

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук Федоренко Романа Сергеевича  
на тему: «Рост, электрофизические и электролюминесцентные свойства  
двумерных пленок сопряженных олигомеров»  
по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния**

Диссертационная работа Федоренко Р.С. посвящена актуальным вопросам органической электроники — одной из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных областей современной физики конденсированного состояния. Особый интерес вызывают органические полевые транзисторы (ОПТ) и органические светотранзисторы (ОСТ), которые открывают возможности для создания гибких, прозрачных и недорогих оптоэлектронных устройств. Однако ключевая проблема в этой области – сочетание высокой подвижности носителей заряда и эффективной электролюминесценции в одном материале – до сих пор не имеет универсального решения. Диссертация Федоренко Р.С. посвящена систематическому исследованию двумерных кристаллических пленок на основе тиофен-фениленовых соолигомеров (ТФСО) с различной степенью аннелирования и донорно-акцепторными свойствами. Тематика работы, несомненно, актуальна, поскольку направлена на установление связей между молекулярной структурой, морфологией пленок и функциональными характеристиками устройств, что необходимо для целенаправленного дизайна новых полупроводниковых материалов.

### **Структура и содержание работы**

Во *Введении* обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены защищаемые положения.

*Глава 1* представляет собой обзор литературы, в котором рассмотрены принципы работы ОПТ и ОСТ, архитектуры устройств, методы роста

двумерных пленок. Обзор написан грамотно, критично и показывает хорошее понимание автором современного состояния проблемы.

*Глава 2* посвящена экспериментальным методам: методикам роста двумерных пленок, методам оптической и атомно-силовой микроскопии, жидкофазному нанесению электродов через микроплоттер и вакуумному напылению, а также схемам электрических измерений.

*Глава 3* – исследование линейно-сопряженных олигомеров. Показана возможность роста монослойных и малослойных пленок с латеральными размерами до 1 мм, их монокристалличность. Подвижности дырок составили 0,1–0,3 см<sup>2</sup>/(В·с). Впервые для данных соединений продемонстрированы ОСТ с электролюминесценцией на электроде.

*Глава 4* посвящена частично аннелированным олигомерам. Ключевой результат – рекордная подвижность дырок 7,5 см<sup>2</sup>/(В·с) для малослойных пленок DD-P-BTBT, что существенно выше значений для аморфного кремния и впервые показано для двумерных пленок такого типа. Для DN-P-TTA достигнут биполярный транспорт.

*Глава 5* – исследование донорно-акцепторных ТФСО с терминальными цианогруппами. Показано, что фторирование центрального фенильного кольца переключает тип проводимости с дырочного/биполярного на электронный. Впервые получены двумерные ОСТ с красной электролюминесценцией (максимумы 630–645 нм) и внешней квантовой эффективностью до 0,1%.

В *Заключении* сформулированы основные результаты и выводы.

### **Научная новизна и практическая значимость**

К наиболее значимым новым результатам, полученным в диссертации, можно отнести:

1. **Разработку методик роста двумерных кристаллических пленок** для широкого набора ТФСО (линейно-сопряженных, аннелированных, донорно-акцепторных) с контролируемой толщиной от монослоя до нескольких десятков слоев и латеральными размерами монокристаллических доменов до сотен микрометров и более. Это существенно расширяет технологическую базу органической электроники.
2. **Достижение рекордной для двумерных пленок подвижности дырок  $7,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$**  на основе частично аннелированного олигомера DD-P-VTVT (малослойные пленки). Это один из лучших показателей для растворных органических полупроводников и открывает перспективы использования таких материалов в высокочастотных устройствах.
3. **Установление влияния фторирования центрального фенильного кольца** в донорно-акцепторных олигомерах на тип проводимости: фторированные аналоги становятся электронными, а нефторированные – дырочными или биполярными. Этот результат имеет важное значение для проектирования n-типа органических полупроводников.
4. **Первую демонстрацию красной электролюминесценции в двумерных ОСТ** на основе донорно-акцепторных ТФСО с внешней квантовой эффективностью 0,1%, что является высоким показателем для однокомпонентных светоизлучающих транзисторов.
5. **Показанную высокую стабильность** транзисторов на основе DD-5T и DD-P-VTVT при хранении на воздухе в течение нескольких месяцев, что важно для практического применения.

