

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания объединенного диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13) от 22 декабря 2022 г. (протокол № 6)

Защита диссертации  
**Полозова Виктора Ивановича**  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
«Тонкие плёнки оксидов ванадия для электродинамических приложений»

Специальность 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки

Москва – 2022

## СТЕНОГРАММА

заседания объединенного диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13)  
Протокол № 6 от 22 декабря 2022 г.

Диссертационный совет 99.1.044.02 (Д 999.138.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ № 411/нк от 10.05.2017 г. в составе 20 человек. На заседании присутствуют 16 человек (14 – очно, 2 – онлайн), из них 16 докторов наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки. Дополнительно введены на разовую защиту – 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – председатель диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02) академик РАН Лагарьков Андрей Николаевич.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02) д.ф.-м.н., доцент Дорофеевко Александр Викторович.

<b>Фамилия, И.О.</b>	<b>Учёная степень, шифр специальности в совете</b>	<b>Присутствие</b>
1 Лагарьков А.Н.	академик РАН (1.3.13)	Очное присутствие
2 Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., ст.н.с. (1.3.13)	Отсутствует
3 Дорофеевко А.В.	д.ф.-м.н., доцент (1.3.13)	Очное присутствие
4 Батенин В.М.	член-корр. РАН, профессор (1.3.13)	Очное присутствие
5 Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., профессор (1.3.13)	Очное присутствие
6 Виноградов А.П.	д.ф.-м.н., профессор (1.3.13)	Очное присутствие
7 Гавриков А.В.	д.ф.-м.н., доцент (1.3.13)	Удаленное подключение
8 Гиппиус Н.А.	д.ф.-м.н. (1.3.13)	Отсутствует
9 Деньщиков К.К.	д.т.н. (1.3.13)	Отсутствует
10 Жук А.З.	д.т.н., профессор (1.3.13)	Очное присутствие
11 Зейгарник В.А.	д.т.н., ст.н.с. (1.3.13)	Очное присутствие
12 Кисель В.Н.	д.ф.-м.н., доцент (1.3.13)	Очное присутствие
13 Мерзликин А.М.	д.ф.-м.н. (1.3.13)	Очное присутствие
14 Парфенов Ю.В.	д.т.н., ст.н.с. (1.3.13)	Очное присутствие
15 Пухов А.А.	д.ф.-м.н., профессор (1.3.13)	Очное присутствие
16 Рахманов А.Л.	д.ф.-м.н., профессор (1.3.13)	Очное присутствие
17 Рожков А.В.	д.ф.-м.н. (1.3.13)	Удалённое подключение
18 Розанов К.Н.	д.ф.-м.н. (1.3.13)	Очное присутствие
19 Сон Э.Е.	академик РАН (1.3.13)	Отсутствует
20 Сарычев А.К.	д.ф.-м.н. (1.3.13)	Очное присутствие

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации младшего научного сотрудника лаборатории № 4 нанотехнологии композиционных материалов и тонкопленочных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук Полозова Виктора Ивановича на тему: «Тонкие плёнки оксидов ванадия для электродинамических приложений». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки. 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:

Маклаков Сергей Сергеевич – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории № 4 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук.

### Официальные оппоненты:

Д.х.н. Кауль Андрей Рафаилович – профессор химического факультета Московского государственного Университета им. М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1)

Д.т.н. Крит Борис Львович – профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» Московского авиационного института (125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

### Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (25009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7).

На заседании присутствуют: официальный оппонент д.х.н. Кауль А.Р., официальный оппонент д.т.н. Крит Б.Л., научный руководитель Полозова В.И. - к.ф.-м.н. Маклаков С.С.

## СТЕНОГРАММА

### **Председатель:**

Добрый день, уважаемые коллеги. Начинаем заседание нашего совета. Кворум - есть. Всё в порядке, мы можем начинать. Итак, защита диссертации Полозова Виктора Ивановича на тему «Тонкие плёнки оксидов ванадия для электродинамических приложений». Диссертация представлена на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности электрофизика, электрофизические установки. Я предоставляю слово учёному секретарю для оглашения содержания всех представленных материалов.

### **Ученый секретарь:**

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ)*

### **Председатель:**

Спасибо. Можем начинать. Даём 20 минут. Виктор Иванович, прошу.

### **Полозов В.И.:**

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Полозова В.И. прилагается).*

### **Председатель:**

Спасибо. Пожалуйста вопросы к соискателю. Есть вопросы?

### **Батенин В.М.:**

Как контролируется толщина плёнки?

### **Полозов В.И.:**

Толщина плёнки контролируется уже после нанесения. Зная, какая толщина плёнки получается при тех или иных условиях нанесения, мы можем выставлять такие условия, чтобы получить нужную толщину. При магнетронном распылении скорость нанесения составляет примерно 100 нм в полчаса.

### **Батенин В.М.:**

Имеет ли переход, инициируемый напряжением, гистерезис?

### **Полозов В.И.:**

Да, переменное такой переход тоже имеет ширину, имеет такой же гистерезис, как и в случае переключения температурой. Обратная кривая по напряжению выглядела бы соответствующе.

