

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЁННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
99.0.057.02 НА БАЗЕ ТАДЖИКСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИ-
ТЕТА, ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С.У.УМАРОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА ПО ДИС-
СЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИИ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 22 февраля 2022 г., № 4

О присуждении Рахматову Бадурдину Амируллоевичу, гражданину Респуб-
лики Таджикистан, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка «внешней» компактной модели органическо-
го полевого транзистора с учётом дифференциальной проводимости» по спе-
циальности 1.3.8.-физика конденсированного состояния принята к защите 14
декабря 2021 г., протокол №2, диссертационным советом 99.0.057.02 на базе
Таджикского национального университета Минобрнауки Республики Таджи-
кистан, 734025, Душанбе, пр. Рудаки 17, Физико-технического института им.
С.У. Умарова НАН Таджикистана, 734063, Душанбе, пр. Айни, 299, приказом
Рособрнадзора №622/нк от 7 ноября 2014 г.

В период подготовки диссертации соискатель Рахматов Б.А. проходил
обучение в аспирантуре при кафедре экспериментальной и теоретической
физики ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им.
И.С.Тургенева».

Соискатель Рахматов Б.А., 1991 года рождения, в 2014 г. окончил Та-
джикский национальный университет по специальности «радиофизика и
электроника». В 2019 г. окончил аспирантуру при Орловском государствен-
ном университете им. И.С.Тургенева по направлению 03.06.01-физика и аст-
рономия по профилю «физика полупроводников». В настоящее время рабо-
тает ассистентом кафедры физической электроники Таджикского националь-
ного университета.

Диссертация выполнена на кафедре экспериментальной и теоретичес-

кой физики Орловского государственного университета им. И.С.Тургенева.

Научный руководитель- Турин Валентин Олегович, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной и теоретической физики ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева»

Официальные оппоненты:

Попов Виктор Дмитриевич, доктор тех. наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Национального исследовательского ядерного университета (НИЯУ) «МИФИ», г. Москва;

Кадыров Абдулахат Лакимович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» в своём положительном отзыве, подписанном заместителем директора Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ, д.ф.-м.н., профессором Кузьменко А.П., указала:

По своему объёму, актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов 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 порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а сам автор заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8.– физика конденсированного состояния.

По материалам диссертации опубликовано 9 трудов, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК РФ, 3 статьи в журналах реферативной базы данных Scopus, 4 статьи в сборниках трудов конференций.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Рахматов Б.А., Турин В.О., Зебрев Г.И., Ким Ч.Х., Инигез Б., Шур М.С. Компактная модель для тока стока «внешнего» органического полевого тран-

- зистора на основе новой сглаживающей функции, обеспечивающей монотонное убывание дифференциальной проводимости // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2020.-№3.-С.146-155.
2. Турин В.О., Рахматов Б.А., Шкарлат Р.С., Зебрев Г.И., Ким Ч.Х., Инигез Б., Шур М.С. Кусочная аппроксимация выходной характеристики «внешнего» органического полевого транзистора с учётом ненулевой дифференциальной проводимости в режиме насыщения и эффекта ограничения тока стока из-за истоковой деградации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии, 2019.-Т.9.-№2.-С.137-157.
3. Turin V.O., Shkarlat R.S., Rakhmatov B.A., Zebrev G.I., Kim C.H., Iñiguez B., and Shur M.S. A Piecewise Approximation for Short-Channel “Extrinsic” MOSFET Drain Current Dependence on Drain-to-Source Bias Including Linear Triode, Linear Saturation and Asymptotic Saturation Regimes // ECS Transactions, 2019.-V.90.-No.1.-PP.101-112.
4. Turin V.O., Rakhmatov B.A., Zebrev G.I., Kim C.H., Iñiguez B., Shur M.S. Modeling of saturation current of an organic field-effect transistor with accounting for contact resistances // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019.-V.498.-No. 012038.-PP.1-5.
5. Turin V.O., Rakhmatov B.A., Kim C.H., Iñiguez B. An approach to organic field-effect transistor above-threshold drains current compact modeling that provides monotonic decrease of the output conductance with drain bias increasing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016.-V.151.-No.1.-PP.1–5.

