

Характеристики наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления с жидким электролитическим электродом

© А.К. Шуаибов, И.В. Шевера, Я.Ю. Козак, Г.В. Кентеш

Ужгородский национальный университет,
88000 Ужгород, Украина
e-mail: jarynkad@ukr.net

(Поступила в Редакцию 25 октября 2013 г.)

Представлены пространственные, электрические и излучательные характеристики импульсно-периодического наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления между электродом на основе системы лезвий и поверхностью дистиллированной воды, а также раствором сульфата цинка в воде.

Введение

Импульсно-периодические разряды разного вида над поверхностью воды и электролитов являются источником радикалов, озона и ультрафиолетового (УФ) излучения, поэтому находят все более широкое применение для очистки воды от вредных химических и биологических примесей, стерилизации и иницированию химических реакций [1–3]. В последнее время такие разряды стали применять и для синтеза наноструктур металлов или их оксидов, которые перспективны для применения в микро- и нанотехнологиях [4]. По сравнению с синтезом наноструктур металлов и их оксидов в импульсном разряде в жидкости синтез наноструктур в разрядах над поверхностью электролита имеет ряд преимуществ: более низкие требования к источнику иницирования разряда (уменьшенное напряжение питания), отсутствие значительной эрозии электродов, более низкие требования к системе охлаждения реактора. Но в большинстве исследованных разрядных систем применялись системы электродов для получения одноканального разряда, который замыкается на небольшой участок площади электролита. Увеличение последней позволит увеличить количество радикалов, которые, попадая в раствор, инициируют синтез наночастиц.

Одно из возможных решений подобной проблемы для системы очистки сильно загрязненной воды предложено в работе [5], где проводились исследования многоканального коронного разряда в воздухе атмосферного давления между 230 острями иглок из платино-родиевой проволоки и металлическим электродом, погруженными в воду или тестовые растворы воды с фенолом или *p-p*-гептаном. Длительности импульсов напряжения и тока в этих экспериментах достигали 150 ns (при максимальной амплитуде напряжения до 20 kV и тока до 170 А).

Для увеличения мгновенной мощности импульсного разряда и уменьшения нагревания раствора представляется интерес уменьшение длительности импульсов напряжения и тока, а для изготовления более технологического электрода с сильным искажением напряженности электрического поля (большое количество одинаковых иго-

лок) может быть перспективным применение электродов на основе системы металлических лезвий.

Для увеличения эффективности реакторов для синтеза наночастиц нами было предложено использование применения потенциального электрода на основе набора тонких лезвий из нержавеющей стали, установленных над поверхностью электролита [6].

В настоящей работе приводятся результаты исследования характеристик импульсного наносекундного разряда с жидкостным катодом на основе дистиллированной воды и раствора сульфата цинка в дистиллированной воде, которые могут быть перспективным и для очистки воды, синтеза озона, радикалов (ОН, О, Н), а также синтеза наноструктур на основе оксида цинка.

Техника и условия эксперимента

Импульсный наносекундный разряд над поверхностью дистиллированной воды или электролита, которым служил 10%-ный раствор сульфата цинка ($ZnSO_4$) в дистиллированной воде, зажигался в диэлектрической кювете (рис. 1) с системой электродов: „лезвия–поверхность жидкости“. Расстояние между набором лезвий и плоским металлическим электродом из нержавеющей стали, который погружался в жидкость на глубину 4 mm, составляло 7.5 mm и могло варьироваться при помощи винтовых креплений электродов. Расстояние между остриями лезвий и поверхностью жидкости составляло 3.5 mm. Точность установки межэлектродного расстояния была не хуже 0.1 mm.

Разрядная кювета была изготовлена из листового оргстекла толщиной 8 mm, имела объем примерно 1 л и была оборудована кварцевым окном диаметром 50 mm, прозрачным до $\lambda = 190$ nm. Верхний электрод был изготовлен из набора нержавеющей лезвий (15 шт.) толщиной 0.1 mm и расстоянием между лезвиями 1 mm. Площадь рабочей поверхности электрода из лезвий составляла 37×22 mm. Нижний электрод был изготовлен из нержавеющей стали и имел размеры $60 \times 40 \times 14$ mm. Разрядная ячейка устанавливалась в металлическом экране с целью минимизации влияния паразитных им-

