

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.1.044.02  
(Д 999.138.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ПРИ УЧАСТИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 22.12.2022 г. № 6

О присуждении Полозову Виктору Ивановичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Тонкие плёнки оксидов ванадия для электродинамических приложений» по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки принята к защите 20.10.2022г., (протокол заседания № 5) диссертационным советом 99.1.044.02 (Д 999.138.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, (495) 484-2383, <http://www.itae.ru/>) при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Дмитровский, ул Ижорская, д. 13, стр. 6, (495) 485-8345, <https://jiht.ru/>), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 411/нк от 10.05.2017 г.

Соискатель Полозов Виктор Иванович 1994 года рождения, в 2018 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории № 4 – нанотехнологии композиционных материалов и тонкопленочных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук.

В 2022 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт».

Диссертация выполнена в лаборатории № 4 – нанотехнологии композиционных материалов и тонкопленочных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории №4 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук Маклаков Сергей Сергеевич.

Официальные оппоненты:

- доктор химических наук, профессор кафедры неорганической химии химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Кауль Андрей Рафаилович

- доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Крит Борис Львович  
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в своем положительном заключении, составленном зав. лабораторией магнитных явлений в микроэлектронике д.ф.-м.н. Шавровым В.Г. (утвержденном 10.11.2022 г. директором ИРЭ РАН, д.ф.-м.н., профессором, академиком РАН Никитовым С.А.), указала, что научная значимость проведенных исследований связана с недостаточностью имеющейся информации об особенностях перехода полупроводник-металл в тонких плёнках  $VO_2$ , получаемых в неэпитаксиальных процессах на поликристаллических подложках большой площади. Большинство современных исследований в этой области носят качественный характер. Анализ факторов, влияющих на свойства перехода в тонкоплёночном  $VO_2$  на подложках большой площади, необходим для расширения спектра прикладных применений этого материала в управляемых устройствах СВЧ диапазона.

Результаты диссертации могут быть использованы для создания функциональных тонкоплёночных слоёв, обеспечивающих заданное, обратимое и быстрое изменение своих электрофизических свойств, например, поверхностного сопротивления, при изменении температуры или под действием электрического тока. Эти функциональные слои на основе  $VO_2$  могут быть использованы для решения практических задач промышленного производства в области обеспечения электромагнитной совместимости и разработки управляемых СВЧ элементов: перестраиваемых планарных фильтров, микрополосковых переключателей, многодиапазонных антенн, управляемых антенных обтекателей.

Соискатель имеет 21 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 19 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ:

1. Maklakov, S.S., Naboko, A.S., Maklakov, S.A., Bobrovskii, S.Y., Polozov, V.I., Zezulina, P.A., Osipov, A.V., Ryzhikov, I.A., Rozanov, K.N., Filimonov,

D.F., Pokholok, K.V., Iakubov, I.T., Lagarkov, A.N., Amorphization of thin supermalloy films Ni<sub>79</sub>Fe<sub>17</sub>Mo<sub>4</sub> with oxygen during magnetron sputtering // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – V. 854. – P. 157097

2. V.I. Polozov, S.S. Maklakov, S.A. Maklakov, A.D. Mishin, D.A. Petrov, K.M. Baskov, A.A. Politiko, V.A. Chistyayev, V.N. Semenenko, V.N. Kisel, Thermally Tunable Frequency-Selective Surface Based on VO<sub>2</sub> Thin Film // Phys. Status Solidi A. – 2020. – V. 217. – P. 2000452

3. V.I. Polozov, S.S. Maklakov, A.L. Rakhmanov, S.A. Maklakov and V.N. Kisel, Blow-up overheating instability in vanadium dioxide thin films // Phys. Rev. B. – 2020. – V.101. – P. 214310

4. V.I. Polozov, S.S. Maklakov, S.A. Maklakov, V.A. Chistyayev, A.A. Politiko, K.M. Baskov, A.D. Mishin, D.A. Petrov, V.N. Kisel, Tunable parallel plate waveguide array based on VO<sub>2</sub> thin films // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – V. 848 – P. 012073

5. Sergey S. Maklakov, Viktor I. Polozov, Sergey A. Maklakov, Alexey D. Mishin, Ilya A. Ryzhikov, Alexander L. Trigub, Vadim A. Amelichev, Konstantin I. Maslakov, Vladimir N. Kisel. Post-deposition annealing of thin RF-magnetron sputter-deposited VO<sub>2</sub> films above melting point. // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – V. 763. – P. 558-569

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии растворов им. Г.А.Крестова РАН** (старший научный сотрудник лаборатории «Новые материалы на основе макроциклических соединений», к.х.н. Кузьмин С.М.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Рисунки автореферата легче обсуждать и воспринимать, если отдельные изображения внутри рисунка проиндексировать (а, б, в, и т.д.).