На автореферат диссертации поступили отзывы от:

1. Профессора кафедры общей и прикладной физики Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф.Морозова, доктора тех. наук, доцента Панюшкина Н.Н. Отзыв положительный. Есть замечания:
- 1) Из автореферата следует, что «...достоверность результатов обеспечивается верификацией разработанных аппроксимационных формул, полученных линеаризацией, как правило, неявных нелинейных уравнений, решением этих

уравнений численным методом (методом итераций, методом бисекции)...», то есть разработанные модели подтверждаются другими более сложными с математической точки зрения моделями, а не экспериментальными результатами. Следовательно, разработанные формулы и модели носят универсальный характер, как и традиционные модели (MOSFET Level 1 и BSIM3/4) и применимы не только для органических полевых транзисторов. Из реферата непонятна специфика применения полученных формул и моделей именно для органических полевых приборов и сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными;

2) Из автореферата следует, что в третьей главе изучено приближение для тока стока в режиме насыщения при высоких напряжениях на стоке, а в четвертой главе разработана кусочно-линейная «внешняя» компактная модель для тока стока, использующая уравнения для тока стока в линейном режиме и в режиме насыщения. Планируется ли расширить эту модель и на режим высоких напряжений на стоке?

2. Заведующего кафедрой радиотехники ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктора тех. наук, профессора Пудовкина А.П. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) Из автореферата не ясно, в чем состоит компактность модели и в сравнение с чем; 2) В п.6 научной новизны и положений, выносимых на защиту, упоминается новое нелинейное уравнение асимптотики зависимости тока стока от «внешнего» напряжения сток-исток и новое уравнение для предельного асимптотического значения тока стока, но при этом не ясно, что это дает для моделирования.

3. Профессора Московского института электроники и математики НИУ ВШЭ экономики, кандидата тех. наук, доцента Харитонов И.А. Отзыв положительный. Есть замечания: 1) На стр. 10 приведён термин «пентаценовой ОПТ», но в тексте автореферата нет объяснения термина «пентаценовый»; 2) На стр. 11 сказано, что «уравнения (6), (7) и (8) определяют выходную проводимость недостаточно корректно», но нет детализации, насколько велика и что представляет собой эта «некорректность». Далее на рис. 2 приведены за-

зависимости дифференциальной проводимости от напряжения стока, рассчитанные по различным выражениям, но не приведены «эталонные» кривые, с которыми их надо сравнивать; 3) На рис. 6 приведены выходные характеристики «внешнего» ОПТ в кусочном приближении, на которых заметны изломы характеристики. В 3 и 4 главах приведены достаточно сложные аппроксимационные зависимости для предложенной модели. При этом нет информации о том, как предложенная модель и выражения работают в реальном SPICE симуляторе, для которого предназначается разработанная модель.

4. Декана факультета электромеханики Горно-металлургического института Таджикистана, кандидата физ.-мат. наук, доцента Козиева К.С. Отзыв положительный. Есть замечания: 1) В третьей главе выводится уравнение для дифференциального сопротивления ОПТ в режиме насыщения и упоминается эффект истоковой деградации, что является разделом теории усилителя с общим истоком. Хотелось бы более подробного пояснения междисциплинарной связи и возможности использования полученного результата в схемотехнике усилителя с общим истоком; 2) Не обсуждается вопрос о возможности учёта влияния нелинейности паразитных сопротивлений истока и стока при компактном моделировании ОПТ.

5. Доцента кафедры общей физики Таджикского педагогического университета имени С. Айни, кандидата физ.-мат. наук, Ньматова А. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) Отсутствует экспериментальная верификация полученных аппроксимаций для тока стока ОПТ; 2) Одним из вариантов верификации полученных аппроксимаций для тока стока ОПТ, дополнительным к экспериментальным измерениям, является двумерное и/или трёхмерное моделирование ОПТ в программах приборно-технологического моделирования (например, TCAD Synopsys или Silvaco), решающих систему уравнений полупроводника на сетке, содержащей до десятков и более тысяч узлов. В работе такой метод верификации не применялся.

