

## ВУФ-ЛАМПА НА СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С МОЛЕКУЛАМИ ВОДЫ С НАКАЧКОЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЕМКОСТНЫМ РАЗРЯДОМ

А. К. Шуаибов\*, А. И. Миня, А. Н. Малинин,  
З. Т. Гомоки, Р. В. Грицак

УДК 537.52

Ужгородский национальный университет, Украина,  
88000, Ужгород, ул. Пидгирна, 46; e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua; roksolanija@ukr.net

(Поступила 17 мая 2011)

Приводятся спектральные характеристики излучения плазмы импульсно-периодического емкостного разряда в смесях паров воды с гелием и аргоном в диапазоне 140—315 нм. В ВУФ-области спектра наиболее интенсивны полосы с максимумами при  $\lambda = 156.0, 180.3, 186.0$  нм, в области 300—315 нм — полосы с максимумами при  $\lambda = 312.1$  и  $313.4$  нм. Проведена оптимизация яркости излучения плазмы емкостного разряда в зависимости от парциального давления гелия, аргона и паров воды. Для разряда на смеси аргона с парами воды выполнен расчет электронных кинетических коэффициентов в диапазоне изменения параметра  $E/N = 1$ —1000 Тд.

**Ключевые слова:** емкостный разряд, пары воды, ВУФ излучение, электронные кинетические коэффициенты.

*Spectral characteristics in a range of 140—315 nm are presented for plasma radiation of a pulse-periodic capacitive discharge in mixtures of a water vapor with helium and argon. In VUV and UV (300—315 nm) spectral regions, most intense bands have maxima at  $\lambda = 156, 180.3,$  and  $186$  nm and at  $\lambda = 312.1$  and  $313.4$  nm, respectively. The brightness of the capacitive discharge plasma radiation has been optimized depending on partial pressures of helium, argon, and the water vapor. For the discharge in the Ar-H<sub>2</sub>O mixtures, electron transport coefficients have been calculated in a  $E/N$  parameter range from 1 to 1000 Td.*

**Keywords:** capacitive discharge, water vapor, vacuum ultraviolet radiation, electron transport coefficients.

**Введение.** Для спектрального диапазона 190—310 нм, который представляет значительный интерес для фотолитографии, фотомедицины и фотохимии, известны источники излучения на димерах тяжелых газов, полосах Лаймана и Вернера молекулы водорода, а также на полосе 175 нм ArCl ( $B-X$ ) [1—3]. Верхняя граница диапазона является предельной для использования УФ излучения в воздухе (из-за сильного поглощения для  $\lambda < 190$  нм), а нижняя — пределом пропускания ВУФ излучения окном из фторида лития. Технологические применения такого излучения возможны только в вакууме или в атмосфере легких инертных газов. Разработанные ранее газоразрядные источники для области 110—190 нм характеризуются низкой эффективностью, использованием дорогостоящих инертных газов и, как правило, перекрывают этот спектральный диапазон в виде отдельных сравнительно узких полос.

Вопросы же разработки широкополосного ВУФ излучателя с недорогой и экологически чистой рабочей средой исследованы мало. Альтернативной может стать лампа на радикалах ОН (гидроксила), которые образуются в разных типах разрядов на основе паров воды [1, 3—6]. Однако основные усилия по оптимизации ламп на гидроксиле связаны с исследованием его излуче-

---

## VUV LAMP PUMPED BY CAPACITIVE PULSE-PERIODIC DISCHARGE IN MIXTURES OF RARE GASES WITH WATER MOLECULES

A. K. Shuaibov\*, A. I. Minya, A. N. Malinin, Z. T. Homoki, and R. V. Hrytsak (Uzhgorod National University, 46 Pidhirna Str., Uzhgorod, 88000, Ukraine; e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua; roksolanija@ukr.net)

