

ОТЗЫВ

официального оппонента

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, исследованию и разработке методов применения тонких плёнок диоксида ванадия (VO_2) с интенсивным фазовым переходом полупроводник-металл в качестве активных элементов управляемых устройств СВЧ диапазона.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 210 ссылок. Общий объём 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 главе 1 представлен литературный обзор, состоящий из 9 разделов. Последовательно рассмотрены электрофизические свойства различных оксидов ванадия, существующие подходы к описанию механизмов фазового перехода полупроводник-металл в целом и в тонких плёнках диоксида ванадия, в частности. Описаны сферы применения тонких плёнок VO_2 . Отдельно выделены прецеденты использования плёнок в перестраиваемых устройствах СВЧ диапазона. Подробно описаны различные методы получения плёнок VO_2 и продемонстрированы особенности фазового перехода, зависящие от метода и условий синтеза. Описаны процессы, происходящие при синтезе тонких плёнок методом магнетронного распыления, а также рассмотрено влияние высокотемпературной обработки на характеристики тонких плёнок VO_2 . В предпоследнем разделе рассматриваются работы, посвященные созданию тонкоплёночных металлических структур на плёнке VO_2 при помощи фотолитографии. В последнем разделе на основе обзора

литературы сформулированы решаемые в диссертационной работе цели и задачи.

Глава 2 посвящена описанию применённых в работе методик синтеза и исследования формируемых тонких плёнок VO_2 , а также исследования устройств, полученных на их основе. Первый раздел главы посвящён напылению тонких плёнок VO_2 методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления, объяснён выбор диапазона, в котором происходило изменение параметров процесса. Во втором разделе описана установка, использованная для проведения высокотемпературной обработки в нейтральной атмосфере. Остальные разделы содержат информацию о применённых методах исследования полученных образцов, в том числе о методике измерения поверхностного сопротивления плёнок, способах исследования их морфологии, кристаллической структуры и фазового состава, методике измерений свойств образцов в СВЧ диапазоне. В последнем разделе продемонстрирована методика формирования структур плёнок методами фотолитографии.

Глава 3 посвящена численному моделированию активных устройств с интегрированными элементами VO_2 . Представлена процедура моделирования изменения частотного отклика управляемых СВЧ экранов и микрополосковых СВЧ переключателей в процессе фазового перехода полупроводник-металл. Определены геометрические параметры и структура устройств, подходящих для демонстрации возможностей применения тонких плёнок VO_2 в приборах СВЧ диапазона.

Глава 4 содержит описание и обсуждение результатов нанесения и высокотемпературной обработки тонких плёнок VO_2 . Определена зависимость электрофизических свойств плёнок, а также их фазового состава от условий нанесения: концентрации кислорода, электрического смещения на подложке и температуры подложки. Рассмотрено влияние процесса ионного ассистирования, позволяющего существенно улучшить характеристики перехода. Представлены результаты нанесения плёнок на различные типы

подложек. Далее рассмотрены результаты отжига плёнок, и обнаружена корреляция между структурой полученных плёнок и параметрами фазового перехода полупроводник-металл. Продемонстрирована возможность управления фазовым составом и морфологией поверхности плёнок при помощи высокотемпературной обработки. Показаны особенности инициации фазового перехода при помощи Джоулева нагрева. В последнем разделе сформулированы результаты, полученные в данной главе.

Глава 5 демонстрирует возможности применения тонких поликристаллических плёнок VO_2 большой площади, полученных в данной работе, в качестве элементов, обеспечивающих управление частотным откликом СВЧ экранов и микрополосковых устройств. Приведён анализ коэффициентов отражения и прохождения плёнки на частотах до 20 ГГц. Исследована разработанная управляемая частотно-селективная поверхность и описан метод оптимизации её структуры в целях увеличения диапазона изменения частотного отклика вследствие фазового перехода в тонких плёнках. Глава завершается демонстрацией результатов СВЧ измерений переключателя для микрополосковых устройств.

Раздел **Заключение** содержит основные выводы по результатам работы.

