

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНОГО КОМПЛЕКСА ХИТОЗАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

© Р. Б. Салихов, А. Д. Остальцова*, Т. Р. Салихов, И. Н. Муллағалиев

Уфимский университет науки и технологий

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: nastia.ostaltsova@yandex.ru

Методами атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии изучены морфология и подвижность носителей заряда в композитных пленках толщиной не более 500 нм, созданных на основе полиэлектролитного комплекса хитозана и сукцинамида хитозана с добавлением углеродных материалов. В качестве наполнителей использовались одностенные углеродные нанотрубки, оксид графена и углеродсодержащие сорбенты с различной удельной поверхностью. Полученные пленки применялись в качестве транспортного слоя в структуре полевых транзисторов. Выходные и передаточные характеристики транзисторов были измерены, и на основе этих данных установлено, что подвижность носителей заряда (μ) варьируется в пределах от 0.341 до $1.123 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от типа добавленного углеродного материала.

Ключевые слова: тонкие пленки, полиэлектролитный комплекс хитозана и сукцинамида хитозана, оксид графена, Carboblack C, Carborack, ОУНТ, полевой транзистор, подвижность носителей заряда.

Введение

Современные тенденции в электронике направлены на создание устройств, которые сочетают в себе высокую функциональность, легкость, гибкость и низкую стоимость производства. Одним из ключевых направлений в этой области является разработка органических полевых транзисторов (ОПТ, или OFET – Organic Field-Effect Transistors), которые представляют собой основу для гибкой электроники, такой как сенсоры, дисплеи, носимые устройства и интеллектуальные упаковки [1–3]. В отличие от традиционных кремниевых транзисторов, ОПТ могут быть изготовлены на гибких подложках, что открывает новые возможности для их применения в нетрадиционных форматах [4–5].

Особый интерес в контексте ОПТ вызывают гибкие проводящие полимеры – уникальный класс материалов, сочетающих в себе механическую гибкость, простоту обработки и возможность тонкой настройки электронных свойств [6–7]. Эти материалы обладают высокой электропроводностью благодаря наличию сопряженных π -электронных систем, что делает их пригодными для использования в качестве активных слоев, электродов или других компонентов транзисторов [8–11]. Кроме того, их совместимость с методами печати и нанесения при комнатной температуре позволяет значительно снизить стоимость производства и расширить область применения. Одним из существенных ограничений проводящих полимеров является их низкая проводимость в тонкопленочном состоянии. Попытки повысить проводимость за счет увеличения толщины пленки часто приводят к ухудшению физико-механических характеристик, включая потерю гибкости, что критично для применения в гибких устройствах. Одним из эффективных подходов к решению этой проблемы является создание композиционных материалов, которые сочетают в себе преимущества проводящих полимеров и дополнительных функциональных компонентов, что позволяет сохранить гибкость и одновременно улучшить электронные свойства. Такой подход особенно перспективен для разработки материалов, предназначенных для гибких носимых устройств [12].

Одним из наиболее эффективных подходов к улучшению свойств проводящих полимеров является их комбинирование с углеродными наноструктурами, такими как углеродные нанотрубки (УНТ или одностенные углеродные нанотрубки – ОУНТ), графен, графеновые наноленты или фуллерены. Такие композиты сочетают в себе гибкость и легкость обработки полимеров с высокой электропроводностью, механической прочностью и термической стабильностью углеродных материалов [13–16].

Современные исследования в области материаловедения направлены на разработку новых функциональных материалов, сочетающих в себе уникальные физико-химические свойства, биосовместимость и возможность применения в различных областях, таких как медицина, электроника и экология. Одним из перспективных направлений является создание полиэлектролитных комплексов на основе природных полимеров, таких как хитозан и его производные [17–18]. Хитозан, благодаря своей биосовместимости, биоразлагаемости и способности к комплексообразованию, широко используется в биомедицинских приложениях, включая доставку лекарств, раневые

покрытия и тканевую инженерию. Однако для расширения функциональности хитозана и улучшения его механических и электронных свойств активно исследуются его модификации, такие как сукцинамид хитозана, а также композиты с добавлением углеродных материалов.

Полиэлектролитные комплексы хитозана и сукцинамида хитозана представляют собой интересный класс материалов, где сочетаются свойства двух полимеров, что позволяет регулировать их механическую прочность, растворимость и биологическую активность. Добавление углеродных материалов, таких как графен, углеродные нанотрубки или углеродные наночастицы, в такие комплексы открывает новые возможности для улучшения их электронных, механических и термических свойств [19–24]. Углеродные материалы обладают высокой проводимостью, механической прочностью и большой удельной поверхностью, что делает их идеальными компонентами для создания композитов с улучшенными характеристиками [25–26].