- Следует расшифровывать использованные аббревиатуры (КП и КО, стр. 14 автореферата)

- На рисунке 4, стр. 13 приведена схема установки, позволяющей оценить временные характеристики перехода полупроводник-металл и стабильность плёнок при многократном переключении. При этом, результаты экспериментов в автореферате отсутствуют. Эти данные имеют исключительную важность в рамках этой работы.

- Автор на основании измеренной температуры фазового перехода и спектров комбинированного рассеяния относит полученный материал к  $\text{VO}_2$ . Можно ли это считать достаточным доказательством, учитывая большое количество возможных фаз оксидов ванадия? Почему не применялись методы рентгенофазного анализа?

- Четырёхточечный метод применён для оценки проводимости материала на постоянном токе. Возможно, лучше было бы применить один из импедансных методов исследования плёнок, так как автор применяет их в высокочастотных устройствах.

- Представление полученной поликристаллической полупроводниковой плёнки в виде исключительно омического сопротивления (рисунок 5) является достаточно грубой моделью. Имеют ли результаты такого моделирования практическую ценность?

- Непонятно, как автор на основании такой модели пришёл к выводу о необходимых «геометрии волновода с импедансом 50 Ом (для проведения измерений) и размере плёнки  $\text{VO}_2$ ».

- На рисунке 5 (средняя картина) показано отношение сопротивлений плёнки  $\text{VO}_2$  при 30 и 60 °С. При параметрах: концентрация  $\text{O}_2 \approx 11\%$ , напряжение смещения подложки  $\approx 0$  В это отношение имеет величину около 1000. Как это согласуется с дальнейшим утверждением автора о критическом значении отжига для достижения высоких значений изменения сопротивления в результате фазового перехода?

**2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Старший научный сотрудник**

физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н. доцент Дроздов К.А.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Из литературы известно, что причиной образования широкой петли температурного гистерезиса ППМ является наличие в плёнке кристаллитов различных размеров, каждый из которых обладает собственной "элементарной" петлей гистерезиса. Результирующая петля формируется суммированием элементарных петель, присущих отдельным кристаллитам. Из представленных в работе данных следует, что при оптимальных параметрах отжига дисперсия кристаллитов по размеру существенно уменьшается. Т.е. следует ожидать, что оптимальные параметры отжига также обеспечивают минимальную ширину петли гистерезиса, что является плюсом для целого ряда практических приложений. В автореферате данный момент не обсуждается, хотя из текста следует, что ширина гистерезиса измерялась.

Сделанное замечание носит рекомендательный характер.

3. **ООО «Промтехсервис»** (генеральный директор ООО «Промтехсервис» Куликчан В.Г.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Рисунок 13 в автореферате пропущен. После рисунка 12 сразу расположен рисунок 14.

- На рисунке 16 перепутаны кривые коэффициента прохождения структуры, соответствующие 25 и 80 °С. Продемонстрированная копланарная структура должна обладать низким коэффициентом прохождения при комнатной температуре.

4. **АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион»** (учёный секретарь АО «ГНПП «Регион», к.т.н. Копченев С.В.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- В автореферате не приведены временные характеристики ППМ в  $VO_2$ , имеющие важное значение для оценки быстродействия перспективных управляемых СВЧ устройств на основе этого материала.

- На рисунках 10, 12 и 14 некоторые обозначения сделаны на английском языке. При этом в пояснении к рисункам перевод не приводится.

**5. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»** (заведующий лабораторией биомедицинских нанотехнологий Института биомедицинских систем, к.ф.-м.н., доцент Герасименко А.Ю.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- В описании второй главы работы, применительно к технологическому процессу реактивного высокочастотного магнетронного распыления мишени из чистого ванадия не указаны критерии оптимизации параметров нанесения и отжига.

