

04;07;12

## Эмиссионные характеристики импульсного емкостного разряда на смесях гелия и неона с молекулами йода

© А.К. Шуаибов, А.Й. Миня, З.Т. Гомоки, Г.Е. Ласлов

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

(Поступило в Редакцию 15 января 2008 г.)

Приведены эмиссионные характеристики импульсного емкостного разряда на смесях гелия или неона с парами йода. Плазма разряда излучала на спектральных линиях атома йода: 183 и 206.2 nm. Емкостный разряд зажегся в цилиндрической трубке из кварца при расстоянии между электродами 10 см.

Проведена оптимизация излучения разряда в зависимости от частоты повторения импульсов возбуждения, давления гелия и неона в смесях He(Ne)-I<sub>2</sub>. Оптимальное парциальное давление гелия составляло 0.8–2 kPa, неона — 0.5–1 Pa, а паров йода ≤ 60 Pa.

PACS: 52.80.Nc

### Введение

Продольный тлеющий, микроволновой, барьерный и емкостной разряды в смесях инертных газов с парами йода широко используются для разработок коротковолновых ламп на переходах атома йода (206.2 nm), молекулы йода (342 nm) и йодида ксенона (254 nm) [1–12]. Наиболее простыми и потенциально самыми мощными являются источники излучения низкого давления с возбуждением продольным тлеющим разрядом [8]. Но электроды таких излучателей находятся в контакте с рабочей средой (в том числе и парами йода), что приводит к ограничению ресурса работы лампы в газостатическом режиме на уровне примерно 1000 часов [4,5,13]. Для увеличения ресурса работы ламп УФ–ВУФ наиболее широкое применение получило использование безэлектродных разрядов в газовых смесях низкого давления на основе инертных газов и галогенсодержащих молекул.

Для использования в различных оптических технологиях микронаноэлектроники и фотохимии представляет интерес разработка импульсной безэлектродной лампы на основе эксиплексных молекул и галогенов с короткой длительностью импульса излучения. Так, в работе [14] приводятся результаты исследования коаксиальной двухбарьерной лампы на V,D,X-переходах молекулы XeBr (наиболее яркая полоса 282 nm) с длительностью импульса излучения 4.5 ns и импульсной мощностью 100 kW.

Представляет интерес исследование емкостного разряда субмикросекундной длительности на смесях инертных и галогенсодержащих газов с целью разработки простой УФ–ВУФ-лампы низкого давления. Такой режим зажигания емкостного разряда является малоисследованным, поскольку в смесях Xe(Kr)-Cl<sub>2</sub> при парциальном давлении хлора 300–400 Pa он существует в виде яркого токового шнура, малопригодного для использования в лампе.

Недостаточно изучены также эмиссионные характеристики йодсодержащей плазмы низкой плотности в спек-

тральном диапазоне 175–210 nm. Такое излучение еще пропускается воздухом и кварцевой оболочкой лампы. В работах [8,11,13] приводятся некоторые характеристики емкостного разряда, который возбуждался от источника переменного напряжения частотой 10–220 kHz и имел длительность импульса излучения порядка 2 μs. Но в этих работах основное внимание уделялось оптимизации излучения емкостного разряда на спектральной линии атома йода 206.2 nm. Известно [2], что суммарная интенсивность излучения резонансной линии атома йода — 183 nm и спектральных линий — 184.4, 187.6 nm — может превышать интенсивность излучения линии — 206.2 nm.

В условиях продольного тлеющего разряда постоянного тока [5], где в результате нагревания кварцевой трубки током разряда плотность паров йода превышала 100 Pa, излучение резонансной линии атома йода не проявлялось. Это, вероятно, обусловлено самопоглощением этой спектральной линии в плазме паров йода. Из ВУФ спектральных линий атома йода наиболее интенсивными были спектральные линии 150.7, 161.8 и 170.2 nm, суммарная интенсивность которых превышала интенсивность линии — 205.2 nm [5]. Поэтому представляет интерес исследование эмиссионных характеристик импульсного емкостного разряда в смесях легких инертных газов с молекулами йода в области края пропускания УФ-излучения воздухом. Этот спектральный диапазон находится в области главного максимума поглощения молекул ДНК [15]. Последнее обстоятельство является важным для разработки ламп с повышенной бактерицидной эффективностью.