ния в интервале 304—315 нм. Систематические исследования ВУФ излучения гидроксила и параметров плазмы продольного тлеющего разряда, который использовался для накачки лампы, подытожены в работе [3]. Сравнение вкладов УФ ( $\Delta\lambda = 304\text{—}315$  нм) и ВУФ излучения тлеющего разряда постоянного тока в смеси He-H<sub>2</sub>O показало, что на УФ область (ОН (A—X)-полосы) приходится только 10 % общей мощности излучения плазмы, а 90 % мощности излучения гидроксила сосредоточено в диапазоне 140—190 нм. С учетом близости параметров и механизмов зажигания тлеющего и емкостного разрядов перспективна разработка источников ВУФ излучения на переходах ОН с накачкой емкостным разрядом. В последнем случае устраняется недостаток тлеющего разряда, обусловленный контактом электродов с плазмой паров воды, что может приводить к уменьшению ресурса работы отпаянных излучателей.

**Эксперимент.** Для исследования оптических характеристик импульсно-периодической лампы емкостного разряда на основе смесей гелия и аргона с парами воды использовалась цилиндрическая кварцевая трубка внутренним диаметром 7 мм и длиной 50 см. Расстояние между внешними электродами 20 см. Катод и анод, изготовленные из никелевой фольги шириной 2 см, размещались на внешней поверхности газоразрядной трубки. Импульсы напряжения амплитудой  $\pm 25\text{—}40$  кВ подавались на электроды емкостного разряда. Частота следования импульсов напряжения могла изменяться в диапазоне 50—1000 Гц.

Исследование спектров излучения разряда в диапазоне 140—350 нм проводилось с использованием фотоумножителя ФЭУ-142 и вакуумного монохроматора. Измерялась интенсивность всей полосы. Излучение отбиралось с центральной области разрядной трубки и направлялось во входную часть вакуумного монохроматора через окно из LiF. Излучение в диапазоне 200—600 нм регистрировалось с помощью монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 1200 штр/мм и фотоумножителя ФЭУ-106. Интенсивности полос определялись как площадь под соответствующей спектральной кривой.

**Результаты и их обсуждение.** Исследование излучения плазмы емкостного разряда в смесях He-H<sub>2</sub>O и Ar-H<sub>2</sub>O проводилось при парциальных давлениях  $p(\text{H}_2\text{O}) = 10\text{—}200$  Па,  $p(\text{He}) = 1\text{—}21$  кПа,  $p(\text{Ar}) = 1.33\text{—}11$  кПа. Импульсно-периодический емкостный разряд на смеси He-H<sub>2</sub>O при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 130$  Па однородно заполнял весь объем между электродами газоразрядной трубки и имел белый цвет. Разряд в смеси Ar-H<sub>2</sub>O имел розовый с фиолетовым оттенком цвет.

Усредненные спектры излучения исследовались при варьировании давления как паров воды, так и инертного газа. На рис. 1 представлен спектр излучения импульсно-периодического емкостного разряда в смеси Ar-H<sub>2</sub>O. Спектр излучения емкостного разряда в смеси He-H<sub>2</sub>O приведен в [6]. По характеру он близок к спектру рис. 1 и отличается в основном интенсивностью излучения гидроксила. В диапазоне 300—315 нм в спектрах емкостного разряда на смесях He-H<sub>2</sub>O, Ar-H<sub>2</sub>O наблюдались полосы с максимумами при  $\lambda = 312.1$  и  $313.4$  нм. Эти полосы могут быть отождествлены с электронно-колебательными переходами гидроксила (A—X). Плазма на смеси He-H<sub>2</sub>O также характеризовалась полосами излучения в ВУФ-области с максимумами при  $\lambda = 156, 180.3, 186$  нм, которые отождествляются с излучением ОН (C—A, B—X) [3—5]. Полоса