Оксид графена (ОГ) представляет собой multifunctional материал, который активно исследуется для применения в органических тонкопленочных транзисторах. Благодаря своей уникальной структуре, высокой удельной поверхности, возможности химической модификации и простоте обработки, оксид графена может значительно улучшить характеристики органических транзисторов, таких как подвижность носителей заряда, гибкость и стабильность. В отличие от графена, оксид графена содержит кислородсодержащие функциональные группы (например, гидроксильные, карбоксильные и эпоксидные), что делает его более гидрофильным и удобным для использования в водных растворах, а также позволяет легко интегрировать его в органические материалы [27–28].

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой уникальный класс материалов, который активно исследуется для применения в органических тонкопленочных транзисторах. Благодаря своим выдающимся электронным, механическим и термическим свойствам, УНТ могут значительно улучшить характеристики органических транзисторов, таких как подвижность носителей заряда, гибкость и стабильность [29–30].

Подвижность носителей заряда (μ) является одной из ключевых характеристик тонкопленочных органических транзисторов. Она определяет, насколько быстро носители заряда (электроны или дырки) могут перемещаться под действием электрического поля в полупроводниковом слое. Высокая подвижность носителей заряда напрямую влияет на производительность транзистора, включая его быстродействие, ток утечки и энергоэффективность [31–32].

Подвижность носителей заряда в тонкопленочных органических транзисторах напрямую зависит от морфологии и качества пленки. Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) предоставляют ценную информацию о структуре поверхности, включая среднеквадратичную шероховатость (RMS), что помогает оптимизировать производительность устройств [33–34].

В работе представлены создание и изучение новых композитных материалов на основе полиэлектролитного комплекса хитозан – сукцинамид хитозана (ПЭК), модифицированных углеродными наноматериалами:

- 1) однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ);
- 2) оксид графена (ОГ);
- 3) углеродные сорбенты Carboblack C (CB) и Carborpack (CP) с различной удельной поверхностью.

Анализ физико-химических свойств этих композитов является важным этапом для разработки:

- 1) высокочувствительных сенсорных платформ с улучшенными характеристиками;
- 2) полевых транзисторов с оптимизированными выходными и передаточными параметрами.

Экспериментальная часть

Хитозан – аминополисахарид, состоящий из β -(1 \rightarrow 4)-связанных остатков D-глюкозамина, а также N-ацетил-D-глюкозамина, химическая схема показана на рис. 1 слева.

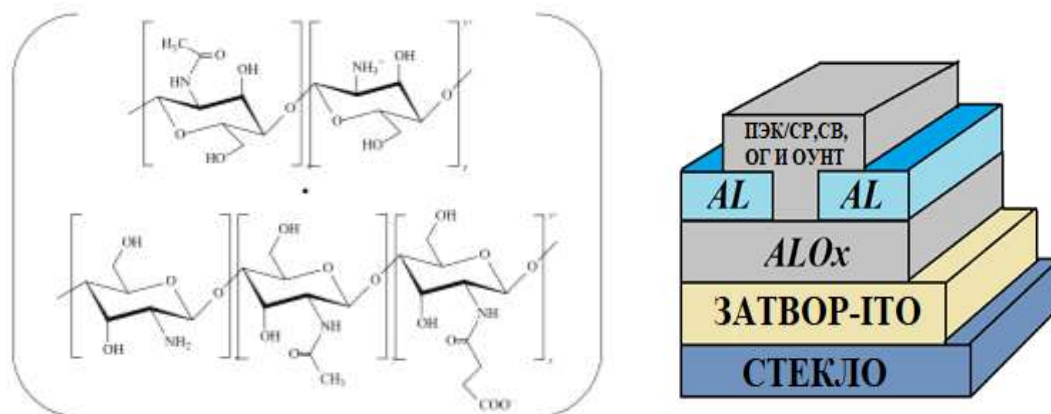


Рис. 1. Схема ПЭК на основе хитозана и сукцинамида хитозана и структура полевого транзистора.

Образцы полевых транзисторов (рис. 1 справа) были созданы из композитов на основе ПЭК: ПЭК-СВ, ПЭК-СР, ПЭК-ОГ и ПЭК-ОУНТ. Методика изготовления образцов полевых транзисторов: полевые транзисторы были изготовлены на стеклянных подложках с ИТО-слоем, выполняющим функцию затвора. Перед формированием диэлектрических слоев подложки подвергались отжигу при 350 °С. Формирование диэлектрика: методом центрифугирования (2 000 об/мин, 30 сек) из раствора были нанесены пленки AlOx толщиной 300 нм, после чего их отжигали при 350 °С в течение 1 ч. Создание электродов и активного слоя: на диэлектрик затвора напылили два алюминиевых электрода (сток и исток) толщиной 500 нм. В зазор между ними (50 мкм × 2 мм) методом центрифугирования наносили слой полупроводникового материала (четыре исследуемых типа). Измерения: вольт-амперные характеристики снимали с использованием блока питания Mastech HY3005D-2 и мультиметра Tektronix DMM-4020 в режиме амперметра.

