



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-85-93>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК621.3.049.77: 621.793

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ

Т.Д. НГУЕН<sup>1</sup>, А.И. ЗАНЬКО<sup>2</sup>, Д.А. ГОЛОСОВ<sup>1</sup>, С.М. ЗАВАДСКИЙ<sup>1</sup>, С.Н. МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>,  
В.В. КОЛОС<sup>2</sup>, Н.К. ТОЛОЧКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20 апреля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** Исследованы процессы реактивного магнетронного распыления V мишени в среде Ar/O<sub>2</sub> газов. Установлено, что при использовании для распыления импульсного тока и давления в камере менее 0,06 Па интенсивности линий излучения ванадия 437,922 нм, аргона 750,386 нм и кислорода 777,417 нм при изменении концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов ( $f_{O_2}$ ) не имеют гистерезиса и однозначно зависят от параметров процесса распыления, что позволяет стабилизировать процесс без использования систем обратной связи. При контроле процесса распыления методом оптической эмиссионной спектроскопии и нанесении пленок на вращающуюся подложку диаметром 100 мм получены пленки оксида ванадия (VO<sub>x</sub>) с неравномерностью толщины менее ±2,4 % и неравномерностью поверхностного сопротивления менее ±2,5 %. Исследования методом длинной линии влияния параметров процесса реактивного распыления и последующего отжига при давлении O<sub>2</sub> 0,04 Па на характеристики терморезистивных структур на основе пленок VO<sub>x</sub> показали, что при нанесении контактов без ионной очистки вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости сопротивления от длины резисторов  $R(L)$  нелинейны, что свидетельствует о наличии в контактах потенциального барьера. Предварительная ионная очистка позволяет значительно улучшить линейность ВАХ. Наиболее линейные ВАХ получены для Ti контактов. Однако удельное контактное сопротивление контакта VO<sub>x</sub>/Ti увеличивается при увеличении степени окисления пленок VO<sub>x</sub> и достигает  $\rho_c = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$  при удельном сопротивлении оксида ванадия  $\rho = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Анализ зависимостей температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и  $\rho$  пленок VO<sub>x</sub> от температуры отжига показал, что при отжиге  $\rho$  и ТКС незначительно снижаются, т. е. происходит частичное восстановление пленок. Однако, в отличие от отжига при атмосферном давлении, отсутствуют области температур, при которых происходит резкое снижение удельного сопротивления и ТКС.

**Ключевые слова:** оксид ванадия, микроболометр, терморезистивная структура, реактивное магнетронное распыление, отжиг, контактное сопротивление.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., Толочко Н.К. Формирование и исследование характеристик терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 85-93.

## FORMATION AND INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF THERMORESISTIVE STRUCTURES BASED ON VANADIUM OXIDE FILMS

TUYEN D. NGUYEN<sup>1</sup>, ANDREY I. ZANKO<sup>2</sup>, DMITRIY A. GOLOSOV<sup>1</sup>, SERGEY M. ZAVADSKI<sup>1</sup>, SERGEY N. MELNIKOV<sup>1</sup>, VLADIMIR V. KOLOS<sup>2</sup>, N.K. TOLOCHKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>JSC "Integral" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** The processes of reactive magnetron sputtering of a V target in Ar/O<sub>2</sub> gas mixture are investigated. It was found that when using a pulsed current for sputtering and a pressure in the chamber less than 0.06 Pa, the intensities of the emission lines of vanadium at 437.922 nm, argon at 750.386 nm, and oxygen at 777.417 nm with a change in the oxygen concentration in Ar/O<sub>2</sub> gas mixtures ( $f_{O_2}$ ) have no hysteresis and unambiguously depend on the parameters of the sputtering process, which makes it possible to stabilize the process without using feedback systems. By monitoring the sputtering process by optical emission spectroscopy and depositing films on a rotating substrate of diameter 100 mm, vanadium oxide (VO<sub>x</sub>) films with nonuniformity thickness less than ±2.4 % and surface resistance less than ±2.5 % were obtained. Studies by transmission line method of the influence of the parameters of the reactive magnetron sputtering and subsequent annealing at O<sub>2</sub> pressure of 0.04 Pa on the characteristics of thermoresistive structures based on VO<sub>x</sub> films showed that when the contacts are deposited without ion cleaning, the current-voltage characteristics (IV) and the dependence of the resistance on the length of resistors  $R(L)$  are nonlinear, which indicates the presence of a potential barrier in the contacts. Preliminary ion cleaning can significantly improve the linearity of the IV characteristic. The most linear IV characteristics were obtained for Ti contacts. However, the specific contact resistance of the VO<sub>x</sub>/Ti contact increases with an increase in the oxidation state of the VO<sub>x</sub> films and reaches  $\rho_c = 0.1 \text{ Ohm}\cdot\text{m}^2$  at the specific resistance of vanadium oxide  $\rho = 0.1 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ . The analysis of the dependences of the temperature coefficient of resistance (TCR) and  $\rho$  of VO<sub>x</sub> films on the annealing temperature showed that, upon annealing,  $\rho$  and TCR slightly decrease, i. e. there occurs a partial deoxidation of the films. However, unlike annealing at atmospheric pressure, there are no temperature regions at which a sharp decrease in the resistivity and TCR occurs.