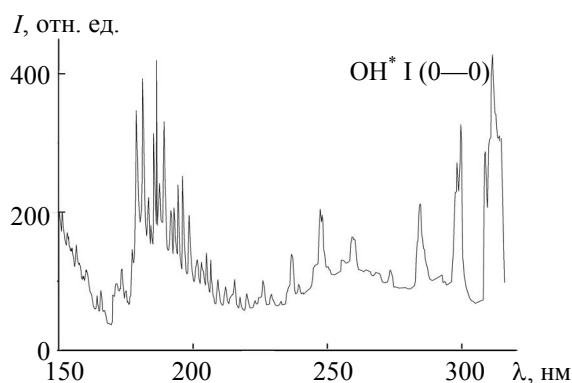


Рис. 1. Спектр излучения емкостного разряда на смеси  $p(\text{Ar})\text{--}p(\text{H}_2\text{O}) = 1.33\text{--}0.133$  кПа

излучения плазмы на основе смеси He-H<sub>2</sub>O с  $\lambda = 297.6$  нм коррелирует с полосой OH ( $A-X$ , 3-2). Спектр смеси Ar-H<sub>2</sub>O (рис. 1) приведен к спектральной чувствительности системы монохроматор+фотоумножитель. Его анализ показывает, что более 70 % мощности излучения плазмы сконцентрировано в ВУФ-диапазоне (140—190 нм).

На рис. 2, *а* приведены результаты оптимизации интенсивности полос излучения в диапазонах 176.0—183.9 и 184.5—198.0 нм в зависимости от парциального давления гелия при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 105$  Па; оптимальное давление гелия  $p(\text{He}) = 1$  и 11 кПа. Подобные максимумы, менее интенсивные по сравнению с наблюдаемыми в ВУФ-диапазоне, имелись и для характеристических полос излучения плазмы на смеси He-H<sub>2</sub>O в диапазонах 296.7—301.0 и 307.5—314.6 нм. Зависимости интенсивности спектральных полос излучения радикала OH\* от давления паров воды в смеси He-H<sub>2</sub>O при  $p(\text{He}) = 2.6$  кПа для  $\lambda_{\text{max}} = 176.0—183.9$ , 284.8—293.0 и 307.5—314.5 нм представлены в работе [6]. Именно для полос  $\lambda_{\text{max}} = 184.5—198.0$  нм интенсивность ВУФ излучения максимальна, что может быть использовано для разработки простых источников ВУФ излучения с недорогой рабочей средой и диапазоном излучения 140—200 нм. Результаты оптимизации интенсивности полосы излучения 297.9 нм OH ( $A-X$ ) в зависимости от парциального давления паров воды представлены на рис. 2, *б*. Оптимальное давление паров воды 130—150 Па. Подобные максимумы характерны и для полос излучения плазмы паров воды (283.6 и 310.0 нм).

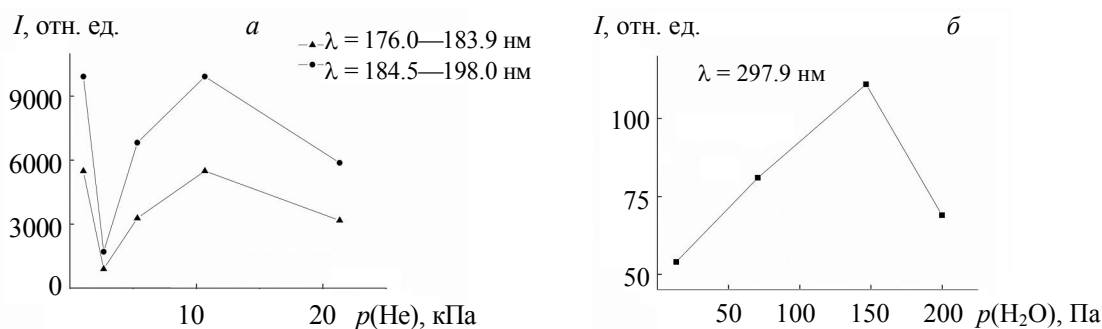


Рис. 2. Зависимость интенсивности характеристических полос газоразрядной плазмы на смеси He-H<sub>2</sub>O от давления гелия при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 106.6$  Па (*а*) и от давления паров воды при  $p(\text{He}) = 2.6$  кПа (*б*)

