

УДК 621.3.049.77–621.793

## БОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ ВОЛЬФРАМОМ

*То К.Т.**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь**Научный руководитель: Голосов Д.А. – канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры ЭТТ*

**Аннотация.** Проведен исследования влияния параметров процесса распыления и степени легирования вольфрамом на электрофизические характеристики пленок оксида ванадия, формируемых методом реактивного магнетронного распыления V-W мозаичной мишени. Получены зависимости удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) от концентрации W в мишени и концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов в процессе нанесения. Установлено, что при добавках вольфрама характер зависимости не изменялся, но характеристики смещались в сторону больших концентраций кислорода. При увеличении количества W вставок с 0 до 2 максимум удельного сопротивления пленок смещался с 16.7 % до 22.4 % O<sub>2</sub>. Однако формирование пленок с высоким ТКС наблюдалось в более узком диапазоне концентраций кислорода от 20 – 30 %.

**Ключевые слова:** Легированный оксид ванадия, реактивное магнетронное распыление, мозаичная мишень, болометрические характеристики, температурный коэффициент сопротивления, удельное сопротивление.

**Введение.** В настоящее время интересно ведутся исследования, направленные на разработку интегральных неохлаждаемых микроболометрических приемников инфракрасного излучения, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. В качестве термочувствительного слоя приемных элементов микроболометров наиболее перспективным является использование пленок оксида ванадия (VO<sub>x</sub>). Однако существует ряд таких недостатков пленок оксида ванадия при применении их для формирования активных слоев неохлаждаемых микроболометров, как нестабильность их свойств в процессе нанесения пленок и процессе эксплуатации, сложность формирования требуемого оксида, низкая воспроизводимость, низкий ТКС и большое удельное сопротивление.

Улучшение электрофизических свойств оксида ванадия (расширение спектрального диапазона в сторону более коротких длин волн, снижение температуры фазового перехода, изменения его крутизны и других характеристик) может быть достигнуто за счет модификации слоев VO<sub>2</sub> путем легирования их дополнительными примесями родственных соединений [2]. Использование некоторых легирующих примесей позволяет увеличить температурный коэффициент сопротивления, снизить удельное сопротивление пленок и повысить функциональные свойства пленок оксида ванадия. Одним из таких материалов является оксид вольфрама. Легирование пленок VO<sub>x</sub> оксидом вольфрама и варьирование составом V<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>O<sub>y</sub> в широком интервале значений x и y позволяет стабилизировать метастабильную фазу диоксида ванадия, увеличить температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и понизить удельное сопротивление пленок. Однако электрофизические характеристики пленок легированного оксида ванадия очень сильно зависят от концентрации вольфрама в пленках.

В данной статье проведены исследования влияния концентрации вольфрама в V-W распыляемой мишени и параметров процесса реактивного магнетронного распыления на болометрические характеристики пленок V<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>O<sub>y</sub>.

**1 Эксперимент.** Пленки легированного вольфрамом оксида ванадия наносились методом импульсного реактивного магнетронного распыления V-W мозаичных мишеней в среде Ar/O<sub>2</sub> рабочих газов. Схема экспериментальной установки для нанесения пленок представлена рисунке 1. 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 ENIS.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) *APEL-M-1.5BP-800-2* (ООО “Прикладная электроника”, Россия) мощностью 1.5 кВт.

Мозаичные V-W мишени представляли собой V основу (99.9 % чистоты)  $\varnothing$  80 мм и толщиной 6 мм в которую впрессованы цилиндрические W вставки (99.9 % чистоты). Вставки  $\varnothing$  2 мм равномерно распределялись по диаметру 42 мм (рисунок 2). В ходе исследований количество вольфрамовых вставок изменялось от 0 (мишень V) до 2 штук (мишень VW-2).

Пленки  $V_{1-x}W_xO_y$  наносились на тестовые структуры и оптическое стекло BK7. Тестовая структура представляла собой ряд Ti контактов шириной 2 мм и длиной 10 мм, расположенных на расстоянии 1, 2, 4 и 8 мм друг от друга. Тестовые структуры формировались на Si подложках, покрытых слоем  $Si_3N_4$  (100 нм). Тело терморезистора формировалось путем нанесения пленок  $V_{1-x}W_xO_y$  через маску. Размер тела терморезистора 8×32 мм.

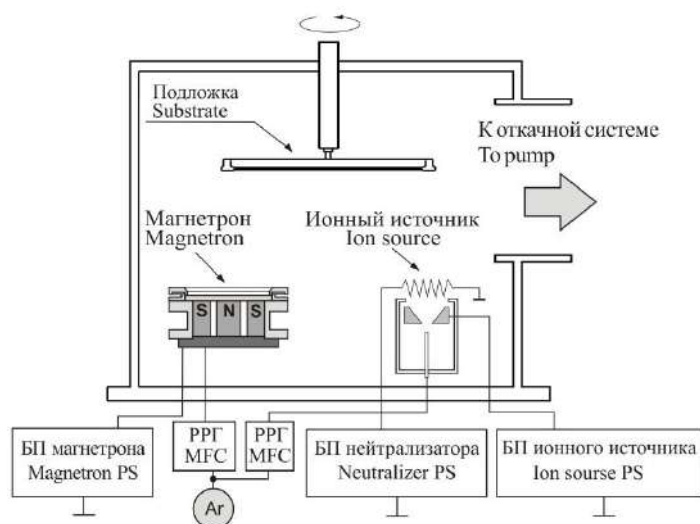


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для нанесения пленок легированного оксида ванадия методом реактивного магнетронного распыления



