



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-94-102>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.049.77: 621.793

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

НГУЕН Т.Д.¹, ЗАНЬКО А.И.², ГОЛОСОВ Д.А.¹, ЗАВАДСКИЙ С.М.¹,
МЕЛЬНИКОВ С.Н.¹, КОЛОС В.В.²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью работы являлось исследование влияния состава газовой среды в процессе распыления на электрофизические характеристики пленок оксида ванадия, нанесенных методом импульсного реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. Получены зависимости напряжения разряда магнетрона, скорости нанесения, удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления (ТКС), ширины оптической запрещенной зоны пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в смеси газов. Установлено, что при реактивном магнетроном распылении формируются аморфные пленки оксида ванадия. Показано, что электрофизические свойства нанесенных пленок оксида ванадия имеют сильную зависимость от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов, что связано с образованием в пленке смеси различных промежуточных оксидов ванадия. Установлено, что с точки зрения использования пленок оксида ванадия в качестве термочувствительных слоев пленки необходимо наносить при концентрациях кислорода в смеси газов от 17 до 25 %. При данных концентрациях кислорода без нагрева подложек получены пленки оксида ванадия с удельным сопротивлением $(0,6-4,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м, ТКС 2,2–2,3 %/°С и шириной запрещенной зоны для прямых переходов 3,7–3,78 эВ. Полученные характеристики позволяют использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев микроболометров.

Ключевые слова: оксид ванадия, реактивное магнетронное распыление, тонкие пленки, микроболометр.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ в рамках научных проектов № Т19КИТГ-016 и № Т20КИТГ-013.

Для цитирования. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 94-102.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF VANADIUM OXIDE FILMS DEPOSITED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING

TUYEN D. NGUYEN¹, ANDREY I. ZANKO², DMITRIY A. GOLOSOV¹,
SERGEY M. ZAVADSKI¹, SERGEY N. MELNIKOV¹, VLADIMIR V. KOLOS²

¹ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

² JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The aim of this work was to study the effect of the gas composition during sputtering on the electrophysical properties of vanadium oxide films deposited by pulsed reactive magnetron sputtering of a vanadium target in an Ar/O₂ medium of working gases. The dependences of the magnetron discharge voltage, deposition rate, resistivity, temperature coefficient of resistance (TCR), and the band gap of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the gas mixture are obtained. It was found that amorphous films of vanadium oxide are formed during reactive magnetron sputtering. It is shown that the properties of the deposited vanadium oxide films have a strong dependence on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture, which is associated with the formation of a mixture of various intermediate vanadium oxides in the film. It was found that from the point of view of using vanadium oxide films as thermosensitive layers of microbolometers, the films must be deposited at oxygen concentrations in the gas mixture of 17 to 25 %. At the given oxygen concentrations without heating the substrates, vanadium oxide films with a resistivity $(0.6-4.0) \cdot 10^{-2}$ Ohm·m, TCR 2.2–2.3%/°C and a band gap for direct transitions of 3.7–3.78 eV. The obtained characteristics make it possible to use these films as thermosensitive layers of microbolometers.

Keywords: vanadium oxide, reactive magnetron sputtering, thin films, microbolometer.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was supported by the BRFFR, research program grants № T19КИТГ-016 and № T20КИТГ-013.

For citation. Nguen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V. Electrophysical properties of vanadium oxide films deposited by reactive magnetron sputtering. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 94-102.

Введение

В последние годы интенсивно ведутся исследования, направленные на разработку интегральных неохлаждаемых инфракрасных (ИК) микроболومترических приемников, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. Основным преимуществом приборов на основе неохлаждаемых микроболومترических приемников является отсутствие системы криогенного охлаждения. По чувствительности такие приемники приближаются к криогенным фотонным приемникам, что позволяет создавать на основе неохлаждаемых микроболметров ИК приборы, имеющие малые габариты, вес, энергопотребление и низкую стоимость. Это открывает возможность разрабатывать на базе неохлаждаемых микроболومترических приемников приборы не только для военной техники, но и для применения в промышленности, охранных системах, медицине, экологическом мониторинге, на транспорте [1, 2].

