

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77: 621.793

НГУЕН
Динь Туен

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ
ДЛЯ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ПРИЕМНИКОВ
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2021

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель: **Голосов Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Рогачев Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор, директор Государственного научного учреждения «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси»

Латушкина Светлана Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией вакуумно-плазменных покрытий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Защита диссертации состоится «25» ноября 2021 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «___» октября 2021 г.

И.о. ученого секретаря совета
по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор



В.Л. Ланин

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно ведутся исследования, направленные на разработку интегральных неохлаждаемых микроболометрических приемников инфракрасного (ИК) излучения, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента. Основным преимуществом таких приемников является высокая чувствительность и отсутствие системы криогенного охлаждения, что позволяет создавать на основе микроболометров ИК приборы, имеющие малые габариты, вес, энергопотребление и низкую стоимость. Это открывает возможность разработки на базе микроболометров приборов не только для военной техники, но и для применения в промышленности, охранных системах и медицине. Работа микроболометра основана на изменении электрического сопротивления термочувствительного материала при поглощении падающего ИК излучения, которое преобразуется в напряжение. Термочувствительный материал должен обладать высоким значением температурного коэффициента сопротивления (ТКС), малыми значениями удельного сопротивления, теплопроводности и шумов. Также важным вопросом является возможность применения данного материала в стандартных технологических процессах изготовления полупроводниковых интегральных микросхем, что позволяет формировать микроболометрическую матрицу и мультиплексор на одном кристалле. Одним из таких материалов является оксид ванадия VO_x , который обладает наилучшим сочетанием требуемых свойств. Однако широкое использование оксида ванадия сдерживается сложностью получения пленок с заданными характеристиками. Оксид ванадия имеет более двадцати разных оксидных состояний, и только некоторые из них обладают требуемыми свойствами. Формирование однофазных пленок VO_x является сложным процессом из-за узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих оптимальность и стабильность характеристик оксида. Одним из наиболее перспективных методов формирования пленок оксида ванадия является реактивное магнетронное распыление. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения и химическую чистоту наносимых слоев, позволяет в широких пределах варьировать состав пленок. Однако до настоящего времени практически отсутствуют публикации, где для нанесения пленок VO_x используется данный метод и анализируются болометрические характеристики пленок с точки зрения их использования в качестве термочувствительных слоев микроболометров. Таким образом, разработка метода реактивного магнетронного нанесения тонких пленок оксида ванадия с высокими эксплуатационными характеристиками, методов контроля и управления их физическими свойствами является актуальной задачей, которая требует решения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в рамках следующих научно-исследовательских проектов: ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» задание 3.3.07 «Разработка физико-технических основ формирования сверхтонких пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью для использования в качестве подзатворного диэлектрика КМОП структур» (2019–2020 гг., № ГР 20191719), хозяйственных договоров на выполнение НИР № 19-1016 «Исследование электрофизических характеристик пленок оксида ванадия, формируемых методом реактивного магнетронного напыления» (2019 г., № ГР 20191055), № 19-1075Б «Разработка и исследование технологических процессов нанесения контактно-барьерных и сегнетоэлектрических материалов конденсаторных структур перспективной энергонезависимой памяти методами ВЧ реактивного магнетронного напыления и реактивного магнетронного напыления на постоянном токе» (2019–2020 гг. № ГР 20191779) (заказчик – ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, РБ). Тема работы соответствует п. 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190 и п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156.

Цель и задачи исследований

Целью исследования является установление закономерностей и разработка метода формирования тонких пленок оксида ванадия высоковакуумным импульсным реактивным магнетронным распылением, методов контроля и управления составом, структурой, электрофизическими свойствами пленок, которые определяют возможность их использования в качестве активных слоев неохлаждаемых микроболометрических приемников излучения.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

– исследовать влияние параметров процесса высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления и последующего отжига на структурно-фазовые и электрофизические характеристики пленок VO_x ;

- разработать методики формирования пленок VO_x с высокой воспроизводимостью электрофизических характеристик;
- разработать методики определения электрофизических характеристик термочувствительных структур на основе пленок оксида ванадия;
- провести экспериментальные исследования процессов формирования термочувствительных структур на основе пленок оксида ванадия, их физических свойств и показать возможность применения структур в качестве неохлаждаемых микроболометрических приемников излучения;
- разработать структуру ячейки микроболометрической матрицы на основе пленки оксида ванадия.

Научная новизна

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- установлены закономерности высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени в среде Ar/O₂ газов. Показано, что при использовании для распыления биполярного асимметричного импульсного тока (частота импульсов $F = 10$ кГц, амплитуда положительного импульса $U^+ = 25$ В, длительность $\tau = 3$ мкс) при давлении в камере менее 0,06 Па, напряжение разряда и интенсивность контрольных линий оптического излучения плазмы VI (437,92 нм), ArI (750,39 нм) и OI (777,42 нм) при изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов (Γ_{O_2}) от 0 до 100 % имеют однозначную зависимость от Γ_{O_2} , что позволяет обеспечить воспроизводимость процесса нанесения пленок VO_x во всем диапазоне концентраций кислорода;
- установлены зависимости структурно-фазовых и электрофизических характеристик (ТКС, удельного сопротивления ρ , ширины запрещенной зоны E_g) пленок VO_x от параметров процесса реактивного магнетронного распыления. Показано, что при реактивном магнетронном распылении формируются аморфные пленки VO_x , которые представляют собой смесь промежуточных оксидов, а свойства пленок в первую очередь определяются концентрацией кислорода в Ar/O₂ смеси газов в процессе нанесения. При $\Gamma_{O_2} = 17 - 25$ % получены пленки VO_x с $\rho = (0,6 - 4,0) \times 10^{-2}$ Ом×м, ТКС = 2,2 – 2,3 %/°С и $E_g = 3,7 - 3,78$ эВ;
- определены закономерности изменения характеристик пленок VO_x от параметров процесса отжига в атмосфере O₂ (давления, температуры и времени отжига). Установлено, что при отжиге пленок VO_x при давлении 0,002 – 0,9 Па структура пленок остается аморфной. При увеличении температуры происходит практически линейное уменьшение ТКС и удельного сопротивления пленок, что позволяет точно контролировать процесс отжига.

