

04;07;12

Исследование излучения плазмы тлеющего разряда постоянного тока на смеси He/H₂O

© А.К. Шуайбов, А.И. Дащенко, И.В. Шевера

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

(Поступило в Редакцию 27 марта 2001 г.)

Исследованы электрические и оптические характеристики продольного тлеющего разряда постоянного тока в цилиндрической разрядной трубке на смеси гелия и насыщенных при комнатной температуре парах воды. Установлено, что основное излучение в ультрафиолетовой области длин волн представлено широкой полосой с $\lambda_{\max}=309.6$ nm и $\Delta\lambda=9$ nm. Основными диагностическими спектральными линиями исследуемой плазмы являются 656.3 nm H $_{\alpha}$, 486.1 nm H $_{\beta}$ и линии атома He в области 440–670 nm. Проведена оптимизация величины яркости излучения полосы с $\lambda_{\max}=309.6$ nm и интенсивности спектральных линий HeI и HeII в зависимости от парциального давления гелия и величины тока тлеющего разряда. Полученные результаты представляют интерес для разработки экологически чистого излучателя на основе продуктов распада молекул и кластеров воды в плазме.

Введение

Низкотемпературная плазма на смесях инертных газов с малыми примесями паров воды является селективным источником излучения на основе продуктов распада молекул воды, которыми в большинстве случаев являются радикалы OH [1,2]. О разработке экологически чистой лампы на $\lambda = 306.4$ nm OH(A-X; 0-0) с накачкой тлеющим и высокочастотным разрядами сообщалось в работах [3]. Яркость излучения полосы OH(A-X) увеличивалась с ростом парциального давления паров воды в смесях He(Ar)/H₂O в пределах 1–130 Pa. При более высокой плотности паров воды в рабочей среде, когда возрастает роль кластерных молекул (H₂O)_n, (OH)_m и (OH)_m · (H₂O)_n в плазме, излучение разряда не исследовалось, хотя кластерная плазма может представлять определенный интерес для использования в лампах [4].

В данной работе приведены результаты исследования излучения тлеющего разряда постоянного тока в смеси гелия и паров воды при $P(\text{H}_2\text{O}) = 2.0\text{--}2.5$ kPa.

Условия эксперимента

Тлеющий разряд получали в кварцевой трубке с внутренним диаметром 7 mm и расстоянием между анодом и катодом 50 mm. Конструкция разрядной трубки была такой же, как и в нашей работе [5]. Величина мощности, вкладываемой в плазму, составляла 40–60 W, ток разряда находился в диапазоне 2–50 mA. Пары воды, насыщенные при комнатных температурах ($T = 17\text{--}21^\circ\text{C}$), получали при испарении дистиллированной воды из резервуара, который устанавливался в нижней части буферной камеры. Разрядная трубка с открытыми торцевыми частями устанавливалась в верхней части буферной камеры объемом 10 l. Давление насыщенных паров воды находилось в пределах 2.0–2.5 kPa. Под яркостью молекулярной

полосы излучения понималась площадь под кривой на спектре, который был исправлен с учетом относительной спектральной чувствительности системы регистрации излучения. Остаточное давление воздуха в буферной камере не превышало 10–15 Pa. Спектральное разрешение составляло 0.2 nm. Точность измерения яркости и интенсивности излучения плазмы составляла 7–10%.

Электрические и оптические характеристики

Тлеющий разряд постоянного тока на смеси He/H₂O при $P(\text{He}) = 1\text{--}16$ kPa был достаточно однороден по длине разрядной трубки. С увеличением парциального давления гелия диаметр плазменного шнура уменьшался с 4–5 до 2 mm. Нормальный режим зажигания разряда наблюдался при токах $I_{ch} \geq 30$ mA, а при малых разрядных токах разряд существовал в поднормальном режиме (рис. 1). Потенциал зажигания и величина квазистационарного спада напряжения на электродах трубки в нормальном режиме зажигания разряда увеличивалась с ростом парциального давления гелия в рабочей смеси. При близких геометрических параметрах разрядной трубки и мощности $P_{ch} = I_{ch} \cdot U_{ch}$ в настоящих экспериментах величины U_{ch} и I_{ch} были соответственно на порядок выше и ниже, чем соответствующие данные из работ [3].