Результаты и обсуждение

Для изучения морфологии поверхности тонких композитных пленок и пленок ПЭК использовались два микроскопа: атомно-силовой микроскоп Nanoeducator II NT-MDT и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) TESCAN MIRA LMS с программным обеспечением TESCAN Essence. Была изучена морфология поверхности пленок. Изображения АСМ (рис. 2) были получены с помощью Nanoeducator II. На АСМ изображениях можно наблюдать зернистую структуру органических пленок, которая влияет на подвижность носителей заряда.

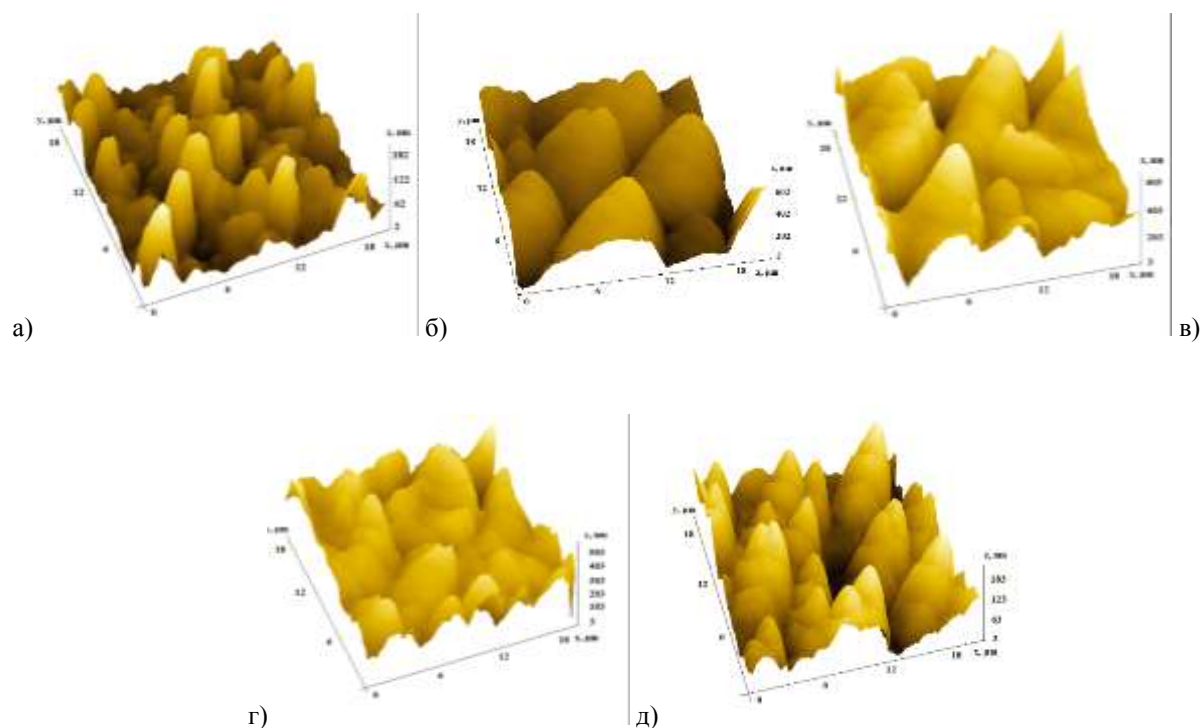


Рис. 2. АСМ-изображения 20×20 мкм: а) ПЭК б) ПЭК-СР, в) ПЭК-СВ, г) ПЭК-ОГ, д) ПЭК-ОУНТ.

С помощью программы Gwyddion рассчитана среднеквадратичная шероховатость поверхности пленок на площади 20×20 мкм с погрешностью до 10% и представлена на диаграмме (рис. 3). Полученные таким образом значения шероховатости коррелируют с приведенными выше значениями эффективной площади поверхности. Неровности поверхности могут создавать барьеры для движения носителей заряда, снижая подвижность. Чем более упорядочена структура пленки, тем выше подвижность носителей заряда. Оптимальная толщина пленки обеспечивает баланс между проводимостью и управляемостью транзистора. Низкая RMS шероховатость указывает на гладкую поверхность, что способствует высокой подвижности носителей заряда. Высокая RMS шероховатость может свидетельствовать о наличии дефектов, которые ухудшают перенос заряда.

На снимках СЭМ (рис. 4) показано распределение углерода (желтым цветом) по поверхности пленки. СЭМ изображения могут показать наличие пор или неравномерностей в пленке, которые могут ухудшить характеристики транзистора. Также они позволяют визуализировать дефекты, трещины и другие особенности поверхности. На снимках СЭМ показаны изменения морфологии пленок при переходе от чистого ПЭК к его композитам с ОУНТ или ОГ. Так, поверхность чистого ПЭК достаточно однородна, в то время как на образцах ПЭК/ОУНТ нанотрубки представлены в виде волокнистой структуры, распределенной с неоднородной плотностью по поверхности образца. Структуры, связанные с ОГ, равномерно распределены по всей поверхности, но при этом образуют крупные «островные» участки.