**Keywords:** vanadium oxide, microbolometer, thermoresistive structure, reactive magnetron sputtering, annealing, contact resistance.

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

**For citation.** Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., Tolochko N.K. Formation and investigation of characteristics of thermoresistive structures based on vanadium oxide films. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 85-93.

### Введение

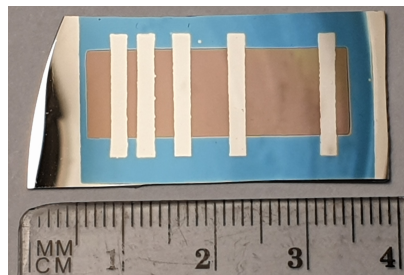
В последние годы интенсивно ведутся исследования, направленные на разработку неохлаждаемых микроболметрических матриц инфракрасного диапазона, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. В таких устройствах в качестве термочувствительного материала могут использоваться пленки некоторых металлов, аморфного гидрогенизированного кремния Si:H, поликристаллического SiGe и оксида ванадия VO<sub>x</sub>. Из данных материалов оксид ванадия обладает наилучшим сочетанием показателей: сравнительно высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), низким удельным сопротивлением и низкой способностью к созданию помех [2]. Однако главной проблемой использования VO<sub>x</sub> является его поливалентная природа. Оксид ванадия имеет ряд оксидных состояний, а его электрофизические свойства имеют сильную зависимость

от структуры и фазового состава [3]. Поэтому для воспроизводимого формирования пленок  $VO_x$  необходимо точно контролировать параметры процесса нанесения и последующего отжига. При этом к процессу нанесения пленок предъявляется ряд требований. Метод нанесения должен обеспечивать формирование пленок с высокой равномерностью толщины и свойств по площади подложки на Si пластинах диаметром до 200 мм. При этом процессы нанесения и последующего отжига должны быть стабильными и обеспечивать высокую воспроизводимость электрофизических свойств пленок не только в партии подложек, обрабатываемых в едином цикле, но и от процесса к процессу.

Второй проблемой является полупроводниковый характер пленок  $VO_x$ , что может приводить к формированию потенциального барьера на контакте оксид ванадия – металл, и величина формируемого барьера зависит не только от используемого металла, но и от характеристик пленок оксида ванадия. Наличие барьера на границе металл – полупроводник приводит к тому, что возможно явление выпрямления переменного тока, а вольт-амперная характеристика (ВАХ) для постоянного тока будет несимметричной. Однако на настоящий момент технология формирования омических контактов к оксидным проводникам гораздо менее развита, чем к кремнию. Поэтому проблема формирования качественных омических контактов к пленкам оксида ванадия является актуальной. Таким образом, целью работы было исследование процессов нанесения и отжига пленок  $VO_x$  и процессов формирования контактов к пленкам оксида ванадия с целью определения возможности воспроизводимого формирования терморезистивных структур с требуемыми свойствами.

### Методика проведения эксперимента

Для измерения характеристик пленок  $VO_x$  и контактов оксид ванадия – металл в работе использовался метод длинной линии (Transmission line method или TLM) [4]. Метод TLM обеспечивает измерение удельного сопротивления пленочного резистора, удельного сопротивления контакта и учитывает токи растекания под контактом по объему полупроводниковой пленки [5]. Тестовая терморезистивная структура представляла собой плоский резистор из оксида ванадия размером  $8 \times 32$  мм с рядом контактов шириной 2 мм и длиной 10 мм, расположенных на расстоянии 1, 2, 4 и 8 мм друг от друга (рис. 1).