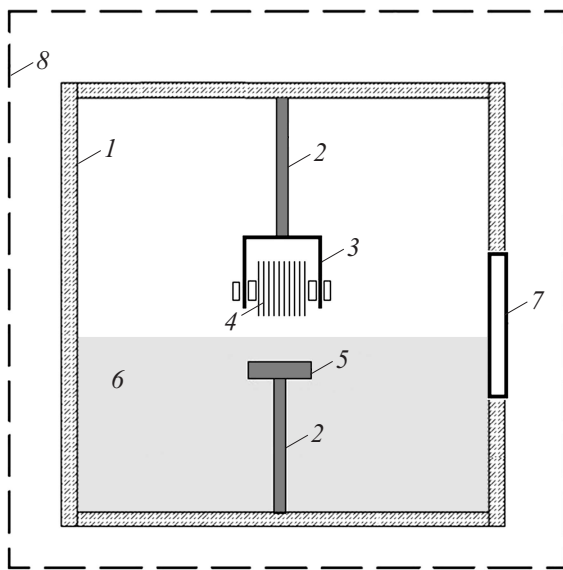


Рис. 1. Конструкция разрядного модуля с жидким электролитическим электродом: 1 — кювета, 2 — винтовая система крепления и регулировки расстояния между металлическими электродами, 3 — система крепления лезвий, 4 — лезвия, 5 — плоский металлический электрод, 6 — раствор сульфата цинка, 7 — кварцевое окно, 8 — металлический экран.

пульсных электромагнитных полей на системы регистрации характеристик разряда.

Импульсно-периодический разряд зажигался при помощи источника импульсов высокого напряжения с резонансной перезарядкой накопительного конденсатора емкостью 1.54 нФ и коммутатором — водородным тиратроном. Амплитуда импульсов напряжения на выходе модулятора увеличивалась при помощи импульсного кабельного трансформатора примерно в 3 раза и достигала 30 кВ при длительности отдельного выброса на уровне 10–15 нс. Амплитуда основного максимума импульса тока достигала 50–170 А при его длительности 20–30 нс. Частота следования импульсов тока могла варьироваться в диапазоне 10–100 Гц. Анализ излучения плазмы проводился при помощи монохроматоров МДР-2 и ДФС-12 и фотоумножителя ФЭУ-106. Более детально система регистрации характеристик наносекундного разряда описана в работе [7]

Пространственные, электрические и оптические характеристики

При использовании жидкостного электрода на основе дистиллированной воды зажигался наносекундный коронный разряд в безстримерной форме. Возле острия каждого из лезвий наблюдалась сравнительно однородная генерационная зона фиолетового цвета, которая прорастала в глубь разрядного промежутка в воздухе на 0.5–1 мм. При замене воды на электролит зажигался

сравнительно однородный поперечный наносекундный разряд во всем разрядном промежутке (рис. 2, вид сбоку).

Острые лезвий за счет усиления напряженности электрического поля могли служить источником убегающих электронов, которые выполняли роль предыонизатора [8]. В подобных случаях разряд короткой длительности в системе непрофилированных электродов в газах атмосферного давления зажигался в виде широких диффузных плазменных струй [9], что и наблюдалось в настоящем эксперименте. Наиболее однородным и устойчивым к контрагированию в обоих случаях был разряд при частоте следования импульсов тока 25 Гц, поэтому все дальнейшие эксперименты были проведены при этой частоте.

После действия разряда на поверхность раствора электролита в течение 40–60 мин на поверхности нижнего металлического электрода (погруженного в электролит) после его просушки наблюдался осадок серо-белого цвета, который может быть идентифицирован как наноструктуры из ZnO. Установление точной его природы и размеров наноструктур требует проведения рентгеноструктурной диагностики и исследований спектров поглощения коллоидного раствора.

Поперечная система электродов имела емкость $C \approx 0.5–2$ нФ, поэтому выполняла роль обострительного импульсного конденсатора, что позволяло получать мощные и короткие по длительности импульсы напряжения и тока.

На рис. 3 приведены характерные импульсы тока электрической мощности наносекундного поперечного разряда с электролитным электродом. При частоте следования импульсов тока 25 Гц поперечный разряд был наиболее однородным, а при других частотах наблюдалось образование стримеров. При увеличении толщины шара электролита над электродом, погруженным в жидкость, однородность разряда увеличивалась, и переход в стримерный режим не происходил.