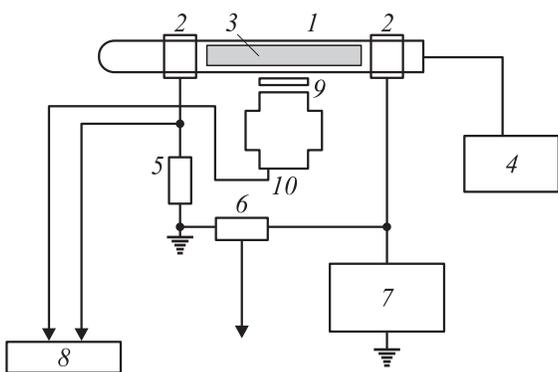
В настоящей работе представлены результаты исследования оптических и электрических характеристик емкостного разряда в смесях гелия и неона с парами йода, который представляет интерес для разработки эффективной бактерицидной лампы с высоким ресурсом работы в отпаянном варианте, излучающей на переходах атома йода в спектральном диапазоне 180–210 nm.

## Техника и условия эксперимента

Исследование эмиссионных и электрических характеристик емкостного разряда проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Методика исследований была близкой к представленной в работах [5,6,16], где рассматривались методика и техника исследования эксиплексно-галогенных ламп с возбуждением продольным тлеющим разрядом. Основными узлами экспериментальной установки были газоразрядная трубка из высококачественного кварца, импульсный высоковольтный источник питания, вакуумная газосмесительная система, а также система регистрации оптических и электрических характеристик импульсного емкостного разряда.

В эксперименте использовалась цилиндрическая разрядная трубка из кварца марки „УФ“, у которого пропускание в спектральном диапазоне 210–180 нм составляло не менее 70%. Длина трубки была равна 40 см, а внутренний диаметр — 1 см. На внешней поверхности трубки устанавливались два кольцевых электрода из никелевой фольги шириной 2 см таким образом, что расстояние в емкостном разряде составляло 6 см, а остальная часть разрядной трубки использовалась в качестве буферного объема для смеси паров йода с гелием или неоном. Кристаллы йода высокой чистоты загружались в часть разрядной трубки, находившейся за электродом, на который подавались импульсы высокого напряжения. В процессе эксперимента разрядная трубка обдувалась потоком воздуха от вентилятора.

Оценки температуры наиболее холодной части разрядной трубки при  $f = 100$  Hz показали, что давление паров йода не превышает 50–60 Па. Для возбуждения разряда применялся источник высоковольтных наносекундных импульсов на основе модулятора с водородным тиратроном и импульсным кабельным трансформатором. Источник питания позволял получать на



**Рис. 1.** Схема исследования характеристик емкостного разряда: кварцевая трубка (1), электроды (2), плазма емкостного разряда (3), вакуумно-газосмесительная система (4), токовый шунт (5), делитель напряжения (6), импульсный высоковольтный источник питания (7), импульсный широкополосный осциллограф 6ЛОР-04 (8), светофильтр (9), электронный линейный умножитель или коаксиальный фотоэлемент (10).

газоразрядном промежутке цуг затухающих колебаний общей длительностью до 400 ns и максимальной амплитудой 25–30 kV. Длительность полуволны напряжения по основанию составляла 30–40 ns. Частота следования импульса могла варьироваться в диапазоне 10–100 Hz. Излучение плазмы емкостного разряда анализировалось при помощи однометрового вакуумного монохроматора, изготовленного по схеме Сейя–Намиоки. Обратная линейная дисперсия монохроматора составляла 0.7 nm/mm. Для детектирования излучения применялись фотоумножители ФЭУ-142 и ФЭУ-154, которые были подключены к усилителю постоянного тока и электронному потенциометру.

