ФИЗИКА

Челябинский физико-математический журнал. 2022. Т. 7, вып. 1. С. 123–130.

УДК 517.977 DOI: 10.47475/2500-0101-2022-17109

ОТРАЖЕНИЕ СВЧ-ВОЛН ОТ ТОНКОЙ ПЛЁНКИ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ

Д. А. Кузьмин[1,a], И. В. Бычков[1], М. Г. Вахитов[2], Д. С. Клыгач[2]

[1] *Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия*
[2] *Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия*
[a] *kuzminda@csu.ru*

Исследуется отражение СВЧ-волны от тонкой плёнки диоксида ванадия на диэлектрической подложке в окрестности фазового перехода полупроводник — металл. Рассчитаны частотные зависимости коэффициента отражения при различных температурах в области фазового перехода. Обнаружен провал в частотной зависимости коэффициента отражения, который при фазовом переходе смещается в область более низких частот.

Ключевые слова: *СВЧ-волны, диоксид ванадия, фазовый переход.*

Введение

Одним из желаемых свойств элементов СВЧ-электроники и активно развивающейся в наше время радиофотоники [1–3] является возможность изменения электродинамических свойств элемента без его замены. Одним из способов получения такой функциональности является использование материалов с фазовым переходом. В этом смысле особый интерес представляет возможность использования диоксида ванадия (VO_2): в нём происходит фазовый переход полупроводник — металл при нагреве [4] до температуры $T_{crit} \approx 340$ K. Это фазовый переход первого рода, он сопровождается скачкообразным изменением электрических, теплофизических, магнитных свойств, оптических, а также структурных параметров. При этом происходит скачок концентрации носителей, который составляет около 105 [5].

В последнее время активно исследуются перспективы использования диоксида ванадия в оптических метаповерхностях и наноструктурах [6–10] с целью добиться возможности динамически изменять их свойства. Исследование подобных СВЧ-свойств остаётся актуальным. При температурах ниже температуры перехода $T \lessapprox T_{crit}$ диоксид ванадия является полупроводниковым материалом, с шириной запрещённой зоны около 0,7 эВ, т. е. почти диэлектриком.

Особый интерес имеют композиты на основе диоксида ванадия [11–13] в связи с возможностью установления минимального размера частиц, при котором ещё наблюдается фазовый переход, и влияния размера на характеристики и параметры перехода. Исследования показали, что нельзя говорить о наличии фазового перехода в частицах диоксида ванадия размером менее 100 нм [12]. В металлической фазе

Работа выполнена частично при поддержке РФФИ (грант № 20-07-00466). Численные расчёты произведены при поддержке РНФ (грант № 21-79-10115).

СВЧ-излучение будет проникать в материал только на глубину скин-слоя, поэтому массивные образцы, очевидно, будут демонстрировать температурную зависимость коэффициента отражения ступенчатого вида. На наш взгляд, большую функциональность позволят реализовать плёнки VO_2 с толщиной, меньшей скин-слоя, когда часть энергии электромагнитной волны способна туннелировать через плёнку, не превышающую 100 нм, чтобы фазовый переход был более выраженным.

1. Формулировка задачи

Рассмотрим СВЧ-характеристики тонкой плёнки диоксида ванадия (VO_2). Из имеющихся экспериментальных данных [14] видно, что электромагнитные свойства диоксида ванадия можно удовлетворительно описывать в рамках модели Друде, когда диэлектрическая проницаемость материала может быть выражена через два зависящих от температуры параметра: $\varepsilon(\omega,\ T) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2\ (T)}{\omega(\omega - i\tau^{-1}(T))}$, $\omega_p(T)$ — плазменная частота, $\tau^{-1}(T)$ — частота межэлектронных соударений (см. рис. 1). При учёте фазового перехода достаточно неплохо работает линейная аппроксимация температурной зависимости параметров модели Друде. Как видно из рис. 1, фазовый переход протекает не мгновенно, а в диапазоне температур примерно от 337 K и до 352 K.