Зависимость интенсивности излучения плазмы в полосе 308.9 нм OH\* для смеси Ar-H<sub>2</sub>O при  $p(\text{Ar}) = 2.7$  кПа приведена на рис. 3. Максимум интенсивности полосы излучения 308.9 нм OH\* наблюдается при оптимальном давлении паров воды  $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.13—0.20$  кПа. Из сравнения интенсивностей излучения для двух смесей видно, что интенсивности полосы излучения 308 нм для разряда на смеси Ar-H<sub>2</sub>O на порядок больше, чем для полосы 297.9 нм смеси He-H<sub>2</sub>O. Это, вероятно, обусловлено процессом передачи энергии от метастабильного атома аргона молекуле воды, вследствие чего происходит диссоциативное возбуждение H<sub>2</sub>O с образованием гидроксила OH\*.

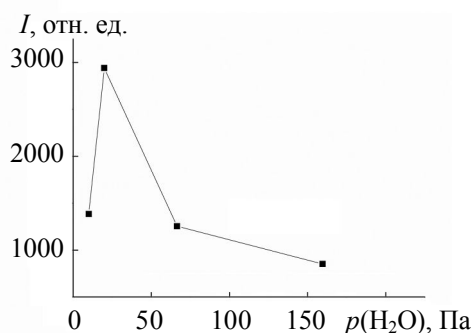


Рис. 3. Зависимость интенсивности полосы излучения 308.9 нм OH\* от давления воды в емкостном разряде на смеси Ar-H<sub>2</sub>O при  $p(\text{Ar}) = 2.66$  кПа

Проведены также расчеты электронных кинетических коэффициентов путем решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) с использованием программы Bolsig+ [8]. На основе рассчитанных ФРЭЭ определены средняя энергия и подвижность электронов, удельные потери мощности разряда на электронные процессы, а также их константы скорости. Расчеты параметров разряда проводились в диапазоне  $E/N = 1-1000$  Тд при давлении смеси  $p(\text{Ar})-p(\text{H}_2\text{O}) = 1.80-0.16$  кПа, степени ионизации  $10^{-7}$  и температуре газа 300 К. Эффективные сечения для процессов с участием молекулы воды (табл. 1) взяты из работ [7—14] и введены в базу данных программы Bolsig+. При решении кинетического уравнения Больцмана для ФРЭЭ учтены процессы ионизации и диссоциативной ионизации, колебательного возбуждения молекул воды, диссоциативного прилипания электронов к молекулам воды, диссоциативного возбуждения молекул гидроксила, атомов водорода и кислорода, упругое рассеяние электронов (табл. 1).

**Т а б л и ц а 1.** Процессы взаимодействия электронов с молекулами воды, которые учитывались при решении уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям

Номер процесса	Процесс	Пороговая энергия, эВ	Литература
1	упругое столкновение $e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{H}_2\text{O}$		[8]
2	$\text{H}_2\text{O}(000)+e\rightarrow\text{H}_2\text{O}(010)+e$	1.00	[9]
3	$\text{H}_2\text{O}(000)+e\rightarrow\text{H}_2\text{O}(100)+e$	1.00	[9]
4	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{OH}+\text{H}^*$	20.00	[10]
5	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{OH}+\text{H}^*$	20.00	[10]
6	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{O}^*(844.7\text{ нм})$	20.00	[11, 12]
7	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{O}^*(777.7\text{ нм})$	20.00	[11, 12]
8	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{OH}^*(\text{A})+\text{H}$	9.00	[10]
9	$\text{H I } L_{\alpha}(121.6\text{ нм})$	25.00	[13]
10	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{O}^*(3^3P)+\text{H}_2$	25.00	[12]
11	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow e+\text{O}^*(2^1S_0)+\text{H}_2$	18.5	[13]
12	$\text{H}_2\text{O}+e\rightarrow\text{OH}^++\text{H}+2e$	10.00	[13]
13	$e+\text{H}_2\text{O}\rightarrow 2e+\text{H}_2\text{O}^+$	13.5	[13]
14	$\text{H}_2\text{O}+e\rightarrow\text{OH}^-+\text{H}$	5.39	[14]
15	$\text{H}_2\text{O}+e\rightarrow\text{OH}^*+\text{H}^-$	5.591	[14]
16	$\text{H}_2\text{O}+e\rightarrow\text{H}_2+\text{O}^-$	4.437	[14]
17	упругое столкновение $e+\text{Ar}\rightarrow e+\text{Ar}$	—	[7]
18	$e+\text{Ar}\rightarrow e+\text{Ar}^*$	11.62	[7]
19	$e+\text{Ar}\rightarrow e+\text{Ar}^*$	12.906	[7]
20	$e+\text{Ar}\rightarrow e+\text{Ar}^*$	11.273	[7]
21	$e+\text{Ar}\rightarrow e+\text{Ar}^+$	15.7	[7]