В эксперименте вакуумный монохроматор не откачивался, поэтому нижний предел чувствительности спектрометра находился в интервале 175–180 nm. Этот предел определялся пропусканием коротковолнового излучения воздухом и кварцевой оболочкой излучателя. Калибровка спектрометра по величине относительной спектральной чувствительности в спектральном диапазоне 175–300 nm проводилась по излучению электрического разряда в водороде. Импульсное излучение плазмы емкостного разряда регистрировалось при помощи электронного линейного умножителя ЭЛУ-14 ФС или коаксиального фотоэлемента ФЭК-22 СПУ с использованием осциллографов 6ЛОР-04 или С1-99. Импульсы напряжения на разрядном промежутке регистрировались при помощи малоиндуктивного емкостного делителя, а импульсы тока — с использованием малоиндуктивного токового шунта.

## Оптические и электрические характеристики

При давлении гелия и неона в диапазоне 0.1–10 kPa плазма емкостного разряда заполняла весь межэлектродный промежуток и часть разрядной трубки за электродами. В отличие от импульсного емкостного разряда на смесях Kr, Xe с молекулами хлора при его парциальном давлении 300–500 Па, где разряд сжимается в тонкий плазменный шнур, для исследуемых рабочих сред становится невозможной разработка импульсной УФ–ВУФ-лампы на основе излучения атомов йода с потенциально высоким ресурсом работы в газостатическом режиме. Основными факторами, способствующими этому, является переход к более низкому парциальному давлению и менее электроотрицательному галогенонесителю, а также отсутствие в рабочей смеси тяжелых инертных газов. Важным фактором является удачное расположение наиболее интенсивных спектральных линий атома йода (рис. 2) в спектральном диапазоне, прозрачном для воздуха и кварцевой оболочки излучателя.

Спектр излучения плазмы барьерного разряда в смеси He–I<sub>2</sub> (без учета относительно спектральной чувствительности ФЭУ-142 и вакуумного монохроматора  $k(\lambda)$ ) представлен на рис. 3. В смесях на основе неона спектр излучения имел такой же вид, отличались лишь интенсивности спектральных линий атома йода. Основная

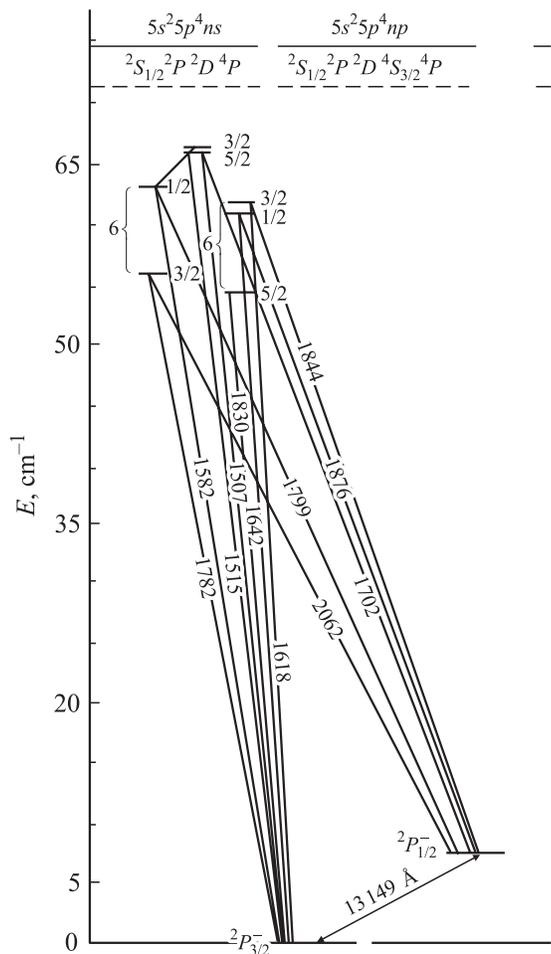


Рис. 2. Упрощенная схема энергетических уровней атома йода.

