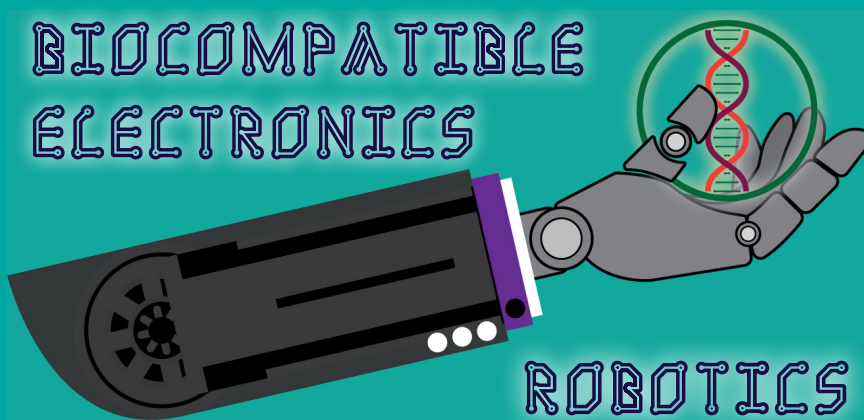


II Всероссийская школа-
конференция с международным
участием по биосовместимой
электронике и робототехнике

Книга тезисов



14-18 мая, 2023

Каспийск, Россия

Отель Азимут

<http://ber2023.tilda.ws/page35462095.html>

II Всероссийская школа-конференция с международным участием по биосовместимой электронике и робототехнике – 2023

Организаторы

Министерство Науки и Образования Российской Федерации

Российский Научный Фонд (РНФ)

Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова
Российской Академии Наук (ИСПМ РАН)

Институт ЭлементоОрганических Соединений им. А.Н. Несмиянова
Российской Академии Наук (ИНЕОС РАН)

ООО “Технологии Печатной Электроники” (ООО Принтэлтех)

ООО “Эклогит”

Тематики школы-конференции

- 1) Биосовместимые/биodeградируемые материалы для ортопедии, хирургии и протезирования**
- 2) Функциональные материалы для протезирования/восстановления функций глаза**
- 3) Полимеры и композиты для актюаторов и сенсоров (искусственная мышца, искусственная кожа), в т.ч. с функциями самозалечивания**
- 4) Биосовместимые электронные устройства для диагностики и лечения различных заболеваний человека и животных**
- 5) Электронные устройства для протезирования и/или создания искусственных органов обоняния (электронный нос, электронный язык)**
- 6) Подходы к развитию искусственного интеллекта, нейросетей, анализу больших данных, машинному обучению для использования в робототехнике и биоэлектронике**

Председатель школы-конференции

д.х.н. член-корр. РАН Сергей Анатольевич Пономаренко (Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова Российской Академии Наук, Россия)

Программный комитет

д.х.н. член-корр. РАН Сергей Анатольевич Пономаренко (Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова Российской Академии Наук, Россия)

д.х.н. академик РАН Азиз Мансурович Музафаров (Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской Академии Наук, Россия)

д.х.н. член-корр. РАН Сергей Николаевич Чвалун (Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова Российской Академии Наук, Россия)

д.ф.-м.н. Елена Юльевна Крамаренко (Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Россия)

к.х.н. Александра Александровна Калинина (Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова Российской Академии Наук, Россия)

Организационный комитет

д.х.н. Елена Валериевна Агина – *Председатель*
Виктория Петровна Гайдаржи – *ученый секретарь*

к.х.н. Аскольд Альбертович Труль
Алина Гайфетдиновна Хмельницкая
Ярослава Олеговна Титова

Книга тезисов. II Всероссийская школа-конференция с международным участием по биосовместимой электронике и робототехнике – 2023 // Институт Синтетических Полимерных Материалов им.Н.С.Ениколопова РАН. - Москва, 2023. - 59 страниц.
ISBN 978-5-6043936-4-2.

ISBN 978-5-6043936-4-2



Программа

Воскресение, 14^е мая

12:00 – 14:00	Трансфер из аэропорта. Заселение в гостиницу Азимут
14:00 – 15:00	Обед. Свободное время

Понедельник, 15^е мая

07:00 – 9:45	Завтрак
	Председатель сессии: <i>Елена Агина</i>
9:45 – 10:00	<u>Открытие Школы-конференции</u>
10:00 – 10:45	<u>Л-1.</u> <i>Азиз Музафаров.</i> Различные Модели Организации Научных Исследований в России и на Западе. В Этом Важно Разбираться
10:45 – 11:30	<u>Л-2.</u> <i>Елена Крамаренко.</i> Новые Магнитоактивные Полимерные Материалы для 3D-Печати
11:30 – 12:15	<u>Л-3.</u> <i>Сергей Пономаренко.</i> Фотодетекторы на Основе Органических Полупроводников: Современное Состояние и Перспективы Развития
12:15 – 12:25	<u>У-1.</u> <i>Алина Хмельницкая.</i> Новый Подход к Получению Функциональных Силоксановых Матриц для Диэлектрических Эластомерных Актуаторов
12:25 – 12:35	<u>У-2.</u> <i>Диана Борисова.</i> Экологические Проблемы в Процессах Радикальной Полимеризации Акриловых Мономеров
12:35 – 12:45	<u>У-3.</u> <i>Ярослава Титова.</i> Эффективный Подход к Изготовлению Многоцветных Печатных Органических Электрохимических Транзисторов на Основе PEDOT:PSS
12:45 – 12:55	<u>У-4.</u> <i>Елена Клеймюк.</i> Термические и Диэлектрические Свойства Сополимеров Поливинилиденфторида с Привитыми Цепями Полиэтилметакрилата и Полиакрилонитрила для Применения в Емкостных Датчиках Давления
12:55 – 13:05	<u>У-5.</u> <i>Виктория Гайдаржи.</i> Актуальные Проблемы Создания Полимерных Печатных Устройств
13:05 – 13:15	<u>У-6.</u> <i>Екатерина Сорокина.</i> Синтез Биотин-Содержащих Производных ВТВТ для Жидкостных Сенсоров на Основе Органических Электролитических Транзисторов
13:15 – 13:25	<u>У-7.</u> <i>Влада Попова.</i> Донорно Акцепторные Люминофоры на Основе 2,1,3 бензотиадиазола с Высоким Торсионным Углом: Синтез и Оптические Свойства
13:25 – 13:35	<u>У-8.</u> <i>Gagik Ghazaryan.</i> Current State of Spring-Roll Actuators: Materials and Fabrication
13:35 – 14:00	<u>У-9.</u> <i>Валерий Постников.</i> Конформационный Полиморфизм Кристаллов Линейных Молекул с Гибким Сопряженным Ядром и Концевыми Триметилсилильными Заместители
14:00 – 15:00	<u>Обед</u>

15:00 – 17:00	Круглый стол по тематике дня
---------------	-------------------------------------

Вторник, 16^е мая

07:00 – 10:00	Завтрак
	Председатель сессии: <i>Александр Литвинов</i>
10:00 – 10:45	Л-4. <i>Елена Агина.</i> Методы и Подходы к Диагностике Заболеваний Человека по Составу Выдыхаемого Воздуха
10:45 – 11:30	Л-5. <i>Елена Завьялова.</i> Аптасенсоры для Мультиплексного Анализа
11:30 – 11:50	У-10. <i>Елена Пойманова.</i> Биохимический Сенсинг на Основе Органических Электролитических Транзисторов
11:50 – 12:10	У-11. <i>Аскольд Труль.</i> Влияние Химической Структуры Полупроводника и Интерфейсного Полимерного Диэлектрика на Сенсорные Свойства Органических Полевых Транзисторов
12:10 – 12:20	У-12. <i>Олег Борщев.</i> Новые Полупроводниковые Материалы на Основе бензотиено[3,2-b][1]бензотиофена
12:20 – 12:30	У-13. <i>Антон Абрамов.</i> Устройство для Измерения Электрических Характеристик Органических Полевых Транзисторов с Электролитным Затвором в Проточном Режиме
12:30 – 12:40	У-14. <i>Елена Кретьова.</i> Биорецепторный Слой на Основе Методов Клик-Химии для Органических Электролитических Транзисторов
12:40 – 12:50	У-15. <i>Полина Шапошник.</i> Влияние Допирования Полупроводникового Слая на Электрические и Сенсорные Свойства Органических Электролитических Транзисторов на Основе Смеси C8-VTVT и Полистирола
12:50 – 13:00	У-16. <i>Полина Караман.</i> Транзисторы с Электролитическим Затвором на Основе Малых Молекул Органических Полупроводников для Биосенсоров
13:00 – 13:10	У-17. <i>Сиевуш Тоиров.</i> Электрические и Сенсорные Свойства Новых Силоксановых Димеров Бензотиенобензотиофена
13:10 – 13:20	У-18. <i>Дмитрий Гайков.</i> Новые Кремнийорганические Фотоотверждаемые Люминесцентные Композиции
13:20 – 13:30	У-19. <i>Лев Левков.</i> Синтез, Свойства и Оценка Возможности Практического Применения Производного 2,1,3-Бензотиадиазола с Разветвляющимися Центрами 1,3,5-Замещённый Бензол
13:30 – 13:40	У-20. <i>Евгений Заборин.</i> Новые Производные 2,1,3-Бензотиадиазола для Органической Электроники и Фотоники
13:40 – 14:00	У-21. <i>Валерий Кривецкий.</i> Современные Методы Обработки Сенсорных Данных в Системах Машинного Обоняния для Мониторинга Атмосферного Воздуха
14:00 – 15:00	Обед
15:00 – 17:30	Круглый стол по тематике дня

Среда, 17^е мая

07:00 – 10:00	Завтрак
	Председатель сессии: <i>Елена Крамаренко</i>
10:00 – 10:45	Л-6. <i>Юрий Лупоносов.</i> Органические Полупроводники как Искусственные Актуаторы Света для Восстановления Функций Зрения Человека
10:45 – 11:30	Л-7. <i>Александр Асеев.</i> Наночастицы Донорно-Акцепторных Веществ в Роли Контролируемых Светом Стимуляторов Нейронной Активности
11:30 – 12:15	Л-8. <i>Андрей Сосоров.</i> Низкочастотная Спектроскопия Комбинационного Рассеяния Света как Инструмент для Оценки Динамического Беспорядка в Органических Полупроводниках и Компактности Биомолекул
12:15 – 12:35	У-22. <i>Игорь Безсуднов.</i> Циклические Испытания Термомеханических Мышц, Восстановленных Различными Растворителями
12:35 – 12:45	У-23. <i>Артур Маннанов.</i> Органические Солнечные Элементы и Фотодетекторы на Основе Звездообразных Донорно-Акцепторных Молекул с Бензотрииндольным Центром
12:45 – 12:55	У-24. <i>Ирина Чуйко.</i> Синтез и Свойства Новых Полимеров с Различными Электроакцепторными Группами на Основе Трифениламина
12:55 – 13:05	У-25. <i>Лия Полетавкина.</i> Синтез Новых Органических Полупроводниковых Материалов на Основе Аннелированных Олигомеров Донорно-Акцепторного Строения
13:05 – 14:00	Стеновые доклады
14:00 – 15:00	Обед
15:00 – 17:00	Круглый стол по тематике дня

Четверг, 18^е мая

07:00 – 10:00	Завтрак
	Председатель сессии: <i>Сергей Пономаренко</i>
10:00 – 10:45	Л-9. <i>Дмитрий Иванов.</i> Новые Биомиметические Полимеры для Биомедицины
10:45 – 11:30	Л-10. <i>Никита Седуш.</i> Биodeградируемые Полимеры с Регулируемой Молекулярной Структурой для Хирургии и Фармацевтики
11:30 – 12:15	Л-11. <i>Александр Литвинов.</i> Высокотехнологичные стартапы. Жизненный цикл и основные трудности
12:15 – 12:35	У-26. <i>Владислав Пойманов.</i> Оптимизация Прогноза по Заболеванию Астмой на Основе Измерений Состава Выдыхаемого Воздуха
12:35 – 13:40	Круглый стол по тематике дня
13:40 – 14:00	Закрытие школы-конференции. Заключительное слово С.А. Пономаренко
14:00 – 15:00	Обед. Выселение из отеля и трансфер в аэропорт

Стендовые доклады

Среда, 17^е мая, 13:05

Денис Анохин	П1	Получение и Исследование Структуры Полимеров для Создания Перерабатываемых Мембран с Оптимизированной Протонной Проводимостью
Павел Евдокимов	П2	Синтез и Свойства Новых Сопряженных Донорно-Акцепторных Олиготиофенов Звездообразного Строения
Юлия Исаева	П3	Синтез и Свойства Симметричных Сопряженных Соединений на Основе Трифениламина с Различными Центральными Фрагментами
Данила Красников	П4	Влияние Интерфейсного Диэлектрика на Электрические и Сенсорные Свойства Органических Полевых Транзисторов на Основе Бензотиенобензотиофена
Дарьяна Кубинская	П5	Проводящие Эластомерные Композиты на Основе Силоксанов и Углеродных Наночастиц
Богдан Кулешов	П6	Гибридный Сенсор на Основе Нового Органического Полупроводникового Материала
Василий Труханов	П7	Influence of Field-Dependent Photogeneration on Spatial Resolution of Ambipolar Organic Filed-Effect Phototransistors

Пленарные лекции

Различные Модели Организации Научных Исследований в России и на Западе. В Этом Важно Разбираться

А.М. Музафаров^{1,2}*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

*e-mail: aziz@ispm.ru

В докладе будут рассмотрены различные подходы к организации процесса познания природы в СССР, России и на Западе. В качестве примеров будут использованы: Манхэттенский проект в США, Атомный проект в СССР, космическая гонка, высадка человека на Луну, поворот сибирских рек, элементоорганический проект, программа латания «озоновых дыр», нанотехнологический бум, углеродный след, антропологического влияния на климат, переработка полимерных отходов.

Анализ реализации крупных проектов и программ, развитых в той или иной степени в планетарном масштабе, позволяет «почувствовать» разницу как в целеполагании, так и в методологических подходах, реализованных в проектах и программах, отражающих принципиальные различия в организации процесса познания. Затянувшийся переход от советской несмеяновской модели к современному российскому состоянию, очевидным образом сдерживает инновационный импульс в развитии страны.

Современная международная обстановка как нельзя лучше подходит для пересмотра информационной и публикационной активности в российской науке и возвращения ее в собственное информационное поле, являющееся оригинальной составляющей мирового научно-информационного пространства. Речь идет не об изоляционизме, но об осмысленности и концентрации на собственных приоритетах.

Новые Магнитоактивные Полимерные Материалы для 3D-Печати

Е.Ю. Крамаренко^{1,2}, В.В. Городов¹, Е.А. Оленич¹, С.А. Костров^{1,2}*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

²Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

*e-mail: kram@polly.phys.msu.ru

Магнитоактивные полимерные материалы – полимерные матрицы с внедренными в них магнитными нано- и/или микрочастицами – привлекают в настоящее время постоянно растущий интерес специалистов во всем мире благодаря широкому кругу практических применений этих материалов, а также благодаря новым явлениям фундаментального характера, наблюдаемым при воздействии магнитным полем на эти материалы. Наиболее активно развивается область создания магнитоактивных эластомеров, основанных на химически сшитых полимерах, или полимерных сетках, которые важны для таких устройств, как перистальтические системы, искусственные мышцы и другие биомедицинские устройства. Эластичная матрица играет роль пассивной среды, а ферромагнитные частицы делают материал «активным» в приложенном магнитном поле. Перестройка магнитных частиц в результате магнитных взаимодействий, индуцированных магнитным полем, приводит к изменению целого ряда физических свойств (вязкоупругих, магнитных, электрических, поверхностных) материала. Величина магнитного отклика зависит от модуля упругости полимерной матрицы, а также от магнитных свойств, концентрации и распределения магнитных частиц^{1,2}.

В случае химически сшитых полимерных матриц распределение магнитных частиц и форма материала задаются на этапе синтеза, их изменение в магнитном поле является обратимым – при выключении поля образец возвращается в свое исходное состояние. Нами был проведен цикл работ, направленных на создание магнитоактивных полимерных материалов, основанных на термопластичных полимерных матрицах, свойствами которых можно управлять посредством как магнитного поля, так и температуры, программируя *in situ* магнитный отклик материала. Кроме того, термопластичность матрицы позволяет использовать эти материалы для создания изделий путем 3D печати. В докладе будет представлен обзор результатов, полученных для магнитоактивных термопластичных полимерных матриц разных типов. Основное внимание будет уделено результатам разработки новых функциональных композиционных материалов, пригодных для 3D-печати и в то же время высокочувствительных к внешнему магнитному полю, на основе новых термопластичных блок-сополимерных полиуретан-силоксановых матриц разного состава с регулируемой реологией расплава и физико-механическими параметрами конечных продуктов.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 23-43-00057).

¹ Shamonin M., Kramarenko E.Y. Highly Responsive Magnetoactive Elastomers. *In: Novel Magnetic Nanostructures. Unique Properties and Applications*, 1st ed.; Domracheva, N.; Caporali, M.; Rentschler, E. Eds.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2018; pp 221–245.

² Kramarenko E.Y., Stepanov G.V., Khokhlov, A.R. *Ineos Open* 2019, **2**, 178-184.