Спектры излучения плазмы в УФ и видимой области представлены на рис. 2. В УФ диапазоне основной в спектре излучения плазмы на смеси He/H₂O была широкая полоса с максимумом при 309.6 nm и менее яркие полосы с $\lambda_{\max} = 286$ и 262 nm. Наиболее яркая полоса имела четко выраженную структуру, которая включала ряд максимумов: 307.0, 309.6 (главный), 312.4 и 315.2 nm. Наиболее близкими к полученным максимумам являются канты полос [6–8] 306.4 nm OH(A-X; 0-0)(R), 308.9 nm OH(A-X; 0-0)(Q), 312.2 nm OH(A-X; 1-1)

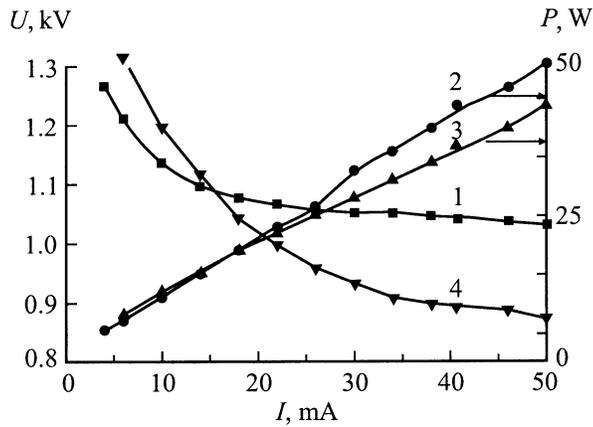
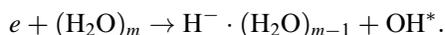


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики (1, 4) и зависимости мощности (2, 3) вкладываемой в продольный тлеющий разряд от тока в смесях $P(\text{He})/P(\text{H}_2\text{O}) = 16/2.5$ (1, 2) и $1.0/2.5$ кПа (3, 4).

и 318.5 nm $\text{OH}(A-X; 2-2)$. В плазме высокочастотного разряда на парах воды при $P(\text{H}_2\text{O}) = 100 \text{ Pa}$ также регистрировалась широкая полоса $\Delta\lambda = 300-310 \text{ nm}$ с $\lambda_{\text{max}} = 307.0, 308.3, 309.1 \text{ nm}$ (главный максимум) [9]. Излучение данной широкой полосы в [9] связывается со спонтанным распадом кластерных молекул $(\text{H}_2\text{O})_2$, но никакого обоснования для такого отождествления не приводится. Длины волн кантов полос излучения с $\lambda_{\text{max}} = 286$ и 262 nm коррелируют с известными переходами радикалов OH : $281.1-282.9 \text{ nm}$ $\text{OH}(A-X; 1-0)$, 278 nm $\text{OH}(B-A)$ и $260.9-262.2 \text{ nm}$ $\text{OH}(A-X; 2-0)$. Эксперимент по исследованию излучения плазмы тлеющего разряда на смеси $\text{He}/\text{H}_2\text{O} = 0.5-16.0/2.5$ кПа в ВУФ диапазоне спектра показал, что излучение сконцентрировано в широкой полосе с $\lambda_{\text{max}} = 185 \text{ nm}$. При уменьшении парциального давления паров воды до $0.1-0.2$ кПа максимум излучения сдвигается с 185 до 180 nm , что практически совпадает с кантом полосы $\lambda_{\text{max}} = 179 \text{ nm}$ $\text{OH}(C-A)$ [3]. Как видно из сравнения зарегистрированных нами максимумов УФ излучения, они хорошо коррелируют с кантами наиболее ярких полос радикала OH и немного сдвинуты в длинноволновую область спектра по сравнению с ними. Поэтому характеристическое излучение плазмы насыщенных паров воды может быть отождествлено с излучением димолей гидроксильной группы — $(\text{OH})_2^*$. В газовой среде с повышенной плотностью паров воды происходит быстрая гидратация димолей OH в кластерные молекулы вида $(\text{OH})_2^* \cdot (\text{H}_2\text{O})$ (где $m \geq 1$) [10]. В плазме на основе насыщенных паров воды образование возбужденных радикалов OH происходит в реакции:



При столкновении радикалов OH^* и OH в плазме становятся возможными образование димолей $(\text{OH})_2^*$ и их последующая гидратация. В диапазоне $\Delta\lambda = 300-400 \text{ nm}$ наблюдались полосы 2^+ системы

молекул азота, присутствовавших в качестве малой примеси в исследуемой газовой смеси. В видимой области спектра ($\Delta\lambda = 440-680 \text{ nm}$) наблюдались спектральные линии H_α , H_β и H_γ , а также линии атома гелия ($\lambda = 667.8, 587.6, 501.0, 447.1 \text{ nm}$). Эти спектральные линии могут использоваться при определении величин n_e , T_e методами эмиссионной спектроскопии. Интенсивность линии $\lambda = 667.8 \text{ nm}$ He I была значительно выше, чем $\lambda = 587.6 \text{ nm}$ He I , хотя, по данным таблиц [11], отношение их интенсивностей составляет 0.12 . Верхние энергетические состояния для данных линий имеют одинаковую энергию ($\epsilon_{\text{up}} = 23.07 \text{ eV}$ [11]), а нижние значительно отличаются (соответственно ϵ_0 равнялось 21.22 и 20.96 eV [11]).

Увеличение интенсивности красной линии He I может быть связано с селективным расселением нижнего уровня атома гелия при столкновениях с молекулами воды или продуктами ее диссоциации в разряде.

В диапазоне $P(\text{He}) = 1.0-4.0$ кПа, когда разряд был достаточно однородным по радиусу разрядной трубки, яркость полосы с $\lambda_{\text{max}} = 309.6 \text{ nm}$ слабо спадала с ростом парциального давления гелия (рис. 3). Яркость излучения молекул примеси на $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ $\text{N}_2(C-B; 0-0)$ была на порядок ниже, чем характеристической полосы 309.6 nm и имела широкий максимум при

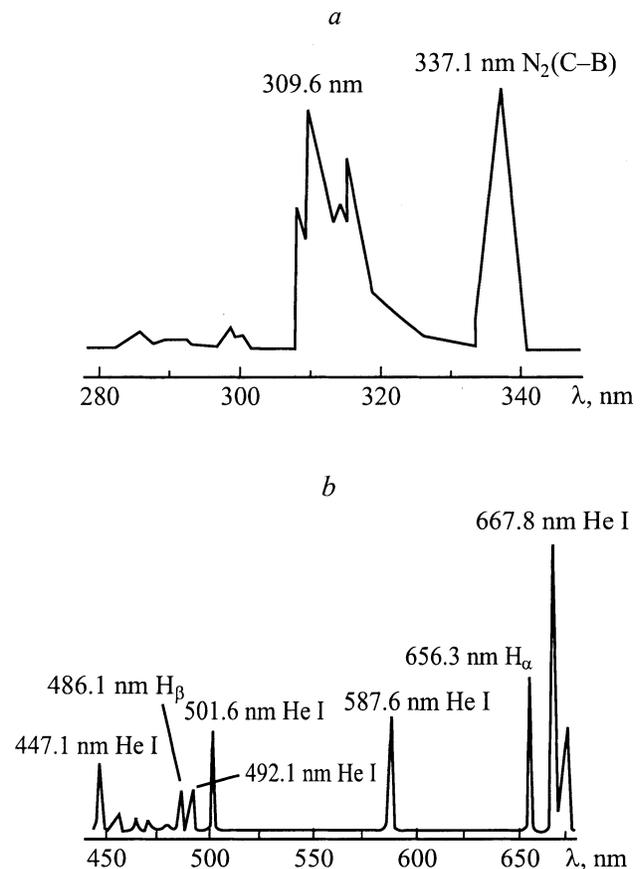


Рис. 2. Спектры излучения плазмы на смеси $\text{He}/\text{H}_2\text{O}$: *a* — УФ диапазон, *b* — видимая область.

$P(\text{He}) = 8 \text{ kPa}$. С увеличением парциального давления гелия в смеси (когда плазменный столб переходит в контрагированное состояние) яркость полосы 309.9 nm значительно увеличивается и достигает максимума при $P(\text{He}) = 8 \text{ kPa}$.