На рис. 4 приведена зависимость средней энергии и подвижности электронов в разряде на смеси Ar-H<sub>2</sub>O от параметра  $E/N$ . Средняя энергия электронов при увеличении параметра  $E/N$  почти линейно возрастает от 5 до 19 эВ. В диапазоне 1—80 Тд подвижность электронов при больших энергиях резко уменьшается. С ростом параметра  $E/N$  от 100 до 1000 Тд характер кривой практически не меняется.

На рис. 5 приведены зависимости констант скорости процессов взаимодействия электронов с молекулами воды от параметра  $E/N$  в разряде на смеси Ar-H<sub>2</sub>O. Максимальной была константа скорости диссоциативного возбуждения молекулы H<sub>2</sub>O ( $L_{\alpha}$ ,  $\lambda = 121.6$  нм), которая в диапазоне 300—900 Тд возрастает. Константа скорости образования гидроксила, распад которого приводит к излучению в полосе 306—312 нм, и константа скорости процесса диссоциативного возбуждения молекулы H<sub>2</sub>O ( $n = 4-2$ ) в диапазоне 200—500 Тд достигают максимума, а далее с ростом параметра  $E/N$  медленно спадают. В диапазоне 400—1000 Тд константы скорости процесса ионизации при столкновении электронов с молекулами воды возрастают с увеличением параметра  $E/N$ . Наименьшие константы скорости характерны для процессов диссоциативного прилипания электронов к молекуле воды, которые имеют наименьший порог по энергии. Полученные путем

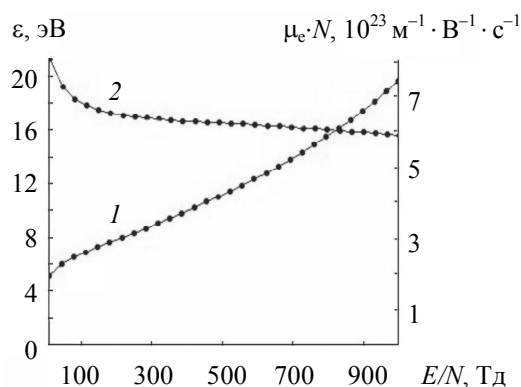


Рис. 4. Зависимость средней энергии (1) и подвижности (2) электронов в разряде на смеси  $p(\text{Ar})$ - $p(\text{H}_2\text{O}) = 1.80$ - $0.16$  кПа от  $E/N$

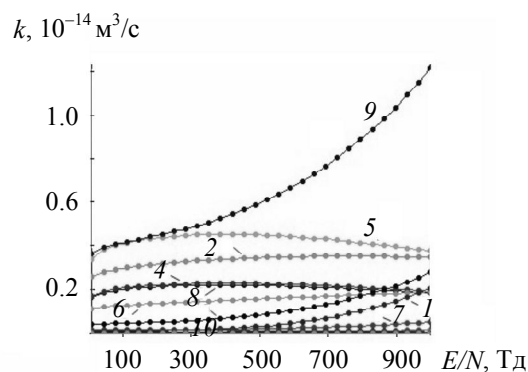


Рис. 5. Зависимости констант скорости электронных процессов в разряде на смеси  $p(\text{Ar})$ - $p(\text{H}_2\text{O}) = 1.80$ - $0.16$  кПа от  $E/N$ ; нумерация кривых соответствует нумерации процессов в табл. 1

численного моделирования электронные кинетические коэффициенты могут быть использованы при расчетах кинетики процессов.

