



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

д.ф.-м.н., проф., академик Никитов С.А.

_____ 2022 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации

на диссертационную работу Полозова Виктора Ивановича

«Тонкие плёнки оксидов ванадия для электродинамических приложений»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Диссертационная работа Полозова В.И. посвящена получению плёнок оксида ванадия (IV) с интенсивным фазовым переходом полупроводник-металл, определению взаимосвязи между строением и электрофизическими свойствами тонких плёнок оксида ванадия (IV) и изучению возможности применения тонких плёнок оксидов ванадия в качестве активных элементов управляемых устройств СВЧ диапазона. Тематика работы соответствует п. 7 паспорта специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки: разработка новых технологических процессов и устройств с использованием, электроразрядных, пучковых, плазменных, фотоэлектронных и электромагнитных, в том числе лазерных, методов и подходов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 210 наименований. В конце каждой главы приведён вывод, содержащий основные результаты главы. Общий объем работы составляет 137 страниц, включая 62 рисунка и 8 таблиц. **Во введении** обоснована актуальность темы работы, поставлены цели работы, описаны новизна и практическая значимость проводимых исследований.

В первой главе представлен литературный обзор, состоящий из 9 разделов и обосновывающий постановку решаемых задач. В первом разделе рассмотрены электрофизические свойства различных оксидов ванадия. Во втором – существующие теории механизмов фазового перехода полупроводник-металл. Третий раздел посвящен описанию перехода полупроводник-металл в тонких плёнках диоксида ванадия.

Четвертый – применению тонких плёнок VO_2 . Особое внимание уделено применениям плёнок в устройствах с управляемым частотным откликом для СВЧ диапазона. В пятом разделе рассмотрены методы получения плёнок VO_2 , продемонстрированы особенности фазового перехода в плёнках, полученных различными методами. В шестом разделе подробно описаны процессы, происходящие при синтезе тонких плёнок методом магнетронного распыления. Описано влияние условий магнетронного распыления на свойства синтезируемых плёнок. В седьмом разделе приводится описание влияния высокотемпературной обработки на тонкие плёнки VO_2 . В разделе 8 рассмотрены работы, посвященные созданию тонкоплёночных металлических структур на плёнке VO_2 методами фотолитографии. В разделе 9 на основе обзора литературных данных поставлены решаемые в диссертационной работе цели и задачи.

Вторая глава посвящена материалам и методам и состоит из шести разделов. Первый раздел посвящён особенностям синтеза тонких плёнок VO_2 методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления. Указаны диапазоны, в которых варьировались параметры процесса синтеза. Во втором разделе выполнено описание установки, использованной для проведения высокотемпературной обработки. Третий раздел посвящён методике измерения поверхностного сопротивления полученных плёнок. В четвёртом разделе перечислены методы исследования морфологии, кристаллической структуры и фазового состава плёнок. Пятый раздел содержит описание методики измерения свойств плёнок и устройств на их основе в СВЧ диапазоне. В шестом разделе приводятся сведения об обработке плёнок методами фотолитографии для создания экспериментальных образцов.

Третья глава состоит из двух разделов, посвященных методам численного моделирования активных устройств с интегрированными переключаемыми тонкоплёночными элементами VO_2 : управляемых СВЧ экранов и СВЧ переключателей, выполненных в копланарной геометрии. Представлена процедура моделирования, по результатам которого определена зависимость частотного отклика каждого устройства от его структуры и топологии. С использованием этой зависимости разработаны активные СВЧ устройства, позволяющие наиболее эффективно применять явление перехода полупроводник-металл в синтезированных плёнках VO_2 для управления частотным откликом.

Четвёртая глава посвящена обсуждению процесса и результатов синтеза тонких плёнок VO_2 . Она содержит 9 разделов, первый из которых посвящен нанесению тонких

плёнок методом ВЧ реактивного магнетронного распыления, второй – выбору параметров высокотемпературной фазообразующей обработке плёнок. В третьем и четвертом разделах рассматриваются особенности нанесения плёнок на различные подложки с использованием и без использования ионного ассистирования. В разделах 5, 6 и 7 рассмотрены результаты высокотемпературной обработки плёнок, выявлены корреляции между структурой полученных плёнок и их электрофизическими свойствами, в частности, параметрами фазового перехода полупроводник-металл. В восьмом разделе продемонстрированы возможности инициации фазового перехода при помощи нагрева плёнок электрическим током. В девятом разделе изложены результаты главы.

В пятой главе, состоящей из четырёх разделов, продемонстрированы возможности применения тонких плёнок VO_2 в качестве активных элементов переключаемых устройств СВЧ диапазона. Первый раздел посвящён исследованию коэффициентов прохождения и отражения сплошных плёнок VO_2 на поликристаллическом Al_2O_3 . Второй раздел посвящён исследованию управляемой частотно-селективной поверхности, работающей в диапазоне 1 – 20 ГГц, полученной на основе плёнок VO_2 . В третьем разделе продемонстрирован подход, позволяющий осуществлять синтез плёнок и устройств на их основе в едином вакуумном цикле. В четвертом разделе приведены результаты измерений разработанного СВЧ переключателя для копланарных волноводов. Показано, что амплитуда изменения коэффициента прохождения данного устройства, связанная с переходом полупроводник-металл, превышает 20 дБ на частотах до 5 ГГц.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Тема работы **актуальна** и имеет как научное, так и прикладное значение. Научное значение проведенных исследований связано 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.

Выводы, сделанные автором из полученных данных, представляются вполне обоснованными и четко сформулированными. Все полученные результаты являются **новыми и оригинальными** и вносят существенный вклад в понимание корреляций структура-свойства тонких плёнок VO_2 , а также расширяют возможности их дальнейшего

исследования и применения. Это подтверждается достаточно высоким цитированием в мировой научно-технической литературе статей, в которых эти результаты опубликованы. Всего по теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, 5 из которых входят в международные базы данных Scopus и Web of Science.

Практическая значимость. Полученные данные могут быть использованы для создания умных материалов, позволяющих получить определенный отклик на изменение внешних условий. Эти материалы 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. Разработанная методика может быть полезна организациям, занимающимся изготовлением активных СВЧ устройств с управляемым частотным откликом, таким как Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ", АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга и др.

Достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечена использованием стандартных методов измерений, оценкой погрешностей, хорошим соответствием теоретических и экспериментальных данных, а также соответствием экспериментальных результатов, полученных с помощью разных методов измерений.

В диссертации есть ряд опечаток и стилистических неточностей, но в целом она написана грамотно и аккуратно оформлена.

При рассмотрении данной работы возникают некоторые вопросы и замечания, среди которых можно отметить следующие.

1. Наличие VO_2 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.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., (ред.07.06.2021г.) а ее автор Полозов В.И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа обсуждена и одобрена на заседании научно-квалификационного семинара ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по направлению «Физика твердого тела, магнитных и акустических явлений» 10.11.2022, протокол № 1.

Отзыв составил д.ф.-м.н. Овсянников Г.А.

Председатель научно-квалификационного семинара по направлению «Физика твердого тела, магнитных и акустических явлений» д.ф.-м.н., профессор



В.Г. Шавров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7, тел.: +7 (495) 629-3574, www.cplire.ru, e-mail: ire@cplire.ru

Подпись Шаврова В.Г. заверено



ЗАВЕДУЮЩИЙ
ОТДЕЛОМ КАДРОВ
Е.В. ЧИЖОВА