Рисунок 2 – Общий вид V-W мозаичной мишени

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 Ar. Поток аргона составлял  $Q_{Ar} = 30$  мл/мин. Время очистки, напряжение

и ток разряда во всех экспериментах было постоянным и составляло  $t = 6$  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 Ar. Поток Ar в камеру составлял  $Q_{Ar} = 60$  мл/мин. V-W 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<sub>2</sub> 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 V<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>O<sub>y</sub>. Для этого подложки подводились в зону нанесения. В процессе экспериментов содержание кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов ( $\Gamma_{O_2}$ ) 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 в зависимости от концентрации кислорода изменялось от 450 до 583 В. Толщина нанесенных пленок составляла около 150 нм и регулировалось временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов.

Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Спектры оптического пропускания пленок в диапазоне 300 – 900 нм получены с помощью спектрофотометра Проскан МС-121.

Электрическое сопротивление резисторов измерялось при комнатной температуре при токе 100 мкА. Удельное сопротивление пленок рассчитывалось исходя из сопротивления резистора  $R$ , его коэффициента формы и толщины пленки V<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>O<sub>y</sub>. 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

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

где  $R$  – сопротивление резистора;

$T$  – температура терморезистора.

**2 Результаты.** Проведены исследования влияния концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов на удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления пленок V<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>O<sub>y</sub> при распылении ванадиевой мишени и мозаичных V-W мишеней с различным количеством  $W$  вставок. На рисунке 3 представлена зависимость удельного сопротивления пленок легированного вольфрамом оксида ванадия. Как видно из рисунка при распылении ванадиевой мишени в атмосфере Ar удельное сопротивление пленок составляло  $\rho = 5 \times 10^{-6}$  Ом×м. При увеличении концентрации кислорода до 7.0 % удельное сопротивление пленок незначительно увеличивалось до  $2 \times 10^{-5}$  Ом×м и далее резко возрастало до  $2.5 \times 10^{-2}$  Ом×м при  $\Gamma_{O_2} = 16.7$  %. При дальнейшем увеличении  $\Gamma_{O_2}$  в диапазоне 16.7 – 25 %  $\rho$  первоначально снижалось до  $6 \times 10^{-3}$  Ом×м и далее увеличивалось до  $4 \times 10^{-2}$  Ом×м. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода в смеси газов сопротивление резисторов увеличивалось до десятков мегаом, т.е. формировались диэлектрические пленки.

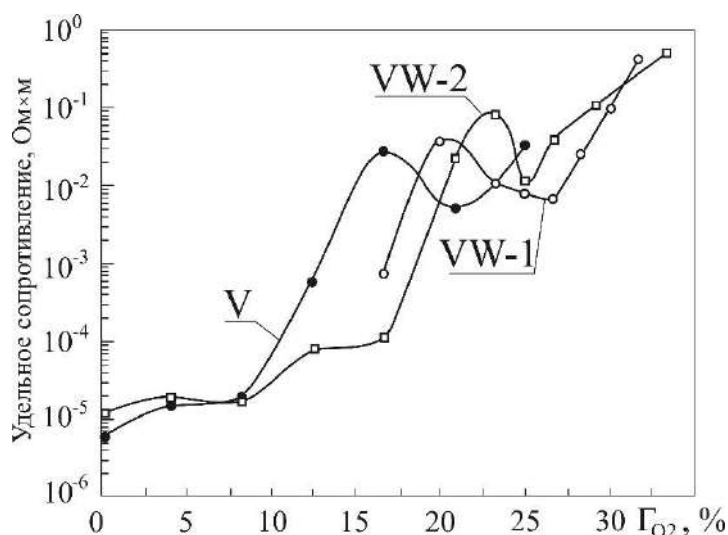


Рисунок 3 – Зависимость удельного сопротивления пленок легированного вольфрамом оксида ванадия от концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов при распылении различных мишеней

При добавках вольфрама характер зависимости не изменялся, но характеристики смещались в сторону больших концентраций кислорода. При увеличении количества вставок с 0 до 2 максимум удельного сопротивления пленок смещался с 16.7 % до 22.4 %  $O_2$ .

Температурный коэффициент сопротивления также зависел от концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов (рисунок 4). При распылении  $V$  мишени и увеличении концентрации кислорода ТКС пленок увеличивался и на участке  $\Gamma_{O_2}$  от 16 до 29 % ТКС пленок составлял 2,2 – 2,3  $\%/^{\circ}C$  при достоверности аппроксимации кривой экспоненциальной функцией  $k^2$  более 0,995. При увеличении  $\Gamma_{O_2}$  более 30 % ТКС пленок снижался до 1,6 – 2,0  $\%/^{\circ}C$ . При этом достоверность аппроксимации также снижалась до 0,974 при  $\Gamma_{O_2} = 63$  %. При легировании пленок оксида ванадия вольфрамом ТКС пленок практически не изменялся (рисунок 4, кривые  $VW-1$ ,  $VW-2$ ). Однако формирование пленок с высоким ТКС наблюдалось в более узком диапазоне концентраций кислорода.