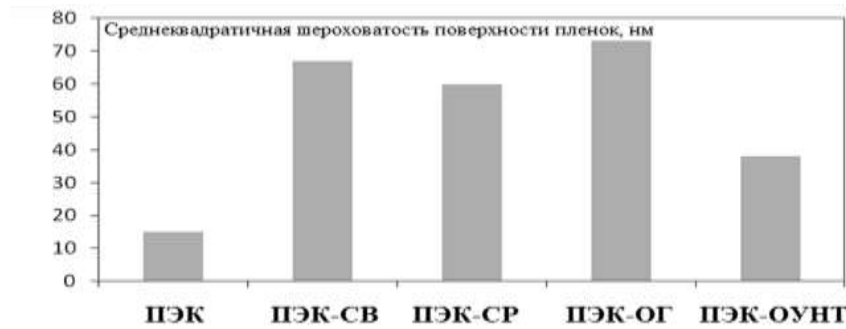


Рис. 3. Значения шероховатости образцов.

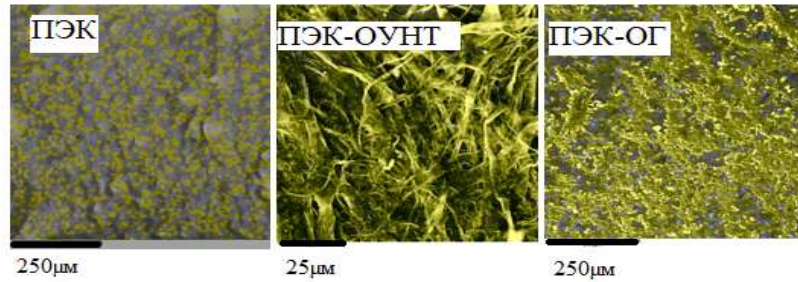
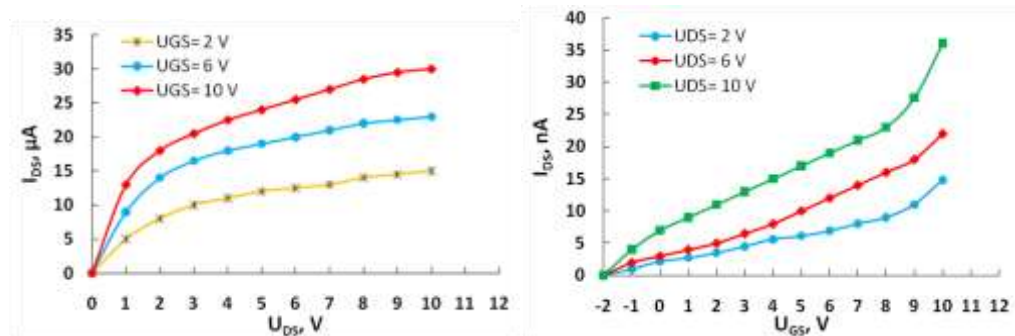


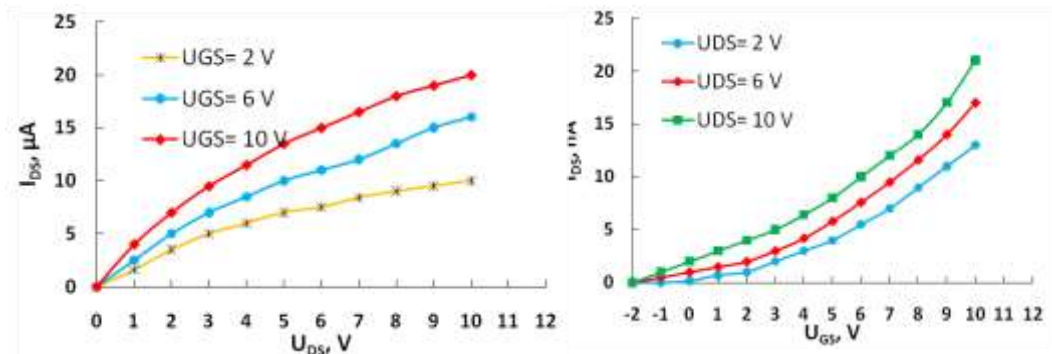
Рис. 4. Снимки СЭМ, определяющие химический состав.

ВАХ полевых транзисторов (рис. 5) снимали по схеме с общим истоком в нормальных атмосферных условиях при комнатной температуре. Проведение измерений без вакуумирования или инертной атмосферы подтверждает устойчивость устройств к внешним факторам. Наблюдаемый выходной ток при положительном напряжении затвора свидетельствует о n-типе проводимости в исследуемых композитных пленках. Это означает, что основными носителями заряда являются электроны. Электронная проводимость характерна для материалов, которые легко отдают электроны под действием электрического поля. Результаты измерений ВАХ подтверждают, что добавление углеродных материалов в полиэлектrolитный комплекс значительно улучшает электронные свойства композитных пленок. Выявлено большее влияние управляющего напряжения в транзисторах с транспортным слоем ПЭК-ОУНТ.