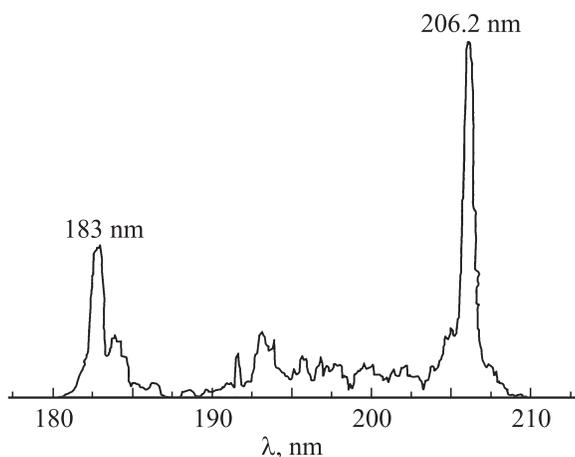


Рис. 3. Зависимость интенсивности спектральных линий 183 (1) и 206.2 nm (2) в емкостном разряде на смеси He–I₂ от парциального давления гелия при  $f = 100$  Hz.

часть ультрафиолетового излучения плазмы емкостного разряда представлена излучением спектральных линий атома йода: 183, 184, 187.6 и 206.2 nm. При учете  $k(\lambda)$

суммарная интенсивность излучения спектральных линий йода в разряде на смесях He(Ne)–I₂ в спектральном диапазоне 180–200 nm была примерно равной интенсивности спектральной линии 206.2 nm, которая получила наиболее широкое распространение в излучателях с возбуждением емкостным разрядом на парах йода.

Контрольные эксперименты с импульсным емкостным разрядом на двойных смесях Ar(Kr)–I₂ показали, что эффективность тяжелых инертных газов в исследуемом излучателе в 3–4 раза ниже по сравнению с применением легких инертных газов. При этом плазменный шнур в центре разрядной трубки также отсутствовал. Зависимость интенсивности излучения спектральных линий 183 и 206.2 nm от парциального давления гелия представлена на рис. 4, а неона — на рис. 5. Наибо-

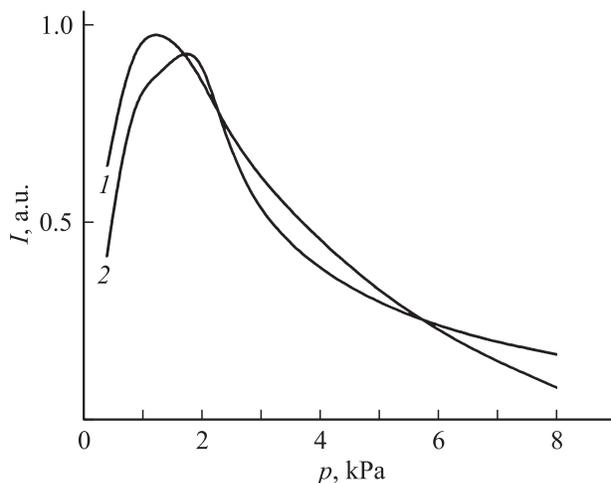


Рис. 4. Зависимость интенсивности спектральных линий 183 (1) и 206.2 nm (2) в емкостном разряде на смеси He–I₂ от парциального давления гелия при  $f = 100$  Hz.

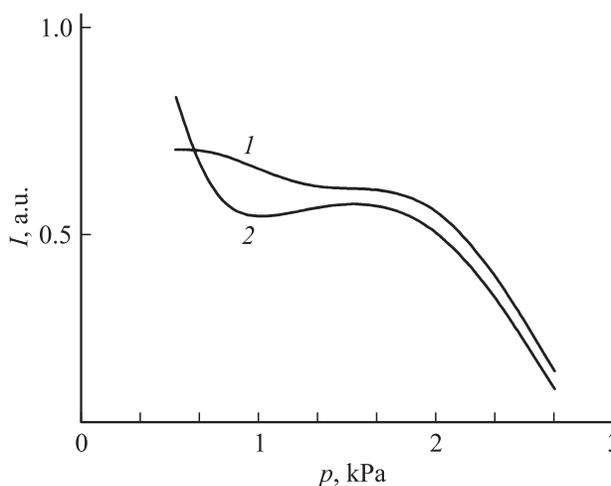


Рис. 5. Зависимость интенсивности спектральных линий 183 (1) и 206.2 nm (2) в емкостном разряде на смеси He–I₂ от парциального давления неона при  $f = 100$  Hz.