**Рис. 1.** Тестовая структура для измерения характеристик терморезистивных структур методом TLM  
**Fig. 1.** Test structure for measuring the characteristics of thermoresistive structures by the TLM method

Тестовые структуры формировались на Si подложках, покрытых слоем  $Si_3N_4$  (100 нм). Первоначально формировалось тело резистора. Для этого методом высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени (чистота 99,96 %) в среде  $Ag/O_2$  рабочих газов через маску наносились пленка  $VO_x$ . Описание схемы установки магнетронного нанесения и методика нанесения пленок приведены в статьях [6, 7]. Пленки  $VO_x$  наносились на вращающуюся подложку, которая располагалась на расстоянии 120 мм от мишени магнетрона. При этом ось вращения подложки была смещена относительно оси магнетрона на расстояние 100 мм. Скорость вращения подложки 24,5 об/мин. Для питания магнетрона использовался биполярный асимметричный импульсный ток (частота импульсов 10 кГц, напряжение и длительность положительного импульса  $U^+ = 25$  В,  $\tau = 3$  мкс соответственно). Ток разряда магнетрона поддерживался постоянным и составлял  $I_t = 1,5$  А. Концентрация кислорода в  $Ag/O_2$  смеси газов  $\Gamma_{O_2}$  изменялась от 12,5 до 25,0 % при общем давлении в камере

0,06 Па. Толщина нанесенных пленок составляла около 150 нм и регулировалась временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов. Для анализа и контроля процесса реактивного магнетронного распыления использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС). Спектры оптического излучения плазмы магнетронного разряда в диапазоне длин волн 250 – 1000 нм получены с использованием оптического эмиссионного спектрометра видимого и ближнего ИК излучения SL 40-2-2048 ISA. Время накопления спектра составляло 500 мс. После нанесения пленки VO<sub>x</sub> подвергались отжигу при пониженном давлении. Отжиг производился на вакуумной установке ВУ-1Б, оборудованной нагревательным столиком. При отжиге образцы устанавливались на столик, камера установки откачивалась до остаточного давления 10<sup>-3</sup> Па, и в камеру подавался кислород до давления 0,04 Па. Образцы разогревались со скоростью 10 °С/мин до требуемой температуры и выдерживались от 60 мин. Температура отжига изменялась от 200 до 400 °С. После окончания отжига образцы охлаждались до температуры 60 °С со скоростью 7,5 °С/мин. Затем методом магнетронного распыления через вторую маску наносились контакты. В качестве материала контактов использовались Al, Ti, Ni, V, TiN (30 нм)/Ti. Толщина слоя металлизации составляла 150 нм. В некоторых экспериментах перед нанесением материала контактов производилась ионная очистка поверхности пленки VO<sub>x</sub>. Для этого использовался ионный источник на основе ускорителя с анодным слоем. Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Поверхностное сопротивление пленок VO<sub>x</sub> измерялось с помощью прибора измерения удельного поверхностного сопротивления ИУС-3. Для определения электрофизических характеристик пленок VO<sub>x</sub> и контактов оксид ванадия – металл, на полученных структурах измерялось полное сопротивление резисторов между каждой парой ближайших контактов. При измерениях подавался стабильный ток 100 мкА и измерялось падение напряжения между контактами. Затем строился график зависимости сопротивления  $R$  от расстояния между контактами  $L$  и производилась линейная аппроксимация экспериментальных данных уравнением типа  $y=ax+b$ . Из графика зависимости полного сопротивления от расстояния между электродами  $R(L)$  извлекались два параметра: поверхностное сопротивление пленки ( $r_s$ ), сопротивление контакта ( $R_c$ ). Удельное сопротивление контакта определялось как сопротивление контакта  $R_c$  приведенное к единице площади контакта  $S_c$ :

$$\rho_c = R_c S_c. \quad (1)$$

Удельное сопротивление пленок VO<sub>x</sub> определялось исходя из  $r_s$  и толщины пленки. При измерениях ТКС температура терморезисторов изменялась от комнатной до 90 °С и обратно со скоростью 4 °С/мин. Для подтверждения омического поведения контактов также проводились измерения ВАХ тестовых структур. Вольт-амперные характеристики получены с помощью измерителя иммитанса E7-20. При измерениях использовалась развертка по напряжению от минус 40 до 40 В и регистрировался ток.