**Заключение.** Из исследования эмиссионных характеристик импульсно-периодического емкостного разряда следует, что спектр излучения плазмы на основе смеси  $\text{He-H}_2\text{O}$  представлен рядом полос с максимумами 297.6 и 308.9 нм. В спектре излучения смеси  $\text{Ar-H}_2\text{O}$  также присутствует полоса  $\lambda = 308.9$  нм, которая принадлежит гидроксилу  $\text{OH}^*$ . В спектрах обеих смесей наблюдались полосы излучения в ВУФ-области с максимумами 156.0, 180.3, 186.0 нм, которые коррелируют с переходами  $C-A$  и  $B-X$  радикала  $\text{OH}$ . Изучение оптических характеристик излучения плазмы смеси паров воды и гелия в диапазоне 184—198 нм показало, что в зависимости от содержания гелия наблюдаются максимумы при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 0.04$ — $0.11$  и  $0.11$ — $0.20$  кПа. Из сравнения интенсивностей излучения двух смесей видно, что интенсивность полосы  $\lambda = 308$  нм для разряда на смеси  $\text{Ar-H}_2\text{O}$  на порядок больше, чем полосы  $\lambda = 297.9$  нм для смеси  $\text{He-H}_2\text{O}$ . Параметры плазмы могут быть использованы при расчетах кинетики процессов в ВУФ-лампе.

- [1] I.O.Soloshenko, V.Yu.Bazhenov, V.O.Khomych, V.V.Tsiolko, N.G.Potapchenko, V.V.Goncharuk. Ukr. J. Phys., **51**, N 11-12 (2006) 1063—1070
- [2] М.И.Ломаяев, В.С.Скакун, Э.А.Соснин, В.Ф.Тарасенко, Д.В.Шитц, М.В.Ерофеев. УФН, **173**, № 2 (2003) 201—217
- [3] А.К.Шуаибов, Л.Л.Шимон, А.Й.Дашенко, Ю.Ю.Неймет, И.В.Шевера. Письма в ЖТФ, **25**, № 11 (1999) 29—33
- [4] А.К.Шуаибов, А.И.Дашенко, И.В.Шевера. Квант. электрон., **31**, № 6 (2001) 547—548
- [5] R.W.B.Pears, A.G.Gaydon. The Identification of Molecular Spectra, London, Chapman Hall LTD (1963) 246—248
- [6] А.К.Шуаибов, А.Й.Миня, З.Т.Гомоки, И.В.Шевера, Р.В.Грицак. Письма в ЖТФ, **37**, № 3 (2011) 64—67
- [7] <http://siglo-kinema.com/bolsig.htm>
- [8] M.A.Khakoo, H.Silva, J.Muse, M.C.A.Lopes, C.Winstead, V.McKoy. Phys. Rev. A, **79** (2009) 052711
- [9] H.Khakao Silva, J.Muse, M.C.A.Lopes, C.Winstead, V.McKoy. Phys. Rev. A, **78** (2008) 052710
- [10] Y.Itikawa, N.Mason. J. Phys. Chem. Ref. Data, **34**, N 1 (2005) 1—22
- [11] W.L.Wiese, J.R.Fuhr, T.M.Deters. J. Phys. Chem. Ref. Data, Monogr. 7 (1996)
- [12] J.E.Sansonetti, W.C.Martin. J. Phys. Chem. Ref. Data, **34**, N 4 (2005) 1559—2259
- [13] С.В.Авакян, Р.Н.Ильин, В.М.Лавров, Г.Н.Огурцов. Сечения процессов ионизации и возбуждения УФ излучения при столкновениях электронов, ионов и фотонов с атомами и молекулами атмосферных газов. Справочник, Санкт-Петербург, ГОИ (2000)
- [14] R.Prashant, Vaibhav S.Prabhudesai, G.Aravind, M.A.Rahman, E.Krishnakumar. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **40**, N 24 (2007) 4625—4636