Фотодетекторы на Основе Органических Полупроводников: Современное Состояние и Перспективы Развития

С.А. Пономаренко^{1}*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской Академии Наук

*e-mail: ponomarenko@ispm.ru

Органические полупроводники можно использовать в качестве функциональных материалов для детектирования фотонов оптического диапазона длин волн в различных устройствах органической оптоэлектроники: фоторезисторах, фототранзисторах и фотодиодах.¹ При этом наибольшее внимание привлекают фотоэлементы на основе органических фотодиодов ввиду наилучшего сочетания простоты их изготовления, возможности настраивать спектральный диапазон чувствительности и достаточно высокой эффективности. Фотодиоды с широким спектром чувствительности используются как солнечные фотоэлементы, эффективность преобразования полного спектра солнечного излучения (КПД) которых в настоящее время достигает 17-19% при внешней квантовой эффективности EQE, достигающей 80-90%. Но можно настроить чувствительность органических фотодиодов и на достаточно узкой спектральный диапазон, например, близкий к спектральной чувствительности палочек и колбочек глаза, где сделаны пока только первые шаги и требуется дальнейшая оптимизация их эффективности.² При этом, если для солнечных фотоэлементов основной характеристикой является КПД, то для фотодетекторов более основными параметрами являются EQE, низкий темновой ток и чувствительность. Кроме этого, важными характеристиками являются спектральный и динамический диапазоны, а также время отклика. Обычно EQE хороших органических фотодетекторов находится в диапазоне 50-70%, а времена отклика составляют порядка микросекунд, что сопоставимо или превышает характеристики неорганических фотодетекторов.

В последнее время появились органические фотодетекторы с EQE, существенно превышающей 100% – вплоть до 9300% на определенной длине волны.³ Такие фотодетекторы по сути являются фотоумножителями, поскольку число генерируемых зарядов в них в разы превышает число падающих фотонов. Для таких фотоумножителей к основным параметрам относится также коэффициент усиления G, который представляет собой отношение времени жизни зарядов противоположного знака в ловушках ко времени переноса основных носителей зарядов через канал проводимости. Первоначально G был введен для органических фототранзисторов, но в последнее время он также используется и для органических фотоумножителей.

В лекции будут рассмотрены различные примеры органических фотодетекторов, используемые в них материалы, механизмы их работы и области применения.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-73-30028-П).

¹ Chow P.C.Y., Someya T., *Adv. Mater.* 2020, **32**(15), 1902045.

² Mannanov A.L., Balakirev D.O., Papkovskaya E.D., Solodukhin A.N., Luponosov Yu.N., Paraschuk D.Yu., Ponomarenko S.A. *Molecules*, 2023, **28**(1), 368.

³ Zijin Zhao, Chunyu Xu, Yao Ma, Kaixuan Yang, Ming Liu, Xixiang Zhu, Zhengji Zhou, Liang Shen, Guangcai Yuan, Fujun Zhang, *Adv. Funct. Mater.* 2022, **32**(29), 2203606.

Методы и Подходы к Диагностике Заболеваний Человека по Составу Выдыхаемого Воздуха

Е.В. Агина^{1}, А.А. Абрамов¹, А.А. Труль¹, Е.Ю. Пойманова¹, В.Д. Пойманов¹*

Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

*e-mail: agina@ispm.ru

Данные современных исследований свидетельствуют о том, что по составу выдыхаемого человеком воздуха можно быстро и неинвазивно диагностировать широкий спектр заболеваний, начиная от астмы и хронической обструктивной болезни легких до рака легких, туберкулеза и коронавирусной инфекции COVID-19.¹

В докладе будут рассмотрены преимущества и недостатки основных существующих на данный момент методов и подходов к определению состава выдыхаемого воздуха и диагностике различных заболеваний на основе полученных данных. Будет показано, что использование для проведения анализа портативного «электронного носа» на основе массива полуселективных газовых сенсоров, имеющих различные принципы работы и дополненных методами машинного обучения и технологиями искусственного интеллекта, позволяет проводить дифференциальную диагностику вышеперечисленных заболеваний (на примере COVID-19 и астмы) в режиме «черного ящика» без идентификации конкретных маркеров, относящихся к тому или иному заболеванию, что существенно убыстряет и удешевляет диагностический процесс. Будет продемонстрировано портативное устройство-газоанализатор для проведения неинвазивной экспресс-диагностики COVID-19, способное с высокой чувствительностью и специфичностью за короткое время (1-2 минуты) определять заражение COVID-19, в т.ч. в бессимптомных случаях.

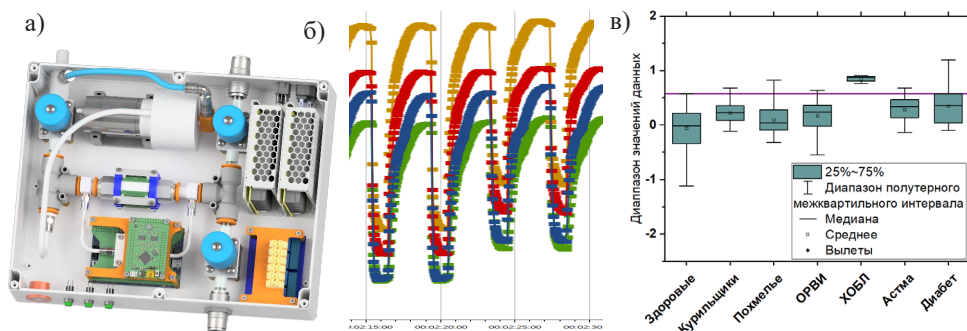


Рисунок 1 – Экспресс-диагностика COVID-19 при помощи электронного носа: 3D модель прибора (а); типичный вид откликов массива сенсоров в портативном приборе (б); сравнение результатов измерений для выборок COVID-19-отрицательных пациентов с учетом анамнеза (фиолетовой линией отмечена граница, выше которой расположены COVID-19-положительные пациенты) (в).

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема FFSM-2022-0001).

¹ N.M. Mule et al, *Informatics in Medicine Unlocked*, 2021, **26**, 100715

Аптасенсоры для Мультиплексного Анализа

Е.Г. Завьялова^{1}, В.И. Кукушкин²*

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Химический факультет

²Институт Физики Твердого Тела РАН

*e-mail: zlenka2006@gmail.com

Аптамеры – узнающие элементы на основе фрагментов нуклеиновых кислот, которые образуют уникальную пространственную структуру и специфически связывают аналиты. Константы диссоциации комплексов аптамер-белок сопоставимы с константами комплексов антитело-антиген. Аптамеры можно разработать к токсичным и неиммуногенным аналитам, а синтез аптамеров проводят с помощью автоматического синтезатора с возможностью сайт-специфической модификации последовательностей. Эти обстоятельства делают аптамеры на основе нуклеиновых кислот привлекательными узнающими элементами, которые могут быть применены для создания биосенсоров.

В настоящее время аптасенсоры – биосенсоры на основе аптамеров – активно разрабатываются с привлечением самых разных физических принципов детекции. Одно из перспективных сочетаний – аптамеры и спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), где аптамеры определяют специфичность узнавания аналита, а ГКР позволяет определять единичные молекулы аналита.

Одной из важных задач является специфическое высокочувствительное определение вирусов с помощью экспресс-тестов. Мы предложили несколько ГКР-аптасенсоров для определения вируса гриппа со временем анализа менее 20 минут, сопоставимых по чувствительности с полимеразной цепной реакцией с обратной транскрипцией, золотым стандартом диагностики респираторных вирусов. Для ГКР-подложек, полученных литографией, был предложен сенсор для мультиплексного анализа 4 респираторных вирусов: гриппа А, SARS-CoV-2, респираторно-синцитиального вируса и аденовируса. Сенсор позволяет идентифицировать смеси вирусов, не обладая кросс-реактивностью с другими вирусами.

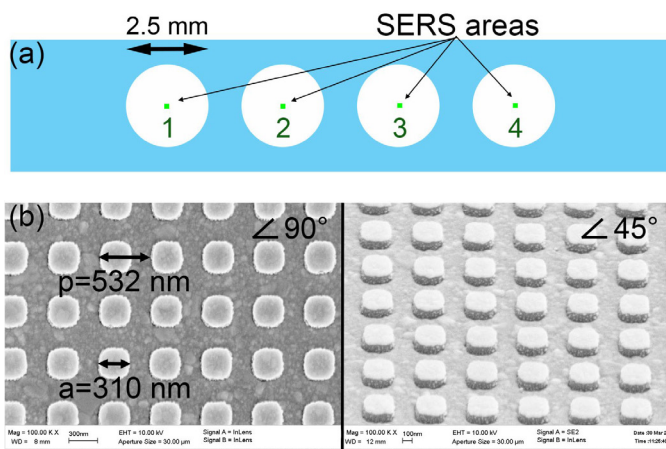


Рисунок 1. Схема сенсора для мультиплексного анализа вирусов. Наностолбики каждой из 4 зон покрыты аптамерами к вирусу гриппа А, SARS-CoV-2, респираторно-синцитиального вирусу и аденовирусу.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 18-74-10019).

Органические Полупроводники как Искусственные Актюаторы Света для Восстановления Функций Зрения Человека

Ю.Н. Лупоносов^{1}*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук

*e-mail: luponosov@ispm.ru

По данным Всемирной организации здравоохранения от нарушения функций зрения страдает не менее 1 миллиарда человек. Одна из самых распространённых причин нарушения зрения – повреждение светочувствительных нейронов сетчатки глаза (фоторецепторов), так называемых палочек, отвечающих за сумеречное зрение, и трех типов колбочек, отвечающих за цветное зрение. При этом нервная ткань сетчатки, как правило, остается работоспособной и может передавать нервные импульсы в головной мозг, что делает возможным заменить поврежденные естественные фоторецепторы и восстановить зрение.

Органические сопряженные материалы, благодаря близкому элементному составу и возможности тонко настраивать комплекс свойств за счет использования современных инструментов органической химии, могут обладать сочетанием биосовместимости со светочувствительностью в диапазонах естественных фоторецепторов сетчатки глаза человека. А возможность печати тонких слоев органических полупроводниковых материалов числе на гибких подложках, позволяет создавать сложные полноцветные протезы сетчатки глаза человека. В докладе будет представлен обзор работ и современных подходов, направленных на разработку светочувствительных и биосовместимых материалов на основе органических полупроводников, используемых в качестве актюаторов света для восстановления функций зрения.¹⁻⁴

Работа поддержана Российским научным фондом (номер гранта 19-73-30028-П)

¹ Tortiglione, C., Antognazza, M. R., Tino, A., Bossio, C., Marchesano, V., Bauduin, A., Lanzani, G. Semiconducting polymers are light nanotransducers in eyeless animals. *Science advances* 2017, **3**(1), e1601699

2. Maya-Vetencourt, J.F., Manfredi, G., Mete, M. et al. *Nat. Nanotechnol.* 2020, **15**, 698–708.

3. M. Skhunov, A.N. Solodukhin, P. Giannakou, L. Askew, Yu. N. Luponosov, D.O. Balakirev, N.K. Kalinichenko, I. P. Marko, S.J. Sweeney, S.A. Ponomarenko, *J. Mater. Chem. C*, 2021, **9**, 5858.

4. A. L. Mannanov, D. O. Balakirev, E. D. Papkovskaya, A. N. Solodukhin, Yu. N. Luponosov, D. Yu. Paraschuk, S. A. Ponomarenko, *Molecules*, 2023, **28**(1), 368.

Наночастицы Донорно-Акцепторных Веществ в Роли Контролируемых Светом Стимуляторов Нейронной Активности

А.Н. Асеев^{1}, Д.Е. Колотова¹, П.М. Балабан¹, А.Н. Солодухин², Ю.Н. Луносов²,
С.А. Пономаренко²*

¹Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

²Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: aseyev@ihna.ru

Органические полупроводники в целом биосовместимые и перспективные материалы для различных биологических применений, таких как визуализация и удаление опухолей и, с недавних пор, для фотостимуляции возбудимых клеток. Некоторые органические конъюгированные соединения обладают ионной и электронной проводимостью, дающей возможность создания био-электронного интерфейса. Среди органических полупроводников один из наиболее многообещающих классов это донорно-акцепторные (D-A) вещества. Варьируя донорные и акцепторные фрагменты в них, можно подстраивать спектры абсорбции и люминесценции, энергетический уровень молекулы. Это позволяет исследователям контролировать живые системы точно при помощи света определённой длины волны.

Здесь мы представляем результаты пилотных экспериментов с наночастицами, сделанными из органических конъюгированных молекул. Используя конфокальную микроскопию мы показали, что такие наночастицы не интернализуются нейронами первичной культуры коры крысы. Используя технику пэтч-кламп на нейронах первичной культуры коры крысы мы продемонстрировали, что используя свет можно контролировать электрическую активность нейронов. Амплитуда ответов зависела от длины волны света в соответствии со спектром абсорбции наночастиц. Меняя структуру D-A молекул, мы показали зависимость амплитуды ответов нейронов от размера алкильной боковой цепи молекул, что предполагает важность липофильных свойств в дизайне био-электронного интерфейса.

Работа была поддержана грантом РФФ (проект № 19-73-30028-П).

Низкочастотная Спектроскопия Комбинационного Рассеяния Света как Инструмент для Оценки Динамического Беспорядка в Органических Полупроводниках и Компактности Биомолекул

А.Ю. Сосорев^{1,2}

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет

Низкочастотная (НЧ) спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) ($10\text{--}200\text{ см}^{-1}$) дает информацию о движениях молекул или их крупных фрагментов и является информативным методом исследования структуры и динамики молекулярных кристаллов, аморфных плёнок и сложных молекулярных систем. Однако, в подавляющем большинстве исследований обсуждаются лишь частоты колебаний, в то время как интенсивности НЧ КР долгое время уделялось мало внимания. В настоящем докладе будет показано, что интенсивность НЧ КР может быть использована как индикатор динамического беспорядка в кристаллах органических π -сопряженных полупроводников (ОП), а также компактности нуклеиновых кислот ДНК и РНК, отвечающих за важнейшие функции по хранению, передаче и реализации генетической информации.

Для использования ОП в высокоэффективных органических электронных устройствах необходима высокая подвижность носителей заряда. Межмолекулярные колебания высокой амплитуды обуславливают динамический беспорядок – флуктуацию интегралов переноса между молекулами, – что нарушает делокализацию носителей заряда и уменьшает их подвижность. Нами было показано, что КР-интенсивность НЧ колебательных мод связана с их вкладом в динамический беспорядок и обнаруживает меньшие значения в ОП с меньшим динамическим беспорядком.^{1,2} В результате, нами сформулирован спектроскопический метод для быстрой и бесконтактной оценки подвижности в кристаллических ОП,³ который можно применять для скрининга ОП с высокой подвижностью до их изучения в электронных устройствах.

Данный подход был распространён на другой класс молекулярных систем – биомолекулы ДНК и РНК. Одной из характеристик этих биомолекул, которая крайне важна для целостности наследственной информации и её передачи в ходе клеточных процессов, является их компактизация. Нами показано, что относительная интенсивность НЧ КР биомолекул ДНК и РНК может быть индикатором их компактности, поскольку в более компактизованных молекулах амплитуда крупномасштабных движений, соответствующих НЧ области КР, ниже.⁴ В дальнейшем данный подход может быть распространён на неинвазивное исследование компактности нуклеиновых кислот в живых клетках.

Таким образом, мониторинг интенсивности НЧ КР является многообещающим методом для оценки и контроля динамического беспорядка в органических π -сопряженных полупроводниках, а также компактизации ДНК и РНК. Он поможет существенно углубить понимание связей между структурой и свойствами молекулярных систем, что будет способствовать развитию наук о материалах, органической электроники и молекулярной биологии.

¹ M.V. Vener, O.D. Parashchuk et al. *Advanced Electronic Materials* 2021, **7**, 2001281.

² A.Yu Sosorev, O.Parashchuk at al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021, **23**, 15485–15491.

³ O.G. Kharlanov, D.R. Maslennikov et al. *Adv. Electron. Mater.* 2021, **7**, 2100579.

⁴ A.Yu. Sosorev, O.D. Parashchuk et al. *JETP Letters* 2022, **116**, 335–341.

Новые Биомиметические Полимеры для Биомедицины

Д.А. Иванов^{1,2,3*}, *Е.А. Никитина*^{1,2}, *М. Vatankhah-Varnosfaderani*⁴, *С.С. Шейко*⁴

¹Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, кафедра
Высокомолекулярных Соединений

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской
химии РАН

³Institut de Sciences des Matériaux de Mulhouse-IS2M CNRS UMR 7361 (France)

⁴Department of Chemistry, University of North Carolina at Chapel Hill (USA)

*e-mail: dimitri.ivanov.2014@gmail.com

Начинающийся в настоящее время переход к персонализированной медицине, ускоряющееся развитие носимой электроники и мягкой робототехники приводит к быстро растущему спросу на синтетические материалы, которые имитируют механические свойства живых тканей. При этом востребованы материалы, имеющие самые различные механические параметры: от очень мягких, имитирующих, например, жировую ткань (механический модуль около 100 Па), до жестких, предназначенных, например, для замены хрящевой ткани (механический модуль около 1 МПа).

В нашей публикации¹ была представлена новая стратегия проектирования материалов, которая позволяет кодировать механические свойства в архитектуре полимерной сети без проведения химической модификации и добавления растворителя. Предложенная в статье стратегия делает возможным создавать эластомеры, обладающие беспрецедентными комбинациями ультрамягкости, высокоэластичности и адаптивной прочности и при этом не содержащие растворителей. Основным отличием от конформации линейных полимеров является предварительная вытяжка основной цепи шеточного блока даже при отсутствии макроскопической деформации.^{2,3} Таким образом, боковые цепи могут выполнять несколько различных функций, выступая одновременно в качестве «растворителя» и медиаторов жесткости основной цепи.

