



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор университета,  
доктор технических наук,

С.Г. Емельянов  
2022г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования Юго-Западного государственного университета на диссертационную работу Рахматова Бадурдина Амируллоевича «Разработка «внешней» компактной модели органического полевого транзистора с учётом дифференциальной проводимости», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Рахматова Бадурдина Амируллоевича посвящена разработку компактных моделей органических полевых транзисторов и обобщение улучшенной компактной модели органического полевого транзистора (ОПТ) путем учета сопротивлений стока и истока не только в линейном, но и в режиме насыщения.

В настоящее время в мире все более нарастает как научный, так и прикладной интерес к развитию органической и печатной электроники, которая постепенно начинает отыгрывать рубежи у классической неорганической (твердотельной) электроники, в том числе, благодаря 3D печати, появляются серийные производства новых изделий и прототипы гибких и лёгких, тонких и недорогих органических электронных устройств. Фактически, несмотря на сравнительно недавнее становление и развитие органическая полупроводниковая электроника, стремительно раздвигает границы применения, что в значительной степени обусловлено доступностью и низкой стоимостью технологий ее создания, в части касающейся, как базовых элементов, так и производства приборов и большеразмерных безальтернативных устройств на их основе. Уже стали обиходными изделия из органической электроники в виде солнечных батарей, светодиодов и органических полевых транзисторов (ОПТ), как базового полупроводникового элемента нового поколения.

Вместе с тем органическим полупроводниковым элементам свойственны целый ряд недостатков физической природы, ограничивающих их применимость. Основной из них низкая подвижность (в несколько десятков  $\text{см}^2/(\text{В}\times\text{с})$ , что обусловлено зачастую с одновременным действием сразу нескольких механизмов электронного транспорта, включая термоэмиссионные поля, прямое туннелирование и туннелирование Фаулера-

Нордгейма, а также диффузию, допиравших органическую матрицу, металлов. Такое многообразие вызвано особенностью электронной структуры присущей углеродным соединениям, с характерной для них гибридизацией атомных орбиталей  $sp^2 p_z$  с образованием  $\sigma$  и  $\pi$  – связей. Три  $\sigma$  связанных электрона сильно локализованы в одной плоскости, и только перпендикулярно ориентированные к этой плоскости с более слабой  $\pi$  связью электроны определяют проводимость. Это все подчеркивает важность и актуальность модельного подхода к анализу дифференциальных подвижностей реализуемых в органическом полупроводниковом транзисторе (ОПТ), развивающегося в представленной диссертационной работе.

Предложенная автором модель была построена на основе известной компактной модели длинноканального МОП-транзистора MOSFET Level 1 и действует на линейном участке дифференциальной подвижности с учетом надпорогового тока стока, что позволило корректно описать выходную проводимость в режиме насыщения и ее последующее монотонное убывание до минимального значения. Для анализа работы ОПТ с  $p$ -каналом использована эквивалентная схема его замещения в виде четырехполюсника в режиме как малых напряжений, так и при насыщении. На этой основе автором получены аппроксимирующие сглаживающие функциональные зависимости дифференциальной проводимости на всех рассмотренных режимах работы ОПТ, которые верифицированы численными методами. По результатам компактного моделирования ОПТ в работе была построена сглаживающая функция, позволившая описать монотонное уменьшение выходной проводимости от максимального значения в линейном режиме, до минимального значения в режиме насыщения, что существенно дополняет область фундаментальных основ схемотехники.

Структурно диссертационная работа Рахматова Бадурдина Амируллоевича состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 119 наименований, изложена на 129 страницах компьютерного текста, включая 57 рисунков, 1 таблицу.

**В введении** обоснована актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, а также перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен подробный литературный обзор касающихся органической электроники, компактному моделированию ОПТ, основанному, на традиционных моделях MOSFET Level 1 и BSIM3/4, а также основы теории МОП-транзистора и ОПТ и теории истоковой деградации. В этом разделе рассматривается теория «внутренней» компактной модели ОПТ и пути преобразование «внутренней» модели во «внешнюю». В этой главе

предлагается новая «улучшенная» компактная модель для компактного моделирования надпорогового тока стока ОПТ основанного на «улучшенной» функции сглаживания, который обеспечивает монотонное убывание выходной проводимости от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения. Получены хорошие выходные характеристики тока стока и дифференциальной проводимости.

**Во второй главе** получены уравнения для линейного режима работы «внутреннего» ОПТ с учетом «внешнего» включения для тока стока в линейном режиме в неявном виде, решенные численно. При компактном моделировании использовано нелинейное приближение зависимости тока стока в линейном режиме от напряжения сток-исток с учетом сопротивления стока и истока, получены и решены методом итераций уравнения, описывающие выходные характеристики «внутреннего» ОПТ.