При температуре 300 °С и давлении 0,04 Па воспроизводимо формируются аморфные пленки VO_x с $\rho = 0,01 - 0,1 \text{ Ом}\times\text{м}$ и $\text{ТКС} = 2,0 - 2,5 \text{ \%}/^\circ\text{С}$;

– установлены зависимости влияния материала и параметров процесса нанесения контактов на удельное контактное сопротивление ρ_c , вольтамперные характеристики (ВАХ), ТКС и температурные зависимости сопротивления $R(T)$ термочувствительных структур на основе пленок оксида ванадия. Показано, что при металлизации без предварительной ионной очистки ВАХ и зависимости $R(L)$ полученных структур нелинейны и несимметричны, что свидетельствует о наличии в контактах барьеров Шоттки. Нелинейность ВАХ и зависимостей $R(L)$ зависит от удельного сопротивления пленки VO_x . Ионная очистка пленки VO_x позволяет значительно понизить ρ_c и улучшить линейность ВАХ структур. Наиболее линейные ВАХ получены для Ti контактов. Установлено, что ρ_c структур VO_x/Ti зависит от ρ пленки VO_x , и при высоких значениях удельного сопротивления пленки (0,01 – 0,1 Ом×м) ВАХ терморезистивных имеют вентильность ($B = 1,1 - 1,36$) и ρ_c может достигать значений $0,1 \text{ Ом}\times\text{м}^2$;

– предложена структура ячейки микроболометрической матрицы, где термочувствительный элемент на основе пленки VO_x формируется после создания слоя Ti металлизации, что обеспечивает формирование омических контактов Ti/VO_x и исключает изменение удельного сопротивления и ТКС пленок VO_x при формировании топологического рисунка металлизации.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленные зависимости напряжения разряда, интенсивности контрольных линий оптического излучения плазмы VI (437,92 нм), ArI (750,39 нм) и OI (777,42 нм) и скорости нанесения пленок VO_x от концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов при высоковакуумном реактивном магнетронном распылении V мишени, позволяющие при давлении в камере менее 0,06 Па и импульсном питании магнетрона ($F = 10 \text{ кГц}$, $U^+ = 25 \text{ В}$ и $\tau = 3 \text{ мкс}$) предотвратить формирование дуг на поверхности мишени, устранить гистерезис изменения напряжения разряда и интенсивности контрольных линий оптического излучения плазмы при изменении Γ_{O_2} и обеспечить воспроизводимость свойств пленок VO_x в диапазоне концентраций кислорода от 0 до 100 %.

2. Методика воспроизводимого формирования пленок VO_x импульсным магнетронным распылением V мишени в Ar/O_2 смеси газов при давлении в камере менее 0,06 Па и поддержании заданного соотношения потоков Ag и O_2 рабочих газов посредством контроля отношения интенсивности контрольных линий оптического излучения VI и OI, обеспечивающая при нанесении на вращающуюся подложку диаметром 100 мм неравномерность толщины пленки

не более $\pm 2,4$ %, разброс удельного сопротивления в пределах одной подложки не более $\pm 2,5$ % и партии подложек не более 8,0 %.

3. Закономерности изменения удельного сопротивления, ТКС, ширины запрещенной зоны пленок VO_x от параметров процесса реактивного магнетронного распыления и последующего отжига, которые показывают, что при нанесении пленок при $\Gamma_{\text{O}_2} = 17 - 25$ % и отжиге в атмосфере O_2 при давлении 0,04 Па и температуре 300 °С воспроизводимо формируются аморфные пленки VO_x с $\rho = 0,01 - 0,1$ Ом \times м и ТКС = 2,0 – 2,5 %/°С, что обеспечивает возможность их использования в качестве термочувствительных слоев неохлаждаемых микроболометрических приемников излучения.

4. Методика формирования терморезистивных структур на основе пленок VO_x , включающая магнетронное нанесение Ti контактов толщиной 100 нм, ионно-лучевую очистку поверхности контактов ионами Ar^+ при энергии ионов 700 эВ и токе разряда 70 мА, реактивное магнетронное нанесение пленок VO_x и отжиг структур в атмосфере O_2 при давлении 0,04 Па, что обеспечивает формирование омических контактов Ti/VO_x с удельным сопротивлением $10^{-4} - 10^{-1}$ Ом \times м² и исключает изменение удельного сопротивления и ТКС пленок VO_x при формировании топологического рисунка металлизации.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в непосредственном участии в подготовке и проведении экспериментов, анализе, интерпретации полученных результатов. Автором сформулированы, исследованы и разработаны выносимые на защиту методики и закономерности. Определение цели и задач работы, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводилось совместно с научным руководителем – канд. техн. наук, доцентом Д.А. Голосовым. В совместно опубликованных работах автор принимал непосредственное участие в исследованиях, интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. Соавторы оказывали помощь в разработке отдельных элементов оборудования, выполнении компьютерных расчетов, обсуждении результатов. Соавторам принадлежат результаты, не вошедшие в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Апробация работы проводилась в Центре 9.1 «Электронных технологий и технической диагностики технологических сред и твердотельных структур» НИЧ БГУИР (г. Минск, РБ). Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Международной юбилейной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня образования ГГУ

им. Ф. Скорины (2020 г., Гомель, РБ), студенческой научно-технической конференции «Интеллектуальные, сенсорные и мехатронные системы – 2021» (2020 г., Минск, РБ). Результаты диссертационной работы будут использованы в «Отраслевой лаборатории новых технологий и материалов» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре ЭТТ БГУИР в качестве материалов лекционного курса «Пучковые и плазменные технологии».

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, в том числе 5 статей в научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (2,7 авторских листа), 2 статьи в материалах научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, общих выводов и библиографического списка. Полный объем работы составляет 141 страницу основного текста, в том числе: 91 иллюстрация на 31 странице, 5 таблиц на 2 страницах, 2 приложения на 2 страницах. Библиографический список содержит 147 наименований источников (включая собственные публикации соискателя) на 12 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены конструкции и принципы работы неохлаждаемых микроболометрических приемников ИК излучения. Показано, что работа микроболометра основана на изменении сопротивления

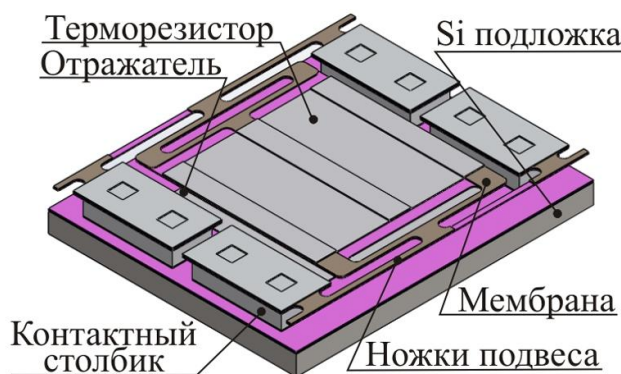


Рисунок 1. – Конструкция ячейки микроболометра

термочувствительного материала при поглощении падающего ИК излучения, которое преобразуется в напряжение. Ячейка микроболометра (рисунок 1) формируется на мембране из Si_3N_4 , на которую наносится термочувствительный материал. Для уменьшения теплоотвода от терморезистора мембрана соединяется с кристаллом ножками из Si_3N_4 , на которые нанесены

проводники из металла. Для повышения эффективности микроболометров под мембраной наносится отражающий слой. Кристалл болометра включает микроболометрическую матрицу, мультиплексор и схемы первичной обработки сигналов, что позволяет использовать при изготовлении болометров хорошо освоенные технологии полупроводниковых интегральных схем (ИС). На основе анализа требуемых характеристик микроболометров сформулированы требования к материалу термочувствительного слоя. Материал должен обладать высоким значением ТКС и низкими значениями удельного сопротивления. Показано, что наиболее перспективным термочувствительным материалом является оксид ванадия, обладающий наилучшим сочетанием требуемых свойств. Однако VO_x имеет около двадцати пяти разных оксидных состояний и большинство из них не обладают необходимыми свойствами. Кроме того, оксиды ванадия имеют сравнительно низкую термическую стабильность, что приводит при повышенных температурах (более $200\text{ }^\circ\text{C}$) к дальнейшему окислению пленок и их кристаллизации. Однако в процессе производства болометров после нанесения слоя VO_x производится еще ряд термических процессов. Поэтому для стабилизации требуемой фазы и структуры пленки требуется проводить предварительный отжиг, который будет определять конечные свойства пленок. Анализ современных методов формирования пленок VO_x показал, что в последние годы для нанесения пленок оксидов интенсивно внедряются в промышленность методы реактивного магнетронного распыления. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения и позволяет в широких пределах варьировать стехиометрический состав пленок. Однако формирование методом реактивного распыления пленок VO_x с требуемыми характеристиками является сложным для управления процессом из-за узкого диапазона технологических параметров. Сделано предположение, что воспроизводимость характеристик наносимых пленок VO_x может быть обеспечена за счет использования высоковакуумного импульсного магнетронного распыления при давлении в камере менее $0,1\text{ Па}$ и контролем процесса распыления методом оптической эмиссионной спектроскопии плазмы.