Целью настоящей работы, является достижение углубленного понимания структуры и физических свойств (механических, оптических и термических) новых эластомеров для создания платформы для целенаправленного проектирования и создания персонализированных изделий биомедицинского применения, включая имплантаты, технологии тканевой инженерии и средства целевой доставки лекарств.

Данная работы выполнена при поддержке госзадания (№ АААА-Ф19-119101590029-0).

¹ Vatankhah-Varnosfaderani, M., et al. *Science* 2018, **359**, 1509–1513.

² Clair, C., et al. *ACS MacroLetters* 2019, **8**, 530–534.

³ Keith, A., et al. *ACS Central Science* 2020, **6**(3), 413-419.

Биодеградируемые Полимеры с Регулируемой Молекулярной Структурой для Хирургии и Фармацевтики

Н.Г. Седуш^{1,2}*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

*e-mail: nsedush@ispm.ru

Развитие современной медицины и фармацевтики требует создания новых биосовместимых полимерных материалов с широким спектром свойств. Особое внимание исследователей направлено на разработку биодеградируемых материалов, которые незаменимы при создании временно функционирующих в организме имплантируемых устройств. Биодеградируемые полимеры на основе циклических сложных эфиров (лактида, гликолида, ϵ -капролактона и др.) представляют собой перспективную платформу для получения материалов с регулируемыми характеристиками и сроками деградации. История применения биоразлагаемых полиэфиров в медицине началась около 50 лет назад, когда был создан первый синтетический рассасывающийся материал. Сегодня сфера применений полилактида и его сополимеров очень широка: системы адресной доставки и пролонгированного высвобождения лекарств, биоразлагаемые имплантаты для хирургии, компоненты имплантируемых сенсоров и др. Каждая из решаемых задач требует получения материалов с уникальным комплексом физико-химических свойств. Кроме того, зачастую нужны материалы с определенными функциональными свойствами: способностью к самоорганизации и отклику на внешний стимул, флуоресценцией, рентгенконтрастностью, биоактивностью и др. В докладе будут рассмотрены инструменты для управления свойствами материалов на основе биоразлагаемых полиэфиров: регулирование состава и молекулярной структуры полимеров на стадии синтеза, модификация концевых групп, контроль надмолекулярной структуры, введение различных добавок. На основе полученных материалов созданы перспективные медицинские изделия и таргетные наносомальные формы противораковых агентов.

Исследования по созданию средств доставки лекарств выполнены при поддержке РФФИ (проект № 18-73-10079-П). Синтез и исследование структуры полимеров поддерживаны Минобрнауки РФ (госзадание ИСПМ РАН № FFSM-2022-0003).

Высокотехнологичные стартапы. Жизненный цикл и основные трудности*А.Е. Литвинов^{1*}*¹Институт синтетических полимерных материалов РАН*e-mail: litvinov@ispm.ru

Создание высокотехнологичных бизнесов требует хорошего понимания инновационной инфраструктуры и её механизмов, типов инвесторов, способов взаимодействия с фондами и форматов взаимодействия между стартапом и инвестором. Создание таких бизнесов в области химии и новых материалов имеет ряд ограничений, связанных с большими сроками НИОКР и более высокими капитальными вложениями. В докладе рассмотрены подходы к развитию высокотехнологичных проектов в ИСПМ РАН. Также в докладе анонсирована работа нового подразделения Института – Центра трансфера технологий (ЦТТ ИСПМ РАН).

High-tech startups. Their lifecycle and difficulties during their development

Starting high-tech businesses requires good understanding of local innovation infrastructure with its mechanisms, investor types, ways of fund-raising and formats of interaction between startups and investors. Chemistry and new materials startups naturally imply numerous limitations due to longer R&D duration as well as greater CAPEX. The talk tries to discover approaches for high-tech projects in ISPM. Technology transfer center which is a new department at the Institute is announced.

Данная работы выполнена при поддержке гранта в форме субсидии на создание и развитие центров трансфера технологий (соглашение № 075-15-2023-518).

Устные доклады

Новый Подход к Получению Функциональных Силоксановых Матриц для Диэлектрических Эластомерных Актуаторов

А.Г. Хмельницкая^{1}, А.А. Калинина¹, С.А. Пономаренко¹, А.М. Музафаров¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: alina.khmelnitskaya@ispm.ru

Электромеханические устройства, в частности, диэлектрические эластомерные актуаторы (ДЭА), являются быстроразвивающимся направлением, где основной упор идет на создание устройств для мягких или гибких роботов, близких по свойствам к человеческому организму.¹ Наиболее перспективными материалами в качестве диэлектрического слоя являются силиконы.² Однако они облают низкой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon'=2,3$), в следствие чего необходимо использовать высокое напряжение актуации. Наиболее перспективным способом увеличения диэлектрической проницаемости силиконов является химическая модификация полярными группами.^{3,4} В связи с чем возникает необходимость предварительного получения функциональных матриц для последующей модификации. Развитие современных методов химии позволяет контролируемо проводить модификацию компонентов системы в широком диапазоне. Поэтому целью данного исследования является синтез винилфункциональных матриц в активной среде.

В данной работе будут представлены результаты по получению винилсодержащих полидиметилсилоксанов с регулируемым содержанием функциональных групп в цепи и молекулярно-массовыми характеристиками поликонденсацией метилвинилдиметоксисилана и диметилдиэтоксисилана в активной среде - избытке безводной уксусной кислоты. Схема реакции представлена на рис. 1. В работе исследовано влияние соотношения исходных мономеров, температуры и продолжительности конденсации полученных соолигомеров в вакууме на молекулярно-массовые характеристики продукта. Анализ продуктов проводили с использованием комбинации физических и химических методов исследования (спектроскопия ЯМР, ГПХ, ГЖХ). Полученные винилсодержащие полимеры представляются перспективной матрицей для получения полидиметилсилоксанов с полярными группами.

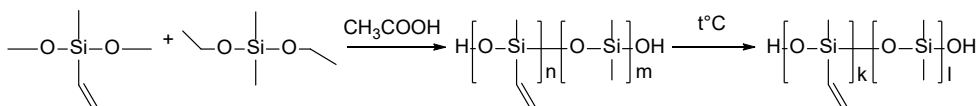


Рис. 1. Общая схема синтеза функциональных сополимеров

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-73-30028-П).

¹ Bezsudnov I. V., Khmelnitskaia A. G., Kalinina A. A., Ponomarenko S. A., *RUSS. CHEM. REV.* 2023, **92** (2), RCR5070.

² Dickey M. D. *Adv. Mater.*, 2017, **29** (27), 1606425.

³ Sheima, Y., Yuts, Y., Frauenrath, H., & Opris, D. M. *Macromolecules*, 2021, **54** (12), 5737-5749.

⁴ Perju, E., Shova, S., & Opris, D. M. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12** (20), 23432-23442

Экологические Проблемы в Процессах Радикальной Полимеризации Акриловых Мономеров

Борисова Д.М.^{1}, Калинина А.А.¹, Музафаров А.М.¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

*e-mail: borisova@ispm.ru

Одним из популярных и активно развиваемых применений полимерных материалов в настоящее время является создание мягких, или гибких, роботов, близких к своему биологическому прообразу.¹ Перспективными с точки зрения применения в робототехнических или биомеханических системах являются устройства на основе диэлектрических электроактивных полимеров (ДЭАП), т.е. полимеров, приводимых в действие электричеством. К одним из первых материалов, нашедших применение в качестве диэлектрических мембран, являются полиакрилаты.¹ Основным способом получения полиакрилатов считается радикальная полимеризация.²

Целью данного доклада — анализ литературных данных, посвященных рассмотрению экологических проблем и путей их решения в процессах радикальной полимеризации акриловых мономеров.

Известно, что свободнорадикальная полимеризация, которой получают коммерческие полиакрилаты и их сополимеры, лишь в редких случаях проходит до полной конверсии мономера, а значит в полимерном материале остается непрореагировавший мономер. Остаточные мономеры в большинстве своем, являются токсичными, а также могут влиять на свойства полимера, например, вызывая большую усадку в кипящей воде, изменение температуры деформации при нагревании, а также возможно изменение цвета полимера и неприятный запах и др.³

Существующие подходы по проведению контролируемой радикальной полимеризации позволяют решить проблемы широкого молекулярно-массового распределения образующихся полимеров, но сопровождаются другими недостатками, связанными со сложностью избавления от металлических и серусодержащих катализаторов, наличие которых может в дальнейшем негативно сказываться на эксплуатационных характеристиках полимерного материала.⁴

Эмульсионная полимеризация, наиболее распространенная в промышленности, требует использования органических ПАВ, которые накапливаются в окружающей среде и загрязняют почву и водные системы. В докладе будет предложен альтернативный вариант проведения полимеризации акриловых мономеров, который может представлять интерес как с точки зрения управления процессом, так и с точки зрения решения экологических проблем: наличия остаточного мономера и токсичности ПАВ.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 21-73-30030).

¹ Безсуднов И. В. и др. Материалы и конструкции диэлектрических эластомерных актюаторов // *Russian Chemical Reviews*. – 2023. – Т. 92. – С. 2.

² Bettencourt A. et al. In vitro release studies of methylmethacrylate liberation from acrylic cement powder // *International journal of pharmaceutics*. – 2000. Т. 197. – С. 161-168

³ Araujo P. H. H. et al. Techniques for reducing residual monomer content in polymers: a review // *Polymer Engineering & Science*. – 2002. – Т. 42. – №. 7. – С. 1442-1468.

⁴ Truong N. P. et al. A comparison of RAFT and ATRP methods for controlled radical polymerization // *Nature Reviews Chemistry*. – 2021. – Т. 5. – №. 12. – С. 859-869.

Эффективный Подход к Изготовлению Многоцветных Печатных Органических Электрохимических Транзисторов на Основе PEDOT:PSS

Я.О. Титова^{1*}, А.А. Труль¹, Е.Ю. Пойманова¹, Е.В. Агина¹, С.А. Пономаренко¹

¹Институт Синтетических Полимерных Материалов РАН им. Н.С. Ениколопова

*e-mail: yaroslava.titova@ispm.ru

В настоящее время одним из наиболее используемых проводящих полимерных материалов является PEDOT:PSS, представляющий собой комплекс поли(3,4-этилендиокситиофена) с полистиролсульфокислотой. Комплекс PEDOT:PSS широко используется в биоаналитике, обладая такими преимуществами как хорошая пленкообразующая способность и биосовместимостьⁱ. На основе такого полимерного комплекса можно создавать достаточно простые био- и хемосенсорные устройства – органические электрохимические транзисторы (ОЭХТ), позволяющие достигать сверхвысокой чувствительностиⁱⁱ. Такие транзисторы могут быть изготовлены на разнообразных подложках с использованием различных растворных методов, включая печатные, такие как метод дозирующего лезвия и струйная печать.

В ходе выполнения работы был разработан эффективный подход к изготовлению многоцветных печатных ОЭХТ с активным слоем из PEDOT:PSS, не подверженному отслоению в биологических жидкостях для создания на их основе жидкостных сенсоров многоцветного использования. Для улучшения адгезии активного слоя и предотвращения его расслоения при измерении в жидких электролитах поверхность подложки была предварительно модифицирована (3-аминопропил)триэтоксисиланом (АПТС) (рис. 1, а). Активный слой был получен с использованием коммерчески доступного PEDOT:PSS PH 1000. Полученные устройства продемонстрировали стабильную работу в физиологических растворах с большой ионной силой, таких как растворах Рингера и Рингера-Локка, без потери качества полупроводникового слоя при многоцветном использовании (рис1, б).

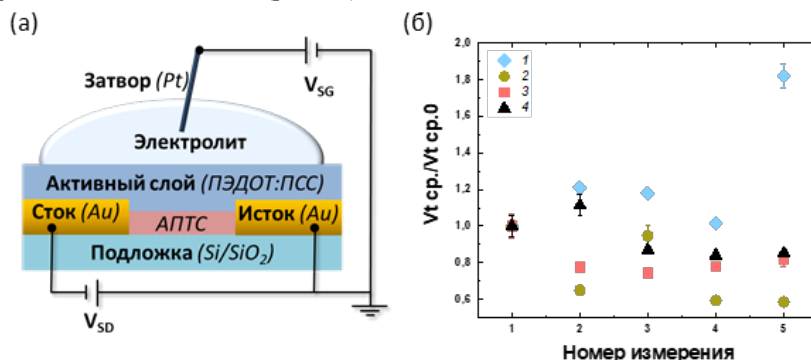


Рис 1. Архитектура ОЭХТ с модифицированной подложкой (а); зависимость нормированного порогового напряжения от цикла измерений, полученная на устройстве при измерении в воде 1 – без модификации поверхности, 2 – с модификацией, 3 – в растворах Рингера, 4 – Рингера-Локка (б);

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-73-30028-П.

ⁱ Liao, Jianjun, et al. *Sensors*, 2019, **19**(2), 218.

ⁱⁱ P.A. Shaposhnik, et al, *Rus. Chem. Rev.*, 2020, **89**(12), 1483-1506.

Термические и Диэлектрические Свойства Сополимеров Поливинилиденфторида с Привитыми Цепями Полиэтилметакрилата и Полиакрилонитрила для Применения в Емкостных Датчиках Давления

Е.А. Клеймюк^{1*}, И.В. Безсуднов¹, В.Г. Шевченко¹, Ю.Н. Лупоносов¹, С.А. Пономаренко¹

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук

*e-mail: kleymyuk@ispm.ru

Объектом исследования в данной работе являлись сополимеры на основе поливинилиденфторида с привитыми цепями полиэтилметакрилата (ПЭМА) и полиакрилонитрила (ПАН), синтезированные ранее методом фотоиндуцированной обратимо-деактивационной радикальной полимеризации (RDRP).¹ Изучено влияние степени прививки на их термические и диэлектрические свойства.² Показано, что увеличение степени прививки в сополимерах приводит к снижению температуры их деструкции, но значительно улучшает их пленкообразующие свойства за счет снижения степени кристалличности. Обнаружено, что сополимеры с ПЭМА можно использовать в качестве материала для емкостных датчиков давления в диапазоне от 0 до 2.5 МПа (Рис. 1).

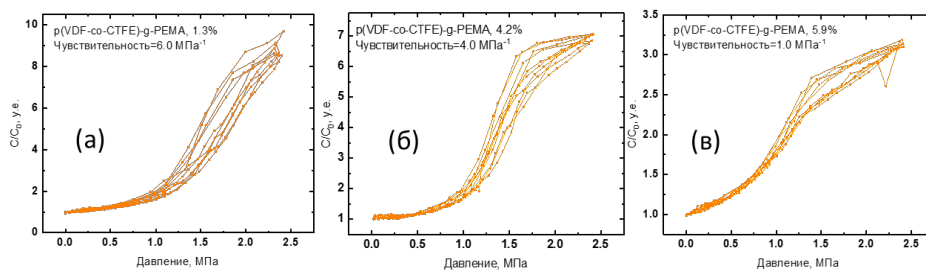


Рис. 1. – Зависимость относительной емкости от приложенного давления для пленок p(VDF-co-CTFE)-g-PEMA с содержанием PEMA в (а) 1,3%, (б) 4,2% и (в) 5,9%.

Показано, что чувствительность и диапазон датчиков можно варьировать, управляя степенью прививки PEMA. Наиболее перспективным материалом оказались двойные сополимеры, поскольку они показали достаточно низкий гистерезис и высокую воспроизводимость отклика.

Данная работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 19-73-30028-П).

¹ Khudyshkina A.D., Luponosov Yu.N., Shevchenko V.G., Ponomarenko S.A. *EXPRESS Polym. Lett.* 2021, **15**(10), 957-971.

² Клеймюк Е. А., Косякова А.И., Бузин А.И., Шевченко В.Г., Лупоносов Ю.Н., Пономаренко С.А. *Высокомолекулярное Соединение, Сер. С*, 2022, **64**(2), 218-228.

Актуальные Проблемы Создания Полимерных Печатных Устройств

В.П. Гайдаржи^{1}, А.А. Труль¹, Е.В. Агина¹, С.А. Пономаренко^{1,2}*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН

²Московский Государственный Университет, Химический факультет

*e-mail: v.gaidarzhi@ispm.ru

Использование печатных методов считается перспективным подходом к производственным технологическим процессам создания гибкой электроники. Адаптация существующих технологий и процессов печати к нанесению функциональных слоев в устройствах органической электроники по-прежнему остается актуальной темой исследований и может иметь большое значение для производственных отраслей будущего. До сих пор не было подробных и всесторонних исследований, посвященных исследованию стабильности и надежности печатных электронных устройств с детальным разбором причин сбоев в процессе их изготовления и эксплуатации.

В данной работе подробно рассмотрены последовательные этапы изготовления печатного устройства,¹ обозначены проблемы, с которыми можно столкнуться в процессе изготовления устройств на основе печатных технологий, а также предложены пути их решения. Представлена новая архитектура и подход к изготовлению газовых сенсоров, полностью сформированных по технологии трафаретной печати: верхний электрод на основе ПЭДОТ:ПСС, нижний - серебряных наночернил, слой диэлектрика (полистирола) и полупроводника наносили из раствора в толуоле. Полученные электрические характеристики позволили использовать данные устройства в качестве емкостных газовых сенсоров на аммиак и толуол. Изготовленные датчики обратимо реагируют на аммиак в широком диапазоне концентраций от 0 до 24 млн⁻¹, с пределом детектирования 1,5 млн⁻¹, а также не теряют работоспособности во влажном воздухе как минимум до 40% относительной влажности, хотя предел детектирования во влажном воздухе выше, чем в сухом и составляет 4 млн⁻¹. Кроме того, напечатанные устройства могут служить одноразовыми сенсорами на присутствие в атмосфере толуола в диапазоне концентраций 0.1 -15 об.%, что потенциально позволяет использовать их в качестве «пожарной сигнализации» об утечках толуола.