**В третьей главе** при компактном моделировании получено семейство аппроксимационных формул для тока насыщения «внешнего» ОПТ для зависимости тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в режиме насыщения на основании соотношения между ними, записано уравнение в «точке насыщения», разработана линейно-кусочная «внешняя» модель выходной характеристики на четырёх характерных участках, включая режимы линейный, насыщения, развитой истоковой деградации и предельного тока стока при больших напряжениях, проведены численные расчеты подтверждающие взаимосвязь между ними. Разработаны формулы, учитывающие разно уровневую истоковую деградацию.

**В четвертой главе** представлена кусочно-линейная «внешняя» компактная модель для тока стока, описывающая монотонное убывание дифференциальной проводимости «внешнего» ОПТ от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные выводы и анализ полученных результатов.

Написана диссертационная работа грамотным физическим языком, имеются неизбежные небольшие опечатки и стилистические неточности.

По содержанию работы имеется ряд предметных замечаний:

1. Во введении было бы уместно дать краткий обзор физики органических полупроводников, в контексте их отличия от традиционных неорганических полупроводников. В частности, дать пояснения по поводу используемого специфического для органических полупроводников уравнения для подвижности носителей с учетом эффекта поля. В обзоре использованы доступные в Интернет-ресурсах описания методик численного

моделирования ОПТ, однако отсутствуют ссылки на свежие оригинальные научные статьи в области компактного моделирования, которые широко представлены в мире.

2. Обращает на себя внимание, не совсем удачные, значительно повторяющиеся формулировки научной новизны и защищаемых положений, что в целом не снижает их обоснованности по представленным в работе данным.

3. Примененный подход компактного моделирования ОПТ не учитывает влияние действующих физических механизмов транспорта и его конструкционных особенностей, построен на учете дальнодействующего упорядочения, которое в этих условиях в силу физической природы отсутствует, что и ограничило его возможности только для описания работы в режимах линейном и насыщении.

4. Полученные теоретические выводы по компактному моделированию ОПТ, следовало бы дополнить сопоставлением с широко представленными экспериментальными данными по изучению физико-химических свойств, структурного строения и их связи вольт-амперными характеристиками ОПТ.

Высказанные замечания не снижают в целом научной ценности, теоретической и практической значимости представленной диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

**Публикации.** Основные результаты исследования, сформулированные в диссертации, отражены в 9 научных публикациях, в том числе, 4 из списка РИНЦ, и 3 в журналах, индексируемых международной библиографической и реферативной базе данных Scopus, две публикации в журналах из перечня ВАК РФ. **Апробация работы** проведена в виде докладов на 10 международных и республиканских конференциях, результаты которых опубликованы в реферируемых изданиях.

Результаты диссертационной работы Рахматова Б. А. в области органической электроники могут получить применение в научных учреждениях, на предприятиях и в организациях, использованы при изготовлении электронных элементов микроэлектроники. Среди них можно отметить ФГБУН «Институт проблем проектирования в микроэлектронике» Российской академии наук (ИППМ РАН) (г. Москва, Зеленоград), ФГУП «Научно-исследовательский институт физических проблем Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”» (ранее НИИФП им. Ф. В. Лукина) (г. Москва, Зеленоград), ООО «Интегральные Решения» (г. Москва, Зеленоград) и компания «ЭРЕМЕКС» (г. Москва).

Основные положения диссертации могут быть использованы при чтении спецкурсов по физике конденсированного состояния, полупроводников и полупроводниковых приборов.

В целом диссертационная работа Рахматова Бадурдина Амируллоевича представляет собой законченный научный труд, полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание работы достаточно полно отражено в публикациях в периодической печати и аprobировано на различных международных и республиканских конференциях. Научная новизна, актуальность и практическая значимость полученных результатов, обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы не вызывают сомнений. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы. Диссертация по объектам и методологии исследования полностью соответствует Паспорту специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа Рахматова Бадурдина Амируллоевича на тему «Разработка «внешней» компактной модели органического полевого транзистора с учётом дифференциальной проводимости» отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Отзыв рассмотрен и одобрен на семинаре Регионального центра нанотехнологий при ЮЗГУ «25» января 2022г., протокол №1.

Заместитель директора

Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ,

доктор физико-математических наук

(специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессор

 (Кузьменко Александр Павлович)

Адрес: 305040, Российской Федерации

г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

Телефон: 8(4712)222605

Электронная почта: apk3527@mail.ru

Подпись удостоверяю



*Печать по кадрам  
Ю.Г. Воронова*