Работа микроболметра основана на повышении температуры термочувствительного материала (терморезистора) за счет поглощения падающего ИК излучения. Изменение температуры вызывает изменение электрического сопротивления терморезистора, которое преобразуется в напряжение и измеряется внешней цепью. Термочувствительный материал микроболметра должен обладать высоким значением температурного коэффициента

электрического сопротивления (ТКС), малыми значениями удельного сопротивления, теплопроводности и шумов. Также важным вопросом является возможность использования данного материала в стандартных технологических процессах изготовления полупроводниковых интегральных микросхем, что позволяет формировать микроболометрическую матрицу и считывающую электронику на едином кристалле. Одним из таких материалов является оксид ванадия VO_x . Пленки оксида ванадия обладают наилучшим сочетанием показателей: сравнительно высоким ТКС, низким удельным сопротивлением и низкой способностью к созданию помех [3].

Для получения пленок оксида ванадия предложен ряд методов осаждения, таких как золь-гель, центрифугирование, распылительный пиролиз, химическое осаждение из газовой фазы, ионное распыление, электронно-лучевое испарение и импульсное лазерное осаждение [4–9]. Однако до настоящего времени широкое промышленное использование данных методов сдерживается сложностью получения пленок VO_x с заданными характеристиками. Это связано с тем, что оксид ванадия имеет порядка двадцати пяти разных оксидных состояний, и только некоторые из них обладают требуемыми свойствами. Из-за узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих стабильность и оптимальность характеристик оксида, процесс формирования пленок VO_x является сложным для управления и трудно воспроизводимым.

Одним из наиболее перспективных методов формирования пленок оксида ванадия является реактивное магнетронное распыление [10]. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения и химическую чистоту наносимых слоев, позволяет в широких пределах варьировать стехиометрический состав пленок за счет изменения парциального давления реактивного газа в камере. Исследованию свойств пленок оксида ванадия, наносимых методом реактивного распыления, посвящен ряд статей, однако в этих статьях чаще всего используется высокочастотное распыление и основное внимание уделяется влиянию параметров процесса распыления на электрохромные и оптические характеристики пленок [11]. В то же время практически отсутствуют представленные в статьях результаты исследований, где для нанесения пленок используется метод импульсного реактивного магнетронного распыления и анализируется влияние параметров процесса на электрофизические свойства пленок с точки зрения использования оксида ванадия в качестве термочувствительных слоев микроболометров. Таким образом, целью работы являлось исследование влияния состава газовой среды в процессе распыления на электрофизические свойства пленок оксида ванадия, наносимых методом импульсного реактивного магнетронного распыления без нагрева подложек.

Методика проведения эксперимента

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для нанесения пленок оксида ванадия методом импульсного реактивного магнетронного распыления. Установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-2МП. Камера вакуумной установки была оборудована магнетронной распылительной системой MARS.011-80 с мишенью $\varnothing 80$ мм и ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя ЕНІS.007-150.

Вращаемый подложкодержатель располагался на расстоянии 120 мм от поверхности мишени магнетрона. В процессе нанесения пленок ось вращения подложки находилась на расстоянии 100 мм от оси магнетрона. Для питания магнетрона использовался блок питания (БП) АРЕL-М-1.5ВР-800-2 (ООО «Прикладная электроника», Россия) мощностью 1,5 кВт.

Пленки оксида ванадия наносились на структуры Si_3N_4/Si и оптическое стекло ВК7. В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па и производилась предварительная ионная очистка подложек. Для этого в ионный источник подавался Аг. Поток Аг составлял $Q_{Ar} = 30$ мл/мин. Время очистки, напряжение и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли $t = 6$ мин, $U_d = 80$ В, $I_d = 7,0$ А соответственно. Очистка производилась в режиме вращения подложки.

Затем производилась очистка мишени магнетрона от загрязнений. Для этого в газораспределительную систему магнетрона подавался Аг. Поток Аг в камеру составлял $Q_{Ar} = 60$ мл/мин. Ванадиевая мишень распылялась в течение 2 мин при токе разряда $I_t = 1,5$ А.

Для распыления ванадиевой мишени использовался биполярный асимметричный импульсный ток (частота следования импульсов $F = 10$ кГц, амплитуда положительного импульса 60 В и длительность 3 мкс). После этого в газораспределительную систему магнетрона подавался кислород, и производилось распыление мишени в среде Ar/O_2 рабочих газов. При этом значения расходов рабочих газов устанавливались такие, которые впоследствии использовались при нанесении пленок. В таком режиме мишень распылялась в течение 2 мин при токе разряда $I_t = 1,5$ А. Далее производилось нанесение пленок оксида ванадия. Для этого подложки подводились в зону нанесения. В процессе экспериментов содержание кислорода в Ar/O_2 смеси газов (G_{O_2}) изменялось от 0 до 67 % при общем расходе газа 60 мл/мин. Для поддержания заданного расхода газов использовались автоматические регуляторы расхода газа (РРГ) РРГ-1. Во всех экспериментах ток разряда поддерживался постоянным и составлял $I_t = 1,5$ А. При этом напряжение разряда изменялось от 450 до 583 В в зависимости от концентрации кислорода. Толщина нанесенных пленок составляла около 150 нм и регулировалась временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов.