Во **второй главе** приведено описание экспериментального оборудования для нанесения термочувствительных структур на основе пленок VO_x и методик анализа их электрофизических и структурно-фазовых характеристик. Для формирования термочувствительных структур применен комплекс экспериментального оборудования, позволяющий наносить тонкие пленки металлов и их оксидов методом магнетронного распыления (рисунок 2).

Для нанесения пленок VO_x в работе использован метод высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени в среде Ar/O_2 рабочих газов. Распыление мишени осуществлялось

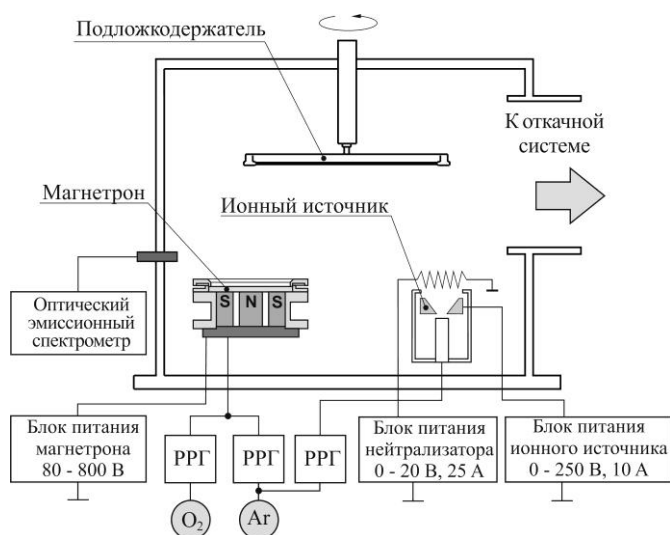


Рисунок 2. – Схема установки для нанесения термочувствительных структур магнетронным распылением

процессов реактивного распыления осуществлялся с помощью оптического эмиссионного спектрометра *SL 40-2-2048 ISA*. Для ионной очистки подложек применен ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя *ЕНРМ-150*. Для исследования влияния повышенных температур на изменение характеристик пленок VO_x производился их отжиг в атмосфере O_2 на установке термического отжига *R-321B2AN* при давлении 10^5 Па и вакуумной установке ВУ1-М при давлении от 0,002 до 0,9 Па. Температура отжига варьировалась от 200 до 450 °С. Время отжига изменялось от 10 до 120 мин.

Структура и фазовый состав пленок определялись методами дифракции обратно-отраженных электронов (*EBS*) и рамановской спектроскопии. Изображения поверхности пленки получены с помощью оптического микроскопа *Micro 200*. Электронномикроскопические изображения пленок получены методом сканирующей электронной микроскопии (*СЭМ*) с помощью высокоразрешающего растрового электронного микроскопа *Hitachi S-4800*. Для измерения электрических характеристик термочувствительных структур разработан диагностический стенд, который позволил измерять такие характеристики, как ВАХ, электрическое сопротивление и ТКС пленки. Для измерения характеристик контактов структур в работе использовался метод длинной линии (*TLM*), который обеспечивает измерение поверхностного сопротивления пленочного резистора, сопротивления контактов и учитывает токи растекания под контактами.

В третьей главе представлены результаты исследований процессов реактивного магнетронного распыления V мишени в среде Ar/O_2 рабочих газов при использовании для питания магнетронной распылительной системы

высоковакуумной магнетронной распылительной системой *MARS.011-80* с мишенью диаметром 80 мм, которая способна работать при пониженных до 0,04 Па давлениях. Для питания магнетрона использовался биполярный асимметричный импульсный ток средней частоты (1 – 100 кГц). Для повышения равномерности толщины и свойств наносимых слоев, пленки наносились на вращающуюся подложку со смещением оси подложки относительно оси магнетрона. Анализ и контроль

постоянного и импульсного тока средней частоты. Получены зависимости напряжения разряда U_t , скорости нанесения и интенсивности контрольных эмиссионных линий излучения плазмы от параметров разряда и концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов. Показано, что использование для распыления V асимметричного биполярного импульсного питания при $F = 10$ кГц, $U^+ = 25$ В и $\tau = 3$ мкс позволяет предотвратить формирование дуг на поверхности мишени и обеспечить стабильность процесса нанесения пленок VO_x в диапазоне концентраций O_2 от 0 до 100 %. На основе анализа полученных эмиссионных спектров излучения плазмы определены линии ванадия, аргона и кислорода, которые в дальнейшем использованы для управления процессом реактивного магнетронного распыления (таблица 1).

Таблица 1. – Спектральные линии, используемые для контроля состава плазмы при реактивном магнетронном нанесении пленок оксида ванадия

Линия	λ , нм
VI	437,922
ArI	750,386
OI	777,417

Установлено, что при импульсном реактивном магнетронном распылении и давлении в камере менее 0,06 Па, изменение напряжения разряда (рисунок 3) и интенсивности контрольных линий оптического излучения плазмы (рисунок 4) при увеличении и уменьшении концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов от 0 до 100 % имеют однозначную зависимость от Γ_{O_2} и практически отсутствует гистерезис характеристик. Это позволяет стабилизировать процесс реактивного распыления без использования систем обратной связи.