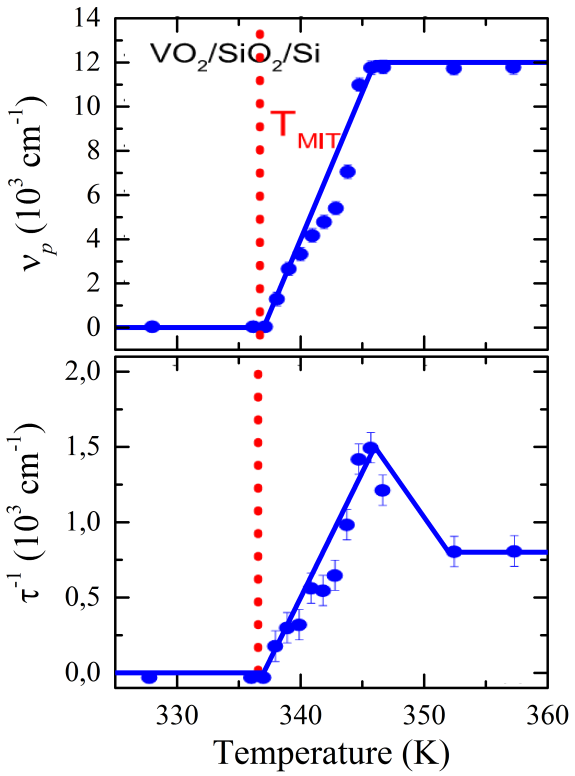

Рис. 1. Температурная зависимость плазменной частоты $\nu_p = \omega_p/2\pi$ и частоты соударений электронов в плёнке VO_2: точки — эксперимент [2], сплошные линии — кусочно-непрерывная аппроксимация

Для исследования СВЧ-свойств тонких плёнок VO_2 рассмотрим для определённости прямоугольный волновод, в который помещён образец, представляющий собой тонкую плёнку диоксида ванадия, нанесённую на диэлектрическую подложку (для определённости будем считать, что это SiO_2). Схема задачи изображена на рис. 2. Пусть по волноводу распространяется волна H_{10}, которая, падая на образец, частично отражается, частично проходит через него, а частично — поглощается. Рассчитаем частотную зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны при различных температурах образца. Для этого необходимо решить уравнения Максвелла в каждой из сред и поставить граничные условия в виде непрерывности тангенциальных компонент напряжённостей электрического и магнитного полей. Расчёты показывают, что для этих целей можно адаптировать метод матриц переноса, который заключается в том, чтобы описывать каждый слой рассматриваемой системы матрицей, связывающей тангенциальные компоненты полей на двух границах слоя:

$$\begin{pmatrix} E_\tau \\ H_\tau \end{pmatrix}\Big|_{x=0} = \widehat{M}_i \begin{pmatrix} E_\tau \\ H_\tau \end{pmatrix}\Big|_{x=d}, \qquad (1)$$

$$\widehat{M}_i = \begin{pmatrix} \cos h_i d_i & -i\frac{k_i}{h_i}\sin h_i d_i \\ -i\frac{h_i}{k_i}\sin h_i d_i & \cos h_i d_i \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

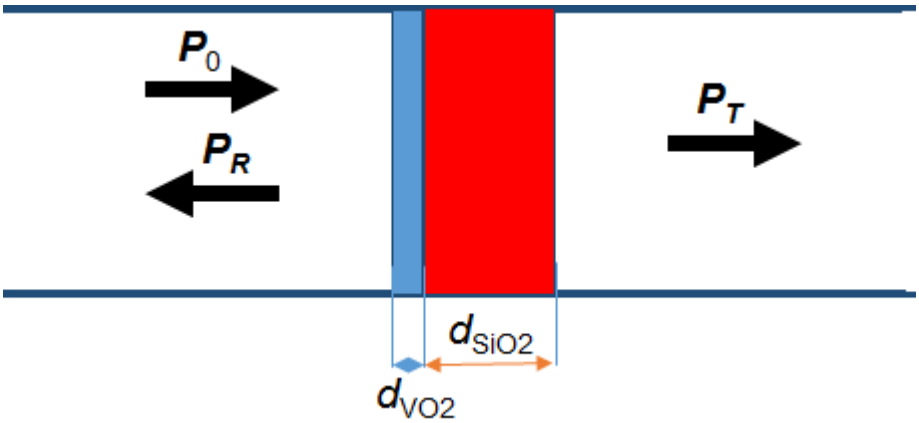

Рис. 2. Схема прямоугольного СВЧ-волновода с образцом, состоящим из тонкой плёнки VO_2 на подложке из SiO_2. На образец падает СВЧ-волна моды H_{10} с мощностью P_0, частично отражается (мощность отражённой волны P_R) и частично проходит сквозь образец (мощность прошедшей волны P_T)