Использование представленных емкостных датчиков в совокупности с газовыми сенсорами на основе органических полимерных транзисторов позволяет существенно расширить диапазон измеряемых концентраций аммиака: от концентраций, сравнимых с ПДК жилых зон, до концентраций, требующих немедленной эвакуации населения.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-73-30028-П).

¹ В. П. Чекусова, и др., *Известия Академии наук. Серия химическая.*, 2022, **6**, 1290-1299.

Синтез Биотин-Содержащих Производных ВТВТ для Жидкостных Сенсоров на Основе Органических Электролитических Транзисторов

Е.А. Соркина^{1}, О.В. Борцев¹, С.А. Пономаренко¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской Академии Наук

*e-mail: e.sorokina@ispm.ru

Содержание некоторых биологических молекул в жидкостях организма может быть использовано в качестве индикаторов для раннего выявления определенных заболеваний.

Полупроводники являются вариантом для высокопроизводительных устройств и продемонстрировали выдающиеся характеристики в органических полевых транзисторах (OFET). Из многочисленных молекул 2,7-dioctyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene является перспективным органическим полупроводником с высокой кристалличностью.¹ Иммунизация биорецепторов на поверхности полупроводника или затвора, путем закрепления биологических молекул, специфичных для соответствующих биоаналитиков, обеспечивает связывание с целевым анализируемым веществом и гарантирует избирательность устройства. Сочетание в структуре молекулы фрагментов ВТВТ, обладающих хорошими полупроводниковыми свойствами, и гибких алкильных спейсеров, значительно улучшают растворимость.

Модификация полисилоксанов с привитыми фрагментами биотина и диалкиламещенными [1]бензотиено[3,2b][1]бензотиофеновыми группами, придаст полученным полисилоксанам способность селективно связываться с различными биологическими молекулами-мишенями. Биотин-содержащее производное ВТВТ синтезируется путем многостадийного процесса через клик-реакции, комбинации реакции ацилирования Фриделя–Крафтса и восстановления соответствующих кетонов.

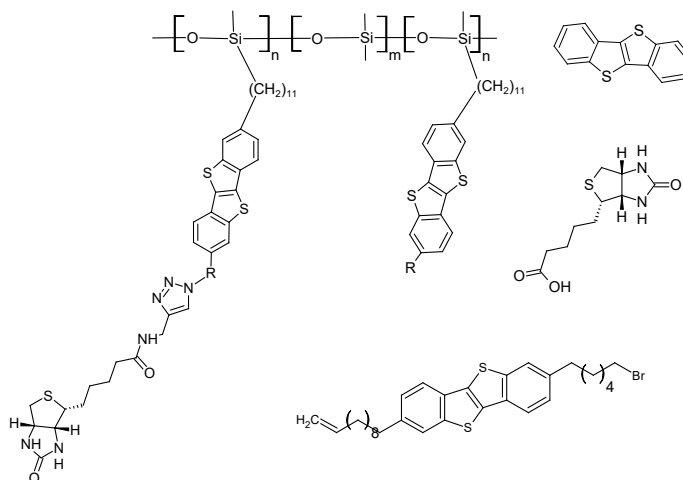


Рис.1. Структурные формулы синтезированных соединений

Данная работы выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-73-30028-П).

¹ Wang, D., Noël, V., Piro, B. *Electronics* 2016, **5**(1).

² Li L., Wang S., Xiao Y., Wang Y. *Trans. Tianjin Univ.* 2020, **26**, 424–440.

Донорно-Акцепторные Люминофоры на Основе 2,1,3-бензотиадиазола с Высоким Торсионным Углом: Синтез и Оптические Свойства

В.В. Попова^{1,2}, М.С. Скоротецкий¹, О.В. Борщев¹, Н.М. Сурин¹, Е.А. Свидченко¹,
С.А. Пономаренко¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН

²Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

*e-mail: vv.popova@ismp.ru

Донорно-акцепторные системы высоко востребованы в разных областях органической электроники благодаря своим уникальным свойствам. Варьируя электронодонорные и электроноакцепторные фрагменты таких структур, возможно тонко настраивать оптические свойства соединений. В данной работе в качестве акцепторного блока используется 2,1,3-бензотиадиазол. Его исключительные оптоэлектронные свойства позволяют синтезировать эффективные люминофоры с различными донорными блоками.^{1,2}

Применение 1,4-диметилбензола в качестве донорных фрагментов с молекулой бензотиадиазола может привести к увеличению торсионного угла между этими звеньями. Изменение копланарности молекулы приводит к нарушению сопряжения и изменению оптических свойств.

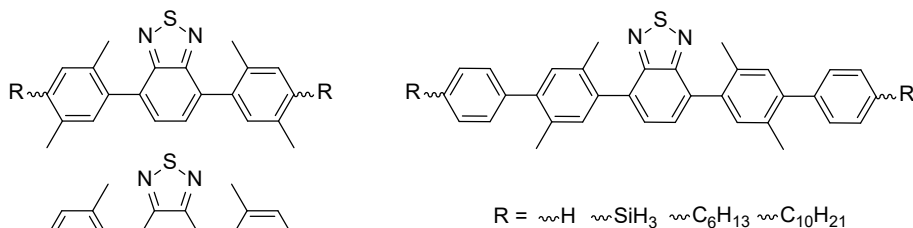


Рисунок 1. Химическая структура полученных соединений

Основная цель работы – исследование взаимосвязи химической структуры и свойств таких систем. Для этого был синтезирован ряд новых симметричных люминесцентных молекул, состоящих из электроноакцепторного центра бензотиадиазола, 1,4-диметилбензола и бензольных фрагментов, с помощью Pd-катализируемой реакции кросс-сочетания в условиях Сузуки. Для изучения кристаллической упаковки также были синтезированы молекулы с различными терминальными заместителями, такими как триметилсилан, а также производные с гексильной и децильной цепями (рис. 1). Для полноты картины синтезирована молекула с 1,3-диметилбензольными донорными звеньями.

Работа выполнена при финансировании из средств гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-3843.2022.1.3.

¹ Skorotetsky M.S., Krivtsova E.D., Borshchev O.V., Surin N.M., Svidchenko E.A., Fedorov Y.V., Pisarev S.A., Ponomarenko S.A. *Dyes and Pigments*. 2018, **155**, 284-291.

² Postnikov V.A., Lyasnikova M.S., Kulishov A.A., Sorokina N.I., Voloshin A.E., Skorotetsky M.S., Borshchev O.V., Ponomarenko S.A. *Physics of the solid state*. 2019, **61**(12), 2322-2355.

Current State of Spring-Roll Actuators: Materials and Fabrication

G. Ghazaryan^{1}, A.G. Khmel'nitskaia¹, I.V. Bezsudnov¹, A.A. Kalinina¹, E.V. Agina¹,
S.A. Ponomarenko¹*

¹Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials RAS

*e-mail: gagik@ispm.ru

Dielectric elastomers (DEs) earned their artificial muscle moniker because of their large electrically induced actuation strain, high energy density, fast response speed, and mechanical compliancy, all of which reproduce or in some aspects exceed the multifunctional performance of natural muscles. When a DE film is sandwiched between compliant electrodes, it acts as a deformable capacitor and is known as a dielectric elastomer actuator (DEA). Under a voltage, the electric field across the DE generates a strong electrostatic interaction between the electrodes, known as a Maxwell stress, which compresses the film in the thickness direction and expands it in area. Basis on the working mechanisms, a high performance DE should have sufficiently high elastic strains, a large dielectric constant, a high dielectric strength, and an actuation stability without premature failure. It has been challenging to tailor the electromechanical properties of an elastomer to meet all these requirements, and the selection of DE materials is therefore limited.

In this work we developed a simple method for assembling a multilayer configuration of DEA, a spring-roll actuator, where the coated DE film is rolled around a spring core. Here we discuss the strategies of increasing the actuation strain of the spring-roll actuator using silicones with higher dielectric constant. We fabricated a spring-roll actuator using a commercial silicone with a dielectric constant of 3 and a Young's modulus of 2 MPa at the pre-strained state. The latter showed 7 % strain at 100 V/ μm . This fairly corresponds to the theoretical value (about 10 % strain) we obtained by applying the model developed by Rajamani et al.¹ We can further predict the actuation strain for spring-roll actuators comprising silicones with higher dielectric constant at the same Young's modulus (see Fig 1). Lastly, we discuss a new method of depositing a thin layer (40-50 nm thick) of carbon nanotube (CNT) compliant electrodes on the DE membrane.

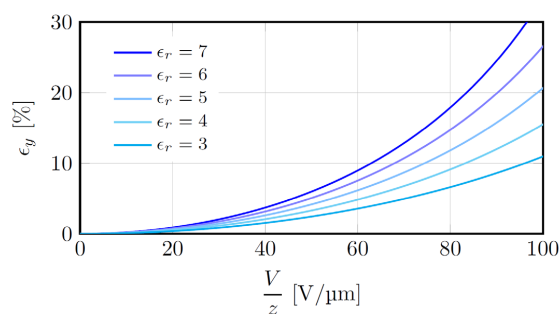


Fig. 1. Dependence of axial strain (ϵ_y) upon applied electric field (V/z) according to the model developed by Rajamani et al. The model is applied to DEs with a Young's modulus of 2 MPa.

This work was supported by RSF (project № 19-73-30028-P).

¹ Rajamani A. et al. *IEEE ASME Trans. Mechatron.*, 2008, **13**, 117–124.

Конформационный Полиморфизм Кристаллов Линейных Молекул с Гибким Сопряженным Ядром и Концевыми Триметилсилильными Заместителями

В.А.Постников^{1,2*}, *Т.А. Сорокин*^{1,2}, *Н.И. Сорокина*¹, *А.А. Кулишов*^{1,2}, *М.С. Лясникова*¹,
Г.А. Юрасик^{1,2}, *М.С. Скоротецкий*², *О.Б. Борцев*²

¹ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

*e-mail: postva@yandex.ru

Полиморфизм – это наличие нескольких кристаллических модификации одного и того же химического вещества, хотя четкое определение этого явления на сегодняшний день так и не выработано.¹ Кристаллы различных полиморфных фаз или полиморфы характеризуются различными термодинамическими свойствами (растворимость, плотность, температура плавления, теплоемкость и пр.). Когда разные конформеры одной и той же молекулы встречаются в разных кристаллических формах, это явление называется конформационным полиморфизмом.² Иногда в одной и той же кристаллической структуре присутствует более одного конформера. Известно, что органические молекулы с гибкими торсионами и низкоэнергетическими конформерами с большей вероятностью проявляют полиморфизм.² Наличие терминальных групп заместителей в составе молекулы с гибким сопряженным ядром, судя по наблюдениям, также повышает вероятность проявления полиморфизма. Тема настоящего доклада посвящена анализу проявления полиморфизма среди линейных сопряженных молекул с гибкой конформационной структурой, содержащей группы фенилена и бензотиадиазола, а также концевые триметилсилильные заместители. Присутствие триметилсилильных групп в кристаллической упаковке дает разрыхляющий эффект, приводящий к понижению плотности кристаллов и увеличению растворимости. Выполняя роль распорок в кристалле, массивные концевые $-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ группы дают возможность гибкому сопряженному ядру принимать более выгодную для внутримолекулярной энергии геометрию. В связи с чем, в кристалле молекула может принимать ряд конформационных состояний с разным набором торсионов, что, тем самым, способствует проявлению термодинамического и кинетического полиморфизма.

Данная работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-13-00255).

¹ Bernstein J. Polymorphism in Molecular Crystals. Second ed. OXFORD: CLARENDON PRESS, 2020. 410 p.

² Nangia A. *Acc. Chem. Res.* 2008, **41(5)**, 595–604.

Биохимический Сенсинг на Основе Органических Электролитических Транзисторов

Е.Ю. Пойманова^{1*}, *Е.А. Кретова*¹, *П.Н. Караман*¹, *П.А. Шапошник*^{1,2}, *Д.С. Анисимов*¹,
*Е.Г. Завьялова*², *А.А. Труль*¹, *М.С. Скоротецкий*¹, *В.В. Крылов*³, *Е.В. Агина*¹,
С.А. Пономаренко^{1,2}

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

²Московский государственный университет, Химический факультет

³Институт органической химии РАН

*e-mail: poymanova@ispm.ru

Обнаружение и определение содержания различных патогенов в жидких средах, включая биологические и среды с высокой ионной силой составляет одно из направлений развития биосенсорных технологий. К настоящему моменту разработано много методов детектирования содержания токсинов и патогенов, обладающих высокой чувствительностью и точностью. Однако одновременное определение нескольких различных аналитов с помощью одного устройства все еще не реализовано, к тому же практически все из существующих методов требуют наличия дорогостоящего оборудования, сложной пробоподготовки, специально подготовленной лаборатории и обученного персонала. Органические электролитические транзисторы (ОЭТ) являются многообещающей платформой для сверхчувствительного, быстрого и надежного обнаружения биологических молекул с помощью недорогих биоэлектронных датчиков. В то же время благодаря возможности модификации биорецепторного слоя в составе ОЭТ различными линкерами для улавливания аналитов в жидких средах, они представляют собой универсальную платформу для био- и химического сенсинга.

Биочувствительность ОЭТ реализуется за счет модификации затвора или поверхности органического полупроводника (ОП) транзистора. Для дизайна мультисенсора в данной работе был разработан рецепторный слой на функциональных производных 2,7-диоктил[1]бензотиено[3,2-*b*]бензотиофена (ВТВТ), содержащего биотиновые фрагменты – С₁₁-ВТВТ-С₆-biotin и фрагменты краун-эфира – ВТВТ-С₆-КryptoFix22. Затем биотинилированный слой, прикрепленный к поверхности ОП, функционализировался различными рецепторами с использованием хорошо изученной биотин-стрептавидиновой химии, рецепторный слой с краун-эфиром на поверхности использовали для определения ионов калия, содержание которых являются важным биохимическим показателем жидких сред. В качестве рецепторов использовали аптамер RHA0385 и антитела к β-глюкану и галактоманнану. Показана специфичность изготовленных биосенсоров и чувствительность к вирусу гриппа А.

Отдельно обговаривается варьирование толщины ОП в составе ОЭТ с точки зрения транспорта зарядов и влияния толщины активного слоя органического полупроводника на биосенсорные свойства устройства на основе ОЭТ.

Предложенный подход к созданию рецепторного слоя открывает возможность создания мультисенсора на основе ОЭТ, позволяющего фиксировать биохимические события на основе биотин-стрептавидинового взаимодействия, а также определять ионный состав жидкости.

Данная работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 23-73-00103).

Влияние Химической Структуры Полупроводника и Интерфейсного Полимерного Диэлектрика на Сенсорные Свойства Органических Полевых Транзисторов

А.А. Труль^{1}, В.П. Гайдаржи¹, А.А. Абрамов¹, С.Х. Тоиров², М.С. Скоротецкий¹,
О.В. Борщев², Е.В. Агина¹, С.А. Пономаренко^{1,2}*

¹ Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

² Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

*e- mail: trul@ispm.ru

Количественный мониторинг и анализ сложных газовых смесей становится все более востребованным с точки зрения безопасности (анализ атмосферного воздуха, анализ свежести продуктов питания) или персонализированной медицины (диагностика посредством анализа выдыхаемого воздуха). Одним из перспективных типов газовых сенсоров для такого мониторинга являются (ультра)тонкопленочные органические полевые транзисторы (ОПТ). Электрические характеристики таких устройств сильно зависят от окружающей среды благодаря непосредственному контакту токопроводящего слоя ОПТ и молекулами детектируемого газа, что позволяет детектировать концентрации в несколько десятков млрд.⁻¹ долей.¹

Ранее в нашей лаборатории были получены сенсорные устройства на основе ОПТ.² В качестве активного слоя использовали силоксановые димеры бензотиенобензотиофена (ВТВТ). Были продемонстрированы несколько подходов достижения селективности подобных устройств,^{3,4} а также получено портативное устройство типа «электронный нос» на их основе.⁵ В тоже время несмотря на большие успехи в прикладной области, понимание факторов, которые влияют на сенсорный отклик таких ОПТ остается на достаточно низком уровне, что является важной задачей как с фундаментально, так и с прикладной точки зрения. Для изучения данной области были поставлены ряд задач по изучению влияния методики измерения ОПТ, химической структуры различных слоев ОПТ, а также методов нанесения слоев на сенсорные свойства последних – первые результаты которых уже были опубликованы.^{6,7}

В ходе данного доклада будут представлены новые данные на тему исследования механизма работы сенсоров на основе ОПТ. Результаты будут разделены на два раздела. Первый посвящен влиянию длины концевой группы на чувствительность к другому токсичному газу (аммиаку), а также на чувствительность к неопределяемым компонентам. Второй посвящен влиянию интерфейсного диэлектрика на сенсорные свойства ОПТ на примере детектирования диоксида азота.

По итогам работы будут сформулированы основные причины изменения сенсорных параметров ОПТ (чувствительность, предел детектирования, время восстановления сенсоров), а также будут сформулированы планы дальнейших исследований, которые позволят получить полное понимание факторов, позволяющих тонко настраивать сенсорные свойства ОПТ на основе силоксановых димеров ВТВТ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-2915.2022.1.3) и РФФИ (проект № 19-73-30028-П).

