

УДК 539.23, 544.6.076.324

Канева М.В.<sup>1</sup>, Лобинский А.А.<sup>1</sup>,  
Левшакова А.С.<sup>2</sup>, Хайруллина Е.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,  
Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
Россия

## ГИБКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНО- ИНДУЦИРОВАННОГО ГРАФЕНА И ГЕКСАЦИАНОФЕРРата КОБАЛЬТА-МАРГАНЦА ДЛЯ АСИММЕТРИЧНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

В условиях стремительного роста потребностей человечества в электроэнергии и обострения экологических проблем, вызванных использованием углеродсодержащего топлива, особенно актуальной задачей становится переход от ископаемых и ядерных источников энергии к возобновляемым. Последние обеспечивают более устойчивое, безопасное и экологически чистое энергоснабжение. Однако их эффективное применение невозможно без надежных и доступных систем хранения энергии.

Среди современных устройств накопления и хранения энергии особое внимание привлекают суперконденсаторы. Они характеризуются высокой удельной мощностью, низким внутренним сопротивлением и быстрым временем заряда/разряда. Благодаря возможности миниатюризации и реализации их создания на гибких подложках с отличными механическими свойствами, суперконденсаторы находят широкое применение, включая носимую электронику и микроустройства.

В настоящей работе впервые предлагается комплексный подход, сочетающий в себе методы лазерного и послойного синтеза с использованием растворов солей переходных металлов, для получения высокоэффективных электродов для суперконденсаторов. В частности, методы лазерной химии были применены для синтеза графенсодержащих электродов путем лазерно-индукционного пиролиза подложки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) [1]. Полученные гибкие углеродные электроды были дополнительно модифицированы методом послойного синтеза — перспективной жидкофазной методикой получения неорганических наноструктур [2, 3]. В качестве модифицирующего слоя исследовалась система гексацианоферратов разноимённых металлов, в частности кобальта и марганца.

Асимметричный суперконденсатор был собран с использованием немодифицированного лазерно-индуцированного графенсодержащего электрода в качестве анода и электрода, модифицированного гексацианоферратом кобальта и марганца, в качестве катода. Максимальная удельная емкость, рассчитанная на основе гальваностатических кривых заряда-разряда при плотности тока 0,25 мА/см<sup>2</sup>, составила 158,3 мФ/см<sup>2</sup>. При этом удельная плотность энергии достигла 44,5 мВт·ч/см<sup>2</sup>, а плотность мощности — 184,0 мВт/см<sup>2</sup>. Механические испытания показали, что устройство сохраняет стабильные электрохимические характеристики при многократных изгибах, демонстрируя высокую устойчивость к механическим нагрузкам.

Сравнение с другими современными гибкими электродными материалами подтверждает конкурентоспособность предложенного подхода. Таким образом, продемонстрирована высокая эффективность комбинации лазерно-индуцированных методов и послойного синтеза для получения гибких электродов на основе графена и гексацианоферратов металлов. Разработанная методология обладает высокой универсальностью и может быть использована для создания широкого спектра анодных и катодных материалов, открывая новые возможности для развития устройств накопления и хранения энергии нового поколения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 24-29-00758.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rodriguez, R.D. Ultra-Robust Flexible Electronics by Laser-Driven Polymer-Nanomaterials Integration / S. Shchadenko, G. Murastov, A. Lipovka, M. Fatkullin, I. Petrov, T.T. Hoang // *Adv. Funct. Mater.* – 2021. – 31. – C. 2008818.
2. Lobinsky, A. SILD synthesis of porous manganese oxide nanocoatings as electroactive materials for pseudocapacitors / M. Kaneva, A. Bachina, M. Tenevich // *Nanosyst-Phys. Chem. M.* – 2023. – 14. – C. 554-559.
3. Tolstoy, V. Low temperature synthesis of  $\text{Cu}_{0.3}\text{IrO}_x\cdot\text{nH}_2\text{O}$  nanocrystals by successive ionic layer deposition and their electrocatalytic properties in oxygen evolution reaction during water splitting in acidic medium / M. Kaneva, N. Fedotova, S. Levshakova // *Ceram. Int.* – 2020. – 46. – C. 20122-20128.