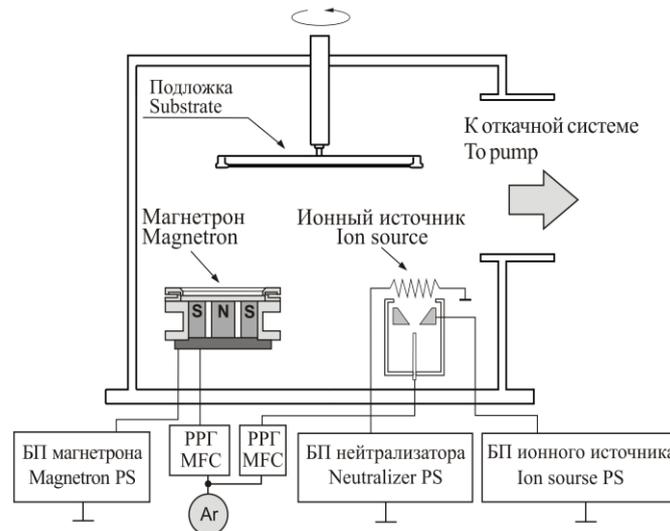


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для нанесения пленок оксида ванадия методом импульсного реактивного магнетронного распыления

Fig. 1. Experimental setup for deposition of vanadium oxide films by reactive magnetron sputtering method

Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Структура и фазовый состав нанесенных пленок определялись методами EBSD (Electron Backscattered Diffraction) и рамановской спектроскопии. Для исследования пленок методом EBSD использовался двулучевой электронно-ионный микроскоп Versa 3D Lovac (США). Дифракционные картины получены при угле наклона подложки 70° . Исследования комбинационного рассеяния света пленок были проведены на сканирующем конфокальном микроскопе SOL Instrument Confotec NR500 с использованием лазера с длиной волны 473 нм и мощностью 3 мВт. Спектры оптического пропускания пленок в диапазоне 300–900 нм получены с помощью спектрофотометра Проскан МС-121. Ширина оптической запрещенной зоны нанесенных пленок определялась по краю собственного поглощения пленок.

Для исследования электрических свойств нанесенных пленок формировались тестовые структуры. Для этого на пленку оксида ванадия методом ионно-лучевого распыления наносились Ni контакты. Сформированные резисторы имели прямоугольную форму размером $7,5 \times 15$ мм (коэффициент формы $K_\phi = 0,5$).

Электрическое сопротивление резисторов измерялось при комнатной температуре при токе 100 мкА. Удельное сопротивление пленок рассчитывалось исходя из сопротивления резистора R , его коэффициента формы K_ϕ и толщины пленки оксида ванадия по формуле

$$\rho = \frac{Rd}{K_\phi}, \quad (1)$$

где d – толщина пленки оксида ванадия.

При измерениях ТКС пленок температура терморезисторов изменялась от комнатной до 90 °С и обратно со скоростью 5 °С/мин. Температурный коэффициент сопротивления рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} 100, \quad (2)$$

где T – температура терморезистора.

Результаты и их обсуждение

Проведены исследования процессов импульсного реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. На рис. 2 представлена зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Зависимость получена в режиме стабилизации тока разряда $I_t = 1,5$ А. Общий расход газов поддерживался постоянным 60 мл/мин. Скорость откачки насосной системой составляла около 1200 л/с. При данных расходах газа давление в камере было 0,05 Па.