### **Батенин В.М.:**

Спасибо.

### **Председатель:**

Еще вопросы, коллеги?

**Василяк Л.М.:**

Скажите пожалуйста, оценивали ли скорость фазового перехода? Вопрос связан с тем, что вы же должны разогреть эту плёнку, поэтому, собственно, есть два слагаемых – скорость разогрева до нужной температуры, а потом скорость протекания самого перехода.

**Полозов В.И.:**

Спасибо, этот вопрос постоянно возникает, потому что это очень важно для всех приложений. В данном случае мы оценивали скорость перехода теоретически, потому что в эксперименте нам мешал коммутатор, а вообще теоретически скорость данного перехода должна составлять 10 нс. В случае температурного нагрева, конечно, ни о каких высоких скоростях говорить не приходится, потому что мы действительно долго греем плёнку внешним нагревателем.

**Председатель:**

А экспериментально в лучшем варианте нагрева время перехода какое? Понятен вопрос?

**Полозов В.И.:**

Да, понятен. Для ответа на этот вопрос лучше всего рассматривать геометрию, когда у нас маленькие элементы VO<sub>2</sub>. Здесь это время составляет несколько микросекунд.

**Председатель:**

Наносекунды, которые вы назвали, это время перехода, который происходит, когда вы уже нагрели плёнку до температуры перехода. За сколько времени температура поднимается до температуры перехода?

**Полозов В.И.:**

Если ещё это время учитывать, то несколько секунд будет; десятки секунд.

**Председатель:**

Ещё вопросы, коллеги?

**Мерзликин А.М.:**

Сколько циклов переключения выдерживает плёнка? Известно, что с монокристаллическими плёнками есть большая проблема, потому что они растрескиваются. Диоксидом ванадия многие занимались, но большая проблема с созданием управляемых устройств связана с тем, что если мы делаем монокристалл, то он начинает растрескиваться и сыпаться. Сколько раз можно переключить плёнку?

**Полозов В.И.:**

Для изучения этого вопроса у нас разработан стенд, который позволяет измерять количество переключений. Мы здесь с генератора сигналов специальной формы подавали сигнал частотой 10 кГц и держали эту систему в таком состоянии около 2 часов. У меня на этот вопрос заготовлен ответ, потому что этот вопрос был в замечаниях: 10<sup>7</sup> циклов плёнка выдержала спокойно, её зависимость сопротивления от температуры почти не изменилась.

**Председатель:**

То есть вы не дошли до предела пока?

**Полозов В.И.:**

Нет, такой эксперимент проводился только один раз.

**Председатель:**

Какое число переключений? Сколько раз вы перешли из одного состояния в другое?

**Полозов В.И.:**

10 миллионов. Если бы у нас было некоторое другое оборудование, то мы могли бы увеличить точность этих измерений.

**Председатель:**

Ещё вопросы, коллеги? Андрей Карлович, пожалуйста.

**Сарычев А.К.:**

Вы защищали вашу плёнку? Насколько она, так сказать, устойчива при этом рециклировании и дальнейшем хранении? Она не дергадирует под действием атмосферного кислорода?

**Полозов В.И.:**

Нет.

**Сарычев А.К.:**

То есть они не защищались ничем?

**Полозов В.И.:**

Не защищались. Они хорошо хранятся, поскольку и так уже находятся в состоянии оксида. Эти плёнки мы начали получать лет 5 назад. Те плёнки, которые мы тогда получили, если их сейчас измерить они будут точно такие же.

**Председатель:**

То есть деградации не наблюдается?

**Полозов В.И.:**

Да, главное их в воду не класть, потому что в воде они себя плохо чувствуют.

**Батенин В.М.:**

А при длительном нагреве они не деградируют?

**Полозов В.И.:**

Плёнки хранятся при комнатной температуре. Если вы задаёте вопрос о том, сколько их можно хранить при повышенной температуре, то я не могу ответить.

**Председатель:**

Да, потому что ещё не задан вопрос при какой высокой.

**Полозов В.И.:**

Видимо имелась в виду температура выше 68 градусов.

**Председатель:**

Ещё вопросы, коллеги? Вопросов нет, тогда переходим дальше. Слово предоставляется научному руководителю Маклакову Сергею Сергеевичу.

### **Маклаков С.С.:**

Добрый день. Виктор Иванович пришёл в лабораторию в 2014 году вместе с другими студентами. Где-то примерно за год-полтора до этого в лабораторию поступило задание получить тонкие плёнки диоксида ванадия. Фактически Витя почти сразу подключился в начале этой работы к нашей научной деятельности. За годы работы совместно он освоил по-настоящему широкий круг научных компетенций. Сюда входят и методы вакуумного нанесения, методы твердотельного отжига, методы анализа структуры твёрдого тела, теория СВЧ, СВЧ расчёты. За всё это время при его участии либо непосредственно им полностью с нуля был создан ряд новых установок. То есть, была модифицирована установка вакуумного нанесения, о которой идёт речь, в частности, подколпачное устройство было полностью переделано и спроектировано с нуля для нанесения плёнок при нагреве. Была создана установка, позволяющая проводить отжиг плёнок. Витя полностью единолично с нуля создал установку для двух-, четырёхточечного метода измерения электрометрии, включая импедансную спектроскопию и так далее.