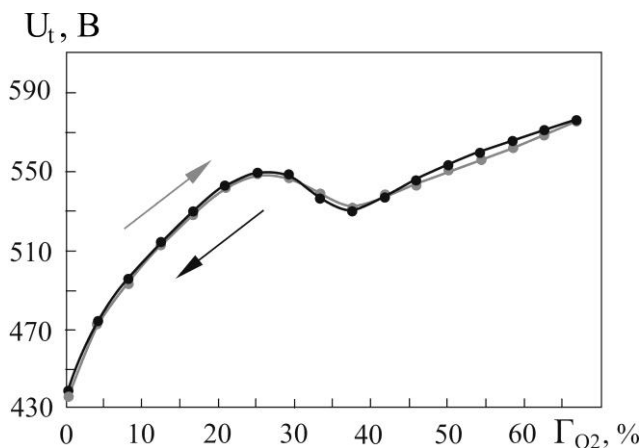


Рисунок 3. – Зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O_2 рабочих газов при распылении V мишени ($I_t = 1,5$ А)

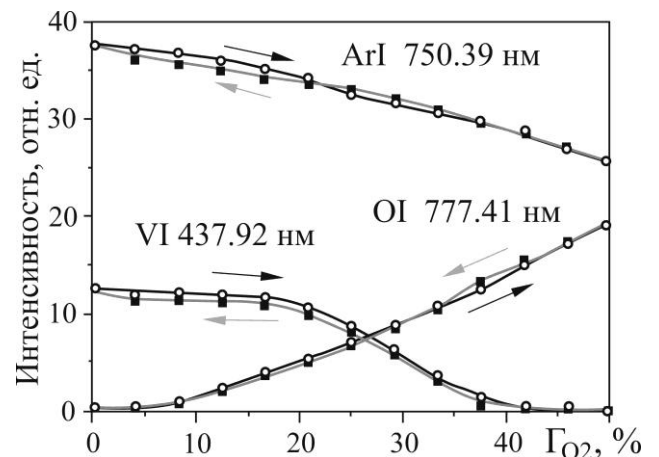


Рисунок 4. – Зависимости интенсивности линий VI, OI и ArI при изменении концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов

Для повышения равномерности толщины и характеристик пленок VO_x по подложке предложено использовать конфигурацию системы, в которой пленки наносятся на вращающуюся подложку при смещении оси подложки относительно оси магнетрона. При нанесении на вращающуюся подложку при расстоянии мишень – подложка 120 мм и смещении оси вращения подложки относительно оси магнетрона 100 мм получены пленки VO_x с неравномерностью толщины менее $\pm 2,4\%$, разбросом электрофизических свойств в пределах одной подложки не более $\pm 2,5\%$ (рисунок 5).

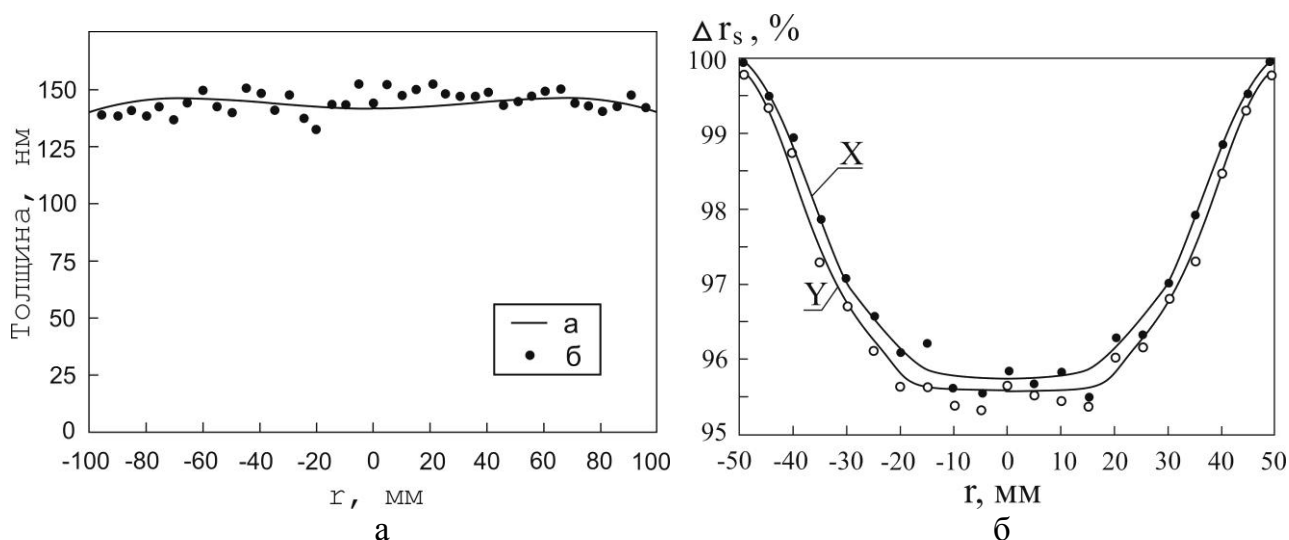


Рисунок 5. – Распределение толщины (а) относительного поверхностного сопротивления (б) пленок VO_x по подложке ($\Gamma_{O_2} = 16,7\%$, $h = 120$ мм, $D = 100$ мм)

На основе полученных результатов разработан алгоритм управления процессом реактивного распыления, при котором для контроля процесса и поддержания заданного режима распыления использовался «параметр отравления» (соотношение интенсивностей контрольных линий кислорода I_O^* и ванадия I_V^*). Это позволило эффективно стабилизировать процесс нанесения пленок и понизить разброс электрофизических характеристик пленок VO_x от процесса к процессу не более 8 %.

В четвертой главе представлены результаты исследования структурно-фазовых и электрофизических характеристик пленок VO_x , нанесенных методом импульсного реактивного магнетронного распыления. Пленки наносились на структуру $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ и на оптическое стекло BK7 в режиме вращения подложки. Получены зависимости структуры, ρ , ТКС, E_g пленок VO_x от параметров процесса нанесения. Установлено, что при реактивном магнетронном распылении формируются аморфные пленки VO_x с недостатком кислорода. Показано, что стехиометрический состав и электрофизические свойства наносимых пленок имеют сильную зависимость от концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов, что связано с образованием различных промежуточных оксидных фаз. Удельное сопротивление пленок при распылении V мишени в

атмосфере Ar составляло 5×10^{-6} Ом \times м (рисунок 6). При увеличении Γ_{O_2} до 7,0 % удельное сопротивление пленок незначительно увеличивалось до 2×10^{-5} Ом \times м и далее резко возрастало до $2,5 \times 10^{-2}$ Ом \times м при $\Gamma_{O_2} = 16,7$ %. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} в диапазоне 16,7 – 25,0 % удельное сопротивление первоначально снижалось до 6×10^{-3} Ом \times м и далее увеличивалось до 4×10^{-2} Ом \times м. При дальнейшем увеличении концентрации O_2 в смеси газов сопротивление резисторов увеличивалось до десятков мегаом, т.е. формировались диэлектрические пленки. Установлено, что пленки, нанесенные при Γ_{O_2} менее 3 %, имели положительный ТКС, и их сопротивление линейно зависело от температуры T , что характерно для металлов. При увеличении концентрации кислорода до 8 % сопротивление нанесенных пленок также линейно зависело от T , но ТКС пленок становился отрицательным. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} сопротивление пленок увеличивалось, и кривые приобретали экспоненциальный характер. При этом отмечалось увеличение ТКС пленок (рисунок 7). На участке Γ_{O_2} от 16 до 29 % ТКС пленок составлял 2,2 – 2,3 %/°С при достоверности аппроксимации k^2 более 0,995. При увеличении Γ_{O_2} более 30 % ТКС пленок снижался до 1,6 – 2,0 %/°С. При этом k также снижалась до 0,974 при $\Gamma_{O_2} = 63$ %.