- В 4 главе не указана погрешность для определения оптимальных температурных параметров, приводящих к изменению электрофизических свойств. Это замечание можно отнести и к другим частям автореферата.

- Для упрощения восприятия рисунков в автореферате их целесообразнее было бы оформлять по ГОСТ с буквенным обозначением рисунков, а также улучшить качество подписей на рисунках.

**6. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»** (заведующий кафедрой физики твердого тела института физики, д.ф.-м.н., профессор Скрипаль А.В.) – отзыв положительный, с замечанием:

- В автореферате не представлены результаты моделирования электрофизических свойств СВЧ-устройств на основе  $\text{VO}_2$ , выполненные автором на основе численного моделирования с использованием программы ANSYS HFSS.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

- д.х.н., доцент **Кауль А.Р.** является ведущим ученым в области синтеза функциональных материалов с заданными свойствами, в том числе оксидов ванадия, а также крупным специалистом по изучению строения и возможностей применения данных материалов.

1. Ivanov A.V, Tatarenko A.Yu., **Kaul A.R.**, et.al. Fabrication of Epitaxial W-Doped VO<sub>2</sub> Nanostructured Films for Terahertz Modulation Using the Solvothermal Process // ACS Applied Nano Materials. – 2021. – Vol. 4. – No. 10. – P. 10592-10600.
2. Makarevich A.M., Sobol A.G., **A.R.Kaul**, et.al. Delicate tuning of epitaxial VO<sub>2</sub> films for ultra-sharp electrical and intense IR optical switching properties // J. Alloys Compounds. – 2021. – Vol. 853. – P. 157214.
3. Solyankin P.M., Esaulkov M.N., **Kaul A.R.**, et.al. Terahertz Switching Focuser Based on Thin Film Vanadium Dioxide Zone Plate // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2018. – Vol. 39. – No. 12. – P. 1203-1210.

- д.т.н. **Крит Б.Л.** является признанным специалистом в области физики пленочных структур, композитных материалов и покрытий на основе оксидов.

1. S. N. Grigoriev, I. O. Kondratsky, **B. L. Krit**, et al. Protective and Thermophysical Characteristics of Plasma Electrolytic Coatings on the Ultralight Magnesium Alloy // J. Eng. Mater. Technol. – 2022. – V. 144. – № 2. – P. 021006.
2. I.V.Lukiyanchuk, M.S.Vasilyeva, **B.L.Krit**, et al. Role and behavior of ultrathin gold films on the fiber materials surface in the CO oxidation process // J. Alloys Compounds. – 2021. – Vol. 852. – P. 157042.
3. T. Yu. Mogil'naya, **B. L. Krit**, N.V. Morozova et al. Evaluation the Influence of Impurities on the Occurrence of a Local Surface Plasmon Resonance Effect



// Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – V. 57. – P. 567-571.

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН** является ведущим исследовательским центром России и мира в области радиофизики. В лабораториях ИРЭ РАН ведутся интенсивные работы по синтезу и исследованию электрофизических свойств функциональных тонкоплёночных покрытий, а также разработке электродинамических приложений с использованием данных покрытий.

1. Андреев В.Г., Вдовин В.А., Глазунов П.С. и др. Влияние толщины диэлектрической подложки на поглощающие и просветляющие свойства ультратонких плёнок меди // Оптика и спектроскоп. 2022. – Т. 130 – № 9. – С. 1410-1416.
2. Signore, M.A., Velardi, L., De Pascali, C., Kuznetsova, I., Blasi, L., Biscaglia, F., Quaranta, F., Siciliano, P., Francioso, L. Effect of silicon-based substrates and deposition type on sputtered AlN thin films: Physical & chemical properties and suitability for piezoelectric device integration // Applied Surface Science. – V. 599. – P. 154017.
3. Tupik, V.A., Potapov, A.A., Margolin, V.I., Kostrin, D.K. Improving the quality of nanofilms produced by magnetron sputtering // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1799. – P. 012037.

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

- Разработан способ применения плёнок  $\text{VO}_2$  в качестве активных элементов управляемых экранов для сантиметрового диапазона длин волн с коэффициентом прохождения (КП), изменяющимся на 9 дБ. Управление КП достигается нагревом, который вызывает переход полупроводник-металл в  $\text{VO}_2$ . Амплитуда изменения КП может быть увеличена до 13 дБ при уменьшении широкополосности управляемых частотно-селективных

поверхностей.