Вне рамок этой работы Виктор активно участвовал в работе нашей и других лабораторий. Сюда входит научная деятельность по договорным работам института, инициативным работам института по выполнению научных грантов. Около трёх лет назад Виктор самостоятельно подал заявку на грант РФФИ «Аспиранты», получил её и самостоятельно успешно провёл этот грант. Также он хорошо себя показал при руководстве молодыми сотрудниками, а сейчас у него наклёвывается руководство непосредственно своим студентом. Можно утверждать, что Виктор очень много сделал и для этой тематики, которая, по сути, от способа получения тонких плёнок прошла все шаги до способа их применения, а сейчас находится в стадии потенциального применения в готовом продукте.

В результате, я считаю, что Виктор доказал способность к самостоятельной квалифицированной научной работе в междисциплинарной области, что достаточно трудно. Его компетенции соответствуют специальности, по которой мы представили работу на защиту. Я прошу уважаемый совет поддержать этого молодого учёного, присудив ему кандидатскую степень. Благодарю за внимание.

### **Председатель:**

Вопросы есть к научному руководителю, коллеги? Вопросов нет. Слово предоставляется ученому секретарю, прошу вас.

### **Ученый секретарь:**

Спасибо. В деле имеется заключение организации, где выполнена диссертация – ИТПЭ РАН. В соответствии с этим заключением Полозов Виктор Иванович выполнил работу в лаборатории номер 4 нанотехнологии композиционных материалов и тонкопленочных структур в качестве инженера-исследователя. Он сдал все экзамены, заключение об этом имеется в деле. По результатам выполнения диссертации был семинар ИТПЭ РАН, который который принял следующее заключение, что диссертационная работа выполнена и готова, по мнению участников семинара, к защите. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений существенная часть экспериментальных работ выполнена лично соискателем. Анализ и интерпретация - совместно с научным руководителем. Все положения, выносимые на защиту, опубликованы и доложены на конференциях. В частности, по цитированию соискатель имеет индекс Хирша 3 – очень серьёзный. Диссертационная работа соответствует профилю диссовета и паспорту специальности 1.3.13 - электрофизика электрофизические установки. Ну а диссертация, соответственно, рекомендуется участниками семинара к защите. Далее я могу перейти, наверное, к соглашению отзывов, да?

**Председатель:**

Ведущей организации сначала.

**Ученый секретарь:**

Начнём с отзыва ведущей организации. В качестве ведущей организации выступил Институт радиотехники и электроники. Отзыв, подписанный д.ф.-м.н. Шавровым и заверенный директором ИРЭ РАН Никитовым положительный с замечаниями.

1. Наличие VO<sub>2</sub> на плёнках определено исключительно на основании результатов спектроскопии комбинационного рассеяния и вида кривой температурной зависимости сопротивления плёнок. Почему для определения фазового состава плёнок не применялся метод рентгеноструктурного анализа?
2. В главе 5 недостаточно информации, позволяющей сравнить разработанные устройства, особенно управляемые частотно-селективные поверхности, с существующими на данный момент разработками.
3. Первое предложение в пункте 2 выводов по работе («Получение плёнок с ППМ данным методом недостижимо без высокотемпературной обработки») дублирует пункт 1.
4. Некорректно введены некоторые аббревиатуры, например ППМ, введённая на стр. 5 диссертации может быть расшифрована как полупроводник-металл. Расшифровка аббревиатур даётся несвоевременно, например, не расшифрованы аббревиатуры КП и КО в подписи к рисунку 3.1.

Сразу остальные отзывы?

**Председатель:**

Да, и остальные, конечно.

**Ученый секретарь:**

Ну и также поступил ряд отзывов на автореферат, а именно 9.

Первый отзыв от Института химии растворов им. Г.А.Крестова РАН, старший научный сотрудник, к.х.н. Кузьмин. 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 ППМ 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 VO<sub>2</sub>. Можно ли это считать достаточным доказательством, учитывая большое количество возможных фаз оксидов ванадия? Почему не применялись методы рентгенофазового 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 VO<sub>2</sub>».

- На рисунке 5 (средняя картина) показано отношение сопротивлений плёнки VO<sub>2</sub> при 30 и 60 °С. При параметрах: концентрация O<sub>2</sub> ≈ 11%, напряжение смещения подложки ≈ 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?

Это был первый отзыв.

### **Председатель:**

Там надо зачитать заключение.

### **Ученый секретарь:**

В целом отзыв положительный, то есть вывод, что диссертация заслуживает, несмотря на это всё. Просто много замечаний. Отзывы все положительные. Вот следующий отзыв из МГУ, Старший научный сотрудник физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н. доцент Дроздов К.А. Отзыв положительный, тоже с замечаниями, но замечание одно:

- 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.

