## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

УДК 537.5

# ПРОЗРАЧНЫЕ ГИДРОГЕЛЕВЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ – НОВЫЙ КЛАСС ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2019 г. А. Е. Дубинов<sup>а, b,</sup> \*, Ю. П. Кожаева<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, 607188 Россия

<sup>b</sup>Саровский физико-технический институт Национального Исследовательского Ядерного Университета "МИФИ", Саров, 607188 Россия

> \**E-mail: dubinov-ae@yandex.ru* Поступила в редакцию 20.12.2018 г. После доработки 07.06.2019 г. Принята к публикации 19.06.2019 г.

В работе впервые продемонстрировано применение прозрачных для видимого света гидрогелевых электродов для генерации искровых разрядов атмосферного давления с амплитудой тока до 400 А, периодически следующих друг за другом с частотой 250 Hz. Описана технология насыщения гидрогелевых электродов на основе полиакриламида водными растворами NaCl и CuSO<sub>4</sub>. Представлены видеоизображения разрядов и кратеров, образующихся на поверхности электродов.

*Ключевые слова:* раствор, гидрогель, электрод, искровой разряд **DOI:** 10.1134/S0023119319060032

#### введение

Искровой разряд представляет собой детально изученный и широко применяемый тип газового разряда [1]. Для его осуществления высоковольтный импульс малой длительности прикладывают к электродам, между которыми находится газ. Чаще всего электродами служат твердотельные металлические катод и анод [2–5]. Часто один или оба электрода в искровых разрядах представляют собой поверхности проводящих жидкостей [6–8].

Для некоторых исследований требуется генерировать искровые разряды на электродах, прозрачных для света видимого диапазона. Такая задача может возникать, например, для удобства визуализации процессов взаимодействия плазмы с электродом.

Металлические электроды непрозрачны, а их форма задается при изготовлении и постоянна при разрядах. Жидкие электроды, например, в виде водного раствора NaCl, наоборот, могут быть прозрачны, но они текучи вод действием силы тяжести и не сохраняют форму так, как металлические электроды.

Известны, например, твердотельные прозрачные электроды, сквозь которые наблюдают за движением плазмы по электроду [9–11]. Такие электроды изготавливаются из стекла с помощью напыления на него тонких проводящих слоев (например, indium-tin-oxide) или из полупроводниковых материалов (например, GaAs : Cr). Однако, для генерации энергоемких сильноточных искровых разрядов наносекундной длительности такие электроды неприменимы, поскольку тонкие проводящие слои быстро разрушаются.

В газоразрядной технике известны также пористые керамические электроды, пропитываемые электролитами [12, 13]. Они хорошо держат свою форму, но абсолютно непрозрачны.

Обозначим две возможные стратегии поиска прозрачных электродов нового типа. Известно, что металлы непрозрачны для света потому, что плазменная частота носителей тока в металлах на порядки превышает частоту электромагнитной волны видимого света. Для обеспечения прозрачности следует понизить плазменную частоту для носителей тока в материалах электродов. Это можно сделать двумя путями:

уменьшая концентрацию носителей и, следовательно, увеличивая удельное сопротивление (как это обеспечивается в полупроводниках с электронами и дырками в качестве носителей тока);





Рис. 1. Фото насыщенных гранул: (а) – для растворов NaCl; (б) – для растоворов CuSO<sub>4</sub>; везде 1 – сухая гранула, 2 – гранула, насыщенная дистиллированной водой, 3 – гранула, насыщенная раствором с весовой долей соли 2: 100, 4 – с долей 4: 100, 5 – с долей 6: 100, 6 – с долей 8: 100, 7 – с долей 10: 100.

увеличивая массу носителей (как это обеспечивается в водных растворах солей с тяжелыми ионами в качестве носителей тока).

В данной работе представлены результаты экспериментов, в которых продемонстрированы импульсно-периодические искровые разряды между электродами, изготовленными из гидрогелей, насыщенных водными солевыми растворами NaCl и CuSO<sub>4</sub>. Эти эксперименты являются обоснованием нового класса электродов — гидрогелевых электродов, которые надолго сохраняют свою форму, имеют ионную проводимость и остаются прозрачными в процессе длительной работы при генерации сильноточных разрядов.

Отметим, что ранее гели использовались в исследованиях разрядов в качестве плазмообразую-



**Рис. 2.** Фрагмент осциллограммы последовательности зарядки и разряда генератора высоковольтных импульсов.

щих изоляторов [14, 15]. Однако исследований электрических разрядов с гелевым электродами прежде не проводились.

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГИДРОГЕЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Для материала электродов был выбран полиакриламид (polyacrylamide) в виде сферических гранул. В сухом состоянии гранулы имеют диаметр ~2.5 мм и массу ~20 мг. Для наполнения гранул готовились водные растворы NaCl и CuSO<sub>4</sub> в различных весовых пропорциях. Гранулы помещались в растворы на сутки при комнатной температуре. Установлено, что гранулы, насыщенные этими растворами, увеличивались в диаметре и по массе. Фотоизображения сухих гранул, гранул, насыщенных дистиллированной водой, а также насыщенных различными по концентрации солей растворами, представлены на рис. 1а, б. Оказалось, что полученные таким образом образцы достаточно прозрачны и имеют показатель преломления, близкий к показателю преломления воды.