Амплитуда импульса напряжения достигала 30 кВ, а его длительность составляла примерно 15 нс. Амплитуда импульса тока могла достигать 150–180 А, но при увеличении глубины погружения металлического электрода в дистиллированную воду, которая выполняла роль бал-

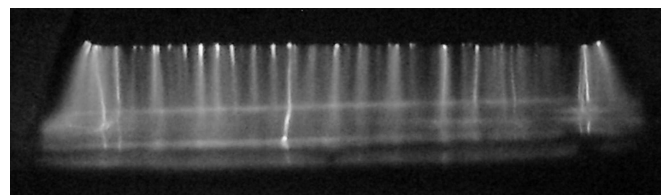


Рис. 2. Пространственные характеристики наносекундного разряда в системе электродов „лезвия–поверхность электролита“ при межэлектродном расстоянии 7.5 мм и глубине погружения металлического электрода в электролит 4 мм (вид сбоку).

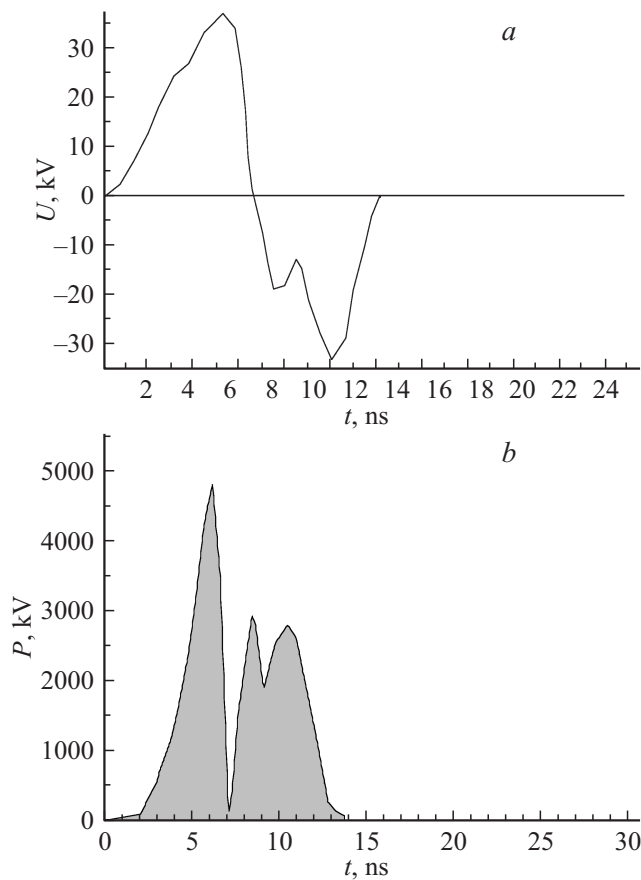


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и электрической мощности (b) поперечного наносекундного разряда над поверхностью 10%-ного раствора сульфата цинка в дистиллированной воде.

ластного сопротивления, она уменьшалась в несколько раз. К такому же результату приводило и увеличение расстояния между потенциальным электродом (системой лезвий) и поверхностью жидкости. Длительность основной части импульса тока составляла 5–8 ns (на половине амплитуды осциллограммы импульса тока), что перспективно для генерации пучка убегающих электронов в поперечном разряде. После начала увеличения напряжения уже примерно через 2 ns возникал ток, что отмечено на осциллограмме напряжения небольшим уступом при $t = 2$ ns. Максимальная импульсная мощность поперечного разряда достигала примерно 5 MW при времени $t = 2$ ns, а энергия этого импульса составляла ~ 20 mJ.

На рис. 4 и 5 представлены усредненные по времени спектры излучения поперечного наносекундного разряда с электродом на основе дистиллированной воды и 10%-ного раствора. В УФ и видимой областях спектра при использовании в качестве электрода на основе воды в спектрах излучения разряда доминировало излучение второй позитивной системы молекулы азота (рис. 4). Из-за низкой частоты следования импульсов испарение

воды было малым, поэтому излучение полосы 309 nm радикалов $\text{OH}(A \rightarrow X)$ и других продуктов распада молекул воды было малоинтенсивным.

В таблице приведены результаты идентификации спектра излучения разряда с электролитным электродом. В этом случае обнаружено излучение молекул азота, оксида азота, атомов цинка, серы и железа.

Появление спектральных линий атомов железа объясняется распылением стальных лезвий, что указывает на возможность синтеза комплексных наночастиц на основе как цинка, так и железа, которые могут иметь сильные магнитные свойства. Спектральные линии атомов цинка и серы связаны с диссоциацией молекул ZnSO_4 в растворе и их неравновесным переносом в газоразрядную плазму.

