

*Комлев А.Е., Бабинова Р.В., Гернеза А.И., Шутова Е.С.  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

## **Фазовый переход «металл-полупроводник» в пленках диоксида ванадия и его применение в технике СВЧ**

*Представлены результаты исследования фазового перехода в пленках диоксида ванадия, полученных методов высокомоощного импульсного реактивного магнетронного распыления. Описаны возможные области применения плёночных структур в технике СВЧ.*

**Ключевые слова:** диоксид ванадия, фазовый переход «полупроводник-металл», проводимость, СВЧ-устройства.

В настоящее время возникает всё большая потребность в устройствах, работающих на высоких и сверхвысоких частотах. Одним из материалов, к которому в последнее время проявляется особый интерес исследователей, является диоксид ванадия  $\text{VO}_2$  [1]. Благодаря присутствию электронных корреляций,  $\text{VO}_2$  обладает уникальными свойствами, определяемыми разнообразием типов химических связей между атомами кислорода и ванадия в данном соединении, включая связи, обусловленные d-электронами. Диоксид ванадия — материал, испытывающий фазовый переход первого рода (полупроводник–металл), который в монокристаллах наблюдается при температуре  $T_c = 67^\circ\text{C}$  (340 К) и вызван перестроением из моноклинной кристаллической фазы ( $C_{3v}$ ) в тетрагональную ( $D_{4h}$ ). При таком переходе испытывают скачок как оптические, так и электрические свойства материала. Так, показатель преломления изменяется от 2.5 в моноклинной фазе до 2.0 в тетрагональной фазе, а концентрация свободных носителей может возрасти до  $\approx 10^{22}$ , вызвав скачок электропроводности до  $10^5$  [1].

Этот эффект впервые был описан исследователем Морином в 1959 году [2], а затем подтвержден во множестве научных публикаций. Дальнейшее изучение диоксида ванадия показало, что возможность электрически, оптически или термически изменять и контролировать проводимость материала делает его одним из главных материалов функциональной СВЧ электроники.

Ряд исследований посвящен использованию двуокиси ванадия в устройствах с перестраиваемым диапазоном частот, таких как антенны, фазовращатели, рефлекторы, которые необходимы для беспроводных систем, а также переключателей и резонаторов, работающих на гигагерцовых частотах. Кроме того, в работах [3], [4] сообщается о применении  $\text{VO}_2$  покрытий для таких настраиваемых устройств, как перестраиваемые фильтры и линии задержки.

Так, в работе [5] исследован переключатель с шунтирующим варактором, покрытой пленкой (толщиной около 500 нм)  $\text{VO}_2$ . На частоте более 18 ГГц он обеспечивает хорошую изоляцию (более 20 дБ). Также в [5] был разработан тонкопленочный  $\text{VO}_2$ -резонатор, с частотой 15 и 30 ГГц с изолированной и короткозамкнутой пленкой, соответственно. Использование таких материалов с контролем перехода фаз позволяет быстро и точно проводить перестройку характеристик СВЧ-устройств.

Переключатели на пленках диоксида ванадия [6] толщиной несколько сотен нанометров, находят применение в фазированных антенных решетках, работающие на частоте 1ТГц. Использование изменяющегося на несколько порядков сопротивления пленки позволяет производить быстрое переключение устройства, при этом потери в таком переключателе относительно малы как в открытом, так и в закрытом состоянии.

Планарный волновод с использованием слоя из диоксида ванадия [7], работающий в частотном диапазоне 1-5.5 ГГц, имеет возможность быстро изменять эффективную диэлектрическую проницаемость и, следовательно, электрические характеристики. Это дает возможность для разработки компактных и недорогих микроволновых пассивных устройств с высокой плотностью упаковки элементов.

Фазовый переход может быть инициирован разогревом пленки лазерным импульсом, или электрическим полем. В [8] отмечено, что при освещении пленки лазерным импульсом с дозой 0.15 мДж/см<sup>2</sup> переключение происходит в течение 8 пс. При использовании для накачки пленки импульсного лазера с дозой 2.0 мДж/см<sup>2</sup> время переключения лежит в диапазоне несколько сотен фемтосекунд [9].

Для синтеза пленок оксида ванадия используются различные технологические методы: золь-гель, импульсное лазерное осаждение, магнетронное распыление. Метод реактивного магнетронного распыления позволяет не только получать плёнки оксида ванадия с хорошей адгезией к поверхности подложек, изготовленных из различных материалов, но и управлять в широком диапазоне фазовым и химическим составом осаждаемых покрытий.

Авторы данной работы проводили осаждение тонких плёнок оксида ванадия методом высокомоощного импульсного магнетронного распыления (HiPIMS – от англ. high-power impulse magnetron sputtering) на модернизированной установке УВН-71 с вакуумной камерой объемом  $7.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ , оснащенной плоским магнетроном с ванадиевой (99.95%) мишенью диаметром 115 мм. Остаточное давление в камере менее  $10^{-2}$  мТорр. Пленки осаждали на подложки, изготовленные из кварцевого стекла в смеси аргона и кислорода при давлении аргона 0.75 мТорр и массовом расходе кислорода 1.2–3.0 см<sup>3</sup>. Подложки предварительно разогревались до температуры 300°C.