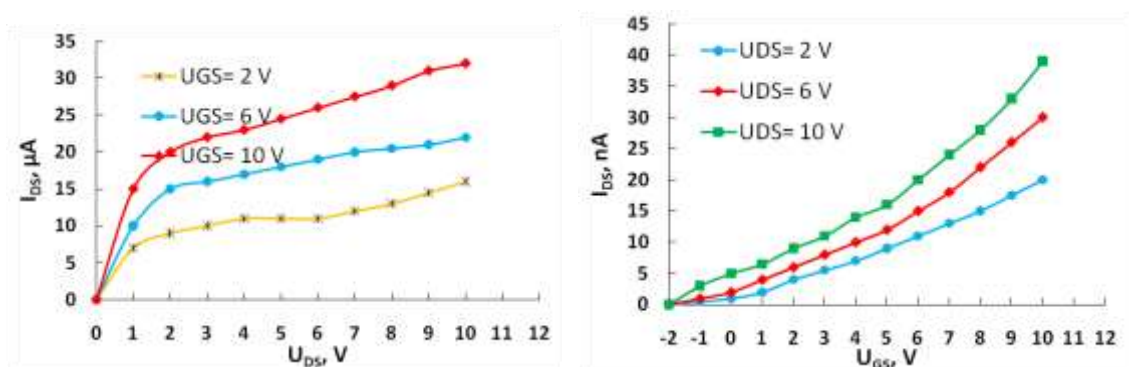
а)



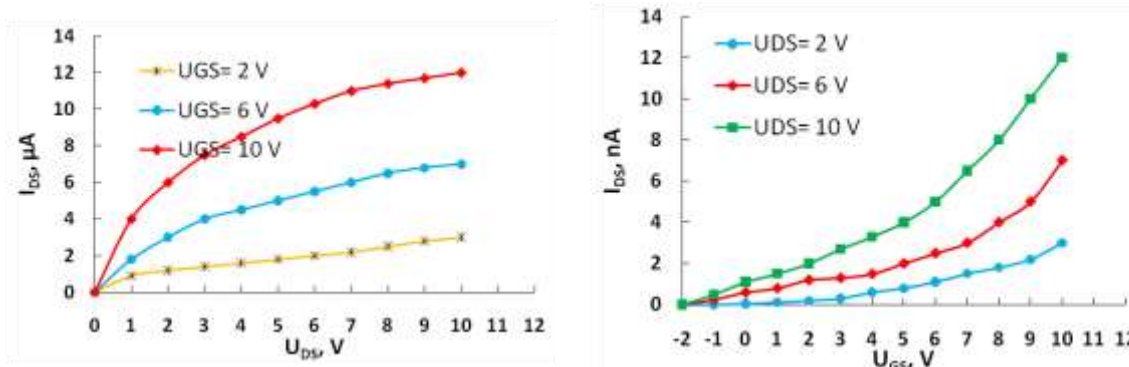
б)



в)



г)



д)

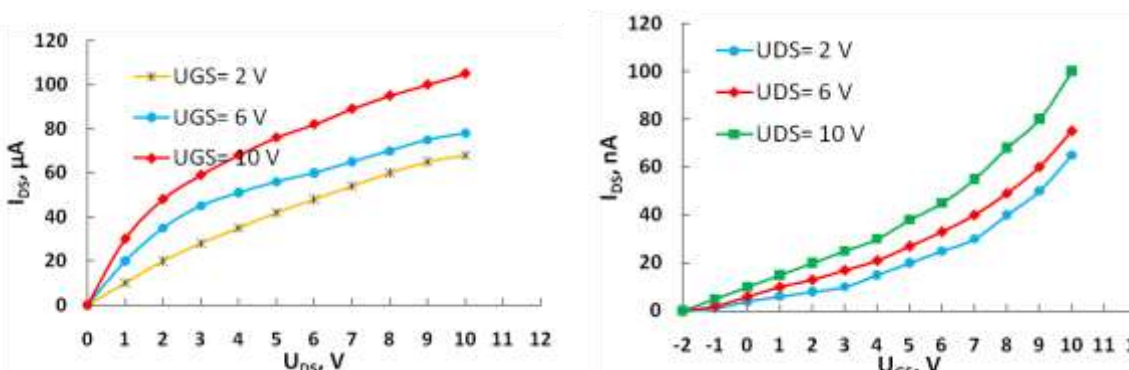


Рис. 5. Выходная (слева) и передаточная (справа) характеристики полевого транзистора
а) ПЭК, б) ПЭК-ОГ, в) ПЭК-СР, г) ПЭК-СВ, д) ПЭК-ОУНТ.