¹ A.-M. Andringa, M.-J. Spijkman et al. *Org Electron.*, 2010, **11(5)**, 895.

² A.A. Trul, A.S. Sizov et al., *J Mater Chem C*, 2018, **6**, 9649-9659.

³ A.S. Sizov, A.A. Trul et al., *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**, 43831.

⁴ A.A. Trul, V.P. Chekusova et al., *Sens. Actuators B-Chem*, 2020, **321**, 128609.

⁵ D.S. Anisimov, V.P. Chekusova et al., *Sci Rep*, 2021, **11**, 10683.

⁶ M.S. Polinskaya, A.A. Trul et al., *J. Mater. Chem. C*, 2022, **11(5)**, 1937.

⁷ A.A. Trul, V.P. Chekusova et al., *Adv. Electron. Mater.*, 2022, **8(5)**, 2101039.

Новые Полупроводниковые Материалы на Основе бензотиено[3,2-b][1]бензотиофена

О.В. Борщев^{1}, М.С. Скоротецкий¹, М.С. Полинская¹, С.А. Пономаренко¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: borschhev@ispm.ru

Одной из бурно развивающихся областей науки и техники является органическая электроника. Использование материалов на основе органических соединений открывает перспективы создания инновационных оптоэлектронных устройств, отличительными особенностями которых являются низкая стоимость, легкость, гибкость и прозрачность. Одним из базовых устройств органической электроники являются органические полевые транзисторы (ОПТ), основанные на способности π -сопряженных олигомеров и полимеров проявлять полупроводниковые свойства. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных классов органических полупроводников являются бензотиенобензотиофены, сочетающие высокие подвижности носителей заряда с высокой растворимостью и возможностью формирования тонких полупроводниковых пленок при помощи растворных методов^{1,2}.

Нами впервые в мире была разработана синтетическая схема и синтезированы органические полупроводниковые материалы на основе [1]бензотиено[3,2-b]-бензотиофена (ВТВТ), способные самоорганизовываться на поверхности воды³. Синтезирован широкий ряд силоксановых димерных молекул, имеющих алифатические спейсеры⁴ и концевые группы⁵ различной длины. Кроме того, успешно получены силоксановые полимеры с различным количеством привитых полупроводниковых фрагментов⁶. Полученные материалы успешно использовались для изготовления органических полевых транзисторов. Были изучены процессы самоорганизации тонких пленок кремнийорганических производных ВТВТ различного химического строения при их формировании ленгмюровскими методами, а также методами вращающейся подложки и дозирующего лезвия⁷. Новые полупроводниковые материалы успешно применялись для изготовления сверхчувствительных газовых сенсоров^{8,9,10}, биосенсоров^{11, 12} и мемристивных устройств^{13, 14}.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-73-30028-П).

¹ Y. Yuan и др., *Nature Comm.* 2014, **5**, 3005.

² K. Takimiya и др., *Thin Solid Films*, 2014, **554**, 13-18.

³ O. Borschhev, A. Sizov, E. Agina, S. Ponomarenko., *Chem. Commun.*, 2017 **53**, 885-888.

⁴ A.A. Trul, V.P. Chekusova, D.S. Anisimov et al. *Adv. Electron. Mater.* 2022, **2101039**.

⁵ M.S. Polinskaya, A.A. Trul, O.V. Borschhev et al. *J. Mater. Chem. C*, 2023, **11**, 1937–1948.

⁶ E.A. Zaborin, O.V. Borschhev и др. *Polymer Science, Series B*, 2022, **64**, 841–854.

⁷ E. V. Agina, M. S. Polinskaya, A. A. Trul et al., *Proc. of SPIE* 2017, **10365**, 23.

⁸ A.S. Sizov, A.A. Trul, V.P. Chekusova et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10, **50**, 43831–43841.

⁹ A. A. Trul, A. S. Sizov, V. P. Chekusova, O. V. Borschhev, E. V. Agina, M. A. Shcherbina, A. V. Bakirov, S. N. Chvalun and S. A. Ponomarenko, *J Mater Chem C*, 2018, **6**, 9649-9659.

¹⁰ D.S. Anisimov, V.P. Chekusova, A.A. Trul, A.A. Abramov, O.V. Borschhev, E.V. Agina, S.A. Ponomarenko, *Scientific Reports* 2021, **11**, 10683.

¹¹ E.Yu. Poimanova и др., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, **14**, 16462–16476.

¹² E.Yu. Poimanova и др., *Russian Chemical Bulletin*, Vol. **71**, No. 10, pp. 2116—2122.

¹³ Prudnikov, N. V. и др., *Phys. Status Solidi RRL*, 2022, **16**: 2100471.

¹⁴ A.A. Suleimanova и др., *Nanobiotechnology Reports*, 2021, Vol. **16**, No. 6, pp. 755–760.

Устройство для Измерения Электрических Характеристики Органических Полевых Транзисторов с Электролитным Затвором в Проточном Режиме

А.А. Абрамов^{1}, Е.В. Агина¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: abramov@ispm.ru

Органические полевые транзисторы с электролитным затвором (EGOFET) позволяют построить на своей основе сенсоры с жидкостью в качестве анализируемой среды. Особый интерес вызывает возможность создания высокочувствительных и селективных биосенсоров на базе данных устройств¹. Сочетание массива биосенсоров, микрофлюидной системы подачи аналита и электронного блока анализа данных позволяет анализировать биологические жидкости на наличие сложных биологических молекул в реальном времени с малыми затратами ресурсов². Данная работа посвящена разработке измерительного стенда для сбора откликов с массива сенсоров на основе EGOFET.

Для сбора откликов с массива сенсоров было разработано измерительное устройство, а также сенсорная ячейка, осуществляющая электрическую коммутацию и подключение системы подачи анализируемой жидкости. Сенсорная ячейка состоит из следующих элементов: печатной платы с электродом затвора, подвижной платы с подпружиненными контактами для соединения с электродами стока и истока, проставки, полидиметилсилоксанового уплотнения, верхней прижимной планки и инъекционных игл с фторопластовыми адаптерами для присоединения силиконовых трубок.

Измерительное устройство построено на базе микроконтроллера STM32F373, имеющего в своём составе 16-битный аналого-цифровой преобразователь с восьмиканальным мультиплексором, а также двухканальный цифро-аналоговый преобразователь. Аналоговая часть устройства состоит из восьми трансимпедансных усилителей для преобразования в напряжение тока каналов транзисторов, а также двух инвертирующих усилителей для подачи напряжения на затвор и исток транзисторов. К неинвертирующим входам усилителей подводится напряжение смещения, равное половине напряжения питания для возможности подачи напряжений обоих знаков при использовании однополярного питания. Встроенное программное обеспечение устройства позволяет одновременно измерять передаточные и выходные характеристики пяти транзисторов на подложке, при этом стоки транзисторов и общий затвор присоединены к соответствующим источникам напряжения, а каждый из истоков присоединен ко входу соответствующего трансимпедансного усилителя.

Калибровка каналов измерения тока и источника напряжения осуществляется автоматически при помощи коммутационной платы, соединяющей какой-либо из каналов с референсным амперметром или вольтметром, и специальной программы на ПК, управляющей устройством и референсным измерителем.

Пробные измерения передаточных характеристик показали смещение порогового напряжения на 0,2..0,4В относительно измерений одиночных транзисторов, проведенных на зондовой станции. Такое поведение может быть обусловлено иной геометрией затвора, а также параллельным включением транзисторов.

Данная работы выполнена при поддержке РНФ (проект № 23-73-00103).

¹ Mulla, Torsi et al. *Methods Enzymol.* 2020, **642**, 403-433.

² Doumbia, Webb et al. *Advanced Electronic Materials.* 2022, **8**(9).

Биорецепторный Слой на Основе Методов Клик-Химии для Органических Электролитических Транзисторов

*Е.А. Кретова¹, Е.Ю. Пойманова¹, П.А. Шапошник^{1,2}, М.С. Скоротецкий¹,
Е.А. Сорокина¹, Е.В. Агина¹, С.А. Пономаренко^{1,2}*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова

²Химический факультет, Московский государственный университет им. М.В.

Ломоносова

*e-mail: e.kretova@ispm.ru

Модификация полупроводникового слоя органических электролитических транзисторов (ОЭТ) является одним из основных методов в создании компактных устройств для биораспознавания различного набора аналитов. В данной работе предлагается надежная функционализация поверхности ОЭТ с помощью методов клик-химии. Среди всего многообразия клик-реакций наиболее известной является реакция азид-алкинового взаимодействия, катализируемая Cu (I).

Полученные устройства представляют собой трехэлектродную систему, состоящую из нижних контактов стока и истока, слоя органического полупроводника и электролитического затвора (рис. 1 а). В качестве полупроводникового слоя была использована смесь [1]бензотиено[3,2-*b*]бензотиофена (C₈-ВТВТ-С₈) и полистирола, к которой добавлялось специально синтезированное производное ВТВТ с алкиновой группой (C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃) в концентрациях, равных 0%, 10% и 20% от концентрации C₈-ВТВТ-С₈. Полученные образцы работают при низких напряжениях (до 0,5 В), что является необходимым условием при работе с молекулами биологической природы. Формирование и качество полученных пленок контролировали с помощью поляризационной оптической и атомно-силовой микроскопии (рис. 1 б-д). Устройства продемонстрировали хорошие пленкообразующие свойства, а также хорошие вольтамперные характеристики в диапазоне рабочих напряжений (от -0,2 В до 0,5 В) (рис. 1 е, ж). Между C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃ и синтезированной молекулой биотина с азидной функциональной группой (Biotin-N₃) была проведена клик-реакция. После проведения клик-реакции значительных ухудшений в работе устройств не наблюдалось (рис 1 з). Функционализация поверхности с помощью методов клик-химии открывает возможность использования полученных устройств в качестве биосенсоров для обнаружения биоаналитов различной природы.

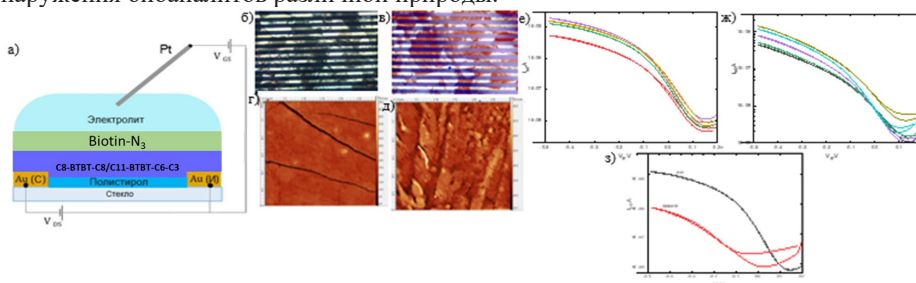


Рис. 1 а) архитектура ОЭТ с биорецепторным слоем; изображения поляризационной оптической микроскопии при: б) 0% C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃, в) 10% C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃; АСМ изображения поверхности при: г) 0% C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃, д) 10% C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃; передаточные характеристики образца при е) 0% C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃, ж) 10% C₁₁-ВТВТ-С₆-С₃, з) передаточные вольтамперные характеристики до (серая кривая) и после (красная кривая) клик-реакции с биотином

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание № FFSM-2022-001).

Влияние Допирования Полупроводникового Слоя на Электрические и Сенсорные Свойства Органических Электролитических Транзисторов на Основе Смеси С8-ВТВТ и Полистирола

П. А. Шапошник^{1,2*}, Е. Ю. Пойманова¹, А. А. Труль¹, Е. В. Агина¹,
С.А. Пономаренко^{1,2}

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

²Московский Государственный Университет, Химический факультет

*e-mail: polinashaposhnik@ispm.ru

Органические полевые транзисторы с электролитическим затвором (ОПТЭЗ) – тип устройств, которые активно исследуют в последнее десятилетие в качестве платформы для биосенсоров. Основное их преимущество – высокая чувствительность, сравнимая с чувствительностью ПЦР-анализа.¹ Однако коммерциализацию устройств на основе органических полупроводников затрудняет ряд факторов, к которым относится более низкая стабильность устройств, чем в случае кремниевых аналогов, а также более низкие электрические характеристики, в том числе, подвижность носителей зарядов, и, следовательно, соотношение токов открытого и закрытого состояний, который характеризует способность транзистора усиливать сигнал, полученный в процессе биораспознавания. Поэтому одной из актуальных задач является поиск методики для изготовления устройств с улучшенными электрическими характеристиками. Одной из первых методик, применявшихся для повышения проводимости органических полупроводников, было допирование, в том числе раствором йода. В данной работе была поставлена задача проверить гипотезу о том, что допирование йодом может значительно улучшить электрические характеристики ОПТЭЗ на основе смеси С8-ВТВТ и полистирола, как это было показано для ОПТ на основе аналогичного полупроводникового слоя.²

В данной работе нами была использована методика изготовления ОПТЭЗ, разработанная нами ранее.³ После этого устройства были обработаны в парах раствора I₂ в ацетонитриле, как было описано в работе.² Были измерены электрических характеристики устройств до и после обработки; показано, что обработка приводит к повышению передаточной проводимости (представляющей собой произведения подвижности носителей заряда μ на удельную емкость двойного электрического слоя C_{eff}). Однако в то же время заметно возрос и ток закрытого состояния, что привело к ухудшению соотношения токов открытого и закрытого состояния. Для того, чтобы объяснить данный эффект, проведено сравнение рН-чувствительности допированных и не-допированных устройств, исходя из предположения, что повышение тока закрытого состояния связано с повышением проницаемости пленки при допировании и, следовательно, повышении инжекции протонов из раствора. При подтверждении этой гипотезы рН-чувствительность должны была повыситься; однако мы наблюдали снижение рН-чувствительности по току закрытого состояния, а рН-чувствительность по пороговому напряжению не изменилась. Это может означать, что повышение передаточной проводимости связано не с повышением подвижности носителей заряда, а с увеличением емкости двойного электрического слоя за счет появления отрицательно заряженных ионов I⁻ на поверхности полупроводника.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-73-30028-П).

¹ Macchia E. et al., *Nat. Commun.* 2018, **9**, 3223.

² Li J. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2023, **15**, **4**, 5521–5528.

³ Shaposhnik P.A. et al., *Dokl. Phys. Chem.* 2021, **496**, **2**, 20–24.

Транзисторы с Электролитическим Затвором на Основе Малых Молекул Органических Полупроводников для Биосенсоров

П.Н. Караман¹, Е.Ю. Поимонова¹, В.Б. Крылов¹, Е.В. Агина¹

¹Институт синтетических полимерных материалов Н.С. Ениколопова РАН

В мире постоянно возрастает спрос на новые биологические и химические сенсоры, так как такие устройства позволяют проводить идентификацию биологических объектов и химических соединений. Органические электролитические транзисторы (ОЭТ) являются перспективной платформой для сверхчувствительного, быстрого и надежного обнаружения биологических молекул для недорогих биоэлектронных датчиков в местах оказания медицинской помощи. Преимущество по сравнению с другими технологиями обнаружения, такими как электрохимические или оптические, заключается в способности давать ответ без меток с использованием простой электронной схемы считывания, которую можно легко миниатюризировать и удешевить, также используя, например, технологии печатных схем и гибкие материалы подложек. С помощью биосенсоров на основе ОЭТ можно детектировать очень низкие концентрации аналитов, что в медицине позволяет определять биомаркеры заболеваний на ранних стадиях. Одним из таких заболеваний является аспергиллез - грибковое заболевание человека, животных и птиц, вызываемое аспергиллами – плесневыми грибами рода *Aspergillus*, выявление которого на ранних стадиях особенно критично для групп риска и для исключения рецидивов заболевания. На данный момент стандартом для определения плесневых грибов является тестом на основе лизата амебоцитов *Limulus* (LAL), недостатком которого является большое количество ложноположительных результатов.

Данная работа направлена на изучение отклика биорецепторного слоя в ОЭТ-биосенсоре на полисахариды, входящие в состав клеточной стенки гриба *Aspergillus* – галактоманнан или β -(1-3)-D-глюкан – с помощью моноклональных антител 7B8 или 5H5 в качестве платформы для экспресс-тестирования грибкового заболевания человека аспергиллеза. Исследовано распределение мест связывания аналитов на поверхности ОЭТ-биосенсора на основе малых молекул, подтверждающие создание крупномасштабного биораспознающего слоя, реализующегося за счет биотин-стрептавидинового взаимодействия. Продемонстрирован специфический отклик ОЭТ-биосенсора на полисахариды бета-глюкан и галактоманнан посредством моноклональных антител (5H5, 7B8). Показана селективность устройства. Обнаруженные с помощью биосенсора количества полисахаридов сопоставимы с результатами, получаемыми иммуно-ферментным анализом на основе антител, и конкурировать с тестом LAL.

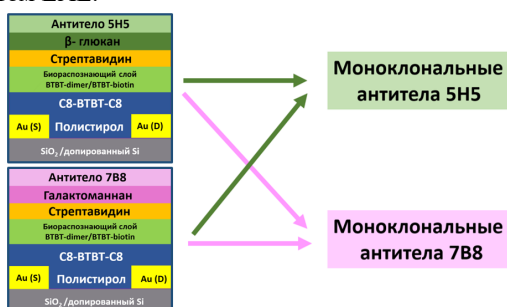


Рисунок 1. Схема специфических и неспецифических связываний полисахаридов с моноклональными антителами.