При распылении V мишени в среде Ar напряжение разряда составляло $U_t = 437$ В. При увеличении содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов напряжение разряда первоначально увеличивалось и достигало максимума $U_t = 550$ В при $\Gamma_{O_2} = 27$ %. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода напряжение разряда незначительно снижалось, и при $\Gamma_{O_2} = 37$ % наблюдался минимум напряжения $U_t = 529$ В. Дальнейшее увеличение Γ_{O_2} опять приводило к росту напряжения. При концентрации кислорода 67,5 % напряжение разряда составляло 573 В. При уменьшении Γ_{O_2} напряжение разряда изменялось по тому же закону. Гистерезис напряжения, характерный для процессов реактивного магнетронного нанесения диэлектрических пленок, отсутствовал. Такая двойная зависимость изменения напряжения разряда от концентрации кислорода и отсутствие гистерезиса, по-видимому, связаны с формированием на поверхности мишени различных промежуточных проводящих оксидов ванадия, стехиометрический состав, электрическая проводимость и коэффициент ионно-электронной эмиссии которых зависит от парциального давления кислорода.

На рис. 3 представлена зависимость скорости нанесения пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. При распылении V мишени в среде Ar скорость нанесения составляла 0,34 нм/с. При добавке кислорода скорость нанесения первоначально увеличивалась и достигала максимума 0,38 нм/с при $\Gamma_{O_2} = 12,5$ %. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода скорость нанесения снижалась до 0,07 нм/с при концентрации кислорода 63 %. На участке снижения скорости нанесения можно выделить три области: 12,5–33,0 %, 33,0–43,0 % и более 43,0 %. В первой и третьей области скорость нанесения снижается плавно при увеличении Γ_{O_2} , на втором участке имеет место резкое снижение скорости.

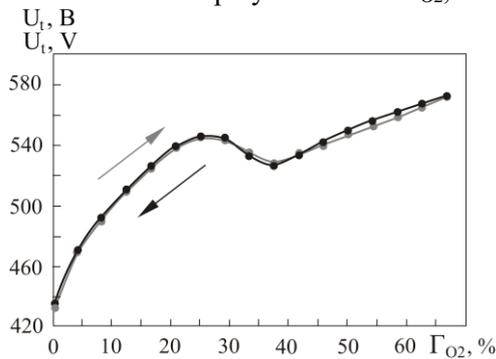


Рис. 2. Зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов при распылении ванадиевой мишени методом реактивного магнетронного распыления

Fig. 2. Dependence of the discharge voltage on the oxygen concentration in an Ar/O₂ gas mixture during sputtering of a vanadium target by the method of reactive magnetron sputtering

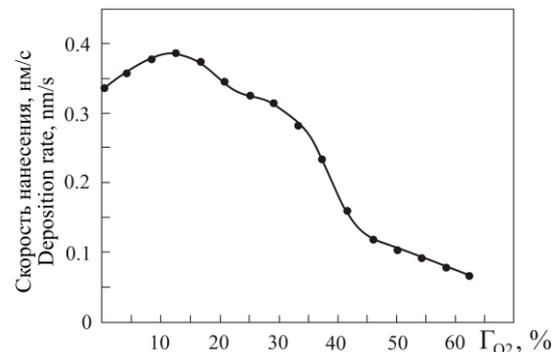


Рис. 3. Зависимость скорости нанесения от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов при распылении ванадиевой мишени методом реактивного магнетронного распыления

Fig. 3. Dependence of the deposition rate on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture during sputtering of a vanadium target by the method of reactive magnetron sputtering

Анализ нанесенных пленок методом EBSD показал, что на всех образцах не наблюдалось дифракционной картины. Полосы Кикучи, характеризующие кристаллические плоскости, полностью отсутствовали, что свидетельствовало об аморфной структуре оксида ванадия. Аморфное состояние пленок также подтверждено методом рамановской спектроскопии. На рис. 4 представлена зависимость удельного сопротивления пленок оксида ванадия при комнатной температуре от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. При распылении ванадиевой мишени в атмосфере Ar удельное сопротивление пленок составляло $\rho = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. При увеличении концентрации кислорода до 7,0 % удельное сопротивление пленок незначительно увеличивалось до $2 \cdot 10^{-5}$ Ом·м и далее резко возрастало до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Ом·м при $\Gamma_{O_2} = 16,7$ %. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} в диапазоне 16,7 – 25 % ρ первоначально снижалось до $6 \cdot 10^{-3}$ Ом·м и далее увеличивалось до $4 \cdot 10^{-2}$ Ом·м. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода в смеси газов сопротивление резисторов увеличивалось до десятков мегаом, т. е. формировались диэлектрические пленки.

