при увеличении электрической мощности разряда.

Наибольшая величина суммарной мощности ультрафиолетового излучения разряда со всей рабочей апертуры разрядной трубки достигала 27 W при КПД $\leq 18\%$. Ресурс работы иодной лампы в газостатическом режиме составлял 400–500 h.

Плазменная кинетика в разряде в смеси He-I₂ рассчитывалась путем решения уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям сов-

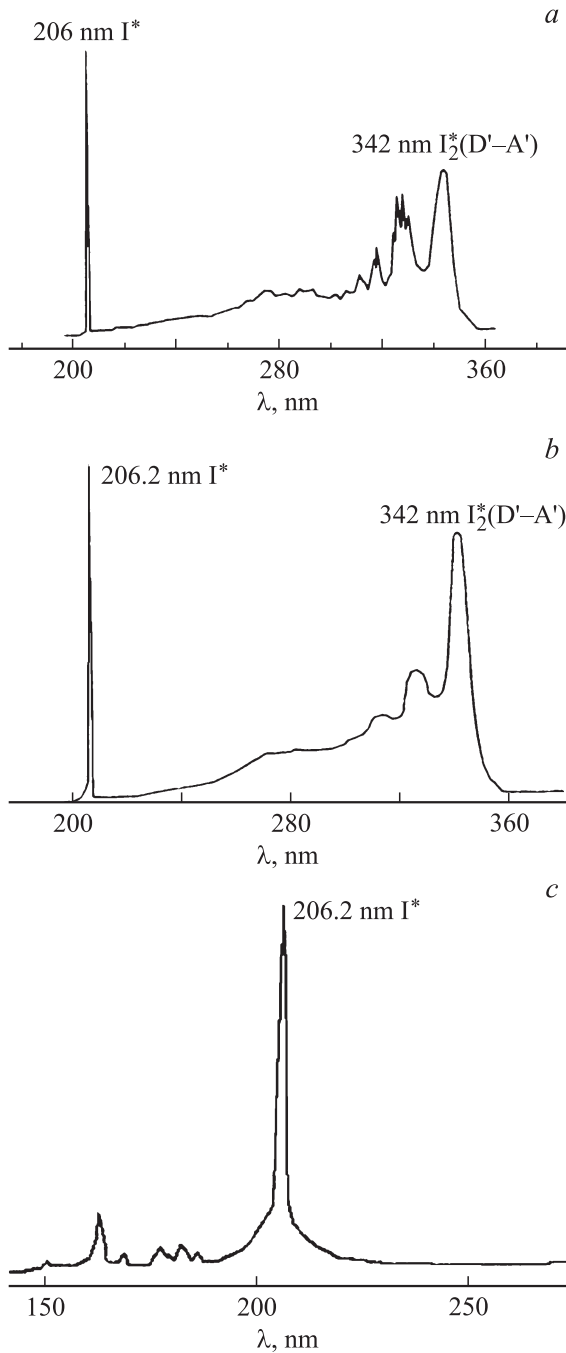


Рис. 1. Спектры ультрафиолетового излучения тлеющего разряда в чистых парах иода (*a*) и смеси He-I₂ (*b, c*) при $p(\text{He}) = 400 \text{ Pa}$; $p(\text{I}_2) = 100\text{--}200 \text{ Pa}$.

местно с системой кинетических уравнений, описывающих эволюцию компонент смеси и их производных в активной среде тлеющего разряда. Электронные кинетические коэффициенты для плазмы на основе смеси гелия с парами иода приведены в работах [6,7]. Плазмохимические реакции, учитываемые в модели, представлены в статье [8].

При варьировании концентрации иода в смеси интенсивности излучения в атомарной линии 206 nm и в

молекулярной полосе 342 nm проходят через максимум (рис. 2). При $p(\text{I}_2) < 200 \text{ Pa}$ интенсивности излучения иода растут по мере увеличения его концентрации, а при $p(\text{I}_2) > 200\text{--}230 \text{ Pa}$ резко спадают до нуля.

Увеличение концентрации иода в смеси сопровождается повышением разрядного напряжения и снижением плотности электронов в разряде. Это связано с влиянием примеси иода на функцию распределения электронов по энергиям. При малых концентрациях иода функция распределения определяется буферным газом — гелием, характеризующимся высокими порогами возбуждения и ионизации 19.8 и 22.5 eV соответственно). Добавление в активную среду иода приводит к обрезанию функции распределения при более низких энергиях благодаря меньшим порогам его возбуждения и ионизации, а также увеличению общего давления смеси. При этом скорость диссоциативного прилипания электронов к молекулам I₂, имеющая нулевой порог, мало зависит от плотности иода в смеси, а скорость их ионизации, определяемая хвостом функции распределения, резко спадает с ростом концентрации иода (рис. 3). Напряжение горения разряда определяется балансом процессов ионизации