В формулах (1), (2) использованы следующие обозначения: d_i — толщина i-го слоя, $k_i = \sqrt{\varepsilon_i \mu_i}$, ω_c — волновое число в среде с диэлектрической и магнитной проницаемостями ε_i и μ_i соответственно, ω — циклическая частота электромагнитной волны, c — скорость света в вакууме, $h_i = \sqrt{k_i^2 - g^2}$ — волновое число моды H_{10}, распространяющейся по волноводу, заполненному i-й средой, $g = \pi/a$ — поперечное волновое число моды H_{10}, a — ширина волновода. В таком случае рассматриваемая структура может быть описана общей матрицей $\widehat{M}$, получаемой произведением матрицы переноса плёнки VO_2 и матрицы переноса подложки SiO_2. Зная полную матрицу переноса всей структуры, можно рассчитать амплитудный коэффициент отражения электромагнитной волны:

$$r = \frac{\left(M_{11} + M_{12}\frac{h_0}{k_0}\right)\frac{h_0}{k_0} - \left(M_{21} + M_{22}\frac{h_0}{k_0}\right)}{\left(M_{11} + M_{12}\frac{h_0}{k_0}\right)\frac{h_0}{k_0} + \left(M_{21} + M_{22}\frac{h_0}{k_0}\right)}.$$

Зная амплитудный коэффициент отражения, можно рассчитать энергетический коэффициент $R = P_R/P_0 = |r|^2$.

2. Результаты и обсуждение

Для проведения расчётов нужно определиться с рассматриваемым частотным диапазоном и толщиной исследуемой плёнки VO_2. Рассмотрим для определённости волновод с шириной стенки 7.11 мм (R320 согласно классификации IEC), что соответствует рабочему диапазону частот 26.5–40 ГГц. Принимая во внимание, что в диоксиде ванадия происходит фазовый переход диэлектрик — полупроводник, в полупроводниковой фазе электромагнитная волна будет проникать в него только на глубину скин-слоя. При выборе плёнки большой толщины электромагнитная волна почти полностью будет отражаться от образца, поэтому чтобы увидеть особенности СВЧ-характеристик диоксида ванадия в области фазового перехода, необходимо выбрать толщину меньше толщины скин-слоя VO_2 в данном диапазоне частот. Зависимость толщины скин-слоя от частоты и температуры приведена на рис 3.

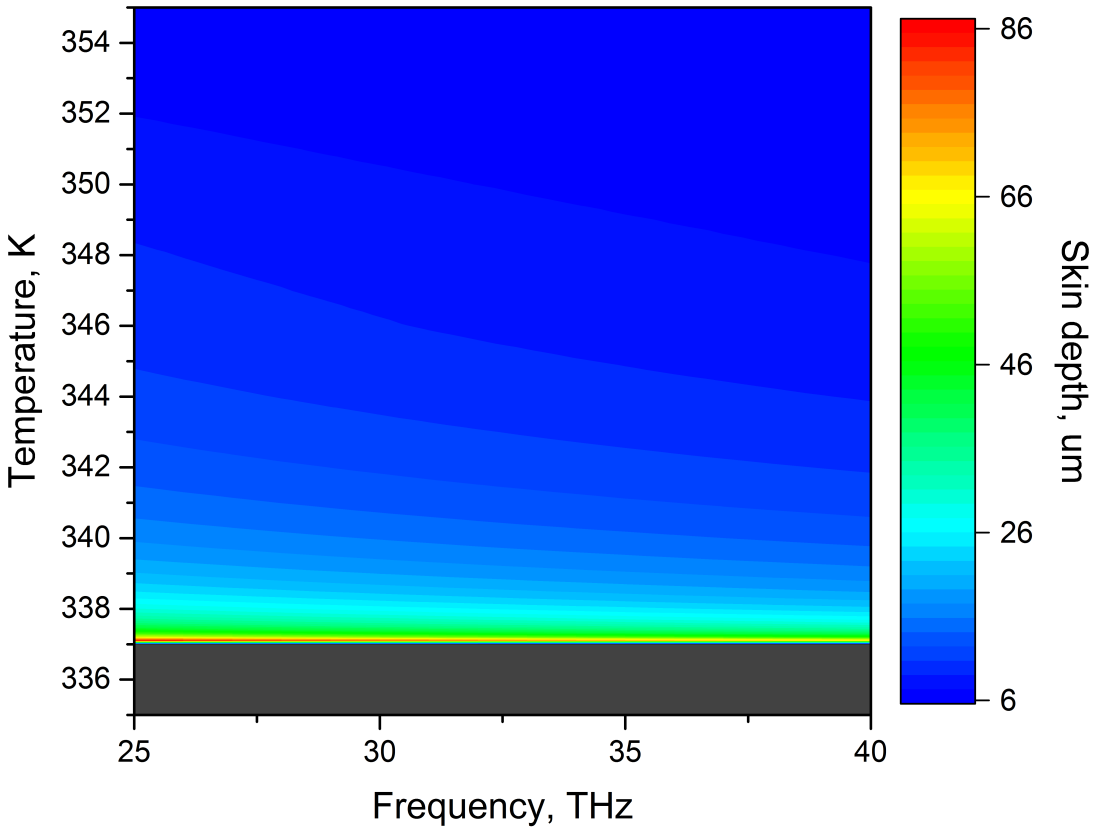

Рис. 3. Скин-слой электромагнитной волны в VO_2 в диапазоне частот 25–40 ГГц и диапазоне температур 335–356 K