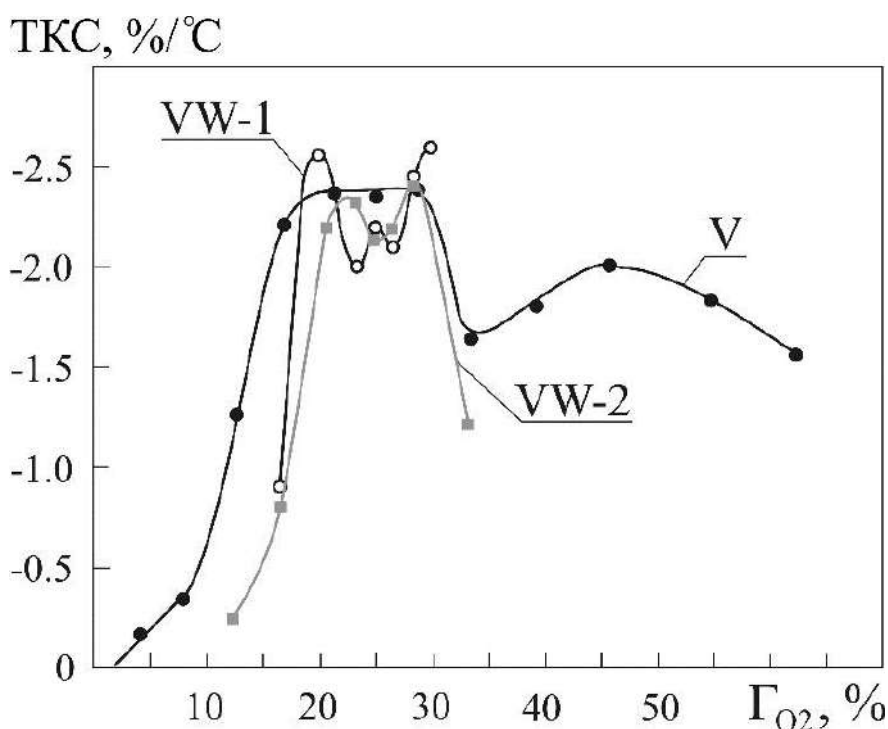


Рисунок 4 – Зависимость температурного коэффициента сопротивления пленок легированного вольфрамом оксида ванадия от концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов при распылении различных мишеней

**Заключение.** Проведены исследования влияния концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов на удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления пленок  $V_{1-x}W_xO_y$  при распылении ванадиевой мишени и мозаичных  $V-W$  мишеней с различным количеством  $W$  вставок. Установлено, что при добавках вольфрама характер зависимости не изменялся, но характеристики смещались в сторону больших концентраций кислорода. При увеличении количества  $W$  вставок с 0 до 2 максимум удельного сопротивления пленок смещался с 16.7 % до 22.4 %  $O_2$ . Однако формирование пленок с высоким ТКС наблюдалось в более узком диапазоне концентраций кислорода от 20 – 30 %.

### Список литературы

1. Rogalski A. *Infrared Detectors for the Future* // *Actaphysicapolonica*. – A. – 2009. – Vol. 116, No. 3 P. 389-406.
2. Кириленко, В.В. Синтез пленкообразующих материалов из оксидов ванадия и исследование возможностей получения на их основе оптических покрытий / В.В. Кириленко, Б.М. Жигарновский, А.Г. Бейрахов // *Оптический журнал*. – 2010. – № 77. – С. 75–87.

UDC 621.3.049.77–621.793

## BOLOMETRIC CHARACTERISTICS OF VANADIUM OXIDE FILMS DOPING WITH TUNGSTEN

*To Q.T.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Golosov D.A. – PhD, assistant professor, associate professor of the department of ICT*

**Annotation.** The influence of the parameters of the sputtering process and the degree of doping with tungsten on the electrical characteristics of vanadium oxide films formed by reactive magnetron sputtering of a V-W mosaic target has been studied. The dependences of the resistivity and temperature coefficient of resistance (TCR) on the concentration  $W$  in the target and the concentration of oxygen in the  $Ar/O_2$  gas mixture during deposition were obtained. It was found that with the addition of tungsten, the nature of the dependence did not change, but the characteristics shifted towards higher oxygen concentrations. With an increase in the number  $W$  of inserts from 0 to 2, the maximum resistivity of the films shifted from 16.7% to 22.4%  $O_2$ . However, the formation of films with a high TCR was observed in a narrower range of oxygen concentrations from 20 – 30%.

**Keywords:** Doped vanadium oxide, reactive magnetron sputtering, mosaic target, bolometric characteristics, temperature coefficient of resistance, resistivity.