Третий отзыв из ООО «Промтехсервис», подписал генеральный директор этого предприятия 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.

Четвертый отзыв из АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», подписал учёный секретарь АО «ГНПП «Регион», к.т.н. Копченев С.В. Отзыв положительный, с замечаниями:

- В автореферате не приведены временные характеристики ППМ в VO<sub>2</sub>, 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.

Пятый отзыв из Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», подписал 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 частой рисунков, а также улучшить качество подписей на рисунках.

Шестой отзыв из Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, подписал заведующий кафедрой физики твердого тела, д.ф.-м.н., профессор Скрипаль А.В. Отзыв положительный, с замечанием: - В автореферате не представлены результаты моделирования электрофизических свойств СВЧ-устройств на основе VO<sub>2</sub>, выполненные автором на основе численного моделирования с использованием программы ANSYS HFSS.

Это все отзывы.

### **Председатель:**

Итак, пожалуйста ответьте на замечания, но кратко, ладно?

### **Полозов В.И.:**

Чтобы люди не теряли нить, буду идти по отзывам на автореферат.

Отзыв института химии растворов, первое замечание. Согласен, естественно, я должен был проиндексировать изображения для того, чтобы всем было проще. По второму замечанию: действительно, в автореферате нет результатов временных измерений, но они есть в диссертации и были доложены только что. По третьему замечанию: я бы хотел бы привести рентгенограмму, полученную нами на дифрактометре Rigaku SmartLab это современный хороший дифрактометр, который позволяет проследить многие тонкие моменты. Здесь приведены дифрактограммы для подложки из поликора и для плёнки диоксида ванадия на этой подложке до и после отжига. Даже в большем масштабе на этих данных никаких пиков, характеризующих VO<sub>2</sub> ни до отжига, ни после отжига не наблюдалось. Если говорить о рентгеновской дифракции, то это дифракция на кристаллографических плоскостях, потому, если мы имеем дело с поликристаллом, который существенно разориентирован, то, скорее всего, мы ничего не получим из этих дифрактограмм. По четвертому замечанию: здесь согласиться нельзя, потому что эта модель плёнки в свободном пространстве хорошо согласуется с экспериментом. У нас есть сопротивление плёнки, в качестве сопротивления плёнки взято поверхностное сопротивление, и некоторый импеданс подложки. Если мы, оценив это теоретически, потом сравним с измерениями, например, в прямоугольном волноводе, то увидим, что результаты хорошо сходятся. Таким образом, для такой геометрии эти результаты измерений имеют практическую ценность для использования устройства в качестве экрана. По пятому замечанию: вопрос не совсем понятен, поскольку вот этот рисунок и вот этот располагаются довольно далеко друг от друга и, действительно, они друг с другом никак не связаны. Соответственно, здесь тоже вопрос не совсем корректен, потому что геометрия, когда мы работаем с экранами, считалась отдельно, а геометрия, когда мы работали с копланарными волноводами, считалась отдельно. Это в автореферате достаточно чётко отражено. По шестому замечанию: в данном случае я, конечно, сам виноват, потому что в подписи к этому рисунку не указал, что что вот это вот картинка она изображена для плёнок уже после отжига. Здесь нас пленки, полученные в различных условиях, но отожженные в одинаковых условиях, и для них мы получаем такое вот изображение. В тексте автореферата это есть, но в подписи к этой картинке этого нет, что, видимо, и вызвало данный вопрос. Спасибо коллеге за то, что указал на эти недостатки.

МГУ, первое замечание: спасибо коллеге за данный вопрос, на самом деле очень хороший. Здесь, если кому-то интересно это изучить, то вот статья, откуда, скорее всего, он это взял. В этой статье рассматривается этот вопрос, но немного в другой геометрии, потому что в этой статье они синтезировали диоксид ванадия в пористом стекле и смотрели отдельные кристаллиты, которые не расположены на плёнке, а расположены немного по-другому. Но, тем не менее, действительно завершение этого замечания, оно абсолютно справедливое и существуют такие параметры отжига, которые обеспечивают минимальную ширину петли гистерезиса. В нашем случае это 720 градусов. Здесь можно видеть изменение ширины гистерезиса в зависимости от температуры.

ООО «Промтехсервис», по первому замечанию: это действительно моя ошибка, но будем считать, что это мы так число 13 пропустили так, чтобы всё лучше прошло. По второму замечанию: совершенно верно, кривые на рисунке действительно перепутаны. Если мы посмотрим на структуру копланарного волновода, то при 80°C включение становится металлическим, соответственно нахождения должен быть около 0 дБ.

АО «Регион», по первому замечанию: оценки быстродействия перехода не приведены, потому что мы не могли оценить настоящую скорость переключения. Всё, что мы могли сделать – это оценки сверху, а вот эти наносекунды, которые там должны быть, мы на нашей аппаратуре никак увидеть не можем. По второму замечанию: надписи на английском следовало перевести, принимается.