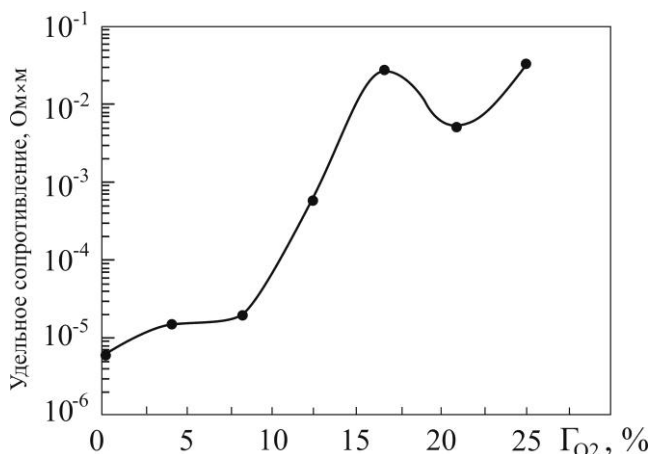


Рисунок 6. – Зависимость удельного сопротивления пленок VO_x от концентрации кислорода в Ar/ O_2 смеси газов

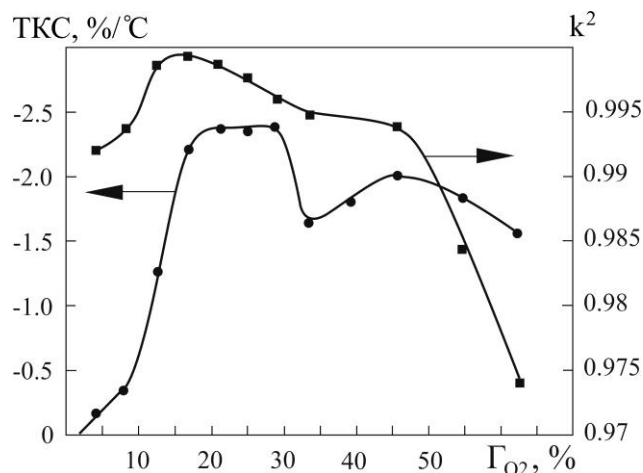


Рисунок 7. – Зависимости ТКС пленок VO_x и достоверности аппроксимации k^2 зависимости $R(T)$ от концентрации кислорода в Ar/ O_2 смеси газов

Установлено, что ширина запрещенной зоны E_g также имела сложную зависимость от Γ_{O_2} . Для прямых переходов E_g^{dir} изменялась в пределах от 3,48 – 3,78 эВ. При малых концентрациях O_2 ($\Gamma_{O_2} = 4$ %) E_g составляла 3,48 эВ и увеличивалась до 3,78 эВ при $\Gamma_{O_2} = 19$ %, далее снижалась до 3,67 эВ при $\Gamma_{O_2} = 29$ %. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода E_g увеличивалась до 3,78 эВ при $\Gamma_{O_2} = 46$ %. Аналогичный характер кривой был получен для непрямых переходов, но значения E_g^{indir} имели более низкие значения

(от 3,06 до 3,61 эВ). На основе полученных результатов сделан вывод, что метод импульсного реактивного магнетронного распыления может эффективно использоваться для контролируемого и воспроизводимого нанесения пленок VO_x . При концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов 17 – 25 % получены пленки с $\rho = (0,6 - 4,0) \times 10^{-2} \text{ Ом} \times \text{м}$, ТКС = 2,2 – 2,3 %/°С и $E_g = 3,7 - 3,78 \text{ эВ}$.

Исследования влияния параметров процесса отжига в атмосфере O_2 на структурно-фазовые и электрофизические характеристики пленок VO_x показали, что их стехиометрический состав, формирующаяся кристаллическая решетка и электрофизические свойства определяются давлением, температурой и временем отжига. При отжиге в атмосфере O_2 при давлении 10^5 Па происходит формирование поликристаллических пленок и их дальнейшее окисление (рисунок 8). При времени отжига 10 мин начальные процессы кристаллизации наблюдаются при температурах 250 – 275 °С. При этом, в зависимости от концентрации O_2 в процессе распыления, формируются поликристаллические пленки с кубической или смешанной моноклинной и кубической кристаллической решеткой и происходит переход от промежуточного оксида V_4O_9 к смешанной фазе $\text{VO}_2/\text{VO}_x/\text{V}_2\text{O}_5$ и далее к высшему оксиду V_2O_5 (рисунок 9).

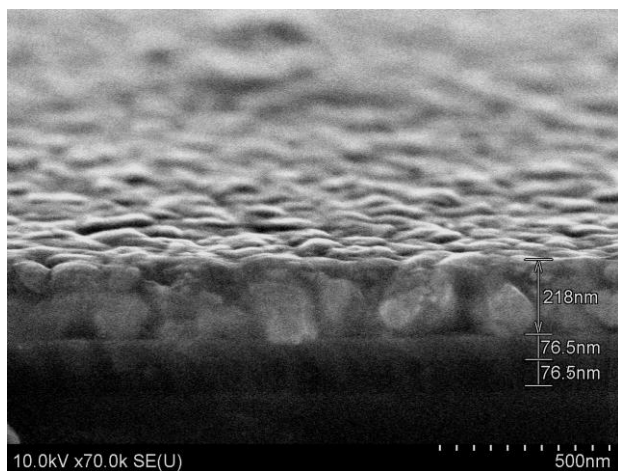


Рисунок 8. – СЭМ изображение бокового среза пленки VO_x , отожженной при температуре 400 °С ($t_{an} = 10 \text{ мин}$)

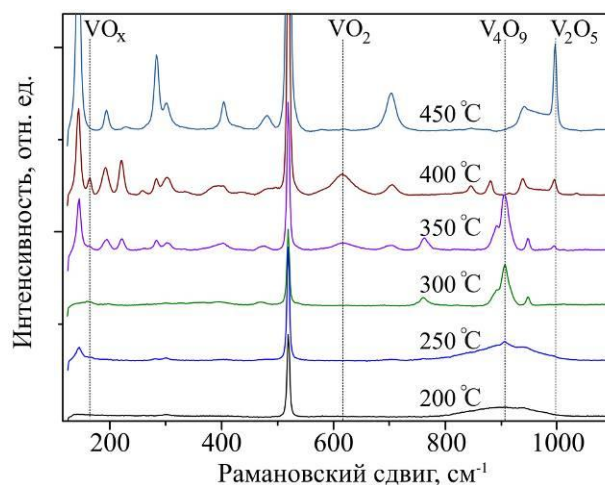


Рисунок 9. – Спектры комбинационного рассеяния пленок VO_x после отжига в атмосфере O_2 ($\Gamma_{\text{O}_2} = 25 \text{ \%}$, $t_{an} = 10 \text{ мин}$)

В смешанной фазе пленка представляет собой отдельные области с различной степенью окисления. При увеличении времени отжига до 60 мин начальное образование высшего оксида V_2O_5 наблюдается уже при температуре 250 °С. При увеличении температуры содержание V_2O_5 практически линейно увеличивается и при $T_{an} = 400 \text{ °С}$ пленки представляют собой оксид V_2O_5 с небольшим содержанием оксида VO_2 . При дальнейшем увеличении времени