Подвижность носителей заряда в полученных полевых транзисторах определялась по формуле (1):

$$I_{DS} = (W/L)\mu C(U_G - U_{th})U_{DS}, \quad (1)$$

где W – ширина канала, L – длина канала, C – емкость на квадратную площадь затворного диэлектрика AlOx (для толщины 500 нм $C=7.1$ нФ/см²), U_G – напряжение на затворе, U_{DS} – напряжение между стоком и истоком, U_{th} – пороговое напряжение. Пороговое напряжение U_{th} находится из графиков зависимости корня тока $I_{DS}^{1/2}$ от напряжения U_{DS} при $U_G = \text{const}$. Погрешность расчетных значений составила около 10%.

Найденные значения подвижности носителей заряда для предлагаемых композитных пленок на основе хитозана были представлены в табл. 1. Введение в состав пленки ПЭК наночастиц углерода значительно увеличивает подвижность носителей заряда, в 2–3 раза.

Таблица 1

Сравнение подвижности носителей заряда для рассматриваемых пленок

Образцы	μ , см ² /В·с
ПЭК-ОУНТ	1.12
ПЭК-ОГ	0.97
ПЭК-СР	0.96
ПЭК-СВ	0.57
ПЭК-чистый	0.34

Проведенные исследования демонстрируют, что полиэлектролитный комплекс на основе хитозана и сукцинамида хитозана является перспективным материалом для создания органических тонкопленочных транзисторов. Однако наилучшие характеристики транзисторов достигаются при модификации ПЭК углеродными материалами, такими как углеродные нанотрубки и оксид графена.