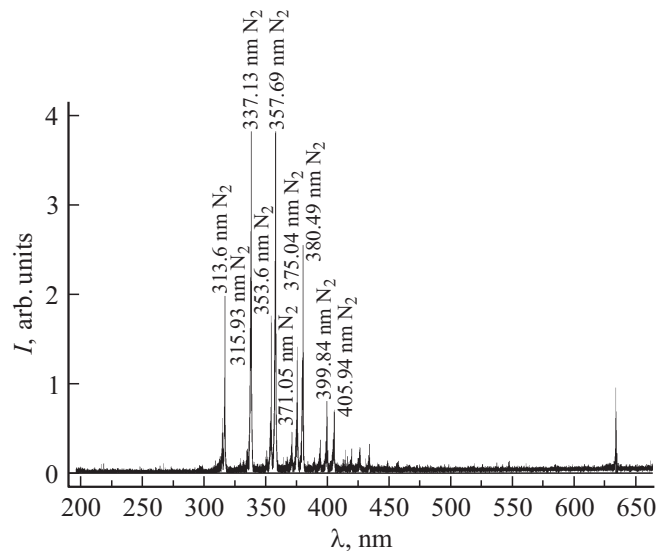


Рис. 4. Спектр излучения поперечного разряда над поверхностью дистиллированной воды.

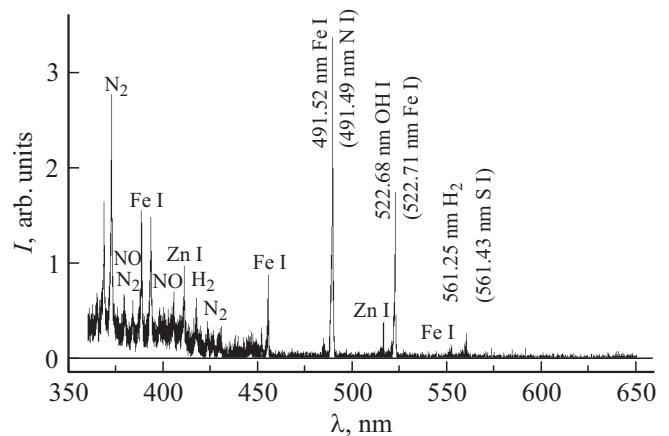


Рис. 5. Спектр излучения поперечного разряда над поверхностью 10%-ного раствора сульфата цинка в дистиллированной воде.

Результаты идентификации спектра излучения поперечного наносекундного разряда над поверхностью раствора сульфата цинка в дистиллированной воде

364.17 nm N ₂
371.05 nm N ₂
375.54 nm N ₂
380.09 nm NO
385.75 nm N ₂
388.62 nm Fe
393.03 nm Fe
406.14 nm NO
411.32 nm Zn
417.71 nm
423.43 nm N ₂
446.26 nm NO
455.98 nm Fe
484.86 nm N ₂
491.52 nm Fe (491.49 nm N)
516.49 nm Zn
522.7 nm Fe
552.4 nm Fe
561.4 nm S

Таким образом, в настоящей работе показано, что в системе электродов из тонких стальных лезвий и электролита формируется многоканальный наносекундный разряд довольно большого объема, в котором на электроде, погруженном в жидкость, и самом растворе возможно образование наноструктур из оксидов металлов.

Список литературы

- [1] Аристова Н.А., Пискарев И.М. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 41–44.
- [2] Аристова Н.А., Пискарев И.М. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Т. XI-5 / Под ред. Лебедева Ю.А., Платэ Н.А., Фортова В.Е. М.: Изд-во ЯНУС-К, 2006. С. 310.
- [3] Пискарев И.М., Иванова И.П., Трофимова С.В., Аристова Н.А. // ХВЭ. 2012. Т. 46. № 5. С. 406–411.
- [4] Richmonds C., Sankaran R.M. // Appl. Phys.Lett. 2008. Vol. 93. P. 132 501.
- [5] Божко И.В., Петухов И.С. // Технічна електродинаміка. 2005. № 3. С. 21–27.
- [6] Кентеш Г., Козак Я., Шевера І., Шуаїбов О. // Int. Conf. of Young Scient and Post-Grad. / Inst. of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci. IEP-2013. Uzhhorod. 20-23 May 2013/ Progr. and Abstr. P. 290.
- [7] Шуаибов А.К., Гомоки З.Т., Миня А.И., Шевера И.В., Джупина Я.Ю. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 156–158.
- [8] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [9] Хомич В.Ю., Ямицкий В.А. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 77–88.