СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ УГЛЕРОДНОЙ ПАСТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАНИЛИНА И ХСЛ, И ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

М.А. Волынец, У.Е. Гога, А.А. Позняк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;
volynetsmaria1@mail.ru

Введение

Электропроводящие полимеры (иногда называемые *synthetic metals*) являются объектом

активных исследований. Проводящие полимеры обладают значительными преимуществами в сравнении с другими проводниками благодаря низкой токсичности, простоте синтеза и химической структуре, обеспечивающей наличие комплекса уникальных свойств и обеспечивающих эффективный перенос заряда. Полианилин (*PANI*) является одним из наиболее перспективных проводящих полимеров, обладая высокой проводимостью и стабильностью. Определенную проблему представляют термореактивные свойства *PANI*, но это отчасти компенсируется созданием композитов с другими материалами, что также увеличивает срок службы *PANI*. Благодаря свойствам *PANI* открываются широкие возможности его применения при производстве суперконденсаторов, накопителей энергии, антикоррозионных покрытий, сенсоров, элементов солнечных батарей, антимикробных материалов, сорбентов, покрытий, поглощающих электромагнитное излучение [1]. Одним из примеров является применения *PANI* в качестве одного из компонентов токопроводящих углеродных паст. Данные композиты привлекательны благодаря сочетанию ценных свойств: высокой электропроводности, низкому фоновому току, возможности работать в большом диапазоне напряжений без разрушения электрода, химической инертности, гидрофобности и низкой стоимости изготовления [2]. Благодаря этим качествам они находят широкое применение в электроаналитике (например, в составе электрохимических сенсоров для определения биомаркеров и загрязнителей) [3], а также рассматриваются как перспективная альтернатива металлическим электродам в оптоэлектронных устройствах, например, в перовскитных солнечных элементах [4]. Также углеродно-пастовый электрод обеспечивает возможность обновления поверхности и обеспечивает высокую ремонтопригодность изделий [2].

Материалы, методика синтеза

Углеродную проводящую пасту получали смешением 30 мг нитроцеллюлозы, 250 мкл этилацетата, 59 мг химически стойкого лака (ХСЛ) и 250 мкл ацетона. Затем добавили предварительно измельченные проводящие компоненты: 24 мг *PANI*, 72 мг сажи, и 24 мг графита. Все реактивы и компоненты промышленного изготовления, кроме *PANI*, который был синтезирован самостоятельно, как описано ранее в [5]. Для смешивания использовали ультразвуковую ванну *ZX*-009 в течение 10 минут при температуре 40 °С. Свежеприготовленную пасту наносили на стеклянную подложку с контактными площадками из алюминиевой фольги. Образец сушили на плитке при температуре 60 °С в течение 10 минут. Изображения образца были получены при помощи оптического микроскопа *Levenhuk* 0701*m*0417. Измерения электрических параметров осуществляли с помощью мультиметра *UT*61*E*$^{+}$.

Результаты и их обсуждение

Вид сбоку образца, полученный с помощью оптического микроскопа, показан на рис. 1 а, программное обеспечение, прилагаемое к микроскопу, позволило определить толщину слоя, оказавшуюся равной 0,597 мм. Для расчета удельного электрического сопротивления образца по формуле (1) были также проведены измерения длины и ширины образца.

$$\rho = \frac{R \cdot d \cdot H}{l}, \qquad (1)$$

где R – сопротивление образца, l – длина, d – ширина и H – толщина слоя.

Сразу после высушивания углеродной пасты на плитке было измерено сопротивление, составившее 3660 Ом, через две недели сопротивление уменьшилось в 2,3 раза, что вызвано испарением остаточных растворителей в ходе естественной сушки и усадкой полимерной матрицы в результате ее релаксации. Сближение частиц проводящего наполнителя при увеличении его объемной доли ведет к росту числа проводящих контактов и, соответственно, к снижению электросопротивления композита [6]. Временная зависимость сопротивления углеродной пасты после нанесения на подложку показана на рис. 1, б. Рассчитанное удельное сопротивление углеродной пасты после ее стабилизации составило 0,787 Ом·м.



Рис. 1. **Вид образца сбоку, полученный с помощью оптического микроскопа (а), временная зависимость сопротивления углеродной проводящей пасты (б) и вид сверху образца (врезка)**

Выводы

В ходе работы синтезирована углеродная проводящая паста на основе *PANI*, нитроцеллюлозы и ХСЛ. После стабилизации системы сопротивление уменьшилось в 2,3 раза и удельное сопротивление составило 0,787 Ом·м. Показано, что при сушке на воздухе при комнатной температуре сопротивление образца стабилизируется примерно через две недели после выдержки. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании составов углеродных проводящих паст для получения электродов и проводящих дорожек с контролируемыми свойствами.

Работа выполнена при поддержке грантов № 26-3092 М и № 26-3086 М Министерства образования Республики Беларусь, и ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», задание 4.1.20.

1. Gutnik I.V., Dyachkova T.P., Burakova E.A. [et al.] Polyaniline and its composites with carbon nanomaterials: preparation, properties, application // J. Adv. Mater. Technol. — 2024 (**9**), № 2, 132—151
2. Que M., Zhang B., Chen J. [et al.] Carbon-based electrodes for perovskite solar cells // Mater. Adv. — 2021 (**2**), № 17, 5560—5579
3. Tajik S., Beitollahi H., Nejad F.G. [et al.] Developments and applications of nanomaterial-based carbon paste electrodes // RSC Adv. — 2020 (**10**), № 36, 21561—21581
4. Волынец М.А., Гога У.Е., Туманов Т.А. Электропроводящие углеродные композиции на основе нитроцеллюлозы и ХСЛ... // Физ. конд. сост. : материалы XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно. — 2026. — С. 34—37
5. Гога А.В., Себешев А.А., Туманов Т.А., Туровец У.Е. Синтез и свойства полианилина // Физ. конд. сост.: материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно. — 2025. — С. 66—69
6. Philip B., Jewell E., Worsley D. The impact of solvent characteristics on performance and process stability of printed carbon resistive materials // J. Coat. Technol. Res. — 2016 (**13**), № 5, 911—920