### Результаты и их обсуждение

С целью определения режимов воспроизводимого нанесения пленок VO<sub>x</sub> проведены исследования плазмы магнетронного разряда при распылении V мишени в среде Ar/O<sub>2</sub> рабочих газов. На рис. 2 представлен типичный спектр ОЭС плазмы магнетронного разряда. На полученных спектрах наиболее интенсивные линии излучения возбужденных атомов (VI) и ионов (VII) ванадия находились в диапазоне длин волн 300 – 500 нм. Были зафиксированы группы пиков на длинах волн 304 – 313, 317 – 321, 380 – 390, 408 – 413, 432 – 441, 457 – 460 и 482 – 489 нм. Наиболее интенсивный пик VI наблюдался на длине волны 318,04 нм. Линии ионов ванадия имели очень низкую интенсивность. Линии Ag находились в диапазоне длин волн 700 – 950 нм. Наиболее интенсивные линии на длинах волн 750,39, 762,4, 811,0 нм принадлежали возбужденным атомам аргона (ArI). Линий ионов аргона (ArII) не было зафиксировано. В спектре также были идентифицированы тройные линии возбужденных атомов кислорода (OI) в диапазонах длин волн 777,1 – 777,6 нм и 844,63 – 844,64 нм, парные линии в диапазоне 926,5 – 926,6 нм и линия на длине волны 557,73 нм. Линий ионов кислорода

(OI) в спектре также не наблюдалось. Это позволяет сделать вывод, что при магнетронном распылении ванадия распыленный поток состоит из нейтральных атомов. На основе анализа полученных эмиссионных спектров плазмы магнетронного разряда были определены интенсивные линии ванадия VI (437,922 нм), аргона ArI (750,386 нм) и кислорода OI (777,417 нм), которые в дальнейшем использовались для контроля состава плазмы при управлении процессом реактивного магнетронного распыления. Наиболее интенсивная линия ванадия VI (318,04 нм) не использовалась для контроля состава плазмы, поскольку было установлено, что в процессе нанесения пленок продукты распыления попадают на входное окно спектрометра. Пленки  $VO_x$  имеют высокое оптическое поглощение в диапазоне длин волн до 300 – 400 нм, что приводит к погрешности измерения ее интенсивности. По данной причине в качестве контрольной была выбрана линия VI (437,92 нм), имеющая более низкую интенсивность, но не попадающая в диапазон длин волн оптического поглощения пленок  $VO_x$ .

С целью определения эффективности использования процесса высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления для контролируемого нанесения пленок оксида ванадия исследовано изменение интенсивности контрольных линий излучения плазмы при увеличении и уменьшении концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов (рис. 3). Установлено, что при увеличении концентрации кислорода до  $\Gamma_{O_2} = 17\%$  интенсивность линии VI практически не изменялась. При дальнейшем увеличении  $\Gamma_{O_2}$  интенсивность линии начинала уменьшаться и снижалась практически до нуля при  $\Gamma_{O_2} = 40\%$ . Линия ArI при увеличении  $\Gamma_{O_2}$  уменьшалась практически пропорционально содержанию Ar в камере. Линия OI при низких концентрациях кислорода (до 7%) практически не наблюдалась. При дальнейшем увеличении  $\Gamma_{O_2}$  линия OI увеличивалась практически пропорционально концентрации кислорода. При увеличении и уменьшении расхода газов интенсивности линий ванадия, кислорода и аргона однозначно зависели от концентрации кислорода, гистерезис при увеличении и уменьшении  $\Gamma_{O_2}$  отсутствовал. На основе этих данных сделан вывод, что эмиссионные линии VI (437,92 нм), OI (777,41 нм) и ArI (750,39 нм) идентично отражают изменения, происходящие в системе распыления, и могут эффективно использоваться для контроля процесса распыления при нанесении пленок оксида ванадия.

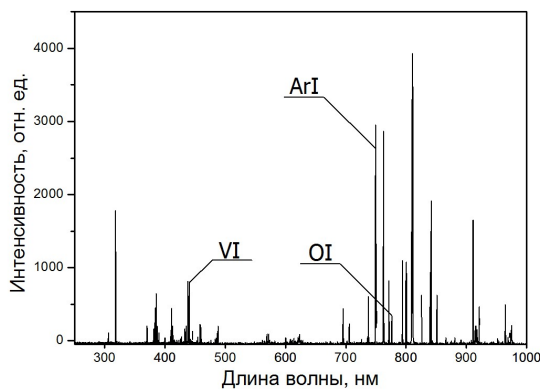


Рис. 2. Оптический эмиссионный спектр излучения плазмы при распылении V мишени в среде Ar/O<sub>2</sub> рабочих газов ( $\Gamma_{O_2} = 16,67\%$ )

Fig. 2. Optical emission spectrum of plasma radiation upon sputtering of a V target in an Ar/O<sub>2</sub> gas mixture ( $\Gamma_{O_2} = 16.67\%$ )