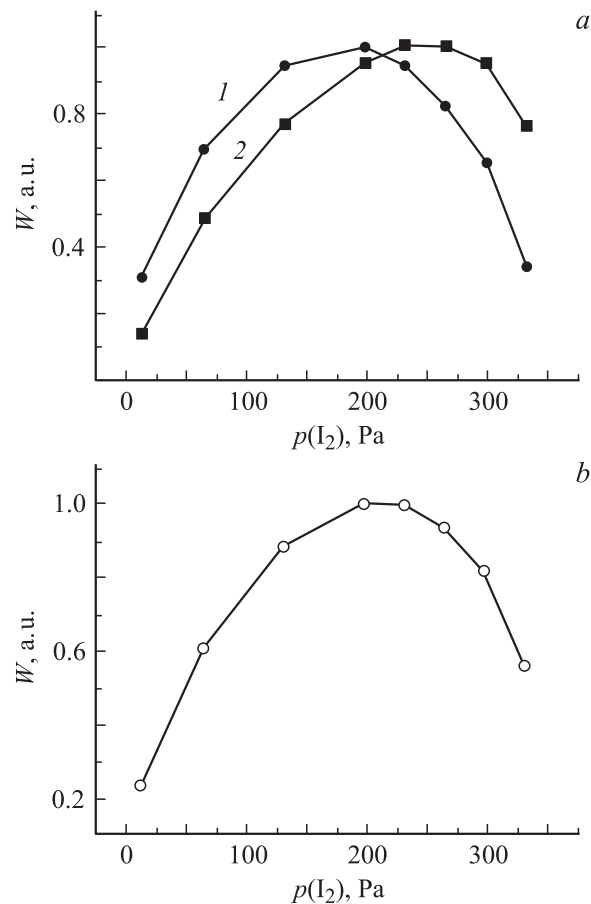


Рис. 2. *a* — зависимости интенсивности излучения в атомарной линии 206 nm (*1*) и молекулярной полосе 342 nm (*2*) от концентрации иода в смеси He-I₂ при $p(\text{He}) = 400 \text{ Pa}$; *b* — зависимость суммарной интенсивности излучения от концентрации иода в смеси He-I₂ при $p(\text{He}) = 400 \text{ Pa}$.

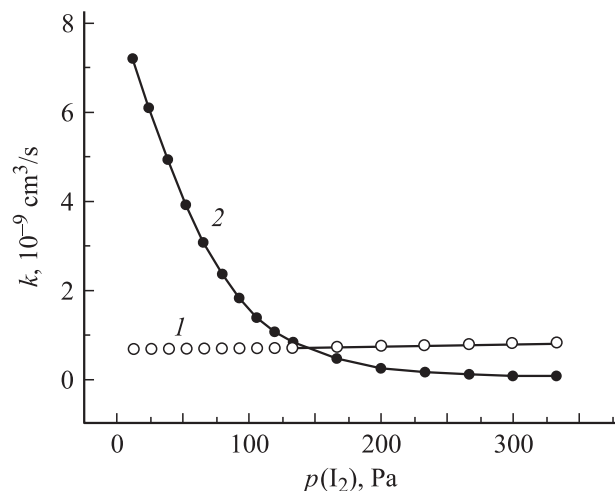


Рис. 3. Скорость диссоциативного прилипания (1) и ионизации (2) молекул иода в зависимости от концентрации насыщенных паров иода в смеси He-I₂ при $p(\text{He}) = 400$ Па и $E = 150$ В/см.

и прилипания. Поэтому для поддержания разряда в среде с повышенным содержанием галогена требуется более высокое напряжение, при этом разрядный ток и соответственно плотность электронов в разряде падают.

Уменьшение плотности электронов снижает эффективность наработки излучающих частиц в разряде, приводя к снижению интенсивности излучений как в атомарной линии, так и в молекулярной полосе иода. При этом, как видно из рис. 2, максимум излучения в полосе 342 нм достигается при более высоком давлении йона $p(I) \approx 230$ Па, в то время как интенсивность излучения атомарного иода начинает падать уже при $p(I_2) > 200$ Па. Это объясняется тем фактом, что наработка возбужденных атомов иода более чувствительна к плотности электронов в среде, поскольку протекает посредством двух электронных процессов — электронного возбуждения молекулярного иода на уровень I₂(В) с дальнейшим распадом на атомы (либо непосредственно электронной диссоциации молекулярного иода) и последующего возбуждения атомов иода на излучающий уровень.

Поскольку интенсивности излучения атомарного и молекулярного иода проходят через максимум при разных концентрациях иода, очевидно, что варьирование его содержания в смеси приводит к изменению соотношения между мощностями излучения при 342 и 206 нм. При увеличении концентрации иода относительная интенсивность излучения в молекулярной полосе растет, а в атомарной линии — падает.

Таким образом, исследование излучательных характеристик лампы тлеющего разряда в смеси гелия с парами иода показало, что ее средняя мощность УФ излучения может достигать 25–30 Вт при эффективности 15–20%. Моделирование характеристик разряда выявило, что характер зависимости мощности излучения и оптимальные

давления паров иода различны для излучения спектральной линии иода и его молекулярной полосы, что может быть использовано для управления спектральными характеристиками такого источника УФ излучения.

Список литературы

- [1] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. // УФН. 2003. Т. 173. С. 201.
- [2] Lomaev M.I., Tarasenko V.F. // SPIE. 2002. Vol. 4747. P. 390.
- [3] Шуаибов А.К., Грабовая И.А. // ПТЭ. 2005. № 1. С. 119.
- [4] Шуаибов А.К., Грабовая И.А., Шимов Л.Л. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 3. С. 31.
- [5] Шуаибов А.К., Грабовая И.А. // Опт. и спектр. 2005. Т. 98. № 4. С. 558.
- [6] Шуаибов А.К., Грабовая И.А., Гомоки З.Т., Калюжная А.Г., Щедрин А.И. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 12. С. 97.
- [7] Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т., Калюжная А.Г., Щедрин А.И. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 149.
- [8] Шуаибов А.К., Гомоки З.Т., Калюжная А.Г., Щедрин А.И. // Опт. и спектр. 2010. Т. 109. № 5. С. 728.