МИЭТ, по первому замечанию: оптимизация заключалась в том, что после процесса нанесения мы выполняли отжиг при различных условиях и, соответственно, оптимизация заключается в том, чтобы увеличить максимальную амплитуду перехода полупроводник-металл. Те условия, которые этому соответствовали, и были оптимальными. По второму замечанию: здесь вопрос, видимо, заключается в том, какая вообще оптимальная температура отжига, потому что это может быть, например, не 720 градусов, а 730 или 710. Можем ли мы это как-то оценить, кроме как многократно произвести отжиг при этих температурах – наверное нет. Разве что теоретически, но, наверное, мне это не под силу сейчас. Поэтому, естественно, мы шли по температуре отжига с некоторым шагом. Если этот шаг уменьшить, то можно оценить такую погрешность, но для этого потребуется очень много образцов, причём довольно больших, чтобы можно было проводить измерение. Это не совсем рационально, получается. А так, вообще вопрос хороший. По второму замечанию: согласен.

Отзыв из Саратовского национального исследовательского государственного университета. По первому замечанию: может быть, я недостаточно чётко написал, но на всех картинках, где присутствуют устройства, измерения этих устройств, присутствуют также и результаты их моделирования. Это вот рисунки 6 12 14 15, там везде отмечены те результаты, которые получились из моделирования. На рисунках это в подпись вынесено. Возможно, если бы я перевёл подписи на рисунках в соответствии с советами предыдущих коллег, то этого вопроса не возникло бы.

Отзыв ведущей организации. По первому замечанию: это связано с разориентированностью кристаллитов поликристаллической плёнки. Метод рентгеновской дифракции использовать невозможно. По второму замечанию: пожалуй, что верно. В диссертации действительно мало такой информации, она даётся в виде ссылок и просто текстовых вставок. Здесь я решил привести сравнение нашей частотно-селективной поверхности с существующими аналогами. Вот наши экспериментальные данные. Здесь вот этот пик коэффициента отражения, минимум, мы его можем сравнить с, во-первых, с классической статьёй 2008 года (классической, потому что её много цитируют) об управляемой ЧСП, но на рin-диодах. Мы видим, что у них коэффициент отражения находится выше -20 дБ. Вот таким образом за счёт того, что мы здесь не используем никакую систему для подведения напряжения к этим нашим переключаемым элементам, мы имеем возможность улучшить наши показатели по

коэффициенту отражения за счёт того, что мы греем это феном. И вот ещё одна статья, это уже российская разработка ИРЭ, который является у меня ведущей организацией. Здесь они использовали варакторы в качестве переключаемых элементов. Коэффициент прохождения у них -3 дБ, а это значит, что половина всего, что на эту структуру падает, отражается. Опять-таки, здесь мы выигрываем именно за счёт того, что не имеем паразитных отражений. По третьему замечанию: согласен, стоило более чётко прописать эти пункты. Если бегло посмотреть, то они похожи. Эти выводы я сюда вынес.

**Председатель:**

Согласитесь.

**Полозов В.И.:**

Ну да, соглашусь. По четвертому замечанию: согласен, в некоторых местах расшифровка аббревиатуры производилась гораздо раньше, чем они использовались, что и стало проблемой. На этом всё.

**Председатель:**

Спасибо. Ответы получены. Слово предоставляется официальному оппоненту, доктору химических наук, Каулю Андрею Рафаиловичу, Московский государственный университет, пожалуйста.

**Кауль А.Р.:**

Я буду в основном говорить о материаловедческой стороне вопроса.

*Зачитывает отзыв на работу и замечания (не стенографируется, отзыв Кауля А.Р. приложен к аттестационному делу)*

**Председатель:**

Спасибо большое, присаживайтесь. Вам предоставляется слово для ответа на замечания оппонента.

**Полозов В.И.:**

Спасибо, Андрей Рафаилович, за такие глубокие вопросы. По первому замечанию: хотелось бы сказать, что мы не очень хорошо контролируем парциальное давление кислорода и при нанесении и отсюда все наши проблемы. Если бы мы могли делать нанесение лучше и более точно, то, в принципе, могли бы получать плёнки с достаточно интенсивным переходом полупроводник-металл уже непосредственно после нанесения. В наших текущих работах, которые мы сейчас ведём, такое иногда получается, но это дело случая. Что же касается способа управления парциальным давлением, насколько я понимаю, этот способ предполагает, что мы должны наш образец поместить в некоторый объём с некоторым другим веществом, которое нам поможет контролировать это самое парциальное давление. И здесь дело в том, что поскольку мы хотим всё-таки отжигать плёнки достаточно большого размера, то у нас бы не получилось реализовать такой способ. Но вообще, мы бы с радостью попробовали, если бы знали как. Этот способ, который предлагается для получения более контролируемого, чем у нас есть, плёнок с высокой амплитудой перехода полупроводник-металл, отлично подошёл бы для применения в устройствах, используемых для переключения в копланарных волноводах. Это был мой ответ на первый вопрос. Что касается второго вопроса: действительно, при уменьшении температуры вследствие легирования или ещё чего-либо характеристики наших переходов существенно ухудшаются в смысле их практического применения. В этой работе температура перехода была снижена относительно