Типичные зависимости интенсивности излучения атомов He и H от величины парциального давления гелия в тлеющем разряде на смеси He/H₂O представлены на рис. 4. Интенсивность спектральной линии H α была примерно на порядок больше, чем линии H β и характеризовалась минимумом в зависимости $J = f(P(\text{He}))$ при давлении гелия 4 kPa . Интенсивность линии H β плавно уменьшалась с ростом парциального давления гелия. Максимум в зависимости $J = f(P(\text{He}))$ для спектральных линий 667.8 ; 501.0 и 491.1 nm He I достигался при парциальном давлении гелия $4\text{--}8 \text{ kPa}$, а для линии $\lambda = 587.6 \text{ nm}$ эта зависимость была плавно нарастающей до $P(\text{He}) = 16 \text{ kPa}$. Характер зависимости яркости полосы с $\lambda_{\text{max}} = 309.6 \text{ nm}$ и спектральной линии 667.8 nm He I был качественно одинаковым в диапазоне парциальных давлений гелия $4\text{--}16 \text{ kPa}$. Это косвенно

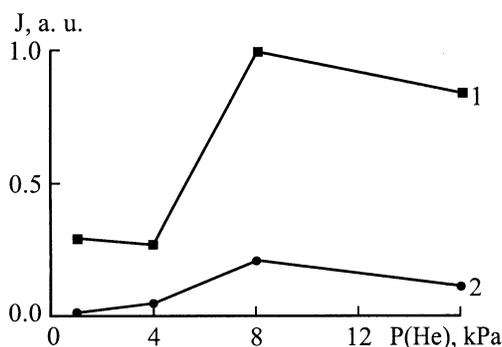


Рис. 3. Зависимости яркости излучения полос $\lambda_{\text{max}} = 309.6$ (1) и 337.1 nm (2) в разряде на смеси He/H₂O от парциального давления гелия при $P(\text{H}_2\text{O}) = 2.5 \text{ kPa}$ и $I_{\text{ch}} = 50 \text{ mA}$.

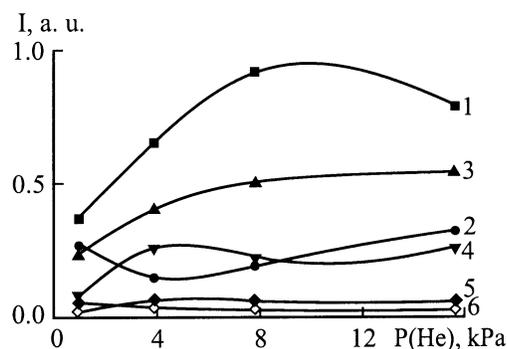


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения спектральных атомов гелия и водорода от величины парциального давления гелия в разряде на смеси He/H₂O = $P(\text{He})/2.5 \text{ kPa}$ при $I_{\text{ch}} = 50 \text{ mA}$: 1 — $\lambda = 667.8 \text{ nm}$ He I, 2 — $\lambda = 656.3 \text{ nm}$ H α , 3 — $\lambda = 587.6 \text{ nm}$ He I, 4 — $\lambda = 501 \text{ nm}$ He I, 5 — $\lambda = 491.1 \text{ nm}$ He I, 6 — $\lambda = 486.1 \text{ nm}$ H β .