На рис. 5 представлены температурные зависимости сопротивления $R(T)$ пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Полученные экспериментальные зависимости $R(T)$ аппроксимировались с использованием экспоненциальной функции и рассчитывалась достоверность аппроксимации k^2 , которая характеризовала близость полученной зависимости к экспоненциальной (идеальность кривой). Установлено, что пленки, нанесенные при Γ_{O_2} менее 3 %, имели положительный ТКС и сопротивление линейно зависело от температуры T (рис. 5, кривая 1). При увеличении концентрации кислорода до 8 % сопротивление нанесенных пленок также линейно зависело от T , но ТКС пленок становился отрицательным (кривые 2, 3). При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} сопротивление пленок увеличивалось, и кривые приобретали характерный экспоненциальный характер (кривые 4–6). При этом отмечалось увеличение ТКС пленок (рис. 6). На участке Γ_{O_2} от 16 до 29 % ТКС пленок составлял 2,2–2,3 %/°C при k^2 более 0,995. При увеличении Γ_{O_2} более 30 % ТКС пленок снижался до 1,6–2,0 %/°C. При этом достоверность аппроксимации также снижалась до 0,974 при $\Gamma_{O_2} = 63$ %.

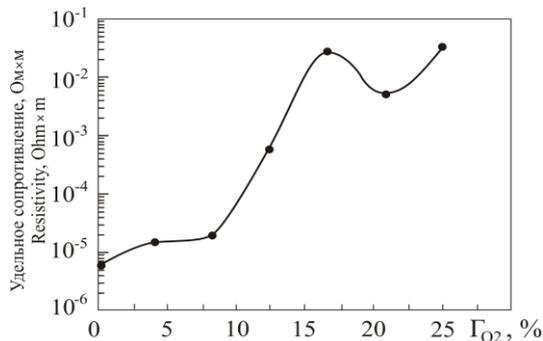


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig. 4. Dependence of the resistivity of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

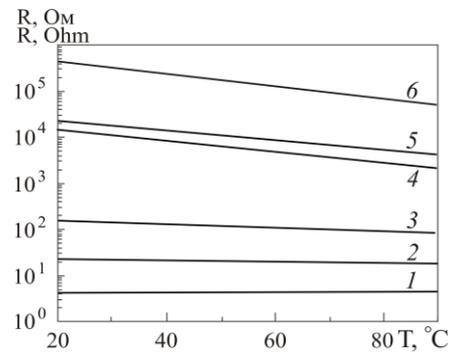


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода: 1 – 4,76 %, 2 – 9,1 %, 3 – 13 %, 4 – 16,7 %, 5 – 20 %, 6 – 25 %

Fig. 5. Temperature dependence of the resistance of vanadium oxide films deposited at various oxygen concentrations: 1 – 4.76%, 2 – 9.1%, 3 – 13%, 4 – 16.7%, 5 – 20%, 6 – 25%

Для расчета оптической ширины запрещенной зоны получены спектры оптического пропускания пленок оксида ванадия (рис. 7). Установлено, что пленки, нанесенные при Γ_{O_2} менее 30 %, обладали высоким оптическим поглощением. Средний коэффициент пропускания в области спектра 450–900 нм не превышал 0,3. Край оптического пропускания находился на длине волны около 350 нм. При увеличении Γ_{O_2} более 30 % коэффициент пропускания резко увеличивался до 0,6–0,8 (рис. 7, кривая 5), и край оптического пропускания смещался в сторону более длинных волн.

С использованием полученных оптических спектров проведены расчеты оптической ширины запрещенной зоны пленок. В связи с аморфной структурой пленок, отсутствием данных о стехиометрическом составе пленок и теоретических расчетов зонной структуры

пленок оксида ванадия для расчета запрещенной зоны построены спектральные зависимости $(ah\omega)$ от энергии фотона для прямых и непрямых разрешенных переходов. Ширина запрещенной зоны E_g определялась путем экстраполяции прямолинейных участков зависимостей $(ah\omega)^2$ и $(ah\omega)^{1/2}$ от энергии фотона $h\omega$ до пересечения с осью абсцисс. На рис. 8 представлены зависимости ширины запрещенной зоны для прямых (1) и непрямых (2) разрешенных переходов от содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Ширина запрещенной зоны также имела сложную зависимость от Γ_{O_2} . Для прямых переходов ширина запрещенной зоны изменялась в пределах от 3,48–3,78 эВ. При малых концентрациях кислорода ($\Gamma_{O_2} = 4\%$) ширина запрещенной зоны 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 имели более низкие значения (от 3,06 до 3,61 эВ).