Заключение

Были получены образцы нового полимерного композиционного материала на основе полиэлектролитного комплекса хитозана и сукцинамида хитозана, легированного различными углеродными наноматериалами. На основе исследованных пленок были созданы полевые транзисторы и измерены их выходные характеристики и характеристики переноса. Была проведена оценка подвижности носителей заряда и получены следующие значения: $\mu(\text{ПЭК}) = 0.34 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $\mu(\text{ПЭК-ОГ}) = 0.97 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $\mu(\text{ПЭК-СР}) = 0.96 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $\mu(\text{ПЭК-СВ}) = 0.57 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $\mu(\text{ПЭК-ОУНТ}) = 1.12 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Полиэлектролитный комплекс на основе хитозана и сукцинамида хитозана, особенно в сочетании с углеродными нанотрубками и оксидом графена, представляет собой перспективный материал для создания высокопроизводительных органических тонкопленочных транзисторов. Гибридные материалы демонстрируют улучшенные электронные характеристики, включая высокую подвижность носителей заряда и крутизну, что делает их пригодными для применения в гибкой электронике и других инновационных устройствах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания (код научной темы FZWU-2023-0002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun M., Wang S., Liang Y., Wang C., Zhang Y., Liu H., Han L. Flexible graphene field-effect transistors and their application in flexible biomedical sensing // *Nano-Micro Letters*. 2025. Vol. 17. No. 1. P. 34.
2. Guo L., Han J., Wang J. Recent advances in enhancing the photodetector performance of 2D materials by combining them with organic thin films // *Journal of Materials Chemistry C*. 2024. Vol. 12. No. 4. P. 1233–1267.
3. Jakher S., Yadav R. Organic thin film transistor review based on their structures, materials, performance parameters, operating principle, and applications // *Microelectronic Engineering*. 2024. Art. 112193.
4. Liu F., Christou A., Dahiya A. S., Dahiya R. From printed devices to vertically stacked, 3d flexible hybrid systems // *Advanced Materials*. 2025. Art. 2411151.
5. Mason G. T., Skaf D., Roy A. L., Hussein R. N., Gomes T. C., Landry E., Rondeau-Gagné S. Printing organic-field effect transistors from semiconducting polymers and branched polyethylene // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 102. No. 12. P. 4166–4174.
6. Salikhov R., Zilberg R., Mullagaliev I., Salikhov T., Teres Y., Bulysheva E., Ostaltsova A. Composite and nanocomposite thin-film structures based on chitosan succinamide // *Current Nanomedicine*. 2025. Vol. 15. No. 1. P. 70–79.
7. Latypova L. R., Andriianova A. N., Usmanova G. S., Salikhov R. B., Mustafin A. G. Influence of copolymer composition on the properties of soluble poly(aniline-co-2-[2-chloro-1-methylbut-2-en-1-yl]aniline)s // *Polymer International*. 2023. Vol. 72. No. 4. P. 440–450.
8. Gadiev R. M., Lachinov A. N., Kornilov V. M., Salikhov R. B., Rakhmiev R. G., Yusupov A. R. Anomalous high conductivity along the interface of two dielectric polymers // *JETP Letters*. 2010. Vol. 90. P. 726–730.
9. Mustafin A. G., Latypova L. R., Andriianova A. N., Salikhov S. M., Sattarova A. F., Mullagaliev I. N., Abdrakhmanov I. B. Synthesis and physicochemical properties of poly(2-ethyl-3-methylindole) // *Macromolecules*. 2020. Vol. 53. No. 18. P. 8050–8059.
10. Salikhov R. B., Lachinov A. N., Bunakov A. A. Charge transfer in thin polymer films of polyarylenephthalides // *Physics of the Solid State*. 2007. Vol. 49. P. 185–188.
11. Bunakov A. A., Lachinov A. N., Salikhov R. B. Current-voltage characteristics of poly(diphenylenephthalide) thin films // *Technical Physics*. 2003. Vol. 48. P. 626–630.
12. Punetha V. D., Rana S., Yoo H. J., Chaurasia A., McLeskey J. T., Ramasamy M. S., Sahoo N. K., Cho J. W. Functionalization of carbon nanomaterials for advanced polymer nanocomposites // *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 67. P. 1–47.
13. Salikhov R. B., Zilberg R. A., Mullagaliev I. N., Salikhov T. R., Teres Y. B. Nanocomposite thin film structures based on polyarylenephthalide with SWCNT and graphene oxide fillers // *Mendeleev Communications*. 2022. Vol. 32. No. 4. P. 520–522.
14. Salikhov R. B., Zilberg R. A., Bulysheva E. O., Ostaltsova A. D., Salikhov T. R., Teres Y. B. Nanocomposite thin-film structures based on a polyelectrolyte complex of chitosan and chitosan succinamide with SWCNT // *Letters on Materials*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 132–137.
15. Salikhov R. B., Ostaltsova A. D., Salikhov T. R., Mullagaliev I. N. Nanocomposite polymer thin films for sensors // *Vestnik Bashkirskogo Universiteta*. 2024. Vol. 29. No. 2. P. 75–79.
16. Salikhov R. B., Mullagaliev I. N., Ostaltsova A. D., Vazhdaev K. V. Creation and study of composite and nanocomposite thin-film structures based on SCTS with various carbon-containing fillers for environmental monitoring // *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2024. No. 4. P. 12–24.
17. Kolesov S. V., Gurina M. S., Mudarisova R. K. Specific features of the formation of aqueous nanodispersions of interpolyelectrolyte complexes based of chitosan and chitosan succinamide // *Russian Journal of General Chemistry*. 2018. Vol. 88. P. 1694–1698.
18. Kolesov S. V., Gurina M. S., Mudarisova R. K. On the stability of aqueous nanodispersions of polyelectrolyte complexes based on chitosan and N-succinyl-chitosan // *Polymer Science, Series A*. 2019. Vol. 61. P. 253–259.
19. Barck K., Butler M. F. Comparison of morphology and properties of polyelectrolyte complex particles formed from chitosan and polyanionic biopolymers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 98. No. 4. P. 1581–1593.
20. Boddohi S., Moore N., Johnson P. A., Kipper M. J. Polysaccharide-based polyelectrolyte complex nanoparticles from chitosan, heparin, and hyaluronan // *Biomacromolecules*. 2009. Vol. 10. No. 6. P. 1402–1409.
21. Shu X. Z., Zhu K. J. Chitosan/gelatin microspheres prepared by modified emulsification and ionotropic gelation // *Journal of Microencapsulation*. 2001. Vol. 18. No. 2. P. 237–245.
22. Bernkop-Schnürch A., Dünnhaupt S. Chitosan-based drug delivery systems // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2012. Vol. 81. No. 3. P. 463–469.
23. Gurina M. S., Vil'danova R. R., Badykova L. A., Vlasova N. M., Kolesov S. V. Microparticles based on chitosan-hyaluronic acid interpolyelectrolyte complex, which provide stability of aqueous dispersions // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017. Vol. 90. P. 219–224.
24. Guo R., Chen L., Cai S., Liu Z., Zhu Y., Xue W., Zhang Y. Novel alginate coated hydrophobically modified chitosan polyelectrolyte complex for the delivery of BSA // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2013. Vol. 24. P. 2093–2100.