Электрическое питание магнетрона осуществлялось от сильноточного импульсного источника АРЕL-М-5НIPIMS при напряжении 500 В, мощности 1200 Вт, длительности импульса 100 мкс, и частоте 100 Гц. Поскольку разрядные импульсы имели малую длительность, плотность мощности на мишени магнетрона могла достигать чрезвычайно высоких мгновенных значений – более 1000 Вт/см<sup>2</sup>, при силе тока до 1000 А.

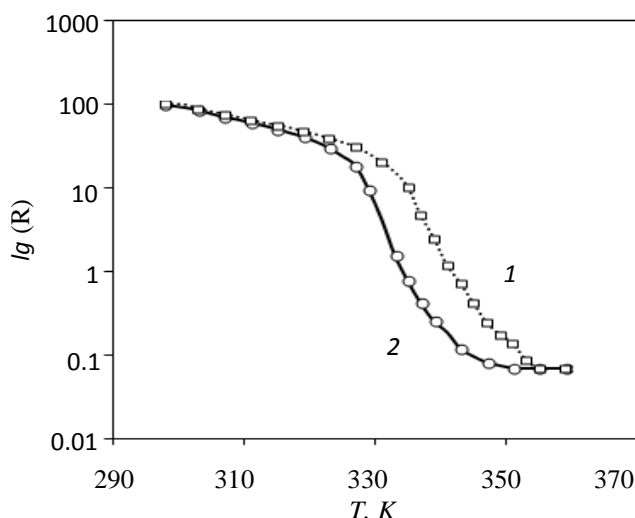
Для определения диапазона изменения расхода кислорода, необходимого для осаждения плёнок диоксида ванадия, использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии газового разряда.

В результате проведенных экспериментов была получена серия образцов плёнок диоксида ванадия, толщиной  $\approx 500$  нм.

Исследование температурных зависимостей сопротивления образцов проводилось по стандартной двухзондовой методике с помощью экспериментально измерительного стенда, обеспечивающего измерение сопротивления плёнки при её принудительном нагреве и охлаждении, на базе омметра ОА–3201.

В образцах, полученных при расходе кислорода более 2 см<sup>3</sup>, изменение сопротивления на два порядка (со 100 кОм до 1 кОм) наблюдалось при температуре 450 К. Ширина температурного гистерезиса составила величину менее 5 К. Сопоставление полученных результатов с литературными данными свидетельствует о том, что при больших массовых расходах кислорода на подложке формируется оксид V<sub>3</sub>O<sub>5</sub>.

Большой практический интерес представляют пленки, выращенные при расходе кислорода  $1.5 \text{ см}^3$ . Типичная температурная кривая изменения проводимости такой плёнки



представлена на рис.1. В диапазоне температуры 325-340 К наблюдается резкое

Рис.1. Температурная зависимость сопротивления плёнки диоксида ванадия (1 – прямая, 2 – обратная зависимости).

снижение сопротивления более чем на 3 порядка – от 100 кОм до 40 Ом. Ширина температурного гистерезиса составляет 7 К. Температура фазового перехода соответствует справочным данным для диоксида ванадия  $\text{VO}_2$ .

Известно, что на свойства пленок и характеристики фазового перехода сильное влияние оказывает кристаллическая ориентация подложки. По всей видимости, именно с этим связано то, что в плёнках, осаждённых на аморфную подложку ( $\text{SiO}_2$ ) наблюдается меньшее изменение проводимости, по сравнению с данными для монокристаллических образцов.

Исследования проводятся при финансовой поддержке РФФ (грант 15-19-00076).

#### Библиографический список

1. Exploiting the Semiconductor-Metal Phase Transition of  $\text{VO}_2$  Materials: a Novel Direction towards Tuneable Devices and Systems for RF-Microwave Applications, *Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems* / Aurelian, Julien, Pierre, Jean-Christophe, Corinne, Alain С. и др.; под ред. Mukherjee M. InTech, 2010. - 642 P.
2. Morin F.J. // *Phys. Rev. Lett.* 1959. Vol. 3. N 1. P. 34–36
3. S. D. Ha, Y. Zhou, C. J. Fisher, S. Ramanathan, and J. P. Treadway. Electrical switching dynamics and broadband microwave characteristics of  $\text{VO}_2$  radio frequency devices // *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 18, 2013, Art. no. 184501.
4. J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, and A. Crunteanu. Tunable band stop filters based on metal-insulator transition in vanadium dioxide thin films // *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 2, 2008. - pp. 1103–1106.
5. Thermally controlled vanadium dioxide thin film microwave devices // <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> URL: DOI: 10.1109/MWSCAS.2013.6674588 (дата обращения: 11.03.2017).
6. Patent USA № 7,642,881 B1 11/371174. Vanadium oxide RF/microwave integrated switch suitable for use with phased array radar antenna // Robinson et al.
7. Emond, N., Hendaoui, A., Delprat, S., Chaker, M., Wu K. Theoretical and experimental investigation of thermo-tunable metal-insulator-vanadium dioxide coplanar waveguide structure // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. IEEE, 2017. - pp. 1443 - 1455.
8. Chen Z., Wen Q.-Y., Dong K., D.-D. Sun, Qiu D.-H., Zhang H.-W. Ultrafast and Broadband Terahertz Switching Based on Photo-Induced Phase Transition in Vanadium Dioxide Films // *Chin. Phys. Lett.* 2013. V. 30. P. 1–4.
9. Kyoung J., Choi S., Kim D., et al. Nanoresonator Enabled Ultrafast All-optical Terahertz Switching Based on Vanadium Dioxide Thin Film // *AIP Confer. Proc.* 2011. V. 1399. P. 1027–1028.