68С путём нанесения на другие подложки, например на кварц. В таком случае получается температура перехода около 50 градусов. При этом образуется огромный гистерезис, который мешает применять плёнку в качестве датчиков или других подобных устройств. Что же касается плёнок на поликоре, то действительно у нас получались образцы плёнок, у которых переход происходит при температуре около 45 градусов, но при этом существенно ухудшается амплитуда перехода. Здесь она составляет всего 2 порядка. Этот результат не был нашим целевым и получился в оптимизационном процессе. Эта конкретная плёнка отличается тем, что в какой-то момент мы начали дополнительное ионное ассистирование, мощность которого варьировалась. В одном из этих процессов получился такой результат, но он подробно не исследовался. Его на комбинационном рассеянии не изучали и поэтому я, к сожалению, не могу сказать, чем же он отличается от остальных плёнок. Таковы мои ответы на эти вопросы.

**Председатель:**

Спасибо. Я тогда дополнительно к вопросу Андрея Рафаиловича тоже задам вопрос. Ваш ответ на первый вопрос относительно парциального давления заключался в том, что вы бы с удовольствием. То есть в принципе это можно было бы сделать, но для этого надо существенно усложнить установки, правильно я понимаю?

**Полозов В.И.:**

Да, но вряд ли это возможно для установки, предназначенной для больших подложек.

**Председатель:**

Но в принципе можно было бы контролировать парциальное давление кислорода точно в таких больших установках, или нет?

**Полозов В.И.:**

Насчёт больших установок не знаю, но в маленьких объёмах можно.

**Председатель:**

В маленьких я понимаю, но я имею в виду в тех, которые нужны для напыления больших плёнок.

**Полозов В.И.:**

Не могу ответить на этот вопрос в данный момент.

**Председатель:**

Понятно, спасибо. Так, вы удовлетворены ответами?

**Кауль А.Р.:**

Да, вполне.

**Председатель:**

Спасибо. Слово предоставляется официальному оппоненту, доктору технических наук Криту Борису Львовичу.

**Крит Б.Л.:**

Добрый день, уважаемые коллеги, уважаемый председатель, члены совета. Благодарю вас за возможность высказать мнение об этой работе.

*Зачитывает отзыв на работу и замечания (не стенографируется, отзыв Крита Б.Л. приложен к аттестационному делу)*

**Председатель:**

Спасибо большое, вам слово предоставляется для ответа.

**Полозов В.И.:**

Большое спасибо, Борис Львович, за эти замечания. Действительно было бы очень интересно попробовать нанести покрытие из диоксида ванадия тем способом, который вы используете в вашей лаборатории. Я таких статей не видел, так что это было бы чем-то новым. Теперь перейдём к замечаниям. По первому замечанию: что касается ионно-лучевой эпитаксии, то здесь работа посвящена тому, чтобы получать плёнки на неэпитаксиальных подложках. Можно ли при помощи ионно-лучевой эпитаксии получать наэпитаксиальные плёнки? Наверное нет. Соответственно, здесь с направленностью этой работы был выбран метод именно магнетронного распыления. По второму замечанию: причины выбора определённых температур мы уже отметили. Что касается времени отжига – времени, при котором плёнки выдерживались при тех или иных температурах: здесь время также выбиралось путём оптимизации, мы точно так же проводили серии отжигов с разным временем выдержки. Получалось так, что при малых временах (5 минут, 10 минут) результат был очень незаметным в смысле перехода полупроводник-металл. Отчасти это связано с инерционностью нагревательной системы, которая использовалась для отжига – трубчатой печи, также поток аргона чистого через неё продувается, соответственно, было принято решение выдерживать плёнки в течение 15 минут, когда уже появляется какой-то результат и когда мы можем быть уверены, что температура плёнки соответствует температуре, которую мы видим на измерительном устройстве. Количество таких циклов также выбиралось путём выполнения серий экспериментов и было подобрано эмпирически. По третьему замечанию: наверное, самым точным методом оценки этих напряжений, которые по сути являются результатом растяжений материала вдоль его кристаллографических осей, была бы как раз рентгеновская дифракция, которая позволила бы нам определить конкретную цифру этих самых растяжений. Но поскольку этот метод нам не подошёл в связи с указанными причинами, был выбран метод комбинационного рассеяния как единственный возможный. Он заключался, по сути, в анализе литературы и сравнении наших данных с литературными. Тут нас выручает то, что ванадий изучается давно и данных как по ненапряжённому ванадию, как по напряжённому ванадию, и по легированному ванадию полно и мы можем просто взять много статей и посмотреть, что происходит, и на этом основании сделать соответствующие выводы. Естественно, это качественная оценка, а не количественная. По четвертому замечанию: для численного моделирования использовались данные по плёнкам, в частности, их поверхностное сопротивление, полученное при помощи оптимизации этих самых технологических подходов. В этом связь и заключается, что мы наши экспериментальные данные с характеристиками плёнок подставляли вот в эти самые модели, которые использовались для расчёта тех или иных топологий. У меня всё, спасибо.