отжига до 120 мин пленки становились однофазными и состояли из высшего оксида V_2O_5 . Для использования пленок VO_x в качестве термочувствительных слоев предпочтительными являются следующие условия нанесения и отжига: пленки наносят при концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов 25 % и отжигают при температуре $T_{an} = 250 - 275$ °С в атмосфере O_2 в течении 10 мин. При данных условиях получены пленки VO_x с удельным сопротивлением $\rho = 0,01 - 0,03$ Ом \times м, ТКС = 2,05 %/°С и $E_g = 3,76 - 3,78$ эВ. Установлено, что отжиг пленок VO_x при давлении 10^5 Па имеет ряд недостатков: это резкая зависимость характеристик пленок от температуры и времени отжига, что приводит к большому разбросу ρ и ТКС от процесса к процессу. При отжиге пленок VO_x при температурах до 400 °С при пониженном давлении (0,002 – 0,9 Па) структура пленок остается аморфной. Независимо от режимов нанесения пленок, при увеличении T_{an} происходит уменьшение ρ и ТКС пленок (рисунок 10). Однако, в отличие от отжига при атмосферном давлении, снижение ρ и ТКС происходит практически линейно. Отсутствуют области температур, при которых происходит резкое падение ρ и ТКС. Это позволяет точно контролировать процесс отжига. При $T_{an} = 300$ °С могут быть воспроизводимо получены аморфные пленки VO_x с удельным сопротивлением 0,01 – 0,1 Ом \times м и ТКС = 2,0 – 2,5 %/°С.

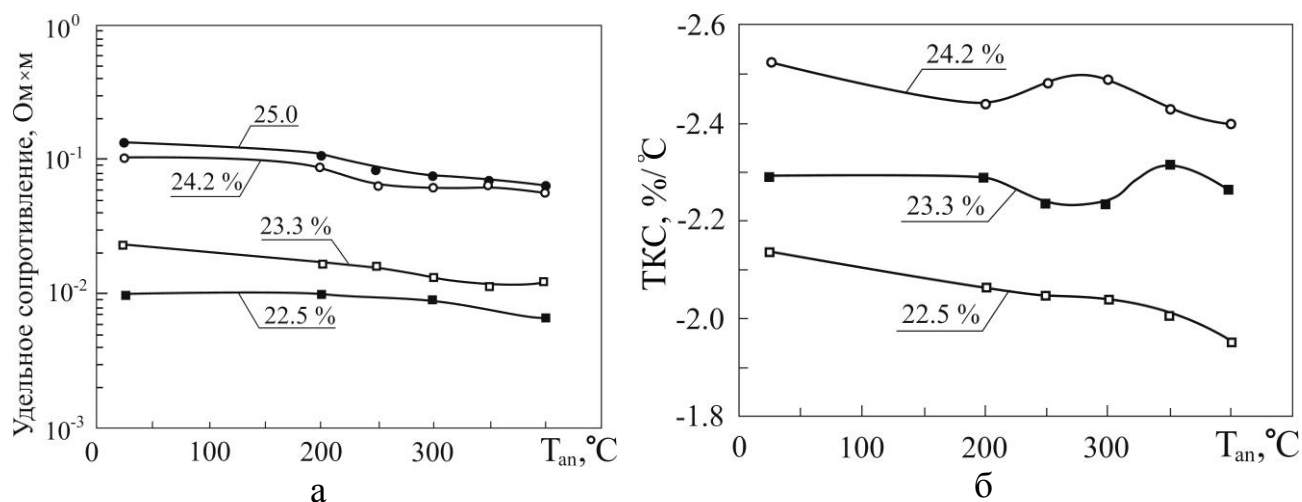


Рисунок 10. – Зависимости удельного сопротивления (а) и ТКС (б) пленок VO_x , нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов, от температуры отжига

В пятой главе приведены результаты исследований характеристик терморезистивных структур на основе пленок VO_x при использовании в качестве материала контактов Al, Ti, Ni, V, TiN/Ti. Установлено, что при нанесении металлизации без предварительной ионной очистки ВАХ и зависимости $R(L)$ полученных структур нелинейны и несимметричны. Характер ВАХ и зависимостей $R(L)$ свидетельствует о наличии в контактах барьеров Шоттки. Ионная очистка позволяет значительно улучшить линейность ВАХ и

зависимостей $R(L)$. Наиболее линейные ВАХ были получены для Ti контактов. Однако, даже после ионной очистки пленки VO_x при высоких значениях удельного сопротивления пленок оксида ванадия ($10^{-2} - 10^{-1} \text{ Ом}\times\text{м}$) ВАХ терморезистивных структур VO_x/Ti имеют вентильность ($B = 1,1 - 1,35$) и удельное сопротивление контакта может достигать значений $0,1 \text{ Ом}\times\text{м}^2$. Анализ полученных результатов показал, что наилучший контакт получен для металла с наименьшей работой выхода $A_{Ti} = 3,95 \text{ эВ}$. Исследования стабильности изменения сопротивления терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия при циклическом изменении температуры от 20 до $87 \text{ }^\circ\text{C}$ показали, что при изменении температуры характер кривой остается постоянным, что говорит о высокой стабильности пленок VO_x .

На основе анализа принципов работы и полученных в работе экспериментальных результатов разработана базовая структура (рисунок 11) и проведены расчеты основных характеристик ячейки. В предложенной структуре используется конфигурация болометрической матрицы высокой плотности, где ячейка располагается непосредственно над КМДП транзисторами схемы считывания. Полный размер ячейки $25\times 25 \text{ мкм}$. Термочувствительный элемент выполнен из пленки VO_x толщиной 150 нм с $\rho = 2,5\times 10^{-2} \text{ Ом}\times\text{м}$ и $\text{ТКС} = 2,2 - 2,4 \text{ } \%/^\circ\text{C}$. Размеры резистора $9\times 18 \text{ мкм}$. Контакты резистора выполнены из Ti толщиной 100 нм . С использованием свойств материалов и полученных электрофизических характеристик активного слоя VO_x проведено расчетное моделирование основных характеристик структуры микроболометрической ячейки при воздействии ИК излучения. Расчет растекания токов показал, что сопротивление терморезистора при комнатной температуре будет составлять около 80 кОм . Для предложенной структуры ячейки микроболометра проведено моделирование изменения температуры чувствительного элемента при воздействии ИК излучения.

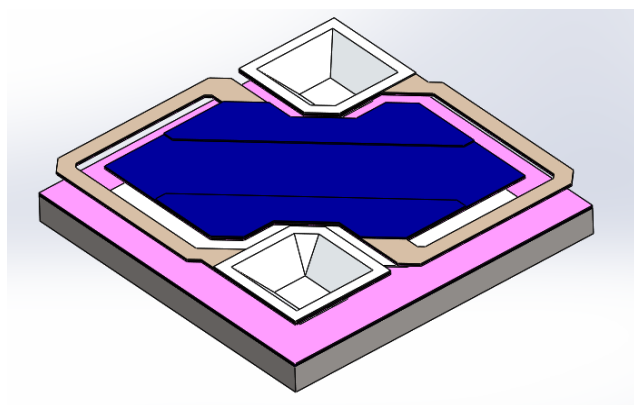


Рисунок 11. – 3D модель структуры ячейки микроболометра

Установлено, что при увеличении падающей мощности температура терморезистора изменяется пропорционально плотности мощности ИК излучения. Пороговая чувствительность $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ достигается при мощности падающего излучения $1,5\times 10^{-8} \text{ Вт}$. При этом изменение тока при напряжении 5 В будет составлять $4,8\times 10^{-8} \text{ А}$. Данный диапазон изменения тока может эффективно детектироваться мультиплексором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате исследований процесса реактивного магнетронного распыления V мишени в среде Ar/O₂ газов показано, что при использовании для питания магнетрона биполярного асимметричного импульсного тока ($F = 10$ кГц, $U^+ = 25$ В, $\tau = 3$ мкс) при давлении в камере менее 0,06 Па, изменение напряжения разряда и интенсивности контрольных линий оптического излучения плазмы VI (437,92 нм), ArI (750,39 нм) и OI (777,42 нм) при изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов от 0 до 100 % однозначно зависит Γ_{O_2} , что обеспечивает стабильность процесса нанесения пленок VO_x во всем диапазоне концентраций кислорода [1, 5].