Было найдено, что чем больше концентрация соли в растворе, тем меньше размер насыщенной гранулы и тем меньше ее масса. Гранулы, насыщенные раствором NaCl, эластичны, после кратковременной механической деформации они возвращаются в исходную форму. Гранулы, насыщенные раствором CuSO<sub>4</sub>, оказались твердыми и хрупкими. Выяснилось, что внутри них соль CuSO<sub>4</sub> закристаллизована. Гранулы, насыщенные раствором CuSO<sub>4</sub>, остаются упругими и прозрачными при существенно меньшей концентрации раствора. Поэтому в дальнейшем были использованы грану-



**Рис. 3.** Синхронизированные осциллограммы тока и напряжения одного из импульсов последовательности.

лы, насыщенные раствором CuSO<sub>4</sub> с массовой долей соли 0.2 : 100.

В насыщенные гранулы вводились игольчатые стальные токовводы на глубину несколько мм. Расстояние между гранулами устанавливалось в диапазоне 2–5 мм.

К токовводам подключался генератор периодической последовательности наносекундных высоковольтных импульсов. На рис. 2 показана осциллограмма последовательности импульсов зарядки и разряда генератора, идущих с частотой ~250 Гц. На рис. За, б показаны синхронизированные осциллограммы тока и напряжения с амплитудами ~400 A и ~5 кВ соответственно, для одного импульса из этой последовательности.

Наблюдения искровых разрядов велось с помощью ручного цифрового микроскопа "Celestron" (Model 44302-A), позволяющего записывать видео с частотой 20 кадров/с. В итоге, мы получали отдельные кадры видеозаписи, на которые накладывались изображения 12 искровых разрядов.





**Рис. 4.** Изображения сверху искровых разрядов между гидрогелевыми электродами: (а) — электроды, насыщенные NaCl; (б) — электроды, насыщенные  $CuSO_4$  (везде катод — слева, анод — справа).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ГИДРОГЕЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ

В результате экспериментов получено, что между гидрогелевыми гранулами устойчиво возникают искровые разряды. Положение разрядов слегка изменяется от импульса к импульсу. Электроды остаются при этом прозрачными. Светящиеся токовые каналы внутри электродов не образуются. Изображения искровых разрядов, возникающих между гидрогелевыми электродами, представлены на рис. 4а, б и рис. 5.

После 3 мин непрерывной работы генератора были исследованы участки поверхностей гидрогелевых электродов. Были обнаружены следы образования кратеров, типичные для металлических электродов. Фотографии микрократеров представлены на рис. 6а, б. Эти фотографии сви-



**Рис. 5.** Изображение сбоку искровых разрядов между гидрогелевыми электродами, насыщенными NaCl (катод – слева, анод – справа).

(a)





**Рис. 6.** Изображения кратеров на поверхности электродов с NaCl, образовавшихся после 3 мин непрерывной работы: (а) – катод, (б) – анод.

детельствуют о том, что работа гидрогелевых электродов во многом аналогична работе металлических электродов. И при этом гидрогелевые электроды остаются прозрачными для видимого света и сохраняют форму, как твердые тела.

### выводы

Таким образом, впервые продемонстрировано применение прозрачных для видимого света гидрогелевых электродов для генерации искровых разрядов. Представленные результаты позволяют заключить о возможностях и перспективности нового класса материалов, применимых для электродов сильноточных разрядов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997.
- 2. Astanei D., Faubert F., Pellerin S., Hnatiuc B., Wartel M. // Plasma Chem. Plasma Process. 2018. V. 38. № 5. P. 1115.
- 3. *Pai D.Z., Lacoste D.A., Laux C.O.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. V. 19. № 6. P. 065015.
- Dubinov A.E., Pylayev N.A., Sadovoy S.A., Sadchikov E.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42. № 10. P. 2648.
- 5. *Li X., Liu X., Zeng F., Gou X., Zhang Q. //* IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43. № 4. P. 1049.
- 6. Садриев Р.Ш., Сон Э.Е., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ф.М. // Теплофиз. Высоких. Темпер. 2017. Т. 55. № 2. С. 317.
- 7. Дубинов А.Е., Кожаева Ю.П., Селемир В.Д. // Теплофиз. Высоких. Темпер. 2018. Т. 56. № 3. С. 469.
- 8. Dubinov A.E., L'vov I.L., Sadovoy S.A., Senilov L.A., Vyalykh D.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. № 2. P. 380.
- 9. *Strümpel C., Astrov Yu.A., Purwins H.-G.* // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. № 4. P. 4889.
- 10. Astrov Yu.A., Lodygin A.N., Portsel L.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. № 9. P. 095202.
- 11. Astrov Yu.A., Lodygin A.N., Portsel L.M., Beregulin E. V. // Phys. Rev. E. 2017. V. 95. № 4. P. 043206.
- 12. Гайсин А.Ф., Тазмеев Х.К. // // Теплофиз. Высоких. Темпер. 2005. Т. 43 № 6. С. 813.
- 13. Lukes P., Clupek M., Babicky V., Sunka P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 4. P. 1146.
- Finis G., Claudi A. // IEEE Dielectr. Electr. Insul. 2008. V. 15. № 2. P. 366.
- Leask P.J. // Acta Phys. Polonica A. 2009. V. 115. № 6. P. 998.