**Председатель:**

Так, коллеги, переходим к дискуссии, дискуссии присутствующих. Кто-нибудь хочет выступить? Прошу, Александр Михайлович Мерзликин.

**Мерзликин А.М.:**

Мне очень радостно, что у нас студент, выпускник нашей кафедры пришёл к тому, что он у нас защищает кандидатскую степень. А что касается его работы, хотел отметить очень важный результат. Дело в том, что сейчас диоксидом ванадия занимается огромное число групп в мире. Эта тематика находится прямо на острие. Она когда-то давно там лет 40 назад, даже больше, в советское время было тоже довольно известна, потом она затихла на некоторое время, а сейчас стала такой популярной, причём не только у нас в стране, но и так за рубежом. Количество работ исчисляется сотнями ежегодно, которые посвящены именно диоксиду ванадия и другим переходным металлам с переходом металл-диэлектрик. У нас в стране также очень много групп занимается этим материалом. Можно отметить институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН. Они занимаются, в основном, монокристаллическим диоксидом ванадия. У нас ещё в ИФТТ в Черноголовке, они тоже пытаются заниматься, но большинство работ посвящено либо кристаллическому диоксиду и там есть вопросы в применении тонких плёнок из монокристалла, потому что это проблемы с напряжениями, проблемы с разрушением, проблемы с количеством переключений, которое может достичь устройство. С другой стороны, пытаются также пылить частично аморфные плёнки, например в Черноголовке, но у них не получается. Недавно присутствовал на большом докладе. Самое большое, что у них получилось – это один порядок получить отношение сопротивлений при переходе, что, естественно, для большинства практических приложений не вполне годно. Они хотят делать собственные устройства, у них есть большая программа, я так понимаю, что большое финансирование выделено на это дело.

Очень приятно, что в этой очень конкурентной борьбе за этот материал оказалось, что мы в лице нашего замечательного сотрудника смогли получить абсолютно передовой результат. Мы получили материал, который, с одной стороны, имеет огромное количество переключений, то есть, у нас больше, чем  $10^4$  отношение проводимостей до и после перехода. И при этом можем получить гигантское количество циклов. Эти два параметра являются ключевыми. Практические применения этого будут просто огромными. Я предлагаю голосовать за эту диссертацию, потому что считаю её чрезвычайно важной как в прикладном значении, так и в научном. Спасибо.

**Председатель:**

Ещё кто-нибудь хочет выступить? Андрей Карлович, прошу вас. Давайте с места.

**Сарычев А.К.:**

По-моему, диссертация замечательная. Она представлена на соискание кандидата технических наук и Александр Михайлович очень правильно рассказал о тех замечательных применениях, которые это может иметь. Но я хочу обратить внимание собравшихся, что помимо всего прочего полученные результаты и этот самый объект является интересным с фундаментальной точки зрения. Сейчас идут тысячи работ по ванадию. Может быть, не все знают, но во введении большинства из них пишется, что ванадий может прийти на смену кремнию, так что вообще вся электроника будущего будет строиться на ванадии, потому что таким образом удастся преодолеть тепловой барьер. При всё этом человечество не понимает точную природу этого перехода. До сих пор идут споры. Здесь присутствует уважаемый профессор Рахманов, который тоже внёс вклад в это. До сих пор идут дискуссии, что первично, есть там Хаббард, нет там Хаббарда, насколько корреляции электронов важны или не важны. С этой точки зрения полученные результаты они интересны с научной точки зрения, потому что при прикладывании вот такого циклирования на микромасштабе может позволить в какой-то степени судить о природе этого перехода. Диссертация, на мой взгляд, может иметь помимо чисто технического может иметь важное фундаментальное значение.

**Председатель:**

Спасибо, Андрей Карлович. Я понимаю, что тема понравилась присутствующим, можем ещё много об этом говорить, но мне кажется, что вопрос достаточно ясен. Если нет желающих среди присутствующих выступить против, то может быть мы прекратим дискуссию на эту тему и перейдём к голосованию. Ещё раз обращаюсь к залу: хочет ли кто-нибудь выступить? Нет. Тогда нам нужно ещё услышать последнее слово Виктора Ивановича.

**Полозов В.И.:**

Всем большое спасибо, что нашли время послушать. Хотел бы сказать, что поскольку здесь используется много разных методов исследования, то вышло так, что практически все лаборатории института в этой работе поучаствовали. К кому бы я не обращался за помощью, все оказывали мне всемерное содействие. Я бы хотел отдельно поблагодарить Киселя Владимира Николаевича и Баскова Константина Михайловича на помощь в разработке частотно-селективных поверхностей, Рахманова Александра Львовича, который помог с анализом перехода полупроводник-металл, Дмитрия Петрова и лабораторию номер 5, в которой было выполнено довольно много высокочастотных измерений. Конечно, хотел бы поблагодарить ту лабораторию, в которую я пришёл ещё студентом. Лабораторию 4 под руководством Рыжикова Ильи Анатольевича, и сотрудников, которые научили меня практически всему, что я знаю. В частности, Алексееву Людмилу Алексеевну, которая научила меня делать фотолитографию и благодаря которой получились все устройства, которые тут представлены. Маклакова Сергея Александровича, которые выполнил большую часть работ по нанесению, ну и конечно своего руководителя Сергея Сергеевича Маклаков, который постоянно оказывал необходимую мне помощь.