Электрические и Сенсорные Свойства Новых Силоксановых Димеров Бензотиенобензотиофена

С.Х. Тоуров^{1,2*}, А.А. Труль¹, В.П. Гайдаржи¹, А.А. Абрамов¹, М.С. Скоротецкий¹,
М.С. Полинская¹, О.В. Борцев¹, Е.В. Агина¹, С.А. Пономаренко^{1,2}

¹ Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

² Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

*e- mail: trul@ispm.ru

Органические полевые транзисторы, также известные как ОПТ, представляют собой трех-электродные электронные устройства, в которых в качестве активного слоя используются органические полупроводники. Они привлекли большое внимание научного сообщества благодаря ряду преимуществ. По сравнению со своими неорганическими аналогами, ОПТ имеют более широкий диапазон выбора материалов для их изготовления, являются недорогими, легкими, механически гибкими, работают при низких напряжениях и могут быть легко изготовлены в больших масштабах с помощью печатных и растворяемых технологий. Основным недостатком ОПТ является то, что на их характеристики могут влиять внешние воздействия (химические, биологические, механические, оптические), что ограничивает их применение во многих средах. С другой стороны, этот недостаток может быть использован для создания эффективных сенсорных устройств, например, газовых сенсоров. Такие сенсоры продемонстрировали высокую чувствительность (десятки миллиардных долей), быстрый отклик и возможность создавать реальные устройства на их основе.^{1,2}

Целью работы являлось установление влияния химической структуры, а именно длины алифатической концевой группы (от 0 до 13 атомов углерода), силоксановых димеров бензотиенобензотиофена (БТБТ) на электрические свойства ОПТ на их основе, а также исследование сенсорных свойств таких ОПТ в присутствии низких концентраций токсичных газов, а именно аммиака и диоксида азота. Было показано, что метод Ленгмюра-Шеффера позволяет сформировать однородные монослои силоксановых производных БТБТ для всех исследованных длин концевой алифатической группы, существенно отличающиеся морфологией поверхности слоя, которая определяет их электрические и сенсорные свойства. Морфология поверхности слоя играет ключевую роль в чувствительности слоя к низким концентрациям. При этом чем больше на поверхности слоя однородных областей с низкой шероховатостью, тем более высокую чувствительность к целевому газу будет проявлять слой. Наилучшие электрические и сенсорные свойства продемонстрировали слои на основе димера с концевой бутильной группой.

Для всех исследованных молекул выявлено, что изменение длины концевой алифатической группы приводит к изменению чувствительности и селективности ОПТ на основе силоксановых производных БТБТ, что открывает возможность создания устройства типа «электронный нос» на массиве ОПТ изготовленных из силоксановых производных БТБТ с различной длиной концевой алифатической группы.

¹ Yuvaraja S., Surya S. G. et al. *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters.*, 2020, **14** (6), 2000086.

² D.S. Anisimov, V.P. Chekusova et al., *Sci Rep*, 2021, **11**, 10683.

Новые Кремнийорганические Фотоотверждаемые Люминесцентные Композиции

Д.К. Гайков^{1}, А.А.Бочарова¹, О.В.Борцев¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: d.gaikov@ispm.ru

Силоксансодержащие олигомеры представляют собой уникальный класс синтетических полимеров, использующих органическую и неорганическую основную структуру, состоящую из повторяющихся связей основной цепи $-(Si-O)_n$ -силоксана. В последние десятилетия усилилась важность силоксансодержащих полимеров в различных областях применения такие как фоторезисты, газоразделительные мембраны, защитные покрытия, эластомеры, увлажнители, уплотнители, спортивная одежда и эмульгаторы.¹ Отработан быстрый и простой способ получения гибких, гидрофобных олигосилоксанов, соконденсацией γ -тиопропилтриметоксисилана с гексаметилдисилоксаном и винилтриметоксисилана с гексаметилдисилоксаном в среде уксусной кислоты. Строение полученных соединений подтверждено данными 1H ЯМР.

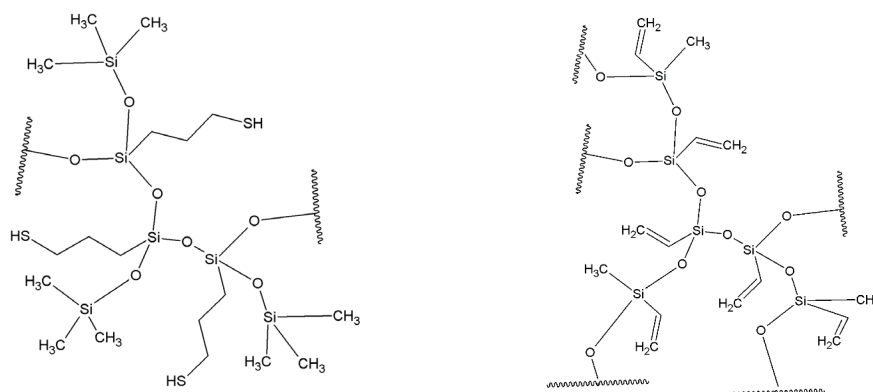


Рис. 1 Структурные формулы продуктов реакции

Олигомеры силоксанов, содержащие тиольные и винильные группы, находят применение в светоизлучающих диодах (LED), тонкопленочных транзисторах и органических солнечных элементах¹. Для получения люминесцентных композиций на первом этапе была проведена иницируемая светом сшивка люминофора, содержащего винильные фрагменты с синтезированным тиол- олигомером. Затем к полученному полимеру добавляли винил- содержащий олигомер. Методом центрифугирования были получены тонкие плёнки композиции, которые фотоотверждались под действием УФ-света с образованием нерастворимого люминесцентного полимера.

Данная работы выполнена в рамках госзадания FFSM-2022-0004.

¹ Sitrine, J. M.; Schexnayder, S. A.; Dennis, J. M.; Long, T. E. Urea as a Monomer for Isocyanate-Free Synthesis of Segmented Poly(Dimethyl Siloxane) Polyureas. *Polymer (Guildf)*. 2018, 154, 225–232

² Maxim N. Temnikov, Yuriy N. Kononevich, Ivan B. Meshkov, Mikhail I. Buzin, Viktor G. Vasil'ev, Galina G. Nikiforova, Aziz M. Muzafarov. Simple and fast method for producing flexible superhydrophobic aerogels by direct formation of thiol-ene networks in scCO₂. *Polymer* 138 (2018), 255-256

Синтез, Свойства и Оценка Возможности Практического Применения Производного 2,1,3-Бензотриадиазола с Разветвляющими Центрами 1,3,5-Замещённый Бензол

Л.Л. Левков^{1,2}, Г.П. Гончарук², Н.М. Сурин², О.В. Борцев², С.А. Пономаренко^{1,2}*

¹Московский Государственный Университет, химический факультет

²Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: ponomarenko@ispm.ru

Важнейшим свойством π – сопряжённых соединений, применяемых в оптоэлектронике и биомедицине является способность эффективно поглощать излучение в заданном диапазоне. Способами достижения высокой поглощающей способности являются линейное соединение нескольких хромофоров или применение разветвляющих центров, разрывающих сопряжение (атомы кремния, бора, углерода) или входящих в цепь сопряжения (атомы азота, молекулярные фрагменты труксена или бензола). При этом увеличение числа линейно соединённых хромофоров приводит к существенному изменению как абсорбционных, так и эмиссионных характеристик, а при соединении большего числа хромофоров через разветвляющие центры возможно в некоторых случаях минимальное смещение области поглощения и сохранение эмиссионных характеристик.

В настоящей работе разработан люминофор с разветвляющими центрами 1,3,5-замещённый бензол, обладающий молярными коэффициентами экстинкции в среднем УФ-диапазоне более $5 \times 10^4 \text{ л} \times \text{М}^{-1} \times \text{см}^{-1}$ и квантовым выходом фотолюминесценции в сине-зелёной области 80% (рис. 1. А).

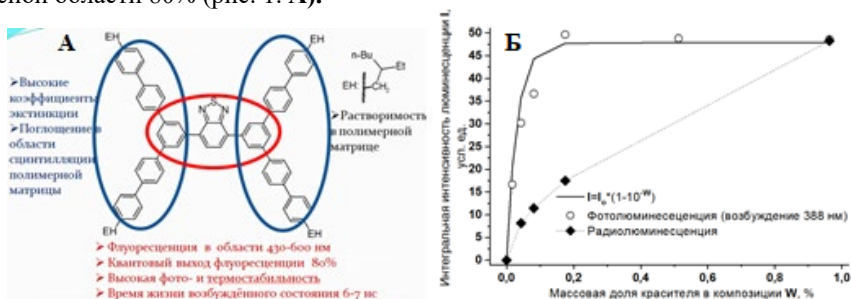


Рис. 1. А Структура красителя и функциональные свойства структурных фрагментов; Б Зависимости интенсивности фото- и радиолуминесценции пластинок толщиной 1.5-1.7 мм от массовой доли красителя в композиции

Исследованы абсорбционные, фото- и радиолуминесцентные свойства двухкомпонентных композиций краситель (0.01-1 масс.%) – полистирол. Изученные материалы получены методом экструзионного смешения. Продемонстрирована возможность создания композиций, в которых один и тот же краситель выполняет роль как активатора радиолуминесценции, так сместителя излучения в видимую область. Показано, что оптимальным диапазоном концентраций люминофора в отношении интенсивности фотолюминесценции является 0.15-0.25 масс.%, а максимальная интенсивность радиолуминесценции наблюдается при концентрации 1 масс.% (Рис. 1 Б).

Работа выполнена при финансировании из средств гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-3843.2022.1.3 с использованием приборной базы ЦКП ИСПМ РАН.

Новые Производные 2,1,3-Бензотиадиазола для Органической Электроники и Фотоники

Заборин Е.А.^{1}, Борщев О.В.¹, Скоротецкий М.С.¹, Сурин Н.М.¹, Пономаренко С.А.¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: zaborin@ispm.ru

Исследование различных олигомеров на основе люминофоров – одно из определяющих направлений в области органической электроники и фотоники. Изучая закономерности между молекулярной структурой и физическими свойствами различных олигомеров на основе люминофоров, можно задавать и предсказывать свойства новых соединений и различных устройств на их основе.

В работе представлены различные новые люминофоры на основе 2,1,3-бензотиадиазола.¹⁻⁵ Их симбиоз оптических и электрических свойств представляет огромный интерес как в фундаментальной, так и в прикладной науке. Среди таких свойств можно выделить: высокую термостойкость, большой коэффициент поглощения, а также значения высшей заполненной и низшей свободной молекулярных орбиталей и сильное межмолекулярное π - π взаимодействие.

Определение закономерностей взаимосвязей между молекулярной структурой и спектрально-люминесцентными, термическими, кристаллохимическими и кристаллофизическими свойствами новых люминофоров, содержащих 2,1,3-бензотиадиазольные фрагменты, является актуальной задачей для фундаментальной науки, и в то же время имеет важное значение для прикладных исследований.

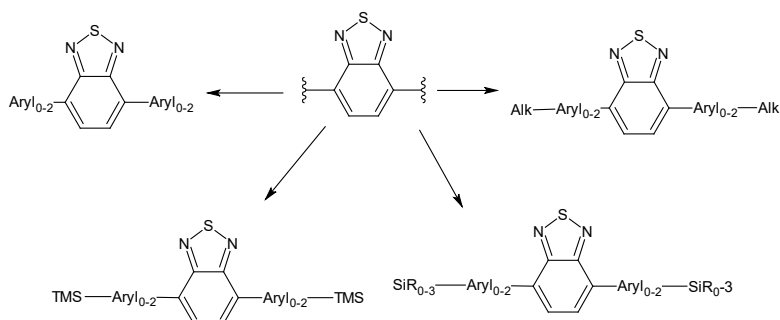


Рисунок 1. Схема новых люминофоров на основе 2,1,3-бензотиадиазола

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №22-13-00255.

¹ Skorotetcky M.S., et al., *Dyes and Pigments* 2018, **155** 284-291

2. Ponomarenko S.A., et al., *Scientific Reports* 2014, **4**, 6549.

3. Borshchev O.V., et al., *INEOS OPEN*, 2019, **2** (4), 112-123

4. Borshchev O.V., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, **848** (1), 012012

5. Postnikov, V.A., et al., *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.*, 2020, **14** (3), 540-543.

Современные Методы Обработки Сенсорных Данных в Системах Машинного Обучения для Мониторинга Атмосферного Воздуха

В.В. Кривецкий^{1,2}*

¹ Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет

² НПК «Технологический центр»

*e-mail: vkrivetsky@inorg.chem.msu.ru

Металлооксидные полупроводниковые газовые сенсоры всё чаще рассматриваются в качестве инструмента для долговременных непрерывных измерений концентраций газов – загрязнителей атмосферного воздуха. Низкая стоимость, миниатюрность, малое энергопотребление делают устройства на основе таких сенсоров пригодными для развертывания распределенных сетей датчиков, позволяющих проводить экологический мониторинг с высоким пространственно-временным соотношением. На сегодняшний день значительные исследовательские усилия направлены на совершенствование режимов работы сенсоров и методов математической обработки исходного сенсорного отклика для компенсации дрейфа базовой линии сенсоров и её колебания в ответ на изменения атмосферных условий, а также снижение кросс-чувствительности по отношению к нецелевым газам.

В докладе рассмотрены современные подходы к повышению метрологической ценности количественных измерений с помощью металлооксидных полупроводниковых газовых сенсоров в рамках трех стратегий – повышения стабильности свойств газочувствительного материала, применения алгоритмов машинного обучения и перекалибровки с применением внешнего стандарта, разработка алгоритмов периодической самокалибровки.

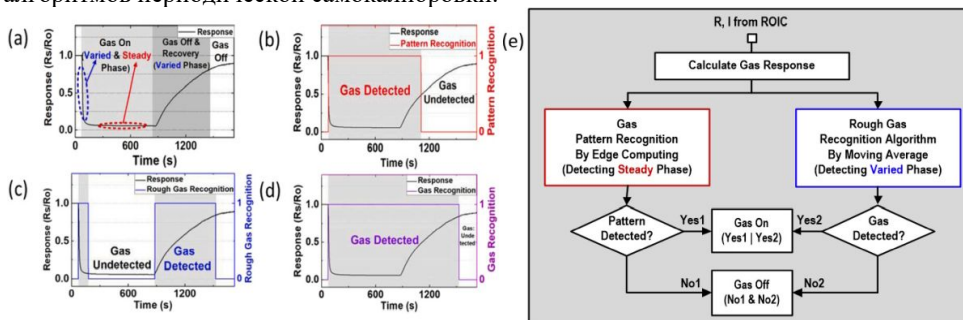


Рис. 1. (a)-(d) Принцип работы алгоритма по определению присутствия детектируемых газов в анализируемом воздухе, (e) логическая схема для запуска процедуры самокалибровки ¹.

Существенное внимание в современной литературе уделяется компромиссному подходу на основе машинного обучения с переносом, подразумевающим корректировку базовой калибровочной зависимости на основе нейросетевой модели для каждого нового устройства по небольшому набору калибровочных данных. Такой подход позволяет с одной стороны использовать преимущества универсального приёма калибровки с внешним стандартом и при этом сократить временные затраты на корректировку калибровочных зависимостей более чем на 90%.

Данная работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-19-00703).

¹ Kwon, Y.M. et al. *Sens Actuat B Chem* 2023, **375**, 132939.

Циклические Испытания Термомеханических Мышц, Восстановленных Различными Растворителями

И.В.Безсуднов^{1}, А.Г.Хмельницкая¹, К.А.Мухаммадиев², А.А.Калинина¹, С.А.Пономаренко¹*

¹ Институт синтетических полимерных материалов РАН

² Московский Государственный Университет, факультет ФФХИ

*e-mail: bezsudnov_iv@ispm.ru

Двухфазный композиционный материал, демонстрирующий при нагреве высокое объемное расширение и использующий для этого фазовый переход жидкость-газ был первоначально описан в¹. Для приготовления композита к компоненту(ам) силиконового компаунда добавляют этанол. При полимеризации расходуется компонент, в котором был растворен этанол, что приводит к его выделению в отдельную фазу в объеме композита и затем образованию сферических пор в силиконовой матрице, заполненных этанолом. Нагрев такого композита выше температуры кипения этанола (78.4°C) приводит к его испарению и, соответственно, к высокому объемному расширению пор и всего композита.

При нагреве этанол также диффундирует через силиконовую матрицу вовне композита, таким образом ограничивая возможность повторного использования композита. Была показана возможность восстановления функционирования композита – повторное наполнение этанолом композитаⁱⁱ, а также продемонстрирована возможность заполнения пор композита растворителем, отличным от этанола.

При циклических испытаниях количество циклов нагрева-охлаждения композита силикон-этанол составляет 4-5 циклов. Ниже представлены результаты циклических испытаний композита, восстановленного с помощью растворителей, отличных от этанола: изопропанола и бутанола, температуры кипения 80.2°C и 117.4°C, соответственно. Испытания проводились на приборе PARUS (ИСПИМ) в циклическом режиме при постоянной мощности нагрева 12 Вт.

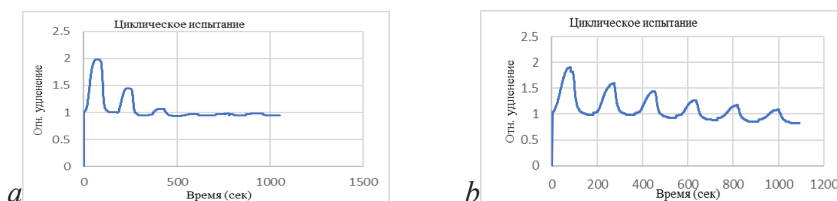


Рис. 1. Циклические испытания композитов *a)* силикон-изопропанол и *b)* силикон-бутанол при постоянной мощности нагрева 12 Вт.