2. Предложена методика воспроизводимого формирования пленок VO_x импульсным магнетронным распылением V мишени в Ar/O₂ смеси газов при давлении в камере менее 0,06 Па и поддержании заданного соотношения потоков Ar и O₂ рабочих газов посредством контроля отношения интенсивности контрольных линий оптического излучения VI и OI, обеспечивающая при нанесении на вращающуюся подложку диаметром 100 мм неравномерность толщины пленки не более $\pm 2,4$ %, разброс удельного сопротивления в пределах одной подложки не более $\pm 2,5$ % и партии подложек не более 8,0 % [1, 5].

3. Установлены зависимости структурно-фазовых и электрофизических характеристик пленок VO_x от параметров процесса импульсного реактивного магнетронного распыления. Показано, что при импульсном реактивном магнетроном распылении формируются аморфные пленки VO_x, которые представляют собой смесь различных промежуточных оксидов. Зависимости ТКС, ρ и E_g пленок от концентрации кислорода имеют сложный характер, что связано с формированием в пленке смеси различных промежуточных оксидов. При $\Gamma_{O_2} = 17 - 25$ % получены пленки VO_x с $\rho = (0,6 - 4,0) \times 10^{-2}$ Ом×м, ТКС = 2,2 – 2,3 %/°С и $E_g = 3,7 - 3,78$ эВ [1, 2, 3, 5].

4. При отжиге пленок VO_x в атмосфере O₂ при давлении 10⁵ Па процессы кристаллизации пленок наблюдаются при температурах более 275 °С. При температурах в диапазоне 300 – 450 °С происходит переход от промежуточного оксида V₄O₉ с аморфной структурой к смешанной фазе VO₂/VO_x/V₂O₅ с моноклинной, кубической или смешанной моноклинной/кубической кристаллической решеткой и далее к высшему оксиду V₂O₅. При этом электрофизические характеристики пленок в первую очередь определяются температурой и временем отжига, что приводит к большому разбросу ρ и ТКС пленок от процесса к процессу. При отжиге пленок VO_x в атмосфере O₂ при давлении 0,002 – 0,9 Па структура пленок остается аморфной. При увеличении

температуры происходит практически линейное уменьшение ТКС и ρ пленок, что позволяет точно контролировать процесс отжига. При температуре отжига 300 °С и давлении 0,04 Па воспроизводимо получены аморфные пленки VO_x с $\rho = 0,01 - 0,1 \text{ Ом}\times\text{м}$ и $\text{ТКС} = 2,0 - 2,5 \text{ \%}/^\circ\text{С}$, что позволяет использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев неохлаждаемых микроболометрических приемников излучения [3, 4, 5, 6, 7].

5. Исследования характеристик терморезистивных структур на основе пленок VO_x при использовании в качестве материала контактов Al, Ti, Ni, V, TiN/Ti показали, что ионная очистка пленки VO_x позволяет значительно понизить ρ_c и уменьшить нелинейность ВАХ структур. Наиболее линейные ВАХ получены для Ti контактов. Установлено, что при высоких значениях удельного сопротивления пленки VO_x (0,01 – 0,1 Ом×м) ВАХ терморезистивных структур Ti/ VO_x имеют вентильность ($B = 1,1 - 1,35$) и ρ_c может достигать значений 0,1 Ом×м². На основе полученных результатов предложена методика формирования терморезистивных структур на основе пленок VO_x , основанная на последовательном нанесении методом магнетронного распыления Ti контактов, ионно-лучевой очистке поверхности контактов, реактивном магнетронном нанесении пленок VO_x и отжиге структур в атмосфере O_2 при давлении 0,04 Па, что обеспечивает формирование омических контактов Ti/ VO_x [5].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты, технологические приемы нанесения термочувствительных пленок VO_x методом высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления и режимы кристаллизационного отжига, могут быть использованы при разработке технологий изготовления интегральных неохлаждаемых микроболометрических матриц.

Разработанные режимы воспроизводимого формирования пленок VO_x методом высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления и последующего отжига в атмосфере O_2 при пониженном давлении будут в дальнейшем использованы в «Отраслевой лаборатории новых технологий и материалов» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» при адаптации нанесения пленок VO_x на установке магнетронного напыления SysKeyUHVPVD и разработке технологического процесса формирования микроболометрических матриц для освоения на ОАО «ИНТЕГРАЛ» производства неохлаждаемых инфракрасных фотоприемных устройств.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос // Доклады БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 6. – С. 94–102.

2. Формирование пленок оксида тантала на подложках диаметром 200 миллиметров / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, Т. Д. Нгуен, А. Д. Голосов, Э. Е. Литвин, Н. Н. Лам // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1(42). – С. 12–17.

3. Структурно-фазовые характеристики пленок оксида ванадия / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос, Т. К. То // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2021. – № 1(84). – С. 33–41.

4. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос, Т. К. То // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 22–30.

5. Формирование и исследование характеристик терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос, Н. К. Толочко // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 4. – С. 85–93.

Материалы конференций

6. Влияние отжига на кристаллизацию и оптические характеристики пленок оксида ванадия / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Т. К. То, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, В. В. Колос // Материалы Международной юбилейной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня образования Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, 19–20 ноября 2020 г.: в 3 ч. Ч. 3 // Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – С. 147–151.

7. Изменение электрических свойств пленок оксида ванадия при отжиге / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Т. К. То // «Интеллектуальные, сенсорные и мехатронные системы – 2021»: сборник научных трудов / Минск: БНТУ, 2021. – С. 89–93.

РЭЗІЮМЭ

Нгуен Дінь Туен

**Фарміраванне плёнак аксіду ванадыя для няастуджальных прымальнікаў
інфрачырвонага выпраменьвання рэактыўным магнетронным
распыленнем**

Ключавыя словы: аксід ванадыя, балометр, рэактыўнае магнетроннае распыленне, адпал, структура, электрафізічныя ўласцівасці.

Мэта працы: усталяванне заканамернасцяў і распрацоўка метадаў рэактыўнага магнетроннага нанясення тонкіх плёнак аксіду ванадыя і тэрмарэзистыўных структур на іх аснове.