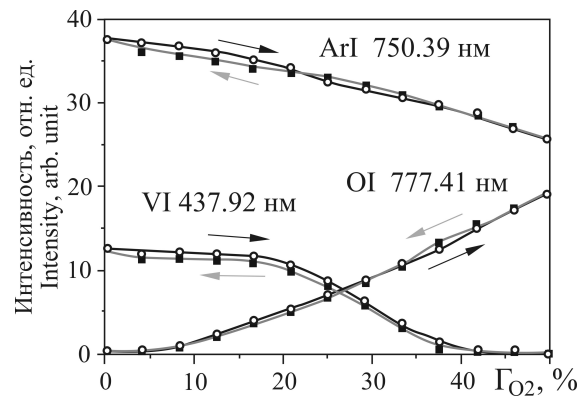


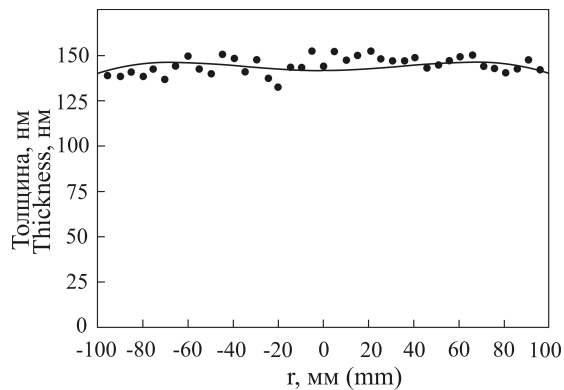
Рис. 3. Изменение интенсивности линий VI, OI и ArI при увеличении и уменьшении концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов

Fig. 3. Changing the intensities of the lines VI, OI and ArI with increasing and decreasing the oxygen concentration in the Ar/O<sub>2</sub> gas mixture

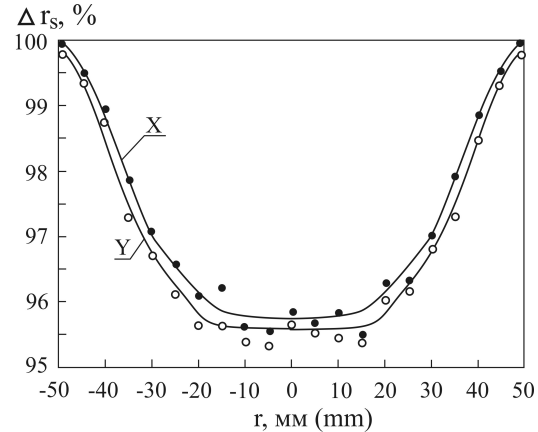
Проведены исследования равномерности распределения толщины пленок  $VO_x$  при нанесении на вращающуюся подложку (рис. 4). Пленки наносилась при следующих режимах:  $\Gamma_{O_2} = 25,0\%$ , ток и напряжение разряда соответственно  $I_t = 1,5$  А,  $U_t = 538$  В, время нанесения 455 с. Установлено, что неравномерность толщины пленок  $VO_x$  на подложках диаметром 100 и 200 мм не превышала  $\pm 2,4\%$ . Для измерения неравномерности распределения поверхностного сопротивления  $r_s$  на подложку диаметром 100 мм были нанесены пленки  $VO_x$  со сравнительно низким удельным сопротивлением при  $\Gamma_{O_2} = 12,5\%$ . Измерения  $r_s$  пленок по поверхности подложки проводились по двум взаимно перпендикулярным осям с шагом 5 мм. Поверхностное

сопротивление пленок на подложке диаметром 100 мм изменялось от 415 до 435 Ом/□. Относительное изменение поверхностного сопротивления пленок не превышало  $\pm 2,5\%$  (рис. 5).

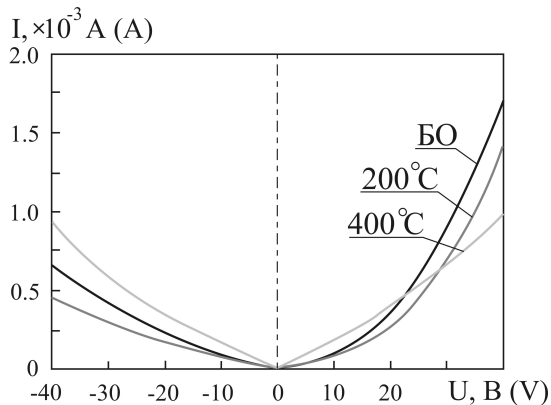
Также проведены исследования влияния параметров процесса реактивного магнетронного распыления и последующего отжига в атмосфере  $O_2$  при давлении 0,04 Па на электрофизические характеристики терморезистивных структур. На рис. 6, 7 представлены ВАХ и зависимости  $R(L)$  терморезисторов с Ti контактами, нанесенными без предварительной ионной очистки пленки  $VO_x$ . Пленки  $VO_x$  наносились при  $\Gamma_{O_2} = 25\%$  и затем отжигались в атмосфере кислорода при давлении в камере 0,04 Па. Время отжига составляло 60 мин.