Актуальность диссертационной работы определяется перспективами применения полученного материала для различных технических приложений в СВЧ диапазоне. К таким приложениям относятся многоканальные быстродействующие СВЧ переключатели, перестраиваемые резонаторы, устройства, решающие задачи обеспечения электромагнитной совместимости. В настоящее время плёнки VO_2 редко используются в качестве активных элементов перечисленных выше устройств СВЧ диапазона, что связано со слабым развитием неэпитаксиальных методов синтеза плёнок VO_2 , позволяющих получать плёнку с высоким контрастом сопротивлений (более 10^3 раз) при переходе полупроводник-металл на поликристаллических подложках низкой стоимости и большой площади. Представленная работа

содержит описание такого метода синтеза, а также возможностей применения полученных плёнок, что и обуславливает её актуальность.

Все полученные результаты обладают **новизной и оригинальностью**. Полученный метод синтеза плёнок VO_2 , а также достаточно подробно описанные зависимости свойств фазового перехода в тонких плёнках в зависимости от их структуры, расширяют возможности применения VO_2 в СВЧ диапазоне. Востребованность полученных результатов 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 в разработке материалов и структур, позволяющих управлять частотным откликом пространственных и планарных СВЧ устройств в широких пределах. Полученные устройства могут быть использованы для решения практических задач промышленного производства в области телекоммуникаций и электромагнитной защиты. Методика может быть полезна учреждениям, занимающимся разработкой активных СВЧ устройств и СВЧ материалов с управляемыми свойствами, например АО НПП «Исток», ОАО «Завод магнетон», АО ЦКБА и др.

Достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечена использованием стандартных измерительных методик, соответствием теоретических и экспериментальных данных, а также согласованностью результатов, полученных разными методами измерений и различными научными группами.

Тем не менее, текст диссертации содержит ряд стилистических, грамматических ошибок и опечаток. Кроме того, можно сделать следующие **замечания:**

1. При анализе существующих методов получения тонких плёнок VO_2 (раздел 1.5) автор незаслуженно обошёл вниманием такие эффективные

процессы как ионно-лучевая эпитаксия и ионно-кластерное осаждение. В выводах по главе также недостаточно системно и чётко объяснён выбор высокочастотного реактивного магнетронного распыления в качестве основного метода.

2. В разделе 2.2. было бы уместно привести обоснование используемых параметров циклического отжига при проведении фазообразующей термической обработки.

3. Известно, и это отмечено в рукописи, что большинство свойств материалов (включая обратимый фазовый переход полупроводник-металл) зависят от внутренних напряжений в плёнке. В этом смысле ощущается явная нехватка оценок степени внутренних напряжений как в самой плёнке, так и на границе с подложкой.

4. На мой взгляд, необходимо конкретизировать взаимосвязь результатов численного моделирования экранов и микрополосковых устройств (глава 3) с разработанными технологическими подходами формирования и дополнительной обработки плёнок VO_2 (главы 4, 5).

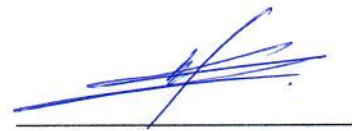
Следует отметить, что все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы.

Заключение. Материалы, содержащиеся в рукописи и автореферате, свидетельствуют о том, что диссертация Полозова Виктора Ивановича посвящена актуальной тематике, выполнена на достаточно высоком теоретическом и экспериментальном уровне, а полученные результаты обладают признаками научной новизны и практической значимости. В работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых способно внести значительный вклад в развитие ряда отраслей промышленности. Обозначенные цель и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту доказаны.

Диссертационная работа Полозова Виктора Ивановича «Тонкие плёнки оксидов ванадия для электродинамических приложений» отвечает

требованиям, установленным п.п. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении научных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), в части критериев, предъявляемых к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, соответствует паспорту научной специальности 1.3.13 «Электрофизика, электрофизические установки». Соискатель Полозов Виктор Иванович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.13 «Электрофизика, электрофизические установки».

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники



Борис Львович Крит

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, www.mai.ru,
тел.: +7 (499) 158-92-09, +7 (916) 677-26-08
e-mail: bkrit@mail.ru

*Поздравляю Б.Л.Крима с заслуженным
званием Героя России за работу с
перехватом*

