

2. Полубояринов, Д.Н. Исследование некоторых вопросов технологии керамики на основе BN и AlN. / И. Г. Кузнецова, Е. П. Садковский и др. // Методы получения, свойства и применения нитридов. – 1972. – С. 135–141.
3. Полубояринов, Д.Н. Испытание высокоогнеупорных изоляционных материалов в парах лития при высоких температурах в вакууме. / В.А. Башкатов, Г.А. Серова и др. // Огнеупоры. – 1964. – № 2. – С.82–89.
4. Дубовик, Т. В. Материалы на основе нитридов для поджигателей игнитронов. / Т. Г. Куценко, Т. И. Серебрякова. // Методы получения, свойства и применения нитридов. – 1972. – С.182–186.
5. Самсонов, Г. В. Получение и методы анализа нитридов. / О. П. Кулик, В. С. Полищук. // Киев: Наук думка. – 1978. – С. 320.

ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ Ti И V ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**С. М. Барайшук¹, Г. Б. Мельникова², Д. А. Голосов³,
А. А. Шевченко¹, В. К. Долгий¹**

¹⁾ *Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023 Минск, Беларусь, e-mail: baraishuksm@gmail.com*

²⁾ *Белорусский государственный педагогический университет им. М.Танка ул. Советская, 18, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: galachkax@gmail.com*

³⁾ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, e-mail: dmgolesov@mail.ru*

Проведены исследования топографии пленок оксида ванадия осажденных на Si₃N₄/Si с предварительным осаждением Ti тыльного электрода и без него. Показано, что процессы формирования зеренной структуры наблюдаются при температурах более 300 °С. В результате отжига пленок в атмосфере кислорода при температурах 400 °С формируются покрытия идентичные по структуре с шероховатостью 0,2 нм по площадке 100 мкм², которая практически не зависит от состава подложки. Это указывает на возможность, использовать Ti покрытия для формирования тыльных контактов сенсорных элементов, а всю структуру VO/Ti/Si₃N₄/Si в качестве термочувствительного элемента.

Ключевые слова: сенсоры, тонкие пленки, топография поверхности, магнетронное распыление, тыльные контакты.

DIAGNOSTICS OF THE SURFACE OF FILMS BASED ON Ti AND V FOR SENSOR ELEMENTS

S. M. Baraishuk¹, G. B. Melnikova², D. A. Golosov³, A. A. Shevchenok¹, V. K. Dolgiy¹

¹⁾ *Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti av. 99, 220023 Minsk, Belarus*

²⁾ *Belarusian State Pedagogical University named after M. Tanka, st. Sovetskaya, 18, 220030 Minsk, Belarus*

³⁾ *Belarusian state university of informatics and radioelectronics, 220013, P. Brovki 6, Minsk, Belarus
Corresponding author: S. M. Baraishuk (baraishuksm@gmail.com)*

The topography of vanadium oxide films deposited on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ with and without preliminary Ti deposition of the rear electrode was studied. It is shown that the processes of grain structure formation are observed at temperatures above 300°C . As a result of film annealing in an oxygen atmosphere at temperatures of 400°C , coatings are formed that are identical in structure with a roughness of 0.2 nm over an area of $100\text{ }\mu\text{m}^2$, which is practically independent of the composition of the substrate. This indicates the possibility of using Ti coatings to form the back contacts of sensor elements, and the entire $\text{VO}/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ structure as a temperature-sensitive element.

Key words: sensors; thin films; surface topography; magnetron sputtering; rear contact.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно проводится разработка интегральных неохлаждаемых инфракрасных микроболометрических сенсоров, работа которых основана на терморезистивных свойствах тонкопленочных сенсоров [1]. Такие сенсоры станут основой компактных инфракрасных сенсоров и приборов на их основе не требующих охлаждения. Сенсорный слой микроболометра должен обладать высоким значением температурного коэффициента электрического сопротивления, малыми значениями удельного сопротивления, теплопроводности и шумов, быть доступным для формирования в стандартных технологических процессах изготовления полупроводниковых интегральных микросхем. Одним из таких материалов является оксид ванадия VOx . Пленки оксида ванадия обладают сравнительно высоким коэффициентом температурного электрического сопротивления, низким удельным сопротивлением и низкой способностью к созданию помех [1–2]. В таких условиях наиболее перспективным методом формирования пленок оксида ванадия является реактивное магнетронное распыление [3–4]. Такой метод обеспечивает достаточную скорость нанесения и химическую чистоту наносимых слоев, позволяет управлять составом пленок. Однако несмотря на большое внимание уделяемое электрофизическим свойствам таких пленок работ изучающих оптические свойства и свойств топографии поверхности, которые так же влияют на эффективность поглощения инфракрасного излучения, недостаточно [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

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 работе [2]. Пленки наносились на структуры $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, Ti/Si и $\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ при следующих условиях: ток разряда $I_t = 1,5\text{ A}$, потоки аргона и кислорода $Q_{\text{Ar}} = 50\text{ мл/мин}$, $Q_{\text{O}_2} = 10\text{ мл/мин}$, время нанесения 6 мин 40 с. При этом напряжение разряда составляло $U_t = 525\text{ В}$. Толщина нанесенных пленок составляла порядка 150 нм . Ранее было проведены исследования электрофизических характеристик пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени, показано, что при концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси рабочих газов 17–25 % без нагрева подложек получены пленки оксида ванадия характеристиками, которые позволяют использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев микроболометров. В данной работе исследовалась поверхность пленок, которые подвергались отжигу в атмосфере кислорода на установке инфракрасного нагрева. Температура отжига изменялась от 100 до 450°C . Время от-

жиги варьировалось от 10 до 120 мин. Атомно-силовые изображения поверхности и данные по топографии получены методом атомно-силовой микроскопии (NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сканирующая электронная микроскопия показывает, что внешне поверхность полученных пленок зависит от времени и температуры отжига, в частности наиболее наглядно меняется поверхность пленок VO. На рисунке 1 представлены СЭМ изображения поверхности исходных и отожженных при температуре 300 и 400 °С пленок. Без отжига (рисунок 1, а) на поверхности пленки визуально определяются пятна, что, по видимому связано с формированием областей, в которых оксид ванадия находится в различных оксидных состояниях.

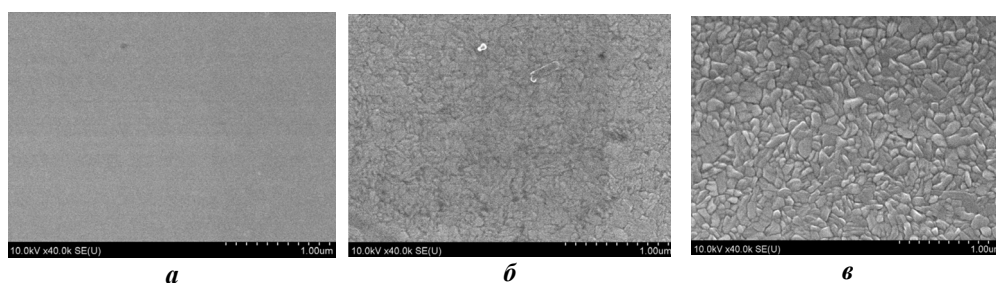


Рисунок 1. СЭМ изображения поверхности пленок оксида ванадия без отжига – а и отожженных при температуре 300 °С – б; 400 °С – в

При отжиге при температуре 300 °С, на поверхности пленки формируются округлые кристаллиты, которые визуально имеют выпуклую форму. Эти кристаллиты при продолжении отжига более длительное время становятся центрами кристаллизации. При увеличении времени отжига начинается рост кристаллов в виде ветвей из центров кристаллизации. При времени отжига более 60 минут при температуре 400 °С на поверхности образовывается сплошная поликристаллическая структура (рисунок 1, в).

Изображения поверхности структур VO/Ti/Si₃N₄/Si полученные методом атомно-силовой микроскопии представлены на рисунке 2. Для данных образцов перед получением сенсорного слоя оксида ванадия на поверхность структуры Si₃N₄/Si, предварительно, методом магнетронного распыления, наносился тыльный проводящий контакт Ti. После чего, формировалось покрытие VO_x из ванадиевой мишени (чистота 99,96 %) методом импульсного реактивного магнетронного распыления в среде Ar/O₂.

Атомно-силовые изображения поверхности пленок оксида ванадия, отожженных при различной температуре (время отжига $t = 10$ мин) хорошо согласуются с представленными в работе [4] оптическим изображением пленок. Непосредственно после нанесения пленки оксида ванадия обладали высокой сплошностью и низкой шероховатостью (0,6 нм по площадке 100 мкм²) поверхности (рисунок 2, а).

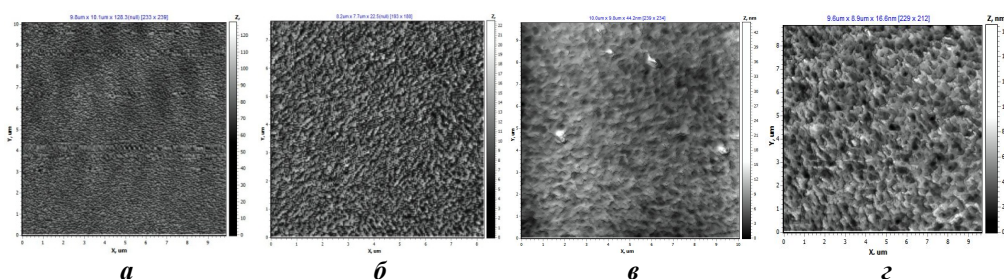


Рисунок 2. АСМ изображения поверхности структур V/Ti/Si₃N₄/Si без отжига – (а), с отжигом при температуре 200 °С – (б), 300 °С – (в), 400 °С – (з)

При отжиге с температурой 200 °С поверхность становилась более однородной, и шероховатость снижалась (табл.), однако отжиг при такой температуре по-видимому не приводит к формированию на поверхности зернистой структуры. Процессы кристаллизации отмечались при температурах 300 и 400 °С (рисунок 2, в, з). При этом структура пленок становилась зернистой в виде ячеек кристаллитов размером до 60–90 нм, что так же хорошо согласуется с данными приведенными в работе [4].

Шероховатость поверхности получаемых структур

Температура отжига, °С	Поверхность структуры			
	Ti/Si ₃ N ₄ /Si	V/Ti/Si ₃ N ₄ /Si	V/Si ₃ N ₄ /Si	Si ₃ N ₄ /Si
200	0,5	0,4	0,5	0,8
300	0,4	0,2	0,2	0,8
400	0,3	0,2	0,2	0,9
Без отжига	0,6	0,6	0,5	1,2

При увеличении температуры отжига размеры зерен увеличивались, что приводило к формированию на поверхности сплошной зернистой структуры с поперечным размером зерен 50–90 нм и длиной 140–180 нм (рис. 2, в, з), однако шероховатость такой поверхности остается низкой, что связано с «деградацией» поверхностных структур. При этом на поверхности начинает идентифицироваться упорядоченное ориентирование таких зерен в масштабные кристаллиты, что, соответствует СЭМ изображениям представленным на рисунке 1, б, в.

Отдельно были исследованы области в которых покрытие VO_x осаждалось непосредственно на Si₃N₄/Si, без подслоя Ti. Атомно-силовые изображения таких областей представлены на рис. 3.

Аналогично тому, как показано в работе [5] видно (рис. 3, а), что на поверхности формируется аналогичное покрытие с визуалью более мелкими структурными элементами имеющее сопоставимые параметры шероховатости. Это означает, что при предварительном нанесении подслоя Ti скорость формирования покрытия можно увеличить, снизив дефекты поверхности исходной подложки. А в случае проведения отжига (рис. 3, б–з) структура поверхности становится качественно схожа с покрытиями осажденными на титановом подслое. Сколь либо значительная разница видна при температурах отжига 200 °С, при повышении температуры на поверхности обра-

зовываются зерна с меньшим разбросом размеров; ширина в поперечнике 70–90 нм и длиной 160–200 нм (рис. 3, *з*). Так же, как и на рисунке 2, *з* просматривается формирование упорядоченного расположения зерен по поверхности.

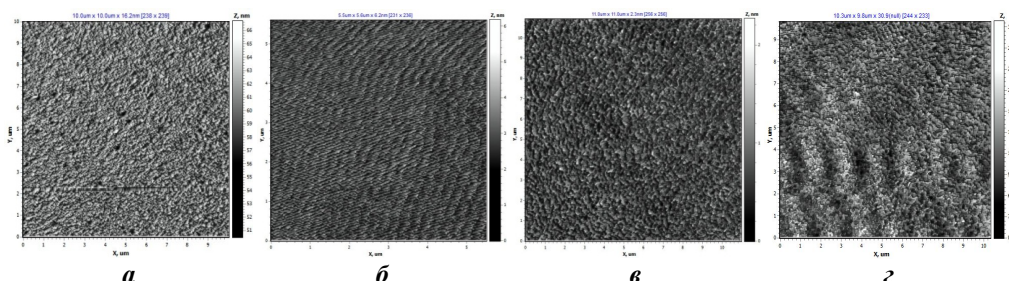


Рисунок 3. АСМ изображения поверхности структур V/Si₃N₄/Si: без отжига – (*а*), с отжигом при температуре 2000 °С – (*б*), 3000 °С – (*в*), 4000 °С – (*з*)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом структура поверхности VO_x осажденных на Si₃N₄/Si с предварительным осаждением Ti тыльного электрода и без него оказались схожи, шероховатость таких покрытий при температуре отжига более 300 °С, крайне низка и составляет 0,2 нм по площадке 100 мкм², что позволяет говорить о их идентичных свойствах и указывает на возможность, аналогичную показанной в работе [6] использовать Ti покрытия для формирования тыльных контактов сенсорных элементов, а всю структуру VO/Ti/Si₃N₄/Si в качестве термочувствительного элемента микроболометров.

Проведены исследования состава подложки и влияния температуры отжига в атмосфере кислорода на структуру и характеристики топографии пленок оксида ванадия. Показано, что процессы формирования зеренной структуры наблюдаются при температурах более 300 °С. В результате отжига пленок в атмосфере кислорода при температурах 400 °С формируются покрытия по структуре и шероховатости идентичные и не зависящие от состава подложки, что показывает принципиальную возможность получения пленок с управляемыми сенсорными свойствами и представляет направление использования данных пленок в качестве термочувствительных слоев микроболометров. Разработанные при этом системы могут найти применение при создании сенсорных микро-наносистем.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211250.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Влияние отжига на кристаллизацию и оптические характеристики пленок оксида ванадия / Т. Д. Нгуен, А. И. Занько, Т. К. То, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, В. В. Колос //

- Международная юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины (Гомель, 19–20 ноября 2020 г.) : материалы : в 3 ч. Ч. 3 / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. : С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – С. 147–151.
5. Барайшук, С. М., В. Ф. Гременок, В. В. Тульев, И. С. Ташлыков. Изучение поверхности структур металл/кремний, приготовленных ионно-ассистированным нанесением покрытий. ФХОМ 1 (2011): 66.
6. Нгуен Т. Д., Занько А. И., Голосов Д. А. и др. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия. Доклады БГУИР. 2021; 19(3):22–30.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ТОКА КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА С *p-n*-ПЕРЕХОДОМ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Борздов¹, В. М. Борздов¹, Д. Н. Буйновский¹, А. Н. Петлицкий²

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: borzdov@bsu.by

²⁾ ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск

Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование тока кремниевого фотодиода с *p-n*-переходом при воздействии импульсов излучения видимого диапазона пикосекундной длительности. Исследован отклик тока диода на импульсы лазерного излучения с длиной волны 532 нм и интенсивностью 5×10^{10} Вт/м².

Ключевые слова: кремниевый фотодиод; метод Монте-Карло; фототок.

SIMULATION OF CURRENT RESPONSE OF SILICON PHOTODIODE WITH *p-n*-JUNCTION ON THE EFFECT OF PULSED LASER IRRADIATION

A. V. Borzdov¹, V. M. Borzdov¹, D. N. Buinouski¹, A. N. Petlitsky²

¹⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

²⁾ JSC “Integral” – Holding Management Company, Kazintsa str. 121A, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. M. Borzdov (borzdov@bsu.by)

Ensemble Monte Carlo simulation of current in silicon photodiode with *p-n*-junction under the effect of picosecond pulses of irradiation of visible spectrum has been performed. The diode current response on the pulses of laser radiation with 532 nm wavelength and $5 \cdot 10^{10}$ W/m² intensity has been studied.

Key words: silicon photodiode; Monte Carlo method; photocurrent.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые фотодиоды, в том числе и лавинные, к настоящему времени нашли широкое применение в качестве преобразователей оптических сигналов в электрические. Полупроводниковые фотодиоды могут использоваться в качестве детекторов излучения видимого и инфракрасного диапазонов и работать как в обычном токовом режиме, так и в режиме счета фотонов [1, 2]. Большой интерес к кремниевым фото-