- Разработан способ применения плёнок  $\text{VO}_2$  в микрополосковых устройствах, в частности, в СВЧ переключателе, обеспечивающем изменение коэффициента прохождения на частотах до 5 ГГц на величину не менее 20 дБ при ППМ.

- Разработан метод нанесения тонких плёнок  $\text{VO}_2$  с заданными электрофизическими параметрами на поликристаллические подложки. Метод основан на применении высокочастотного реактивного магнетронного распыления с последующей термообработкой. Контраст изменения сопротивления при ППМ аналогичен значению, известному для плёнок  $\text{VO}_2$ , получаемых при эпитаксиальном росте. Тонкие плёнки  $\text{VO}_2$  обладают ППМ с отношением сопротивлений при 30 °С и 80 °С до  $10^4$  раз и абсолютными значениями поверхностного сопротивления в полупроводниковом и металлическом состояниях  $10^6 - 10^4$  Ом/кв и  $10^3 - 10^2$  Ом/кв соответственно.

- Установлено, что релаксация внутренних напряжений в плёнке, приводящая к росту амплитуды ППМ до значений до  $10^4$  раз, происходит вследствие увеличения размеров кристаллических зёрен и уменьшению ширины распределения зерен по размеру при нагреве плёнок до температуры 600 - 720 °С.

- Выявлено, что ППМ в  $\text{VO}_2$  происходит в режиме с обострением в случае инициирования перехода приложением электрического напряжения величиной 40 - 100 В при расстоянии между планарными электродами, нанесёнными на поверхность плёнки, 10 - 20 мкм. Режим переключения не зависит от кристаллической структуры плёнки.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

– Экспериментально показана возможность управления внутренними напряжениями в неэпитаксиальных тонких плёнках  $\text{VO}_2$  путём их высокотемпературной и ионной обработки, обеспечивающая параметры перехода полупроводник-металл (отношение сопротивлений в различных

состояниях и величина гистерезиса), соответствующие тонким плёнкам  $\text{VO}_2$ , полученным при помощи эпитаксиального роста.

– Экспериментально показан способ создания активного управляемого экрана для СВЧ на основе тонких плёнок  $\text{VO}_2$ , ранее не применявшихся для таких целей из-за высокого поверхностного сопротивления в металлическом состоянии (более 300 Ом/квadrat). Результат достигнут путём интеграции плёнок  $\text{VO}_2$  в частотно-селективную поверхность для диапазона 9-19 ГГц.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

– Разработанная методика синтеза тонких плёнок  $\text{VO}_2$  с контрастом сопротивлений в полупроводниковом и металлическом состояниях более  $10^4$  раз на неэпитаксиальных подложках большой площади (более  $20 \text{ см}^2$ ) методом реактивного магнетронного распыления – одного из основных методов нанесения функциональных слоёв микроэлектронных устройств, позволяет использовать явления перехода полупроводник-металл в широком классе управляемых устройств радиочастотного диапазона.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, занимающихся разработкой материалов и элементной базы для активных устройств радиотехнического назначения, среди которых можно выделить Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Акционерное общество «Центральное конструкторское

бюро автоматики», Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Исток»» имени А.И. Шокина, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга».

**Достоверность полученных результатов** не вызывает сомнений и обеспечена использованием стандартных методов измерений, хорошим соответствием теоретических и экспериментальных данных, а также соответствием экспериментальных результатов, полученных с помощью разных методов измерений.

**Личный вклад соискателя** состоит в постановке задач, практической реализации экспериментальных методов для их решения, проведении всего объема экспериментальных работ, связанных с получением и измерениями электрофизических свойств плёнок оксидов ванадия и образцов СВЧ устройств с управляемым частотным откликом. Анализ и интерпретация экспериментальных результатов проводились совместно с научным руководителем.

**Апробация результатов** исследования проводилась на 14 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Полозов Виктор Иванович ответил на вопросы, согласился с замечаниями, высказанными в ходе заседания, и привел собственную аргументацию.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация Полозова В.И. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г.

На заседании от 22.12.2022г. диссертационный совет принял решение присудить Полозову Виктору Ивановичу ученую степень кандидата

технических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 16 человек, из них очно: 14 докторов наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02)

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН



Лагарьков А.Н.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02)

д.ф.-м.н., доцент

Дорофеев А.В.

22.12.2022г.