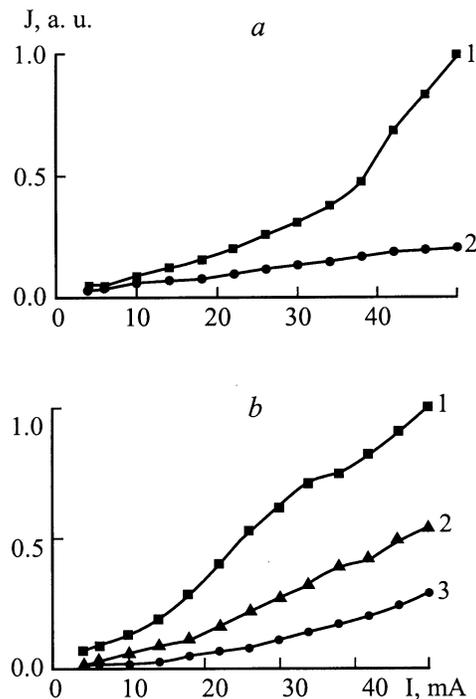


Рис. 5. Зависимость яркости излучения полос (a) и интенсивности спектральных линий He I и He I (b) от величины тока тлеющего разряда в смеси He/H₂O = $8.0/2.5 \text{ kPa}$: a — $\lambda = 309.6$ (1), 337.1 nm (2); a — $\lambda = 667.8$ He I (1), 656.3 H α (2), 486.1 nm H β (3).

указывает на значительную роль возбужденных атомов He при образовании возбужденных радикалов OH и кластеров на основе (OH)* при повышенном давлении смеси He/H₂O.

Типичные зависимости характеристических полос плазмы паров воды и молекул примеси (N₂), а также интенсивности спектральных линий атомов H и He представлены на рис. 5. Для полосы с $\lambda_{\text{max}} = 309.6 \text{ nm}$ зависимость яркости от I_{ch} в области малых токов была близкой к линейной, а с $I_{\text{ch}} \geq 15\text{--}20 \text{ mA}$ скорость роста яркости значительно увеличивалась с ростом I_{ch} . Для полосы с $\lambda_{\text{max}} = 337.1 \text{ nm}$ данная зависимость была линейной во всем исследуемом диапазоне разрядных токов. Наиболее интенсивными спектральными линиями были $\lambda = 667 \text{ nm}$ He I и 656.3 nm H I, а их зависимости от величин I_{ch} были близки к линейным. Интенсивность излучения других линий He I ($\lambda = 587.6, 506.1, 491 \text{ nm}$) была в $10\text{--}50$ раз ниже красной линии атома гелия, а характер зависимости их интенсивности от величин тока разряда были подобными.

Выводы

Исследование излучения плазмы продольного тлеющего разряда постоянного тока в смеси He/H₂O при $P(\text{H}_2) = 2.5 \text{ kPa}$ показало, что в области длин

волн 200–400 nm основной является полоса с $\lambda_{\max} = 309.6$ nm и шириной $\Delta\lambda = 9$ nm; диагностика параметров плазмы n_c , T_c методом эмиссионной спектроскопии может быть проведена с использованием спектральных линий 656.3 nm H α , 486.1 nm H β и 667.8, 587.6, 501.0, 491.1 nm He I; для получения максимальной яркости излучения полосы 309.6 nm оптимальное парциальное давления гелия составляет 8 kPa, а ее зависимости от величины тока разряда является нелинейно возрастающей в области 20–50 mA без признаков насыщения; на основе характеристической полосы с $\lambda_{\max} = 309.6$ nm может быть создан простой источник УФ излучения, работающий в режиме медленной замены газовой смеси $P(\text{He})/P(\text{H}_2\text{O}) = 8.0/2.5$ kPa при $I_{ch} \geq 50$ mA.

Список литературы

- [1] Мавлютов А.А., Миськевич А.И., Саламаха Б.С. // Опт. и спектр. 1994. Т. 76. С. 946–954.
- [2] Шуаибов А.К., Шевера И.В. // ЖПС. 1997. Т. 67. С. 242–248.
- [3] Вуль А.Я., Кидалов С.В., Миленин В.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 1. С. 10–16. Там же. 1999. Т. 25. Вып. 8 С. 62–66.
- [4] Смирнов Б.М. // УФН. 2000. Т. 170. С. 495–534.
- [5] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ЖПС. 2001. Т. 68. С. 275–277.
- [6] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [7] Pears R.W.B., Gaydon A.G. The Identification of Molecular Spectra. London: Chapman Hall, ltd., 1963.
- [8] Wallace L. // Astrophys. J. 1962. Vol. 7. Suppl. Ser. P. 245–247.
- [9] Soskida M. // 32 EGAS. Abstract. Vilnius, 2000. P. 314–315.
- [10] Востриков А.А., Дубов Д.Ю. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 1. С. 760–770.
- [11] Стриганов А.Р., Одицова Г.А. // Таблицы спектральных линий атомов и ионов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 321 с.