лее оптимальным буферным газом для излучателя на основе этих спектральных линий атома йода был гелий. Оптимальное парциальное давление гелия находилось в диапазоне 0.8–2 кПа.

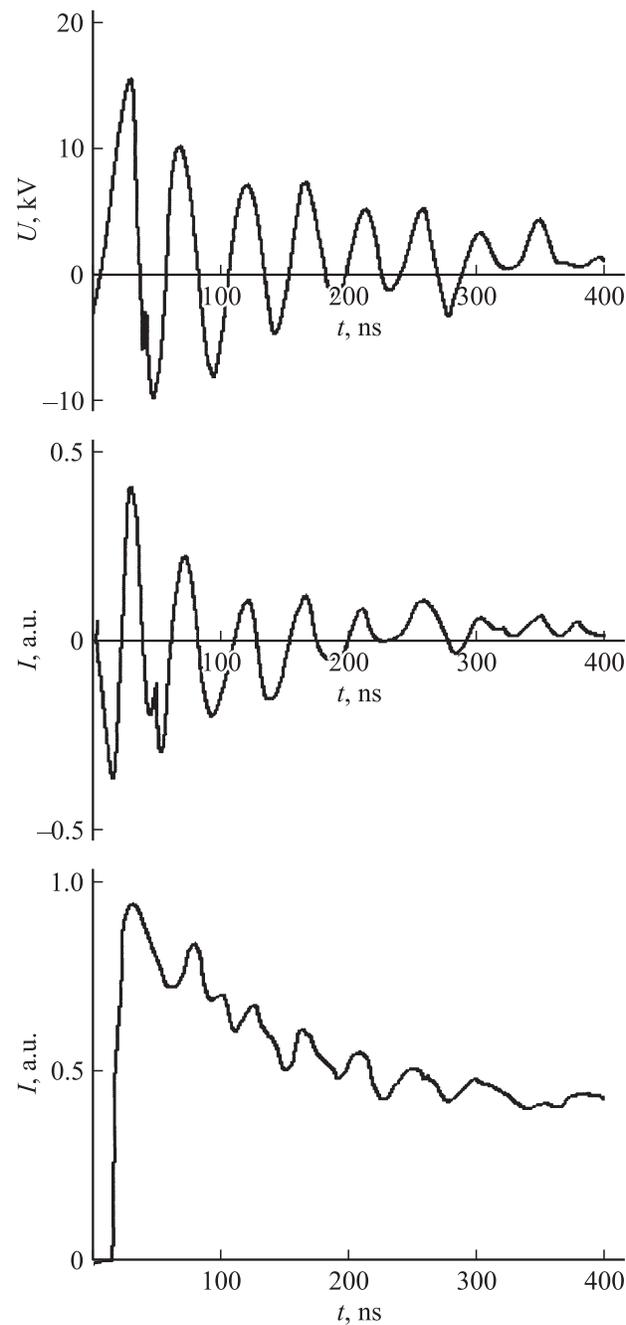
При увеличении частоты повторения импульсов от 25 до 100 Hz интенсивность излучения спектральных линий йода в смесях He(Ne)–I<sub>2</sub> увеличивалась на 30–50%. При переходе к емкостному разряду на смеси Ne–I<sub>2</sub> интенсивность излучения резонансной линии атома йода уменьшалась в 1.5–2 раза. Интенсивность резонансной линии атома йода в исследованных смесях в основном превышала интенсивность спектральной линии — 206.2 nm. Для емкостного разряда на гелиевых смесях характер поведения интенсивности линий 183 и 206.2 nm от парциального давления гелия одинаков, а для смесей на основе неона он отличается: при  $P(\text{Ne}) < 0.6$  кПа интенсивность спектральной линии 206.2 nm была выше интенсивности линии 183 nm.

Оптимальное значение давления неона находилось в диапазоне 0.5–1.0 кПа. Такое отличие в поведении интенсивности излучения этих спектральных линий может быть обусловлено различием электронных кинетических коэффициентов в смесях на основе гелия и неона, разной кинетикой заселения верхних рабочих уровней, а также различной теплоемкостью буферных газов. Более точные данные по физике процессов в плазме емкостного разряда могут быть получены в результате численного моделирования выходных характеристик излучателя.