Практическая значимость заключается в том, что разработанные методики роста и изготовления устройств могут быть адаптированы для массового производства. Полученные зависимости «структура–свойства»

позволяют целенаправленно выбирать молекулярную архитектуру для требуемого типа проводимости и цвета излучения.

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Экспериментальные данные получены на современном оборудовании (атомно-силовая микроскопия, оптическая микроскопия с C-DIC, прецизионные электрические измерения). Статистическая обработка результатов для серий устройств свидетельствует о хорошей воспроизводимости. Полученные результаты опубликованы в 9 статьях в ведущих рецензируемых журналах (ACS Applied Materials & Interfaces, Advanced Electronic Materials, Materials Chemistry Frontiers, Dyes and Pigments и др.), что подтверждает их высокий уровень. Данные не противоречат известным работам других групп, а логично их дополняют и развивают. Защищаемые положения четко сформулированы и экспериментально обоснованы.

### **Замечания по работе**

При общей положительной оценке диссертации можно высказать следующие замечания и вопросы:

1. В Главе 4 для DD-P-BTBT наблюдается сильная зависимость подвижности от толщины пленки: монослой дает  $\sim 0,7-0,9 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , малослойный – до  $7,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . В работе это связывается с различной ориентацией молекул. Желательно видеть более детальное структурное объяснение (например, данные рентгеновской дифракции или теоретические расчеты упаковки). К этому же вопросу: почему столь драматическое различие не проявляется в других изученных олигомерах?
2. Для ОСТ на основе донорно-акцепторных олигомеров в Главе 5 достигнута внешняя квантовая эффективность 0,1%. Это хороший результат, но в тексте хотелось бы видеть более подробное обсуждение

– какие потери доминируют (баланс инжекции, тушение экситонов на электродах, волноводные потери) и как можно повысить эффективность в дальнейшем.

3. В этой же Главе 5 желательно было оценить уровень яркости, который демонстрируют разработанные ОСТ.
4. В работе был использован метод плоттерной микропечати для нанесения электродов из ПЭДОТ:ПСС (Глава 4). Насколько этот метод воспроизводим при создании серий устройств с длиной канала менее 10 мкм? Возникают ли проблемы, связанные с растеканием капли на гидрофобной поверхности органической пленки?
5. В разделе 4.2 Главы 4 для описания ВАХ ОПТ на основе пленок DD-P-VTVT и DN-P-TTA применена модель Шокли. Автору следовало обсудить подробнее соответствие эксперимента условиям модели.
6. На стр. 6 присутствует термин «нижняя занятая молекулярная орбиталь (НЗМО)». Если здесь не опечатка, то следовало пояснить положение НЗМО относительно НСМО и ВЗМО.
7. На стр. 92 упомянут рисунок 23, который отсутствует в работе.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени

доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Федоренко Роман Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник лаборатории электронных и фотонных процессов в полимерных наноматериалах  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук

Тамеев Алексей Раисович

5 мая 2026 г.

Контактные данные:

тел.: 8 495 955 4032; e-mail: [tameev@elchem.ac.ru](mailto:tameev@elchem.ac.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 02.00.04 — физическая химия

Адрес места работы:

119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4

ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), лаборатория электронных и фотонных процессов в полимерных наноматериалах

Тел.: 8 495 955 4601; e-mail: [dir@phyche.ac.ru](mailto:dir@phyche.ac.ru)

Подпись сотрудника ИФХЭ РАН А.Р. Тамеева удостоверяю.

Заместитель директора ИФХЭ РАН,

д.ф.-м.н.

5 мая 2026 г.

О.В. Батищев