25. Chen Z., Jiang X., Boyjoo Y., Zhang L., Li W., Zhao L., Li X. Nanoporous carbon materials derived from biomass precursors: sustainable materials for energy conversion and storage // *Electrochemical Energy Reviews*. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 26.
26. Lan X., Du T., Zhuo J., Wang T., Shu R., Li Y., Wang J. Advances of biomacromolecule-based antibacterial hydrogels and their performance evaluation for wound healing: a review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Art. 135577.
27. Oh J. Y., Choi B. K., Liu Y., Seo D. S. Enhancement of electro-optical properties of aluminum magnesium oxide thin films through controlled graphene oxide doping // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2024. Vol. 35. No. 16. P. 1096.
28. Franchin L., Casalini S., Cester A., Paccagnella A., Bonaldo S. Monitoring of lactococcus lactis growth based on reduced-graphene oxide TFT for dairy industry applications // *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24. No. 17.
29. Sui N., Kang K., Li M., Zhang D., Li B., Shao S., Zhao J. Fabrication of carbon nanotube neuromorphic thin film transistor arrays and their applications for flexible olfactory-visual multisensory synergy recognition // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2024. Vol. 7. No. 1. Art. 015503.
30. Li B., Sui N., Li M., Gu W., Yang W., Xu W., Zhao J. High-sensitivity and energy-efficient chloride ion sensors based on flexible printed carbon nanotube thin-film transistors for wearable electronics // *Talanta*. 2024. Vol. 276. Art. 126285.
31. Jin H., Kim K., Kim K., Park S., Shin E. Y., Heo J. W., Son H. J. Development of degradable networked-organic semiconductors and effects on charge carrier mobility in organic thin-film transistors // *Journal of Materials Chemistry C*. 2024. Vol. 12. No. 24. P. 8719–8726.
32. He Z., Asare-Yeboah K., Bi S. Advances in charge carrier mobility of diketopyrrolopyrrole-based organic semiconductors // *Coatings*. 2024. Vol. 14. No. 9. P. 1080.
33. Verma S. P., Ghosh C., Talreja A. J., Pramanik S., Sadhukhan R., Mandal A., Goswami D. K. Surface doping of mercury-sensing molecules in the semiconducting channel of organic field-effect transistors // *ACS Applied Electronic Materials*. 2025. Vol. 7. No. 3.
34. Cantera Cantera L. A., Sánchez Vergara M. E., Hamui L., Mejía Prado I., Flores Huerta A., Martínez Plata T. L. Analysis of a flexible photoconductor, manufactured with organic semiconductor films // *Micromachines*. 2024. Vol. 15. No. 4. P. 446.

Поступила в редакцию 25.04.2025 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.3.1

**THIN-FILM ORGANIC TRANSISTORS BASED
ON A POLYELECTROLYTE CHITOSAN COMPLEX
WITH THE ADDITION OF CARBON-CONTAINING FILLERS**

© R. B. Salikhov, A. D. Ostaltsova*, T. R. Salikhov, I. N. Mullagaliev

*Ufa University of Science and Technology
32, Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*Email: nastia.ostaltsova@yandex.ru

The morphology and mobility of charge carriers in composite films no more than 500 nm thick, created on the basis of a polyelectrolyte complex of chitosan and chitosan succinamide with the addition of carbon materials, were studied using atomic force microscopy and scanning electron microscopy. Single-walled carbon nanotubes, graphene oxide and carbon-containing sorbents with different specific surfaces were used as fillers. The obtained films were used as a transport layer in the structure of field-effect transistors. The output and transfer characteristics of the transistors were measured, and based on these data it was found that the mobility of charge carriers (μ) varies from 0.341 to 1.123 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ depending on the type of added carbon material.

Keywords: thin films, polyelectrolyte complex of chitosan and chitosan succinamide, graphene oxide, Carboblack C, Carbopack, SWCNT, field-effect transistor, charge carrier mobility.

Received 25.04.2025.

Об авторах / About the authors

САЛИХОВ Ренат Баязитович

Уфимский университет науки и технологий, Россия
д.ф.-м.н., проф.,
заведующий кафедрой электроники и физики наноструктур
salikhovrb@yandex.ru

ОСТАЛЬЦОВА Анастасия Дмитриевна

Уфимский университет науки и технологий, Россия
ассистент кафедры электроники и физики наноструктур
nastia.ostaltsova@yandex.ru

САЛИХОВ Тимур Ренатович

Уфимский университет науки и технологий, Россия
доцент, к.ф.-м.н.,
доцент кафедры электроники и физики наноструктур
timur-salikhov@yandex.ru

МУЛЛАГАЛИЕВ Ильнур Наилевич

Уфимский университет науки и технологий, Россия
ассистент кафедры электроники и физики наноструктур
ilnur9409@mail.ru

SALIKHOV Renat Bayazitovich

Ufa University of Science and Technology, Russia
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Head of the Department of Electronics and Physics of Nanostructures
salikhovrb@ya.ru
ORCID: 0000-0003-0603-4183, 11738898100

OSTALTSOVA Anastasia Dmitrievna

Ufa University of Science and Technology, Russia
Assistant Professor,
Department of Electronics and Physics of Nanostructures
nastia.ostaltsova@yandex.ru
ORCID: 0009-0009-6574-2789
Scopus ID: 58000878300

SALIKHOV Timur Renatovich

Ufa University of Science and Technology, Russia
Docent, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor
of the Department of Electronics and Physics of Nanostructures
timur-salikhov@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-2884-0042
Scopus ID: 55921773000

MULLAGALIEV Ilnur Nailievich

Ufa University of Science and Technology, Russia
ilnur9409@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7037-6201
Scopus ID: 57205464144