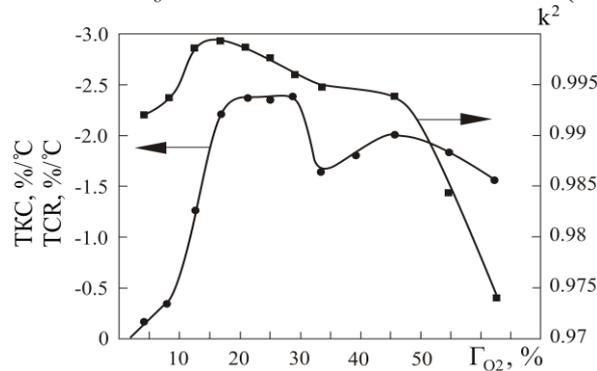


Рис. 6. Зависимость ТКС и достоверности аппроксимации k^2 зависимости $R(T)$ пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig.6. Dependence of the TCR and the reliability of approximation k^2 of the dependence $R(T)$ of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

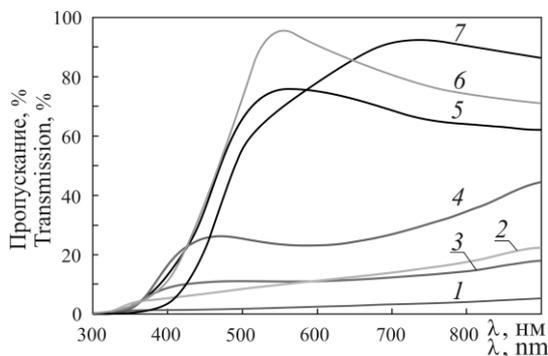


Рис. 7. Спектры оптического пропускания пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов: 1 – 12,5 %, 2 – 16,7 %, 3 – 25,0 %, 4 – 29,2 %, 5 – 37,5 %, 6 – 45,8 %, 7 – 62,5 %

Fig. 7. Optical transmission spectra of vanadium oxide films deposited at various oxygen concentrations in an Ar/O₂ gas mixture: 1 – 12.5 %, 2 – 16.7 %, 3 – 25.0 %, 4 – 29.2 %, 5 – 37.5 %, 6 – 45.8 %, 7 – 62.5 %

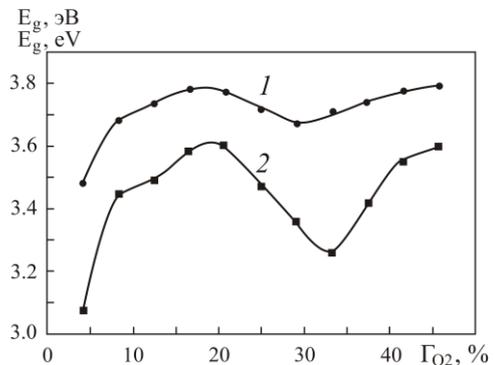


Рис. 8. Зависимость ширины запрещенной зоны пленок оксида ванадия для прямых (1) и непрямых (2) разрешенных переходов от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig. 8. Dependence of the band gap of vanadium oxide films for direct (1) and indirect (2) allowed transitions on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

Анализ полученных результатов показывает, что зависимости напряжения разряда, скорости нанесения пленок, ТКС, удельного сопротивления и ширины запрещенной зоны от концентрации кислорода имеют сложный характер. Данное поведение, по-видимому, связано с тем, что нанесенные пленки представляют собой смесь различных промежуточных оксидов ванадия, электрофизические свойства которых имеют большие различия. И электрофизические свойства пленок определяются соотношением концентраций этих оксидов. Формирование пленок оксида ванадия с высокими значениями ТКС (2,2–2,3 %/°C) отмечалось в сравнительно

узком диапазоне концентраций кислорода (от 17 до 29 %). При этом достоверность аппроксимации составляла более 0,995, что говорит о высокой идеальности кривой $R(T)$ во всем температурном диапазоне измерений. В данном диапазоне концентраций кислорода удельное сопротивление пленок находилось в пределах $(0,6-4,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м. Однако при Γ_{O_2} более 25 % удельное сопротивление пленок резко увеличивалось и становилось более 0,1 Ом·м, что не позволяет использовать такие пленки в микроболометрах из-за высокого сопротивления. Анализ зависимости ширины запрещенной зоны от Γ_{O_2} показывает, что в диапазоне концентраций кислорода в Ar/O₂ смеси газов 17–25 % наблюдается максимум значений E_g . Для прямых переходов E_g изменяется от 3,7 до 3,78 эВ, для непрямых переходов от 3,47 до 3,61 эВ. Следует также отметить, что в данном диапазоне концентраций кислорода напряжение разряда монотонно увеличивается и однозначно зависит от Γ_{O_2} . Скорость нанесения пленок имеет сравнительно высокие значения от 0,32 до 0,38 нм/с. Это позволяет эффективно и воспроизводимо наносить пленки оксида ванадия для использования в качестве термочувствительных слоев микроболометров.