6. Заведующего кафедрой общей физики Бохтарского государственного университета им. Н.Хусрава, кандидата тех. наук, доцента Тургунбаева М.Т. От-

зыв положительный. Имеются замечания: 1) Для полноценной компактной модели важна не только возможность моделирования стационарных вольт-амперных характеристик, но и нестационарных процессов. При этом необходима и ёмкостная часть компактной модели. Соответственно, работа должна быть продолжена и в этом направлении; 2) Шумовые характеристики ОПТ тоже на данном этапе не рассматривались.

Выбор официальных оппонентов и Ведущей организации обосновывается тем, что:

-официальный оппонент профессор Попов В.Д. является авторитетным учёным в области твердотельной электроники, имеет около 270 работ, из которых 76 в ведущих российских и 27 в зарубежных изданиях, является автором 4 монографий. За последние 5 лет им издано 21 статей по близкой тематике в российских и зарубежных изданиях, получено 3 патента РФ.

-официальный оппонент доктор физико-математических наук Кадыров А.Л. является признанным учёным в области физики полупроводников. Является автором 5 монографий и более 80 научных трудов в ведущих российских и зарубежных журналах. За последние 5 лет им опубликовано 17 статей по близкой тематике в российских и зарубежных изданиях.

-ведущая организация Юго-Западный государственный является одним из ведущих российских научных центров исследования физико-химических свойств наноструктур и наноматериалов. Научными сотрудниками университета за последние 5 лет опубликовано 8 монографий и свыше 100 научных статей по тематике диссертации в российских и зарубежных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований впервые:

-разработана «улучшенная» компактная модель для тока стока «внутреннего» ОПТ в надпороговом режиме работы, обеспечивающая корректный учет дифференциальной проводимости при монотонном ее убывании от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения;

- предложены** новые аппроксимационные формулы для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ в линейном режиме от «внешнего» напряжения сток-исток, основанные на линеаризации и приближенном решении уравнения для тока стока «внешнего» ОПТ;
- выведено** семейство новых аппроксимационных формул для тока насыщения «внешнего» ОПТ в зависимости от «внешнего» напряжения затвор-исток, которые могут быть использованы при компактном моделировании;
- получено** новое уравнение для выходного дифференциального сопротивления «внешнего» ОПТ в «точке насыщения», на основе которого разработана линейная аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в окрестности «точки насыщения»;
- получено** новое нелинейное уравнение асимптотики зависимости тока стока от «внешнего» напряжения сток-исток и новое уравнение для предельного асимптотического значения тока стока;
- построена** новая нелинейная аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток с выходом на предельное асимптотическое значения тока стока.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработанные диссертантом компактные модели могут быть использованы в учебниках и лекционных курсах по полупроводниковым приборам, а также в виде программных модулей в современных электронных САПР.

Практическое значение результатов подтверждается тем, что они необходимы для эффективного проектирования электронных схем органической электроники и теоретического анализа характеристик ОПТ. Отдельным направлением использования компактной модели ОПТ является экстракция параметров ОПТ и органических полупроводников на основе экспериментальных данных.

Оценка **достоверности** результатов исследования показывает, что результаты получены с использованием стандартных математических методов

и подтверждены такими численными методами, как метод итераций и бисекции. Разработанные аппроксимационные формулы верифицированы использованием численных методов.

Личный вклад соискателя заключается в поиске и анализе литературных данных, проведении теоретических исследований и компьютерных расчётов, разработке уравнений для компактного моделирования, верификации этих уравнений с использованием численных методов и подготовке материалов для научных публикаций, личном участии в апробации результатов.

Диссертационный совет пришёл к выводу, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным пп. 9-14 и 32 Положения о присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30.01.2002г. №74 (в ред. постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., №842), и принял решение присудить Рахматову Бадурдину Амируллоевичу учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, участвовавших на заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за- 18, против- нет, недействительных бюллетеней- нет.

Председатель

диссертационного совета



Солихов Д.К.

Учёный секретарь

диссертационного совета

Табаров С.Х.

22.02.2022 г.