

04;12

## Эмиссионные характеристики газоразрядной плазмы на основе паров этанола

© А.А. Генерал, А.К. Шуаибов, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк

Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород, Украина

E-mail: heneral-andrij@rambler.ru

Ужгородский национальный университет, Украина

Поступило в Редакцию 13 декабря 2013 г.

Изучены эмиссионные характеристики низкотемпературной плазмы на основе паров этилового спирта, которая формировалась при помощи высокочастотного и барьерного разрядов. Детально исследовано излучение плазмы в спектральном интервале 300–700 nm. Парциальное давление паров спирта было равным 5.7 kPa. Спектры излучения плазмы паров спирта и смеси аргон/спирт имеют существенные отличия. Также представлены временные характеристики импульсов тока и излучения в высокочастотном разряде в парах спирта.

Результаты экспериментального исследования излучательных характеристик плазмы продольного импульсно-периодического разряда на основе паров этилового спирта в спектральном диапазоне 300–500 nm приведены в работе [1]. Но моделирование физики процессов в подобной плазме показало, что необратимая диссоциация молекул этанола и образование устойчивых молекул углеводородов, имеющих более высокие энергии диссоциации электронным ударом, приводят к невыгодности получения молекул радикала гидроксила  $\text{OH}$  ( $\text{A} \rightarrow \text{X}$ ) в такой рабочей среде [2]. К тому же ресурс работы таких ламп может оказаться низким из-за оседания на внутреннюю поверхность выходной апертуры излучателя непрозрачных углеродных пленок.

Низкотемпературная плазма паров этилового спирта представляет значительный интерес для использования в альтернативных источниках водорода и оптимизации технологии получения синтез-газа [3,4]. Для применения в таких технологиях высокочастотного разряда низкого давления или импульсного барьерного разряда повышенного давления, а также контроля параметров плазмы этилового спирта по ее излучению в видимой и ультрафиолетовой области спектра важным является

исследование ее эмиссионных характеристик. Для таких практических применений может представлять интерес разработка плазмохимических реакторов с поперечным высокочастотным (ВЧ) разрядом и импульсным барьерным разрядом на основе паров этилового спирта.

Условия образования возбужденных продуктов диссоциации молекулы этилового спирта, а также спектральные характеристики ВЧ-разряда низкого давления в парах спирта малоисследованы. Совсем не изучены эмиссионные характеристики плазмы импульсного барьерного разряда в смеси  $\text{Ag}/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  и влияние аргона на эффективность излучения продуктов деструкции этанола.

В данной работе приводятся результаты исследования характеристик барьерного разряда в парах этилового спирта (96%) и смеси  $\text{Ag}/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ , а также спектральные характеристики, осциллограммы импульсов тока и излучения ВЧ-разряда в насыщенных парах спирта.

Эксперименты с возбуждением барьерным разрядом проводились с плоским газоразрядным источником, электродами в котором являлись, с одной стороны, поверхность диэлектрика, а с другой — медный электрод. Разрядный промежуток между электродами был равным 5 мм, а излучение разряда вводилось наружу через боковую кварцевую оболочку. Для возбуждения газовой среды применялся генератор с резонансной перезарядкой накопительного конденсатора емкостью 680 пФ, а в качестве коммутатора применялся тиратрон ТГИ2-500/20. Частота следования импульсов составляла 0.1–1 кГц, а на электроды газоразрядного источника подавалось импульсное напряжение до 5 кВ. Давление паров спирта составляло  $\sim 5.7$  кПа, а давление аргона изменялось в пределах 0–100 кПа.

Для регистрации спектральных характеристик источников излучения барьерного разряда использовался монохроматор MS 7504i фирмы „SOLAR TII“ и камера CCD. В работе детально исследовался спектральный интервал 300–700 нм.

ВЧ-разряд в парах спирта формировался в объеме  $17 \times 3 \times 2.2$  см<sup>3</sup> (где 2.2 см — межэлектродное расстояние). Система электродов состояла из никелированного электрода длиной 17 см и плоского электрода из листового никеля [5]. Электроды были установлены внутри разрядной камеры из кварца. В этом случае излучение разряда исследовалось при помощи монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106. Для регистрации временных характеристик суммарного излучения разряда применялись импульсный ФЭУ „Фотон“ и осциллограф С1-99. Воз-