Метады даследаванняў і апаратура: атамна-сілавая і сканавальная электронная мікраскапія, раманаўская спектраскапія, энергадысперсіўная рэнтгенаўская спектраскапія, дыфракцыя назад-адлюстраваных электронаў, стандартныя метадыкі даследавання электрафізічных уласцівасцяў матэрыялаў.

Асноўныя вынікі: эксперыментальна ўсталяваныя заканамернасці ўплыву параметраў імпульснага рэактыўнага магнетроннага нанясення і наступнага адпалу на структурна-фазавыя і электрафізічныя ўласцівасці плёнак аксіду ванадыя (VO_x). Паказана, што пры магнетронным нанясенні фармуюцца аморфныя плёнкі VO_x , якія ўяўляюць сабой сумесь розных аксідаў. Пры канцэнтрацыі кіслароду ў Ar/O_2 сумесі газаў 17 – 25 % атрыманы плёнкі з $\rho = (0,6 - 4,0) \times 10^{-2} \text{ Ом}\times\text{м}$, $\text{ТКС} = 2,2 - 2,3 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ і $E_g = 3,7 - 3,78 \text{ эВ}$. Устаноўлена, што пры адпале ў атмасферы O_2 пры ціску 0,04 Па і тэмпературы 300 °С могуць быць атрыманы аморфныя плёнкі VO_x з $\rho = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ Ом}\times\text{м}$ і $\text{ТКС} = 2,0 - 2,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, што дазваляе выкарыстоўваць дадзеныя плёнкі ў якасці тэрмаадчувальных слаёў мікрабаламетрычных прымальнікаў выпраменьвання. Даследаванні характарыстык тэрмарэзистыўных структур паказалі, што найбольш лінейныя ВАХ былі атрыманы пры выкарыстанні Ті кантактаў з папярэдняй іённай ачысткай плёнак. Аднак нават пасля іённай ачысткі ВАХ тэрмарэзистыўных структур $\text{VO}_x/\text{Tі}$ маюць некаторую вентыльнасць і ўдзельнае супраціўленне кантакту можа дасягаць значэнняў 0,1 $\text{ Ом}\times\text{м}^2$. На аснове атрыманых эксперыментальных дадзеных прапанаваная структура ячэйкі мікрабаламетрычнай матрыцы высокай шчыльнасці, дзе тэрмаадчувальны элемент на аснове плёнкі VO_x размяшчаецца непасрэдна над КМДП схемай счытвання і фармуецца пасля стварэння слоя Ті металізацыі.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы тэхналагічнага працэсу рэактыўнага магнетроннага нанясення плёнак аксіду ванадыя.

Галіна ўжывання: мікра- і нанаэлектроніка, мікраэлектрамеханічныя сістэмы.

РЕЗЮМЕ**Нгуен Динь Туен****Формирование пленок оксида ванадия для неохлаждаемых приемников инфракрасного излучения реактивным магнетронным распылением**

Ключевые слова: оксид ванадия, болометр, реактивное магнетронное распыление, отжиг, структура, электрофизические свойства.

Цель работы: установление закономерностей и разработка методов реактивного магнетронного нанесения тонких пленок оксида ванадия и терморезистивных структур на их основе.

Методы исследований и аппаратура: атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия, рамановская спектроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, дифракция обратно-отраженных электронов, стандартные методики исследования электрофизических свойств материалов.

Основные результаты: экспериментально установлены закономерности влияния параметров импульсного реактивного магнетронного нанесения и последующего отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия (VO_x). Показано, что при магнетронном нанесении формируются аморфные пленки VO_x , представляющие собой смесь различных оксидов. При концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов 17 – 25 % получены пленки с $\rho = (0,6 - 4,0) \times 10^{-2} \text{ Ом} \times \text{м}$, ТКС = 2,2 – 2,3 %/°С и $E_g = 3,7 - 3,78 \text{ эВ}$. Установлено, что при отжиге в атмосфере O_2 при давлении 0,04 Па и температуре 300 °С и могут быть получены аморфные пленки VO_x с $\rho = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ Ом} \times \text{м}$ и ТКС = 2,0 – 2,5 %/°С, что позволяет использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев микроболометрических приемников излучения. Исследования характеристик терморезистивных структур показали, что наиболее линейные ВАХ были получены при использовании Ti контактов с предварительной ионной очисткой пленок. Однако даже после ионной очистки ВАХ терморезистивных структур VO_x/Ti имеют некоторую вентильность и удельное сопротивление контакта может достигать значений $0,1 \text{ Ом} \times \text{м}^2$. На основе полученных экспериментальных данных предложена структура ячейки микроболометрической матрицы высокой плотности, где термочувствительный элемент на основе пленки VO_x располагается непосредственно над КМДП схемой считывания и формируется после создания слоя Ti металлизации.

Степень использования: результаты исследований использованы при разработке технологического процесса реактивного магнетронного нанесения пленок оксида ванадия.

Область применения: микро- и наноэлектроника, микроэлектромеханические системы.

SUMMARY

Nguyen Dinh Tuyen

Formation of vanadium oxide films for uncooled infrared detectors by reactive magnetron sputtering

Key words: vanadium oxide, bolometer, reactive magnetron sputtering, annealing, structure, electrophysical properties.

The aim of the work: is to establish the regularities and develop methods for reactive magnetron deposition of vanadium oxide thin films and thermoresistive structures based on them.

Research method and equipment: atomic force and scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, diffraction of back-reflected electrons, standard techniques for studying the electrophysical properties of materials.

Main results: the regularities of the influence of the pulsed reactive magnetron deposition and subsequent annealing parameters on the structural, phase and electrophysical properties of vanadium oxide (VO_x) films have been established experimentally. It is shown that amorphous VO_x films, which are a mixture of various oxides, are formed upon magnetron deposition. At an oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture of 17 – 25 % films with $\rho = (0,6 - 4,0) \times 10^{-2} \text{ Ohm} \times \text{m}$, $\text{TCR} = 2,2 - 2,3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ and $E_g = 3,7 - 3,78 \text{ eV}$ were obtained. It was found that at annealing in an O_2 atmosphere at a pressure of 0,04 Pa and a temperature of 300 °C, amorphous VO_x films with $\rho = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ Ohm} \times \text{m}$ and $\text{TCR} = 2,0 - 2,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ can be obtained, which makes it possible to use these films as thermosensitive layers of microbolometric IR detectors. Studies of the characteristics of thermoresistive structures showed that the most linear I-V characteristics were obtained using Ti contacts with preliminary ion cleaning of the films. However, even after ion cleaning, the I-V characteristics of thermoresistive structures VO_x/Ti have a certain valve and the resistivity of the contact can reach values of $0,1 \text{ Ohm} \times \text{m}^2$. On the basis of the experimental data the structure of the cell of a high-density microbolometric matrix is proposed, where a thermosensitive element based on a VO_x film is located directly above the CMOS readout circuit and is formed after the deposition of a Ti metallization layer.

Degree of use: the research results were used in the development of a technological process for reactive magnetron deposition of vanadium oxide films.

Area of application: micro- and nanoelectronic, micro electrical mechanical systems.

Научное издание

НГУЕН
Динь Туен

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ
ДЛЯ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ПРИЕМНИКОВ ИНФРАКРАСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ
РАСПЫЛЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники