

Расчеты с использованием программного продукта *CoventorWare* предлагают возможность выполнения мультифизического (междисциплинарного) анализа компонентов МЭМС с учетом факторов, оказывающих существенное влияние на работу микроустройств. Учет этих факторов позволяет в ряде случаев существенно уточнить результаты вычислений и избежать ошибок при их изготовлении.

### Литература

1. Лабунов, В.А. Современные дисплеи: перспективы миниатюризации / В.А. Лабунов, П.В. Жагиро, П.С. Кацуба, А.Г. Смирнов // Доклады БГУИР. – 2008. – № 5. – С. 5–28.
2. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Дисплеи на жидких кристаллах / М.Г. Томилин, Г.Е. Невская. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2010. – 108 с.
3. Hornbeck, L.J. Digital Light Processing™ and MEMS: An Overview / L. J. Hornbeck // Proc. Dig. IEEE/LEOS Summer Topical Meetings Opt. MEMS Applicat. – 1996. – P. 7–8.
4. A MEMS-Based Projection Display / Peter F. Van kessel, Larry J. Hornbeck, Robert E. Meier, Michael R. Douglass // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86. – № 8. – P. 1687–1704.
5. Компьютерное моделирование компонентов МЭМС / Ю.В. Коловский, А.А. Левицкий, П.С. Маринушкин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2008. – № 1. – С. 398-401.

УДК 621.3.049.77: 621.793

### ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ ПРИ ОТЖИГЕ

аспирант Нгуен Т. Д.<sup>1</sup>,  
аспирант Занько А. И.<sup>2</sup>,  
магистрант То Т. К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный руководитель – канд. техн. наук *Голосов Д. А.*

<sup>2</sup>Научный руководитель – канд. техн. наук *Котов Д. А.*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь

**Введение.** В последние годы интенсивно ведутся исследования, направленные на разработку неохлаждаемых микроболометрических матриц инфракрасного диапазона, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. Работа такого микроболометра 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 микроболометра должны обладать высоким значением температурного коэффициента электрического сопротивления (ТКС), малыми значениями удельного сопротивления  $\rho$ , теплопроводности и шумов. Одним из таких материалов является оксид ванадия  $VO_x$ . Полученные методом реактивного магнетронного распыления пленки аморфного оксида ванадия обладают требуемыми характеристиками:  $\rho = (0.6 - 4.0) \times 10^{-2}$  Ом $\times$ м, ТКС = 2.2 – 2.3 %/°С [2]. Однако в технологическом процессе производства микроболометрических датчиков после нанесения слоя оксида ванадия производится еще ряд термических процессов. Аморфный оксид ванадия не обладает достаточной термической стабильностью, и проявляет тенденцию к дальнейшему окислению и кристаллизации при повышенных температурах. Процессы кристаллизации в пленках оксида ванадия отмечаются уже при температурах около 200 °С [3]. Кроме того поливалентная природа ванадия приводит к

стабилизации ряда различных оксидных фаз, и только некоторые из них обладают требуемыми свойствами. Поэтому для стабилизации требуемого состава и кристаллической структуры оксида ванадия после нанесения пленок требуется проводить отжиг [4]. И в данном случае процесс отжига является одним из ключевых факторов, определяющих конечную структуру, состав и свойства пленок оксида ванадия. При этом температура отжига должна превышать все последующие температурные процессы, но ограничена термостойкостью полиимида, используемого при формировании подвешенных ячеек микроболометров (400 °С).

Чаще всего однофазные пленки низших оксидов ванадия получают путем высокотемпературного отжига высшего оксида  $V_2O_5$  в вакууме, инертной или в восстановительной атмосфере при температурах 500 – 1000 °С. Однако при этом возникает целый ряд проблем: взаимодействие материалов пленки и подложки, деградация характеристик ранее сформированных КМОП структур и т.п. Одним из возможных путей решения данной задачи является нанесение низших оксидов ( $VO$ ,  $V_2O_3$ ) и дальнейшее их окисление и кристаллизация. Поэтому исследование возможности относительно низкотемпературного синтеза однофазных пленок низших оксидов ванадия представляет собой актуальную задачу. Таким образом целью работы являлось исследование влияния параметров процесса нанесения и последующего отжига на электрофизические свойства пленок оксида ванадия.

**1. Эксперимент.** Пленки оксида ванадия наносились методом импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени (чистота 99.96 %) в среде  $Ar/O_2$  рабочих газов. Схема установки магнетронного нанесения и методика проведения экспериментов по нанесению пленок описана в статье [2]. Пленки оксида ванадия наносились на структуры  $Si_3N_4/Si$  и оптическое стекло BK7. Концентрация кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов  $\Gamma_{O_2}$  изменялась от 16.67 до 33.34 %. Толщина нанесенных пленок составляла около 150 нм и регулировалось временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов. Для формирования кристаллической структуры нанесенные пленки подвергались отжигу в атмосфере  $O_2$  на установке ИК нагрева R-321B2AN (*Nabertherm*, Германия). Температура отжига изменялась от 200 до 450 °С. Время отжига 10 мин.

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.

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 7.5×15 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  $K_\phi$  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 4 °С/мин. Температурный коэффициент сопротивления рассчитывался по формуле

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

где  $T$  – температура терморезистора.

**2. Результаты и обсуждение.** Проведены исследования влияния отжига в атмосфере  $O_2$  на электрические характеристики пленок оксида ванадия. На рис. 1 представлена зависимость удельного сопротивления при комнатной температуре от температуры отжига  $\rho(T_{an})$  пленок оксида ванадия нанесенных при различной концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов. Как видно из рисунка зависимости  $\rho(T_{an})$  имели сложный характер и во многом определялись  $\Gamma_{O_2}$ .

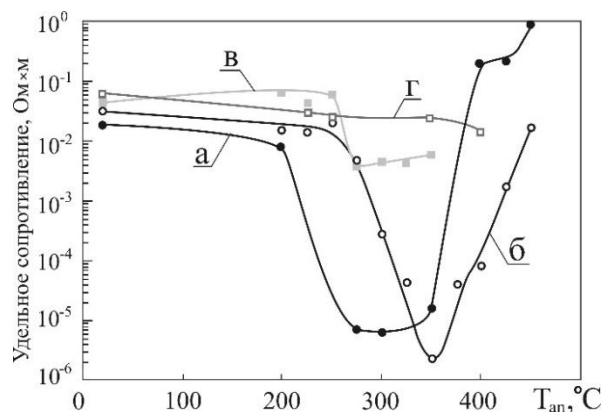


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления от температуры отжига пленок оксида ванадия нанесенных при различной концентрации кислорода в  $Ar/O_2$  смеси газов: *a* – 16.67 %, *б* – 25 %, *в* – 27.5 %, *г* – 33.34 %

Независимо от  $\Gamma_{O_2}$  удельное сопротивление пленок оксида ванадия практически не изменялось при температурах отжига до 200 – 250 °C. Для пленок, нанесенных при  $\Gamma_{O_2}$  менее 25 %, при увеличении температуры до 300 – 350 °C удельное сопротивление снижалось  $10^{-6} - 10^{-5}$  Ом·м. При дальнейшем увеличении температуры  $\rho$  резко увеличивалось и достигало 1.0 Ом·м при температурах более 450 °C. При увеличении концентрации кислорода до 27.5 % снижение удельное сопротивление при температурах отжига 275 – 350 °C было не столь значительное  $\rho = (3 - 6) \times 10^{-3}$  Ом·м. При дальнейшем повышении  $T_{an}$  более 350 °C удельное сопротивление также увеличивалось и становилось более 1.0 Ом·м. При концентрации кислорода 33.34 % удельное сопротивление пленок практически не зависело от температуры отжига и составляло  $(2 - 7) \times 10^{-2}$  Ом·м.

ТКС пленок оксида ванадия также имел сложную зависимость от температуры отжига и  $\Gamma_{O_2}$  (рис. 2). Было обнаружено, что ТКС пленок связан с удельным сопротивлением. В основном пленки, имеющие низкое  $\rho$  имели низкие значения ТКС. Для пленок, нанесенных при низких концентрациях кислорода ( $\Gamma_{O_2} = 16.67$  %) ТКС снижался с 2.2 %/°C до 0.1 – 0.2 %/°C при температурах отжига 275 – 300 °C, что связано с уменьшением удельного сопротивления пленок. При дальнейшем увеличении  $T_{an}$  ТКС пленок увеличивался, что связано с увеличением  $\rho$  пленок. Для пленок, нанесенных при  $\Gamma_{O_2} = 25$  %, ТКС незначительно снижался с 2.3 до 2.05 %/°C при  $T_{an} = 275$  °C. При дальнейшем увеличении температуры происходило резкое снижение удельного сопротивления и ТКС пленок. Однако при этом наблюдалось формирование фазового перехода (ФП) с гистерезисом (рис. 3). Фазовый переход в районе 67 °C характерен для диоксида ванадия  $VO_2$ . При увеличении температуры отжига скачек сопротивления  $R_{max}/R_{min}$  при фазовом переходе увеличивался и достигал максимума ( $R_{max}/R_{min} = 230$ ) при температуре 400 °C (рис. 4).

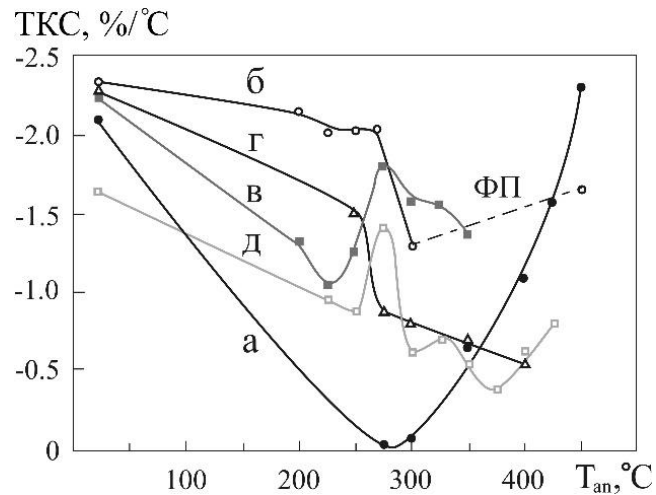


Рис. 2. Зависимость ТКС от температуры пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов: а – 16.67 %, б – 25 %, в – 27.5 %, г – 29.17 %, д – 33.34 % (ФП – фазовый переход)

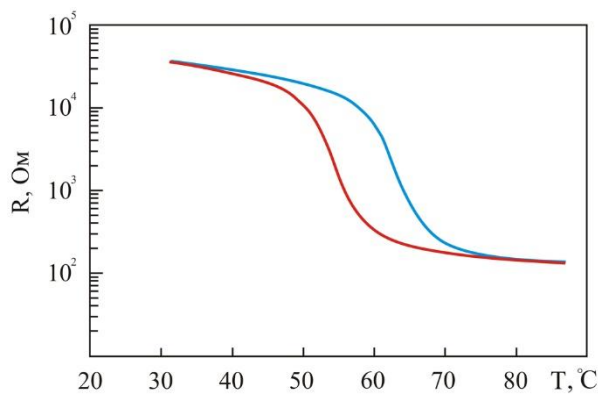


Рис. 3. Изменение сопротивления VO<sub>x</sub> резистора при фазовом переходе ( $\Gamma_{O_2} = 25\%$ ,  $T_{an} = 400\text{ }^\circ\text{C}$ )

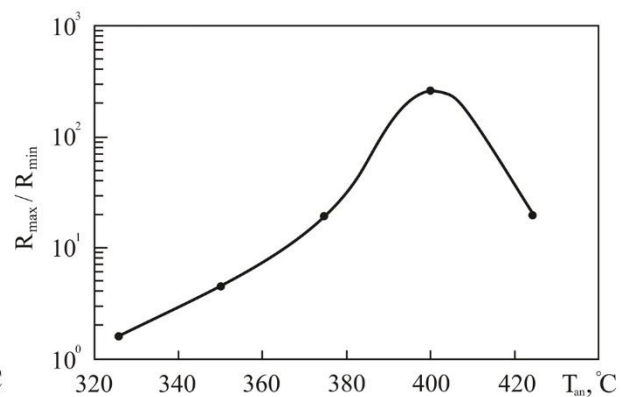


Рис. 4. Зависимость скачка сопротивления при фазовом переходе от температуры отжига ( $\Gamma_{O_2} = 25\%$ )

При дальнейшем увеличении температуры скачек сопротивления уменьшался и при  $T_{an} = 450\text{ }^\circ\text{C}$  фазовый переход пропадал. Для пленок, нанесенных при большей концентрации кислорода ( $\Gamma_{O_2} \geq 27.5\%$ ), ТКС пленок в общем случае снижался при увеличении температуры отжига. Однако при  $T_{an} = 225 - 350\text{ }^\circ\text{C}$  наблюдались скачки ТКС, что, по-видимому, связано с изменением степени окисления ванадия и структуры пленок.

Анализ полученных результатов показывает, что с точки зрения использования пленок оксида ванадия в качестве термочувствительных слоев лучше использовать пленки, нанесенные при концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов 25%. При отжиге таких пленок до температуры 250 – 275 °C удельное сопротивление и ТКС пленок снижаются незначительно и составляют примерно 10<sup>-2</sup> Ом×м и 2.05 %/°C соответственно.

**Заключение.** Проведены исследования влияния отжига в атмосфере O<sub>2</sub> на удельное сопротивление и ТКС пленок оксида ванадия, нанесенных методом импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов. Установлено, что пленки, нанесенные при концентрации кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов 25% и отожженные при температуре 250 – 275 °C в атмосфере кислорода, имеют удельное сопротивление порядка 10<sup>-2</sup> Ом×м при ТКС = 2.05 %/°C. Данные пленки можно применять в качестве активных слоев микроболометров.

## Литература

1. Rogalski, A. Infrared Detectors for the Future / A. Rogalski // Acta physica polonica A. – 2009. – Vol. 116 (3). – P. 389–406.
2. Нгуен, Т. Д. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления / Т. Д. Нгуен [и др.] / Доклады БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 6. – С. 94–102.
3. Mauger, A. Review V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films for energy storage and conversion / A. Mauger, M. J. Christian // AIMS Materials Science. – 2018. – Vol. 5 (3). – P. 349–401.
4. Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO<sub>2</sub> nanoparticles and thin films / J. Y. Suh [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 96 (2). – P. 1209–1213.

УДК 621.3.049.77: 621.793

### ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ГАФНИЯ-ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МИШЕНИ

аспирант Доан Х. Т.<sup>1</sup>,  
младший научный сотрудник Вилья Н.,  
магистрант Пивоварчик С. С.<sup>2</sup>,  
магистрант Лам Н. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный руководитель – канд. техн. наук Голосов Д. А.

<sup>2</sup>Научный руководитель – канд. техн. наук Завадский С. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь

**Введение.** В последние годы оксид гафния HfO<sub>2</sub> стал рассматриваться в микроэлектронике как наиболее перспективный диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью для замены традиционного применяемого в качестве подзатворного диэлектрика в структурах металл – диэлектрик – полупроводник диоксида кремния SiO<sub>2</sub> [1]. Оксид гафния сочетает в себе высокую диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 16\text{--}25$  и большую ширину запрещенной зоны  $E_g = 5.6\text{--}5.8$  эВ, высокую термодинамическую совместимость на границе раздела с кремнием и высокие энергетические барьеры для электронов и дырок относительно кремния (соответственно 2.0 и 2.5 эВ) [2-4]. Как следствие, электрофизические свойства тонких пленок HfO<sub>2</sub> активно исследовались, и было показано, что аморфный оксид гафния обладает улучшенными диэлектрическими свойствами, по сравнению с сильной кристаллической фазой [5]. Однако оксид гафния не обладает достаточной термической стабильностью, и проявляет тенденцию к кристаллизации при температурах 400 – 450 °С [6]. В результате в структуре поликристаллических пленок формируется ряд дефектов, которые приводят к увеличению токов утечки по границам зерен [6, 7].

Один из способов получения термостойких аморфных пленок HfO<sub>2</sub> основан на легировании оксида гафния аморфизирующими примесями (Si, Al, Y, Gd, La и др.). До 2011 года пленки легированного оксида гафния рассматривались исключительно в качестве линейных диэлектриков, и интерес был обусловлен поиском материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. В 2011 году были впервые получены сегнетоэлектрические слои при легировании HfO<sub>2</sub> оксидом циркония ZrO<sub>2</sub> (HZO) [8]. Было установлено, что наибольшая поляризация получена для пленок состава Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub>. Метод реактивного магнетронного распыления как раз и является низкотемпературным процессом, который позволяет наносить многокомпонентные тонкие пленки высокого качества с управляемым стехиометрическим составом путем распыления мозаичных мишеней.