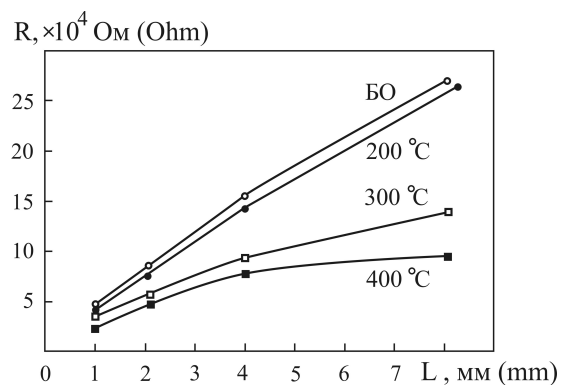
**Рис. 4.** Распределение толщины пленки  $VO_x$  на подложке диаметром 200 мм ( $\Gamma_{O_2} = 25,0\%$ )  
**Fig. 4.** Distribution of the  $VO_x$  film thickness of diameter 200 mm substrate ( $\Gamma_{O_2} = 25.0\%$ )



**Рис. 5.** Относительное распределение поверхностного сопротивления пленок  $VO_x$  на подложке диаметром 100 мм  
**Fig. 5.** Relative distribution of the surface resistance of  $VO_x$  films on a substrate of diameter 100 mm



**Рис. 6.** ВАХ  $VO_x$  резисторов с Ti контактами, нанесенными без предварительной ионной очистки. Пленки  $VO_x$  отожжены при различной температуре  
**Fig. 6.** IV characteristic of  $VO_x$  resistors with Ti contacts, deposited without preliminary ion cleaning.  $VO_x$  films annealed at different temperatures



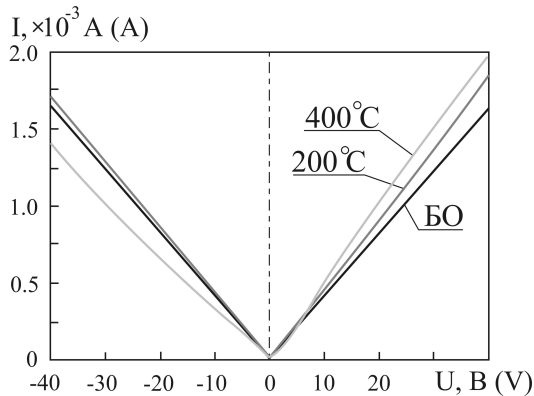
**Рис. 7.** Зависимость сопротивления от длины  $VO_x$  резисторов, отожженных при различной температуре ( $P_{O_2} = 0,04$  Па,  $t_{an} = 60$  мин)  
**Fig. 7.** Dependence of resistance on the length  $VO_x$  of resistors annealed at different temperatures ( $P_{O_2} = 0,04$  Па,  $t_{an} = 60$  min)

Установлено, что при нанесении Al, Ti, Ni, V, TiN/Ti контактов без предварительной ионной очистки ВАХ полученных структур были нелинейными и несимметричными. При приложении напряжений разной полярности пропускаемые токи могли отличаться более чем на порядок. Характер ВАХ и зависимостей  $R(L)$  свидетельствовали о наличии в контактах барьеров Шоттки. Причем этот эффект наиболее сильно проявлялся для контактов с пленками  $VO_x$ , имеющих высокую степень окисления (высокое удельное сопротивление).

Аналогичные результаты были получены при использовании контактов из Al, Ni, V и TiN/Ti, наносимых без предварительной ионной очистки. Была обнаружена общая тенденция, что при увеличении удельного сопротивления пленок оксида ванадия ВАХ и зависимости  $R(L)$  терморезистивных структур становились более нелинейными. При этом увеличивалась вентильность (разность проводимости в разных направлениях протекания тока). Для получения