Количество циклов для восстановленного изопропанолом композита Рис.1.а оказалось близко к композиту силикон-этанол, а композит силикон-бутанол Рис.1.б показал в два раза большее количество циклов работы, что, по-видимому, определяется тем, что более высококипящий растворитель имеет меньший коэффициент диффузии в матрице силикона, однако функционирование композита с бутанолом требует повышенных, по сравнению с этанолом или изопропанолом, температур.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-73-30028-П).

¹ A.Miriyev, K.Stack, H.Lipson, *Nat. Commun.* **8** (2017)

² A.Miriyev, C.Trujillo, G.Caires, H.Lipson, *MRS Commun.*, doi:10.1557/mrc.2018.30

Органические Солнечные Элементы и Фотодетекторы на Основе Звездообразных Донорно-Акцепторных Молекул с Бензотрииндольным Центром

А.Л. Маннанов^{1*}, Д.О. Балакирев¹, П.К. Сухорукова¹, А.К. Калиниченко^{1,2},
Д.Ю. Паращук^{1,2}, С.А. Пономаренко¹, Ю.Н. Лупоносов¹

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

²Физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова

*e-mail: artur.mannanov@ispm.ru

Поиск новых строительных блоков для π -сопряженных донорно-акцепторных молекул остается актуальной задачей при разработке перспективных материалов для органических солнечных элементов (ОСЭ) и фотодетекторов (ОФД), особенно в свете последних успехов в разработке нефуллереновых акцепторов для ОСЭ. Более того, глубокое понимание взаимосвязей структура молекулы-свойства материала-характеристики устройства для новых поколений донорных и акцепторных материалов имеет большое значение для дальнейшего прогресса в области ОСЭ и ОФД. В данной работе сообщается о синтезе серии звездообразных донорно-акцепторных молекул на основе донорного бензотрииндольного (БТИ) ядра, связанного через би- или терциофеновые π -спейсеры либо с гексилдициановинильными, либо с 2-этилгексилцианоацетатными акцепторными концевыми группами (Рис. 1). На основе данных молекул в смеси с хорошо известными нефуллереновыми акцепторами, такими как IDIC и Y6, были изготовлены и исследованы гетеропереходные ОСЭ¹. Сильное влияние молекулярной структуры донора на эффективность устройств было объяснено существенной разницей в морфологии активного слоя, что было успешно доказано с помощью метода сканирующей ближнепольной инфракрасной микроскопии. Кроме того, синтезированные молекулы на основе БТИ были опробованы в качестве материала активного слоя однокомпонентных селективных ОФД². Данные ОФД показали довольно высокие для данного класса материалов значения внешней квантовой эффективности (до 26%) и чувствительности (до 110 мА/Вт). Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал звездообразных донорно-акцепторных молекул на основе БТИ для органической фотовольтаики и других связанных с ней применений.

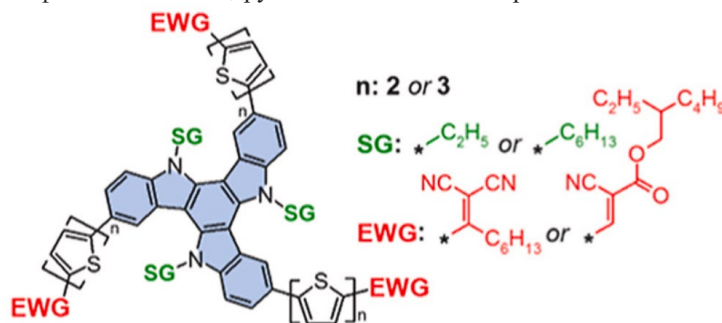


Рис. 1. Химические структуры звездообразных донорно-акцепторных молекул с бензотрииндольным центром.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-73-10198-П).

Авторы выражают благодарность Н.А. Емельянову и П.А. Трошину за проведение исследований методом сканирующей ближнепольной инфракрасной микроскопии.

¹ D.O. Balakirev et al. *Dyes and Pigments*. 2023, **216**, 111343.

² D.O. Balakirev et al. *Dyes and Pigments*. 2020, **181**, 108523.

Синтез и Свойства Новых Полимеров с Различными Электроноакцепторными Группами на Основе Трифениламина

И.А. Чуйко^{1}, Ю.Н. Луносов¹*

¹ Институт синтетических полимерных материалов имени Н.С. Ениколопова РАН

*e-mail: chuyko@ispm.ru

В настоящее время разработан широкий спектр органических дырочно-транспортных материалов на основе производных трифениламина (ТФА), являющихся важными компонентами устройств органической электроники и фотоники¹. Среди них особое внимание уделяется полимерам², поскольку по сравнению с низкомолекулярными соединениями полимеры на основе ТФА обладают лучшей термической стабильностью, хорошими пленкообразующими свойствами и улучшенной адгезией к подложке.

Эффективно регулировать оптоэлектронные свойства сопряженных полимеров можно за счет внутримолекулярного переноса заряда посредством донорно-акцепторных (Д-А) взаимодействий^{3,4}. Введение электроноакцепторных групп позволяет изменять область поглощения света, варьировать энергию уровней ВЗМО и НСМО, уменьшать ширину запрещенной зоны дырочно-транспортных материалов.

Известные сегодня примеры Д-А сополимеров на основе трифениламина, как правило, получают путем реакций кросс-сочетания с использованием дорогих катализаторов⁴. Получение сополимеров на основе ТФА наиболее простым способом синтеза, окислительной полимеризацией⁵, в литературе встречается довольно редко и является малоизученным процессом.

В этой работе методом окислительной полимеризации с FeCl₃ были получены Д-А сополимеры на основе ТФА. Исследованы молекулярно-массовые характеристики полимеров. Представлены результаты исследования их оптических, электрохимических и термических свойств, а также проведен сравнительный анализ свойств сополимеров с их ближайшими аналогами – гомополимерами.

¹ Farokhi A., Shahroosvand H., Monache G.D., Pilkington M., Nazeeruddin M.K. *Chem. Soc. Rev.* 2022, **51**, 5974-6064.

² Xie Y.-M., Yao Q., Xue Q., Zeng Z., Niu T., Zhou Y., Zhuo M.-P., Tsang S.-W., Yip H.-L., Cao Y. *Interdiscipl. Mater.* 2022, **1**, 281-293.

³ Luponosov Y.N., Solodukhin A.N., Chuyko I.A., Peregodova S.M., Ponomarenko S.A. *New J. Chem.* 2022, **46**, 12311.

⁴ Wenyuan W., Hongjin C., Gang Z., Rui Z., Jian L. *Chin. J. of Org. Chem.* 2020, **40** (8), 2513-2519.

⁵ Neo W. T., Ye Q., Chua M. H., Zhu Q., Xu J. *Macromol. Rapid Commun.* 2020, **41**, P. 2000156.

Синтез Новых Органических Полупроводниковых Материалов на Основе Аннелированных Олигомеров Донорно-Акцепторного Строения

Л.А. Полетавкина^{1}, И.В. Дядищев¹, Ю.Н. Луносов¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук

*e-mail: l.poletavkina@ispm.ru

Синтетические органические полупроводниковые материалы вызывают большой интерес как с научной, так и практической точек зрения; они активно разрабатываются и исследуются, открывая перспективы развития для многих современных областей науки и техники: органическая фотовольтаика, электроника, сенсорика и т.д.

При создании новых материалов крайне важно грамотно продумать структуру, поскольку от ней будут зависеть не только проводящие и электрохимические свойства будущих соединений, но и их растворимость, способность к определенным видам упаковки в кристалле, что крайне важно для процессов создания и работоспособности устройств на их основе.¹ Отдельный интерес, в этом смысле, представляют соединения, имеющие донорно-акцепторную структуру (Д-А), из-за возможности контролировать в широком диапазоне молекулярные энергетические уровни, добываясь нужных параметров проводимости. Это возможно благодаря варьированию различных по природе и силе донорных и акцепторных единиц в структуре соединения и их пространственного расположения в молекуле. При грамотной настройке, соединения с Д-А структурой обладают амбиполярным транспортом, что может позволить использовать их не только в органических полевых транзисторах, но в сенсорах и лазерах, а также однокомпонентных солнечных батареях.²

Органические молекулы, состоящие из конденсированных гетероароматических звеньев, особо выделяются в растущей базе органических проводящих соединений. Жесткая конденсированная структура таких соединений обеспечивает π -сопряжение с хорошей проводимостью, высокую устойчивость к окислению и плотную молекулярную упаковку.³

Работа заключается в синтезе новых олигомеров на основе донорных сопряженных аннелированных центральных звеньев с различными концевыми и акцепторными группами, обладающих полупроводниковыми свойствами. Будут представлены: схемы синтеза; результаты исследований электрохимических, оптических и термических свойств, фазового поведения веществ. Планируется выявить отдельные взаимосвязи между структурой и свойствами соединений, а также оценить перспективы применения полученных веществ в различных областях органической электроники.

Данная работы выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-73-10198-П).

¹ Bronstein H., Nielsen C.B. et. al. *Nature Reviews Chemistry*. 2020, **4**, 66-77.

² Toshiki H., Takehiko M. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022, **24**, 9770-9806.

³ Zhang W., Liu Y., Yu G. *Advanced Materials*. 2014, **26**, 6898-6904.

Оптимизация Прогноза по Заболеванию Астмой на Основе Измерений Состава Выдыхаемого Воздуха

*В.Д. Пойманов¹, Е.Ю. Пойманова¹, А.Г. Хмельницкая¹, А.А. Абрамов¹, А.А. Труль¹,
Е.В. Агина¹*

¹Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

Выявление корреляций между признаками заболеваемости на первом этапе исследования носит характер гипотезы, так как полагается в основном на интуицию и в дальнейшем должно быть подтверждено или опровергнуто экспериментально. Вместе с тем, рассеяние количественных данных может быть обусловлено не только различием самих признаков, но и влиянием случайных воздействий, а также качеством постановки самого эксперимента и соответствия его для исследования конкретного заболевания.

Обработка результатов измерений предваряет интерпретацию явления, изучаемого в эксперименте. Выбор правильной методики анализа и дискриминации данных не является универсальным и зачастую зависит от формы облака рассеяния точек, оцениваемой визуально.

В настоящем исследовании проводится сравнительный анализ прогноза по астме на основе обработки данных выдохов пациентов с восьми сенсоров тремя методами – линейный дискриминантный анализ (ЛДА), многомерный разведочный дискриминантный анализ (ДА) и первый метод в комбинации с методом главных компонент (ЛДА+МГК). Первый из них реализуется с помощью Excel, второй и третий – с помощью пакета Statistica 10.

Метод ЛДА строится на количественном критерии сравнения значений дискриминантной функции для каждого измерения с ее средним по выборке значением. Последняя строится с использованием линейного регрессионного анализа и потому может быть легко вычислена с помощью инструментов Excel.

Основой второго (ДА) является соответствие распределений признаков нормальным распределениям. Исходя из этого, программа Statistica 10 может рассчитать количественно степень разнесенности признаков по каждому сенсору. После чего производится оценка вероятности отнесения данных к тому или иному признаку.

Третий метод заключается в предварительной обработке исходных данных методом главных компонент. Это позволяет сократить количество данных для анализа методом ЛДА, оставив только те линейные комбинации, которые имеют наибольшую дисперсию и, тем самым, лучше разделяются.

Результат анализа по выборке данных восьми сенсоров группы из 131 пациента показал примерное равенство качества прогноза. Наилучшая из методик (ЛДА+МГК) дает примерно 92.5 % достоверности.

Стендовые доклады

Получение и Исследование Структуры Полимеров для Создания Перерабатываемых Мембран с Оптимизированной Протонной Проводимостью

Д.В. Анохин^{1,2}, А.В. Марясевская^{1,2}, А.И. Буглаков¹, Б.Амедюри^{1,3}*

¹Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Химический факультет

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН

³ Institute Charles Gerhardt, UMR 5253, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier (France)
*e-mail: deniano@yahoo.com

Коммерческие протонообменные мембраны, как правило, изготавливаются из перфторированных полимеров, содержащих в качестве протон-проводящих функциональных элементов сульфокислотные боковые группы.¹ Эталоном таких коммерческих фторированных мембран является Nafion, сополимер тетрафторэтилена и перфтор(ω -сульфонил алкил винилового эфира), который демонстрирует высокую химическую стойкость и хорошую протонную проводимость за счет формирования доменов, насыщенных сульфоновыми группами и содержащих водные каналы. Дальнейшее улучшение характеристик данных мембран ограничено нерегулярностью строения сетки водных каналов, что приводит к резкому влиянию содержания воды и температуры на протонную проводимость.

Целью работы является разработка нового класса экономически эффективных фторированных протонообменных мембран, содержащих элементы, обеспечивающие самоорганизацию полимеров для формирования регулярной перколированной сетки каналов на этапе изготовления мембраны. Замена основной цепи с политетрафторэтилена на поливинилиденфторид позволит обеспечить экологичность и перерабатываемость подобных полимеров.²

В данном докладе описаны синтез и самоорганизация стержнеобразных фторированных мезогенов октафтор-5-йодо-3-оксапентансульфоновой кислоты, которые являются прекурсорами для получения самоорганизующихся полимерных иономеров. Показано формирование структуры данных соединений и установлены зависимости процессов самоорганизации от термической предыстории. Экспериментальные результаты по формированию кристаллической фазы были подтверждены компьютерным моделированием с использованием подходов молекулярной механики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2022-1117 от 30 июня 2022 г.).

¹ J. R. Werber et al. *Nat. Rev. Mater.* 2016, **1**.

² B.Ameduri *Journal of Fluorine Chemistry* 2023, **267**,110117.

Синтез и Свойства Новых Сопряженных Донорно-Акцепторных Олиготиофенов Звездообразного Строения

П.П. Евдокимов^{1,2}, Д.О. Балакирев¹, С.А. Пономаренко¹, Ю.Н. Лупоносов¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет фундаментальной физико-химической инженерии, Москва, Россия

*e-mail: pasharus1@mail.ru

Часто высокоэффективные перовскитные солнечные элементы включают в свою структуру дырочно-транспортный слой, состоящий из spiro-OMeTAD или РТАА, однако данные материалы характеризуются низкой подвижностью носителей заряда, что приводит к необходимости введения различных допантов для повышения дырочной проводимости. Введение допантов в ряде случаев приводит к понижению стабильности итогового устройства. По этой причине острой проблемой является разработка новых нелегированных дырочно-транспортных материалов для создания высокоэффективных и долговечных перовскитных солнечных батарей.¹

Органические сопряжённые системы донорно-акцепторного типа являются одним из наиболее перспективных типов разрабатываемых материалов, которые могут применяться в качестве нелегированных дырочно-транспортных слоев благодаря своей высокой подвижности носителей заряда. Более того варьирование электронодонорного и электроноакцепторного фрагментов, а также π -сопряжённого спейсера, позволяет добиваться более тонкой настройки итоговых свойств данной системы.²

В ходе данной работы был проведен синтез новых сопряженных донорно-акцепторных олиготиофенов звездообразного строения с различными донорными и акцепторными фрагментами при неизменной длине π -сопряжённого спейсера. Все промежуточные соединения и конечные молекулы были выделены в индивидуальном состоянии и охарактеризованы методами гелипроникающей хроматографии и ¹H и ¹³C ЯМР-спектроскопии. Полученные олиготиофены звездообразного строения продемонстрировали высокую дырочную проводимость, что делает их перспективными дырочно-транспортными материалами для перовскитных солнечных батарей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-3843.2022.1.3

¹ Latypova A. F. et al. *ACS Applied Energy Materials.*, 2022, **5(5)**, 5395-5403.

² Meier, H. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2005, **44**, 2482 – 2506.

Синтез и Свойства Симметричных Сопряженных Соединений на Основе Трифениламина с Различными Центральными Фрагментами

Ю.А. Исаева^{1,2}, Ю.Н. Луносов²*

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
факультет фундаментальной физико-химической инженерии

²Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: ulia_isaeva1999@mail.ru

Сопряженные соединения на основе трифениламина (ТФА) – одни из наиболее перспективных и изученных классов соединений, используемых в различных областях органической электроники, благодаря высокой подвижности носителей заряда, электронной фото- и дырочной проводимости и эффективному поглощению в УФ, видимой и инфракрасной области спектра. Комбинация различных центральных блоков для молекулярного дизайна сопряжённых молекул на основе ТФА может быть эффективным инструментом для создания материалов, излучающих свет в определённых диапазонах спектра, что определяет широкую область их применения. Производные ТФА используются в качестве люминесцентных материалов, компонентов органических светоизлучающих диодов,¹ дырочно-транспортных материалов в перовскитных солнечных батареях.² Помимо этого, в последнее время сообщается, что производные ТФА с поглощением в красном и ближнем ИК-спектральном диапазоне могут быть использованы в фотодинамическом лечении и диагностике онкологических заболеваний.³ Область применения ТФА-содержащих молекул в медицине в качестве противоопухолевых агентов для лечения рака является относительно новой, поэтому получение и исследование свойств новых сопряженных структур на основе ТФА представляет большой научный и социально-значимый интерес.