**Председатель:**

Вы сделаете ошибку, если не поблагодарите оппонентов.

**Полозов В.И.:**

Оппонентов благодарю за глубокие вопросы, которые позволили взглянуть на эту работу немного по-другому и, возможно, получить ещё более интересные результаты в этой области.

**Председатель:**

Теперь голосование. Прошу.

**Учёный секретарь:**

Коллеги! Заседание проходит в комбинированном очно-дистанционном режиме, голосование проводится с использованием телекоммуникационным систем. То есть все присутствующие члены диссовета входят под своим логином и паролем на сайт ОИВТ РАН (jiht.ru), в раздел Научная деятельность – диссертационные совета – голосование совета 99.1.044.02.

Просьба к тем, кто заранее не авторизовался на сайте с помощью телефона, проследовать в центр зала и проголосовать с помощью компьютера.

**Председатель:**

Просьба проголосовать, коллеги.

*(Проводится процедура голосования на сайте ОИВТ РАН)*

**Председатель:**

Коллеги, присаживайтесь пожалуйста.



**Учёный секретарь:**

Можем двигаться к завершению. Результаты голосования: всего присутствовало 16 членов совета, из них очно 14 и 2 онлайн. Проголосовали все - за, против - нет, недействительных - нет.

**Председатель:**

Нам надо утвердить протокол голосования. Кто за прошу поднять руки. Спасибо. Против? Воздержался? Утверждено единогласно. Поскольку мы это сделали, давайте поздравим диссертанта.

**Председатель:**

Коллеги! У вас на руках проект заключения. Есть замечания по проекту заключения? Посмотрите внимательно.

*(Идёт обсуждение проекта заключения)*

**Председатель:**

Кто за то, чтоб утвердить проект заключения? Против? Воздержался? Единогласно. Принято.  
*(Проект заключения с учётом высказанных замечаний принят единогласно)*

**Председатель:**

Итак, мы проголосовали за проект заключения и на этом закончилась процедура по защите. Ещё раз большое спасибо нашим оппонентам за то, что они нашли время и приехали в такую даль. Спасибо вам большое.

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 тонкопленочном  $VO_2$  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 тонкопленочных 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., Zezyulina, 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 VO<sub>2</sub>. 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 VO<sub>2</sub>».

- На рисунке 5 (средняя картина) показано отношение сопротивлений плёнки VO<sub>2</sub> при 30 и 60 °С. При параметрах: концентрация O<sub>2</sub> ≈ 11%, напряжение смещения подложки ≈ 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<sub>2</sub>, 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 VO<sub>2</sub>, 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 ultra-thin 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 тонкопленочных 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 пленок меди // Оптика и спектрскоп. 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 VO<sub>2</sub> 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 VO<sub>2</sub>. Амплитуда изменения КП может быть увеличена до 13 дБ при уменьшении широкополосности управляемых частотно-селективных поверхностей.

- Разработан способ применения плёнок VO<sub>2</sub> 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 VO<sub>2</sub> 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 VO<sub>2</sub>, получаемых при эпитаксиальном росте. Тонкие плёнки VO<sub>2</sub> обладают ППМ с отношением сопротивлений при 30 °С и 80 °С до 10<sup>4</sup> раз и абсолютными значениями поверхностного сопротивления в полупроводниковом и металлическом состояниях 10<sup>6</sup> – 10<sup>4</sup> Ом/кв и 10<sup>3</sup> – 10<sup>2</sup> Ом/кв соответственно.

- Установлено, что релаксация внутренних напряжений в плёнке, приводящая к росту амплитуды ППМ до значений до 10<sup>4</sup> 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 VO<sub>2</sub> 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 VO<sub>2</sub> путём их высокотемпературной и ионной обработки, обеспечивающая параметры перехода полупроводник-металл (отношение сопротивлений в различных состояниях и величина гистерезиса), соответствующие тонким плёнкам VO<sub>2</sub>, полученным при помощи эпитаксиального роста.

– Экспериментально показан способ создания активного управляемого экрана для СВЧ на основе тонких плёнок VO<sub>2</sub>, 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.

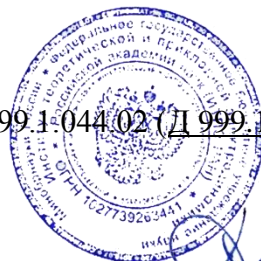
Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация Полозова В.И. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г.

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

Ученый секретарь диссертационного совета 99.1.044.02 (Д 999.138.02)  
д.ф.-м.н., доцент



Лагарьков А.Н.

Дорофеенко А.В.

22.12.2022г.