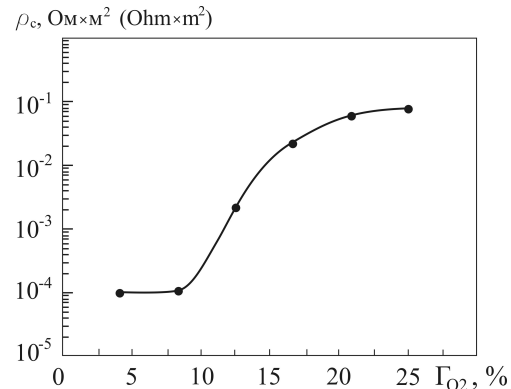
омического контакта было предложено использовать предварительную ионно-лучевую очистку пленки  $VO_x$  перед нанесением металлических контактов. Ионная очистка позволяет устранить адсорбированные на поверхности пленки атомы кислорода и молекулы воды, а также частично восстановить поверхностный слой оксида ванадия. Ионная очистка производилась непосредственно перед нанесением металлизации в режиме вращения подложкодержателя при следующих параметрах: напряжение и ток разряда ионного источника соответственно  $U_a = 2,0$  кВ,  $I_a = 50$  мА. Время очистки 10 мин. Анализ ВАХ резистивных структур, полученных с использованием предварительной очистки, показал, что ионная очистка позволила значительно улучшить линейность ВАХ. Наиболее линейные ВАХ были получены для Ti контактов (рис. 8). Однако даже после ионной очистки пленки  $VO_x$  ВАХ терморезистивных структур имели некоторую вентильность. Также следует отметить, что удельное сопротивление контакта имело сильную зависимость от  $\Gamma_{O_2}$  (удельного сопротивления пленок  $VO_x$ ) (рис. 9). При концентрации кислорода более 20–25 %, когда формируются пленки с высокими значениями ТКС и требуемым удельным сопротивлением ( $10^{-2} - 10^{-1}$  Ом·м),  $\rho_c$  достигало значений 0,1 Ом·м<sup>2</sup>. Наиболее нелинейные ВАХ с большой вентильностью были получены для контактов  $VO_x/Al$ . Контакты пленки  $VO_x$  с Ni, V и TiN/Ti имели сравнительно малую вентильность, но ВАХ также были нелинейными.

Анализ полученных результатов показал, что наилучший контакт получен для металла с наименьшей работой выхода  $A_{Ti} = 3,95$  эВ. Для сравнения, работа выхода для Al, Ni и V составляет соответственно  $A_{Al} = 4,25$  эВ,  $A_V = 4,12$  эВ,  $A_{Ni} = 4,5$  эВ. Поскольку оксид ванадия можно отнести к полупроводникам *n*-типа, то невыпрямляющие омические контакты для такого полупроводника могут быть реализованы в случае, когда работа выхода полупроводника больше работы выхода металла. Поэтому, по-видимому, для формирования омического контакта к пленке  $VO_x$  с низким удельным сопротивлением желательно использовать металлы с низким значением работы выхода.



**Рис. 8.** ВАХ терморезистивных структур с Ti контактами, нанесенными с предварительной ионной очисткой

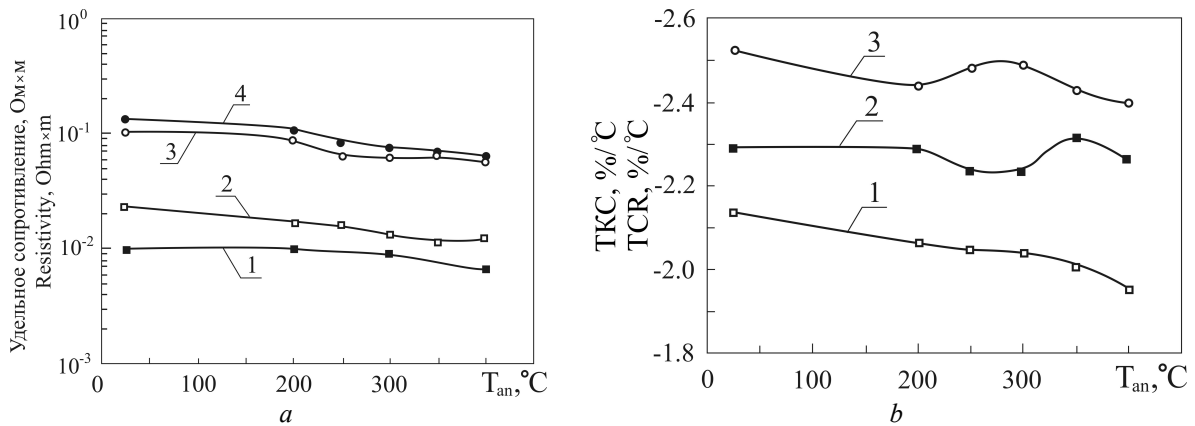
**Fig. 8.** IV characteristics of thermoresistive structures with Ti contacts deposited with preliminary ion cleaning