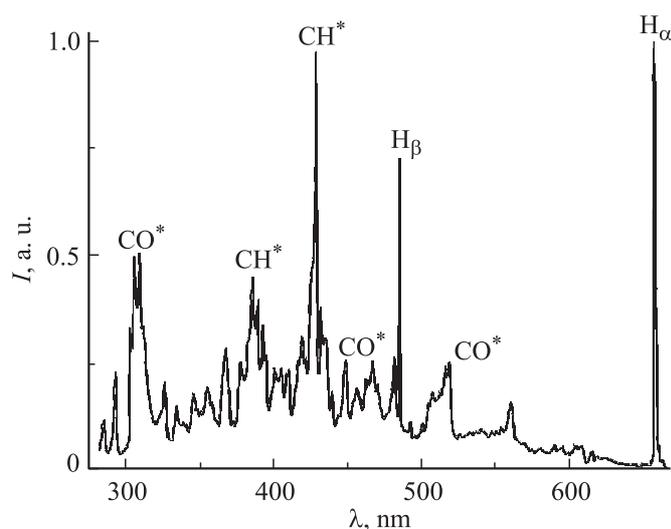
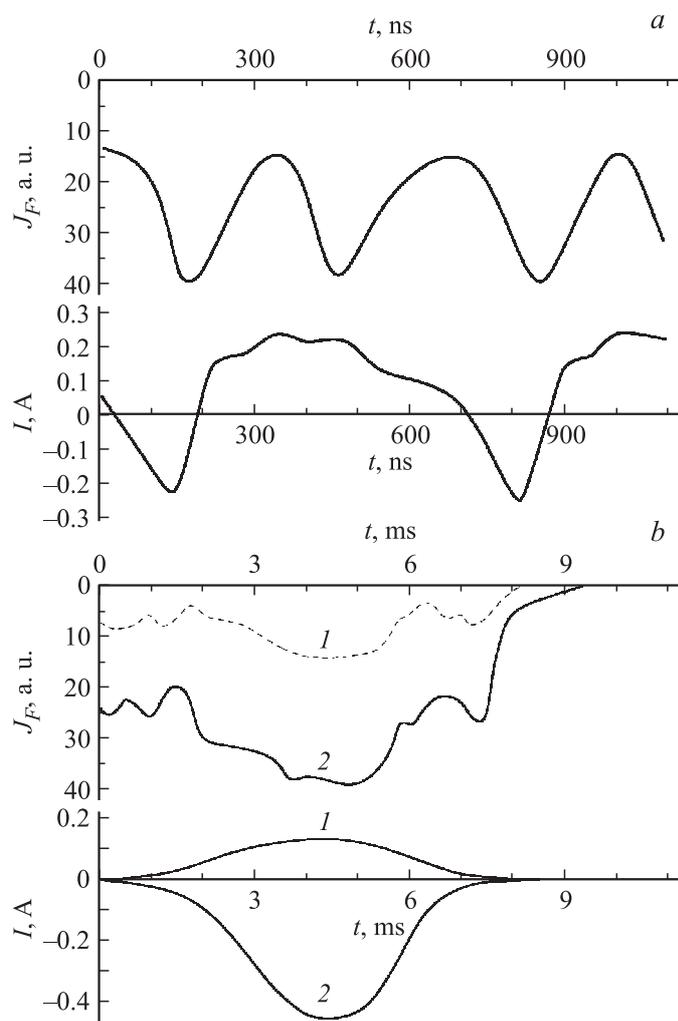


Рис. 1. Спектр излучения  $J(\lambda)$  ВЧ-разряда в парах этанола (96%).

буждение ВЧ-разряда осуществлялось при помощи источника модулированного ВЧ-напряжения со средней мощностью, не превышающей 300 W. Источник возбуждения генерировал ВЧ-колебания частотой 1.76 MHz, заполняющие полупериоды синусоидального напряжения частотой 50 Hz.

Спектральные характеристики источника излучения с высокочастотной накачкой представлены на рис. 1. Электронно-колебательные полосы молекул  $\text{CO}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  были уширены, что привело к их взаимному перекрытию в спектральном диапазоне 350–520 nm и образованию основного континуума излучения. Континуум был сформирован на основе электронно-колебательных полос радикала  $\text{OH}^*$  (переход  $0 \rightarrow 0$  полосы  $^2\Sigma^+ \rightarrow ^2\Pi$ , главный максимум при 309 nm), молекулы  $\text{CO}^*$  (переходы третьей положительной системы  $0 \rightarrow 1$ ,  $0 \rightarrow 2$ ) и широких полос  $^2\Delta \rightarrow ^2\Pi$ ,  $^2\Sigma \rightarrow ^2\Pi$  с переходами в основное состояние молекулы  $\text{CH}$ . В высокочастотном разряде излучение в видимом диапазоне спектра определялось наиболее интенсивными спектральными линиями атомов водорода (серия Бальмера), из которых особенно выделялась спектральная линия  $\text{H}_\alpha$  с максимумом на 656.3 nm.



**Рис. 2.** *a* — осциллограммы импульсов тока  $I$  и интегрального излучения плазмы  $J_F$  высокочастотного разряда в парах этанола; *b* — осциллограммы излучения и тока ВЧ-разряда, усредненные за длительность макроимпульса (*1* — давление 50 Па, *2* — 130 Па).