В ходе данной работы были синтезированы новые симметричные сопряженные соединения на основе ТФА типа донор-акцептор-донор (Д-А-Д) с различными центральными фрагментами. Высокая чистота и заданная структура всех полученных соединений была доказана комплексом современных физико-химических методов анализа. Исследовано влияние природы центрального фрагмента на оптические и электрохимические свойства, фазовое поведение и термостабильность полученных соединений, а также цитотоксичность полученных соединений на свету и в темноте. Показано, что ряд соединений обладает высоким квантовым выходом фотолюминесценции, подходящими уровнями ВЗМО для транспорта дырок и перспективным набором свойств для фотодинамической терапии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-3843.2022.1.3

¹ Justin Thomas K. R., Lin J., et al. *Adv. Funct. Mater.*, 2004., **14**, 83–90

² Paek S., Qin P., Lee Y., et al. *Adv Mater.*, 2017, **29**, 1606555.

³ Wang D., Michelle M. S. Lee, et. al. *A Journal of the Gesellschaft Deutscher Chemiker*. 2019, **58**, 5628-5632.

Влияние Интерфейсного Диэлектрика на Электрические и Сенсорные Свойства Органических Полевых Транзисторов на Основе Бензотиенобензотиофена

Д.А. Красников^{1,2}, А.А. Труль¹, В.П. Гайдаржи¹, А.А. Абрамов¹, М.С. Скоротецкий¹,
Е.В. Агина¹, С.А. Пономаренко^{1,2}*

¹ Институт Синтетических Полимерных Материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

² Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

*e- mail: trul@ispm.ru

В последние годы проводятся многочисленные исследования в области газовых сенсоров и ведется активная разработка устройств для контроля состава газовых смесей в режиме реального времени.¹ Такие устройства (часто объединяемые в массив, известный под названием «электронный нос»²) могут использоваться для распознавания различных компонент в воздушной среде, что поможет детектировать опасные для здоровья вещества, выявлять наличие болезней или отслеживать качество пищевой продукции при хранении и производстве. Сейчас газовые сенсоры на основе органических полевых транзисторов (также известных как ОПТ или OFET) являются одним из наиболее перспективных вариантов для разработки устройств мониторинга газовых смесей.

Целью данной работы являлось исследование электрических и газовых свойств ОПТ с различным материалом интерфейсного диэлектрика, при одинаковых условиях напыления слоя полупроводника, чтобы обеспечить схожесть морфологии поверхности устройств. В качестве исследуемых устройств были выбраны ОПТ на основе диоктил производных бензотиенобензотиофена (ВТВТ), благодаря их высоким электрическим характеристикам. В качестве интерфейсных диэлектриков использовали слои полиметилметакрилата, полистирола, СУТОР и октил-диметил-хлорсилана.

Было установлено, что химическая структура интерфейсного диэлектрика оказывает слабое влияние на электрические свойства, в тоже время сильно влияние на сенсорные свойства ОПТ (Рисунок 1).

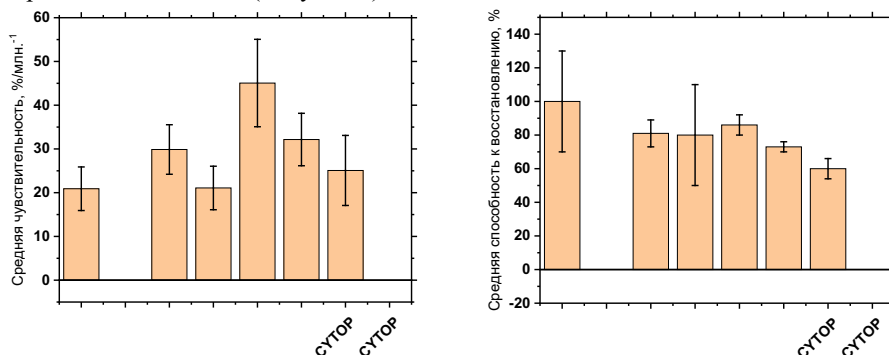


Рисунок 1. Сравнение чувствительности и способности к восстановлению после детектирования NO₂ для изученных ОПТ.

Наилучшие сенсорные характеристики демонстрируют ОПТ с интерфейсным слоем на основе ПС, которые продемонстрировали высокую чувствительность к диоксиду азота, высокую восстановительную способность и высокую воспроизводимость свойств.

¹ M.S. Polinskaya, A.A. Trul et al., *J. Mater. Chem. C*, 2022, **11(5)**, 1937.

² D.S. Anisimov, V.P. Chekusova et al., *Sci Rep*, 2021, **11**, 10683.

Проводящие Эластомерные Композиты на Основе Силоксанов и Углеродных Наночастиц

Д.Я. Кубинская^{1}, А.Г. Хмельницкая², А.А. Калинина²*

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

*e-mail:daryana.kubinskaya@googlemail.com

С развитием мягкой робототехники и медицинских технологий возрастает потребность в новых типах устройств, таких как сенсоры, датчики и приводы. К подобным устройствам предъявляется ряд требований: они должны быть гибкими и прочными, обладать малым весом и размерами. Существует несколько механизмов действия подобных устройств,¹ но особенный интерес представляют гибкие электроды на основе диэлектрических эластомеров. Один из простых методов создания устройств на основе диэлектрических эластомеров – введение в полимерную матрицу проводящих частиц, металлов или углерода в различных аллотропных модификациях. Устройства на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) и углеродных нанотрубок (УНТ) наиболее перспективны в качестве датчиков движения² и давления, искусственных мышц.³

При введении углеродных наполнителей в полимерную матрицу необходимо учитывать склонность наполнителей, например, нанотрубок к агрегации из-за высокой поверхностной энергии, что накладывает ограничения на выбор метода получения подобных материалов. Существует несколько методов получения композитов из ПДМС и УНТ, среди которых особый интерес представляют методы spray coating (напыление) и метод drop casting (полив). Преимуществами методов являются простота реализации и относительная дешевизна оборудования, что отличает их от прочих методов получения проводящих материалов.

Целью данной работы было получение проводящих эластомерных композитов на основе ПДМС и МУНТ методом spray coating и методом drop casting, а также исследование их механических и электрических свойств.

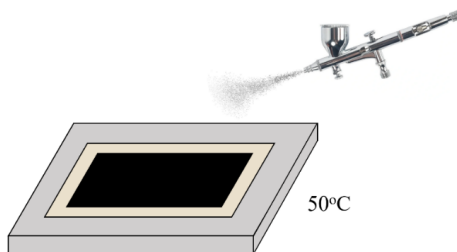


Рис.1. Схема получения композита методом spray coating.³

В докладе будут представлены результаты исследования механических и проводящих свойств, влияние состава и способа получения композитов на свойства материала.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-73-30028-П).

¹ Seyed M. Mirvakili, Ian W. Hunter. Adv. Mater. 2018, **30**(6), 1704407.

² Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y. et al. Nat. Nanotech. 2011, **6**, 296-301.

³ Dong Kyun Seo et al. Nanotechnology. 2012, **23**, 075501.

Гибридный Сенсор на Основе Нового Органического Полупроводникового Материала

Б.С.Кулешов¹, Е.Ю. Пойманова¹, М.С. Скоротецкий¹, Е.В. Агина¹*

¹Институт синтетических полимерных материалов РАН

*e-mail: b.kuleshov@ispm.ru

Ионы щелочных металлов, в частности натрия и калия, жизненно важны для существования практически всех живых организмов. Калийно-натриевый баланс является важным показателем здоровья человека, поскольку на его основе функционируют многие жизненно важные механизмы, в частности клеточные ионные каналы. Устройства, способные в режиме реального времени контролировать концентрацию этих катионов в водных средах, востребованы не только для использования в медицине, но и для использования в аналитической химии. Новые технологии, основанные на органических полупроводниковых материалах, могут иметь большие перспективы для применения в этом направлении. Сочетание полупроводниковых свойств сопряженной молекулы и высоких констант связывания краун-эфиров приводит к новой области применения класса краун-эфирных молекул в качестве основы для датчиков щелочных металлов на основе органических полевых транзисторов с электролитическим затвором (ОПТЭЗ). Предлагаемый подход к получению рецепторного слоя обеспечивает возможность создания универсальной платформы для дальнейшего распознавания ионов за счет использования краун-эфирных структур, которые могут связываться с поддерживающим слоем без существенного ухудшения электрических свойств ОПТЭЗ устройств.

Данная работа направлена на дизайн и синтез гибридного соединения, содержащего в своем составе сопряженный фрагмент бензотиено[3,2-*b*]бензотиофена (ВТВТ), обеспечивающий транспорт зарядов и сокристаллизацию с органическим полупроводником, и фрагмент краун-эфира 1,7,10,16-тетраокса-4,13-диазациклооктадекана, выполняющего роль рецепторного якоря для улавливания ионов из раствора аналита. Была разработана методика изготовления ОПТЭЗ с рецепторным слоем на основе краун-эфира, которая основана на методе Ленгмюра-Шеффера, позволяющем ориентировать молекулы синтезированного гибридного вещества на поверхности активного слоя для обеспечения чувствительности устройства ОПТЭЗ.

Было показано, что концентрация синтезированного гибридного вещества в рецепторном слое может достигать 50%. Устройства ОПТЭЗ с распознающим слоем, описанные в данной работе, демонстрируют хорошие электрические характеристики в растворах электролитов с высокой ионной силой, обеспечивая возможность обнаружения ионов в образцах реальной биологической жидкости. Представлено доказательство концепции сенсорного отклика ОПТЭЗ, функционализированного рецепторным слоем, на ионы калия.

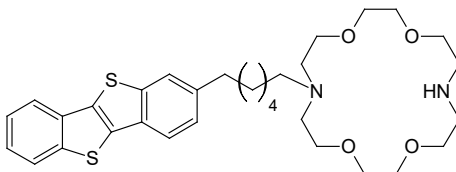


Рисунок 1. Структурная формула синтезированного гибридного вещества на основе краун-эфира.

Influence of Field-Dependent Photogeneration on Spatial Resolution of Ambipolar Organic Field-Effect Phototransistors

V.A. Trukhanov^{1,2*}

¹Moscow State University, Faculty of Physics

²Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials RAS

*e-mail: trukhanov@physics.msu.ru

Ambipolar organic field-effect phototransistors (Fig. 1a) can exhibit a spatially localized photoelectric effect. The electron-hole recombination zone in channel of such transistors acts as a photosensitive region where the maximum electric field is achieved so that the photogenerated electron-hole pairs are efficiently separated. The position of the recombination zone in the channel can be controlled by the gate voltage, V_G . The typical width of this zone is in the range of 15-200 nm.¹ The ability to control the spatial position of the recombination zone is promising for development of new devices, such as optical image scanners with high spatial resolution², which can find applications in robotics and machine vision. Using numerical modeling, it was shown that the normalized photocurrent J_{ph}/J_{dark} dependences on V_G can reproduce the spatial profiles of incident light intensity across the phototransistor channel, after transformation of the V_G -scale to x -scale in accordance with the position dependence of the electric field peak, x_{peak} , on V_G .ⁱⁱⁱ

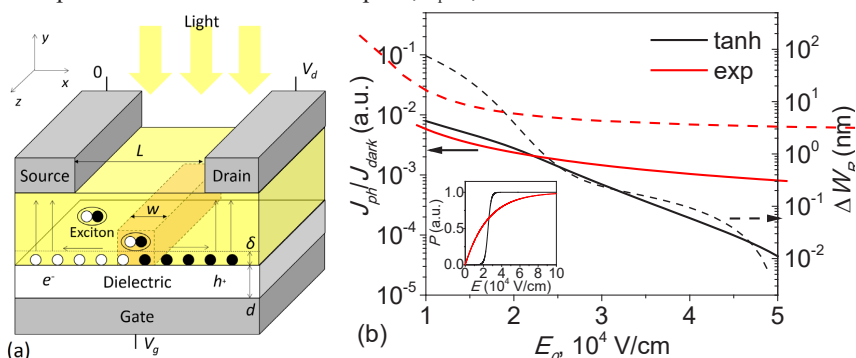


Fig. 1. Organic phototransistor scheme (a), dependences of the normalized photocurrent J_{ph}/J_{dark} (solid lines, scale on the left) and the parameter ΔW_R characterizing the spatial resolution (dashed lines, scale on the right), on the parameter E_0 for stepwise and exponential forms $P(E)$ (inset) (b)

In this work, using drift-diffusion numerical model it was shown that the phototransistor performance with spatially localized photoelectric effect largely depends on the form of the e/h-pair dissociation probability P dependence on the electric field E ; two different forms of such $P(E)$ dependences were studied: stepwise (tanh) and exponential (Fig. 1b). Stepwise form of $P(E)$ turns out to be optimal for obtaining a high spatial resolution and a normalized photocurrent. The exponential form of the field dependence can provide high photocurrent values at moderate spatial resolution. The results obtained in this work can contribute to the development of new organic semiconductor materials for new optoelectronic devices.

This work was supported by RSF (project № 22-79-10122).

¹ M. Kemerink et al., *Appl. Phys. Lett.* 2008, **93**, 033312.

² V.A. Trukhanov, *JETP Lett.* 2019, **109**, 776.

²ⁱ V.A. Trukhanov, *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2020, **75**, 342.

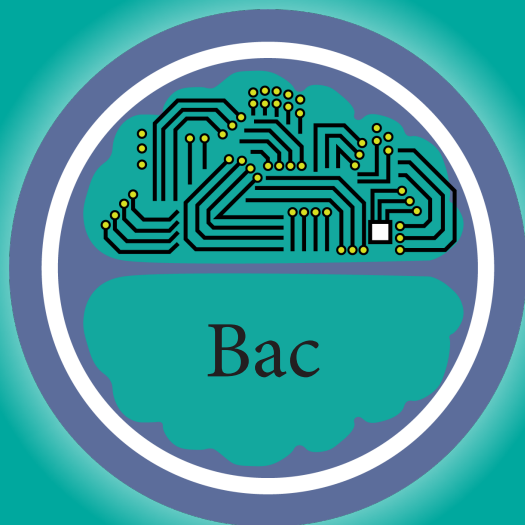
Авторский указатель

	А		Красников, Д.А.	52
Абрамов, А.А.	13 32 34 38 47		Кретова, Е.А.	31 35
	52		Кривецкий, В.В.	42
Агина, Е.В.	13 24 26 31 32		Крылов, В.В.	31 37
	34 35 36 37 38		Кубинская, Д.Я.	53
	47 52		Кукушкин, В.И.	14
Амедюри, Б.	49 54		Кулешов, Б.С.	54
Анисимов, Д.С.	31		Кулишов, А.А.	30
Анохин, Д.В.	49			Л
Асеев, А.Н.	16		Левков, Л.Л.	40
			Литвинов, А.Е.	20
	Б		Лупоносов, Ю.Н.	15 16 25 44 45
Балабан, П.М.	16			46 50 51
Балакирев, Д.О.	44 50		Лясникова, М.С.	30
Безсуднов, И.В.	25 43			М
Борисова, Д.М.	23		Маннанов, А.Л.	44
Борщев, О.В.	27 28 30 32 33		Марясевская, А.В.	49
	38 39 40 41		Музафаров, А.М.	10 22 23
Бочарова, А.А.	39		Мухаммадиев, К.А.	43
Буглаков, А.И.	49			Н
			Никитина, Е.А.	18
	Г			О
Гайдаржи, В.П.	26 32 38 52		Оленич, Е.А.	11
Гайков, Д.К.	39			П
Гончарук, Г.П.	40		Паращук, Д.Ю.	44
Городов, В.В.	11		Пойманов, В.Д.	13 47
			Пойманова, Е.Ю.	13 24 31 35 36
	Д			37 47 54
Дядищев, И.В.	46		Полетавкина, Л.А.	46
			Полинская, М.С.	33 38
	Е		Пономаренко, С.А.	12 16 22 24 25
Евдокимов, П.П.	50			26 27 28 31 32
				33 35 36 38 40
	З		Попова, В.В.	41 43 44 50 52
Заборин, Е.А.	41		Постников, В.А.	28
Завьялова, Е.Г.	14 31			30
				С
	И		Свидченко, Е.А.	28
Иванов, Д.А.	18		Седуш, Н.Г.	19
Исаева, Ю.А.	51		Скоротецкий, М.С.	28 30 31 32 33
				35 38 41 52 54
	К		Солодухин, А.Н.	16
Калинина, А.А.	22 23 43 53		Сорокин, Т.А.	30
Калиниченко, А.К.	44			
Караман, П.Н.	31 37			
Клеймюк, Е.А.	25			
Колотова, Д.Е.	16			
Костров, С.А.	11			
Крамаренко, Е.Ю.	11			

Сорокина, Е.А.	27 30 35		
Сосорев, А.Ю.	17		
Сурин, Н.М.	28 40 41		
Сухорукова, П.К.	44		
		Т	
Титова, Я.О.	24		
Тоиров, С.Х.	32 38		
Труль, А.А.	13 24 26 31 32 36 38 47 52		
		Х	
Хмельницкая, А.Г.	22 43 47 53		
		Ч	
Чуйко, И.А.	45		
		Ш	
Шапошник, П.А.	31 35 36		
Шевченко, В.Г.	25		
Шейко, С.С.	18		
		Ю	
Юрасик, Г.А.	30		
			А
			Agina, E. 29
		В	
			Bezsudnov, I. 29
		Г	
			Ghazaryan, G. 29
		К	
			Kalinina, A. 29
			Khmelnitskaia, A. 29
		Р	
			Ponomarenko, S. 29
		Т	
			Trukhanov, V.A. 29
		В	
			Vatankhah- Varnosfaderani, M. 18

RSF

Russian
Science
Foundation



PRINTELTECH

PRINTED ELECTRONICS TECHNOLOGIES



ООО Технологии Печатной Электроники
117393 Москва, Российская Федерация
ул. Профсоюзная 70с1, оф. 410

☎ Phone: +7 (495) 332-58-40

🌐 <http://www.printeltech.com>

✉ sales@printeltech.com