**Рис. 9.** Зависимость удельного сопротивления контакта Ti/ $VO_x$  от концентрации кислорода в Ar/ $O_2$  смеси газов в процессе нанесения пленок  $VO_x$  (Ti контакты с ионной очисткой)

**Fig. 9.** Dependence of the resistivity of the Ti/ $VO_x$  contact on the oxygen concentration in the Ar/ $O_2$  gas mixture during the deposition of  $VO_x$  films (Ti contacts with ion cleaning)

Анализ зависимостей удельного сопротивления и ТКС пленок оксида ванадия от температуры отжига (рис. 10) показал, что при отжиге в атмосфере  $O_2$  при пониженном давлении,  $\rho$  и ТКС пленок  $VO_x$  снижаются, т. е. происходит частичное восстановление пленок. Однако, в отличие от отжига при атмосферном давлении [8], снижение  $\rho$  и ТКС происходит практически линейно. Отсутствуют области температур, при которых происходит резкое падение удельного сопротивления.



**Рис. 10.** Зависимость удельного сопротивления (а) и ТКС (b) от температуры отжига пленок  $VO_x$ , нанесенных при различной концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов: 1 – 22,5 %, 2 – 23,3 %, 3 – 24,2 %, 4 – 25,0 %

**Fig. 10.** Dependence of resistivity (a) and TCR (b) on the annealing temperature of  $VO_x$  films deposited at various oxygen concentrations in an  $Ar/O_2$  gas mixture: 1 – 22.5 %, 2 – 23.3 %, 3 – 24.2 %, 4 – 25.0 %

### Заключение

Проведены исследования процессов формирования терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия. Установлено, что при контроле процесса реактивного распыления методом ОЭС и нанесении пленок на вращающуюся подложку диаметром 100 мм получены пленки  $VO_x$  с неравномерностью толщины менее  $\pm 2,4\%$  и неравномерностью поверхностного сопротивления менее  $\pm 2,5\%$ . При отжиге пленок оксида ванадия в атмосфере  $O_2$  при давлении 0,04 Па  $\rho$  и ТКС пленок  $VO_x$  снижаются, однако снижение происходит практически линейно. Установлено, что предварительная ионная очистка пленок оксида ванадия и последующее нанесение Ti контактов позволяет формировать терморезистивные структуры с линейными ВАХ. Однако даже после ионной очистки пленки оксида ванадия ВАХ терморезистивных структур  $VO_x/Ti$  имеют некоторую вентильность.

### Список литературы

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Mauger A., Julien C.M. Review  $V_2O_5$  thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401.
3. Morosan E., Natelson D., Nevidomskyy A.H., Si Q. Strongly correlated materials *Adv. Mater.* 2012;24(36):4896-4923.
4. Holland A.S., Pan Y., Alnassar M.S.N., Luong S. Circular test structure for determining the specific contact resistance of ohmic contacts. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics*. 2017;30(3):313-326.
5. Кудрик Я.Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл – полупроводник. *Петербургский журнал электроники*. 2010;1:25-40.
6. 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.
7. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Структурно-фазовые характеристики пленок оксида ванадия. *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2021;1:33-41.
8. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия. *Доклады БГУИР*. 2021;19(3):22-30.

### References

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Mauger A., Julien C.M. Review  $V_2O_5$  thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401.



3. Morosan E., Natelson D., Nevidomskyy A.H., Si Q. Strongly correlated materials *Adv. Mater.* 2012;24(36):4896-4923.
4. Holland A.S., Pan Y., Alnassar M.S.N., Luong S. Circular test structure for determining the specific contact resistance of ohmic contacts. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics.* 2017;30(3):313-326.
5. Кудрик Я.Я. [Udel'noe soprotivlenie omicheskikh kontaktov v strukturah metall – poluprovodnik]. *Petersburg Electronics Journal.* 2010;1:25-40. (In Russ.)
6. Nguyen 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 = Doklady BGUIR.* 2020;18(6):94-102. (In Russ.)
7. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.Q. [Structural and phase characteristics of vanadium oxide films]. *Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel.* 2021;1:33-41. (In Russ.)
8. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.Q. [Influence of annealing on structure, phase and electrophysical properties of vanadium oxide films]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2021;19(3):22-30. (In Russ.)

### Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.  
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.

Зацько 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».

Толочко Н.К., д.ф.-м.н., профессор кафедры технологий и организации технического сервиса Белорусского государственного аграрного технического университета.

#### 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., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the 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 at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Melnikov S.N., PhD, Leader Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the 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.

Tolochko N.K., D.Sc., Professor of the Department of Technologies and Organization of Technical Service of the Belarusian State Agrarian Technical University.

#### 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