Заключение

Проведены исследования электрофизических характеристик пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. Установлено, что метод импульсного реактивного магнетронного распыления может эффективно использоваться для контролируемого и воспроизводимого нанесения пленок оксида ванадия. При реактивном магнетронном распылении формируются аморфные пленки оксида ванадия, которые представляют собой смесь различных промежуточных оксидов. При концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов 17–25 % без нагрева подложек получены пленки оксида ванадия с удельным сопротивлением $(0,6-4,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м, ТКС 2,2–2,3 %/°С и шириной запрещенной зоны для прямых переходов 3,7–3,78 эВ. Полученные характеристики позволяют использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев микроболометров.

Список литературы / References

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Breen Th.B., Kohin M., Marshall Ch. A., Murphy R., White T.E., Leary A.R., Parker T.W. Even more applications of uncooled microbolometer sensors. *Proc. SPIE*. 1999;3698:308-319.
3. Mauger A, Julien Ch. M. Review V₂O₅ thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401. DOI: 10.3934/matrsoci.2018.3.349.
4. Singh T., Wang Sh., Aslam N., Zhang H., Hoffmann-Eifert S., Mathur S. Atomic Layer Deposition of Transparent VO_x Thin Films for Resistive Switching Applications. *Chemical Vapor Deposition*. 2014;20(7-9):291-297. DOI: 10.1002/cvde.201407122.
5. Esther A.C.M., Sharma A.K., Dey A., Porwal D., Pradeepkumar M.S., Rangappa D. Optical constants of pulsed RF magnetron nanocolumnar V₂O₅ coating. *Physica B*. 2015;478:161-166.
6. Luo Z., Wu Z., Xu X., Du M., Wang T., Jiang Y. Impact of substrate temperature on the microstructure, electrical and optical properties of sputtered nanoparticles V₂O₅ thin film. *Vacuum*. 2010;85(2):145-150.
7. Patil C.E., Tarwal N.L., Shinde P.S., Deshmukh H.P., Patil P.S. Synthesis of electrochromic vanadium oxide by pulsed spray pyrolysis technique and its properties. *Journal of Physics D. Applied Physics*. 2009;42(2):1-6.
8. Kumar A., Singh P., Kulkarni N., Kaur D. Structural and optical studies of nanocrystalline V₂O₅ thin film. *Thin Solid Film*. 2008;516(6):912-918.
9. Beke S. A review of the growth of V₂O₅ films from 1885 to 2010. *Thin Solid Films*. 2011;519(6):1761-1771.
10. Chen S., Jianjun L., Jun D., Hong M., Hongchen W., Xinjian Y. Characterization of nanostructured VO₂ thin films grown by magnetron controlled sputtering deposition and post annealing method. *Optics Express*. 2009;17(26):24153-24161.
11. Zhang H., Wu Z., Yan D., Xu X., Jiang Y. Tunable hysteresis in metal-insulator transition of nanostructured vanadium oxide thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 2014;552:218-224.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Нгуен Т.Д., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Занько А.И., инженер-технолог ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Голосов Д.А., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Завадский С.М., к.т.н., доцент, начальник Центра 9.1. НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мельников С.Н., к.т.н., ведущий научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Колос В.В., заместитель заведующего отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375-29-671-35-43;
e-mail: golosov@bsuir.by
Голосов Дмитрий Анатольевич

Information about the authors

Nguyen T.D., PG student of Electronic Technique and Technology Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zanko A.I., Process Engineer of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Golosov D.A., PhD, Associate Professor, Leader Researcher of Center 9.1 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zavadski S.M., PhD, Associate Professor, Head of Center 9.1 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Melnikov S.N., PhD, Leader Researcher of Center 9.1 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kolos V.V., Deputy Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-671-35-43;
e-mail: golosov@bsuir.by
Golosov Dmitriy Anatol'evich