На рис. 6 приведены осциллограммы напряжения на электродах разрядной трубки, тока емкостного разряда и УФ-излучения плазмы на основе смеси Ne–I<sub>2</sub>. При возбуждении разряда цугом коротких импульсов суммарная длительность излучения плазмы достигает 400 ns. При использовании внешнего воздушного охлаждения разрядной трубки при частоте следования импульсов возбуждения 25–100 Hz плотность паров йода не превышает 50–60 Па. При этом самопоглощение резонансной спектральной линии атома йода не проявляется, что позволило расширить спектр излучения разряда до 183 nm.

Таким образом, применение малоагрессивного галогенонесителя (паров йода при умеренном парциальном давлении) позволило получить сравнительно однородный импульсный емкостной разряд, заполняющий весь межэлектродный промежуток без формирования плазменного шнура в центре разрядной трубки. Импульсный емкостной разряд в смесях гелия или неона с парами йода, кроме излучения спектральной линии 206.2 nm, не менее эффективно излучает на резонансной линии атома йода (183.3 nm). Наиболее эффективным буферным газом был гелий при парциальном давлении 0.82 кПа. Оптимальное парциальное давление неона находилось в диапазоне 0.5–1 кПа. Использование цуга коротких импульсов возбуждения позволило получить длительность импульса излучения порядка 400 ns.

На основании исследованного разряда может быть разработана лампа низкого давления, излучающая в



**Рис. 6.** Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и ультрафиолетового излучения плазмы (3) емкостного разряда на основе смеси  $P(\text{Ne}) - P(\text{I}_2) = 2000 - (50 - 60)$  Па.

спектральном диапазоне 206.2–183 nm. Такая лампа может иметь высокий ресурс работы в газостатическом режиме, поскольку разряд является безэлектродным, и высокую бактерицидную эффективность, так как ее спектр излучения коррелирует с главным максимумом поглощения молекул ДНК. При согласовании источника возбуждения емкостного разряда с разрядной трубкой длительность светового импульса может быть уменьшена до 30–40 ns.

## Список литературы

- [1] *Harteck P., Reeves R.R., Thompson B.A.* // Zeitschrift fur Naturforschung. 1964. Bd 19. N 2. S. 1–6.
- [2] *Liuti G. and Mentall J.E.* // Rev. Shi. Instr. 1968. Vo. 39. N 11. P. 1767–1768.
- [3] *Gross U., Ubelis A., Spietz P., and Burrows J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. P. 1588–1591.
- [4] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Грабовая И.А.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 20. С. 77–80.
- [5] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А.* // Оптич. журн. 2005. Т. 72. № 7. С. 502–506.
- [6] *Шуаибов А.К., Грабовая И.А.* // Опт. и спектр. 2005. Т. 98. № 4. С. 567–571.
- [7] *Волкова Г.А., Зверева Г.Н.* // Опт. и спектр. 2004. Т. 96. № 3. С. 419–427.
- [8] *Ломаев М.И., Скасун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [9] *Sosnin E.A., Openlander T., Tarasenko V.F.* // J. of Photochemistry and Photobiology. C: Photochemistry. Rev. 2006. Vol. 7. P. 145–163.
- [10] *Oppenlander T. and Sosnin E.A.* // IUVA NEWS. 2005. N 4. P. 16–20.
- [11] *Sosnin E.A., Erofeev M.F., and Tarasenko V.F.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 3194–3201.
- [12] *Шуаибов О.К., Шевера И.В., Шимон Л.Л., Соснин Е.А.* // Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: і застосування. Ужгород–Томськ: Видавництво УжНУ „Говерла“, 2006. 223 с.
- [13] *Lomaev M.I., Tarasenko V.F.* // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4747. P. 390–398.
- [14] *Авдеев С.М., Костыря И.Д., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 59–63.
- [15] *Sonntag Von C.* // Process Technologies for Water Treatment / Ed. by S. Stucki. N.Y.: Plenum Press, 1987.
- [16] *Шуаибов А.К., Шевера И.В.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 9. С. 93–101.