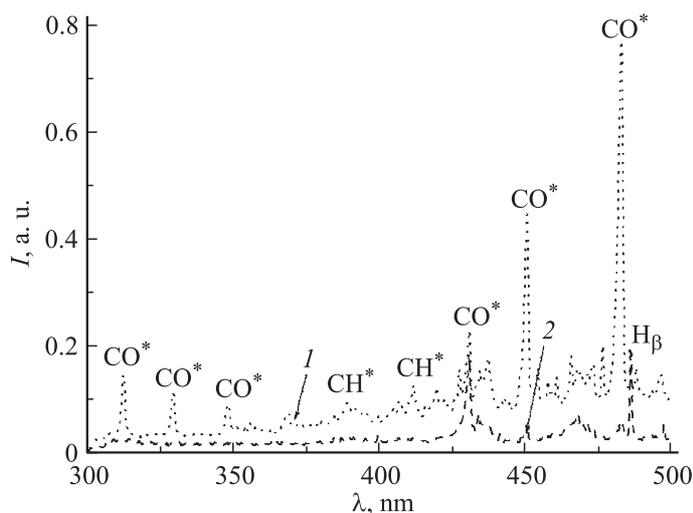


Рис. 3. Спектры излучения  $J(\lambda)$  барьерного разряда в парах смеси  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ .

На рис. 2, *a* приведены осциллограммы импульсов тока и УФ-излучения плазмы ВЧ-разряда. Между напряжением и током наблюдался сдвиг по фазе, который уменьшался с увеличением паров спирта. При этом существенно увеличивался вклад постоянной составляющей излучения в суммарной мощности УФ-излучении разряда. Частота переменной составляющей излучения равнялась удвоенной частоте возбуждающего тока. Максимумы УФ-излучения располагались на участках увеличения и уменьшения ВЧ-составляющей разрядного тока. Характерные же осциллограммы тока и излучения, усредненных на протяжении длительности макроимпульса, приведены на рис. 2, *b*. На переднем и заднем фронтах макроимпульса излучения плазмы наблюдалась пиковая структура: 1–2 пика на переднем, 1 в средней части и 1–2 на заднем фронте. Увеличение давления паров этанола с 50 до 130 Па в разряде приводило к увеличению количества пиков и их уширению.

На рис. 3 приведены интегрированные во времени спектры излучения барьерного разряда в парах смеси  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ : 1 — для давления аргона  $\sim 5$  кПа при давлении паров этанола  $\sim 5.7$  кПа, 2 — для насыщенных паров спирта. Как видно на рис. 3, в барьерном разряде излучение радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$  слабоинтенсивное, в то же время в

спектре преобладают полосы молекулы  $\text{CO}^*$ , представленные переходами третьей положительной, а также системы Ангстрема. Поскольку при диссоциации молекул спирта с весьма большой вероятностью единственный атом кислорода вовлекается в реакции образования молекул  $\text{CO}^*$ , излучение которых наблюдается в спектрах смеси аргон/этанол, альтернативная реакция образования радикалов  $\text{OH}$  протекает неэффективно. Поэтому разряд указанного типа скорее можно рассматривать как источник белого света, а не как УФ-излучатель. Для лучшего понимания элементарных реакций, которые происходят в плазме смеси  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , требуется моделирование кинетики протекающих в ней процессов. Также впервые нами было зарегистрировано увеличение мощности излучения в  $\sim 1.5$  раза в спектральной области 300–500 нм, при добавлении аргона давлением  $\sim 5$  кПа.

При зажигании барьерного разряда в насыщенных парах спирта без аргона, а также при перманентной откачке разрядного источника наблюдался весьма однородный диффузный разряд, розовый цвет которого определялся излучением самой интенсивной спектральной линии  $\text{H}_\alpha$  (серия Бальмера) атома водорода с максимумом на 656.3 нм. В смеси же паров спирта с аргонном наблюдался преимущественно разряд белого цвета, который определялся излучением возбужденных атомов  $\text{CO}^*$ .

Таким образом, исследование эмиссионных характеристик низкотемпературной плазмы паров спирта в спектральном диапазоне 300–700 нм выявило различия в спектрах излучения при низком ( $\sim 130$  Па — ВЧ-разряд) и повышенном ( $\sim 5.7$  кПа — барьерный разряд) давлении паров спирта, а также в зависимости от наличия аргона. В барьерном разряде впервые было зафиксировано, что добавление аргона усиливает мощность излучения продуктов деструкции этанола.

## Список литературы

- [1] Генерал А.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпенник Ю.О. // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 98–101.
- [2] Левко Д.С., Цымбалюк А.Н. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 88–94.
- [3] Щедрин А.И., Левко Д.С., Черняк В.Я., Юхименко В.В., Наумов В.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 10. С. 18–24.
- [4] Цымбалюк А.Н., Левко Д.С., Черняк В.Я., Мартыш Е.В., Недыбалюк О.А., Соломенко Е.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 53–58.
- [5] Шуаибов А.К., Шевера И.В. // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 104. № 4. С. 594–600.