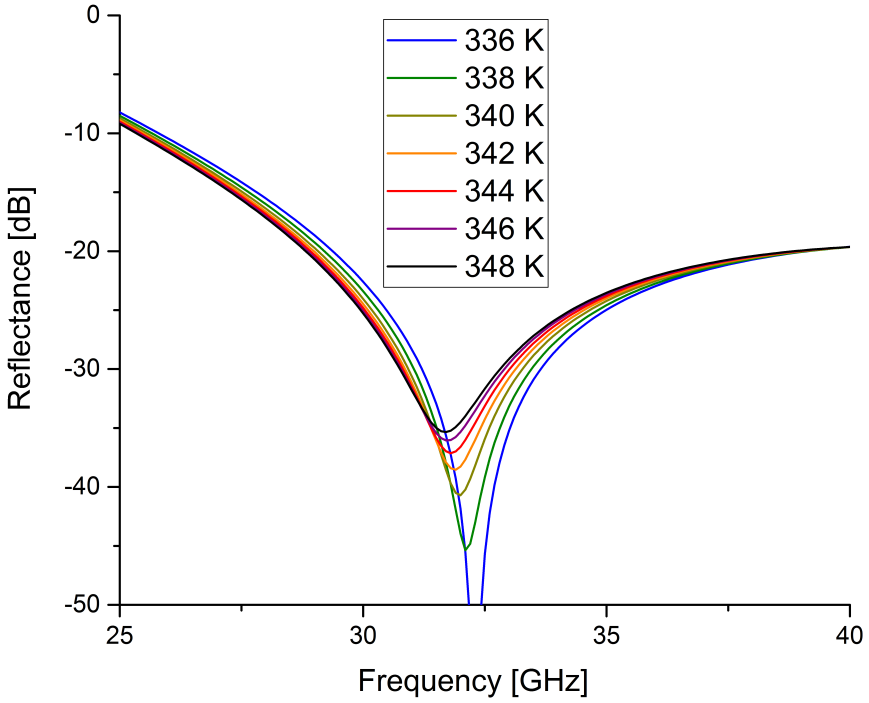

Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения в дБ ($10 \lg R$) электромагнитной волны от структуры VO_2/SiO_2 в области фазового перехода в диоксиде ванадия

Видно, что в полупроводниковой фазе толщина скин-слоя составляет не менее 5 мкм. Поэтому для расчётов выберем толщину плёнки диоксида ванадия существенно меньше толщины скин-слоя, $d_{VO_2} = 1$ мкм. Толщину подложки будем считать равной 1.5 мм, что вполне соответствует характерным размерам подложек

реальных образцов. Для этих параметров были рассчитаны частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны в рассматриваемом диапазоне частот для разных температур (см. рис. 4).

Из расчётов видно, что коэффициент отражения электромагнитной волны имеет минимум. Когда диоксид ванадия находится в диэлектрической фазе, этот минимум соответствует размерному резонансу в плёнке SiO_2. При фазовом переходе этот минимум смещается в область более низких частот и становится шире за счёт возрастающих потерь в VO_2.

Полученные результаты показывают особенности СВЧ-характеристик диоксида ванадия в области фазового перехода. Зависимость ширины и положения минимума в частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны может, с одной стороны, позволить наблюдать кинетику фазового перехода в VO_2 СВЧ-методами, с другой стороны, эта зависимость может оказаться полезной при проектировании различного рода отражающих и поглощающих покрытий СВЧ-диапазона.

Список литературы

1. **Capmany J., Novak D.** Microwave photonics combines two worlds // Nature Photonics. 2007. Vol. 1, iss. 6. P. 319–330.
2. **Capmany J., Li G., Lim C., Yao J.** Microwave photonics: current challenges towards widespread application // Optics Express. 2013. Vol. 21, iss. 19. P. 22862–22867.
3. **Marpaung D., Yao J., Capmany J.** Integrated microwave photonics // Nature Photonics. 2019. Vol. 13, no. 2. P. 80–90.
4. **Morin F. J.** Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature // Physical Review Letters. 1959. Vol. 3, iss. 1. P. 34–35.
5. **Мотт Н. Ф.** Переходы металл-изолятор. М. : Наука, 1979.
6. **Bychkov I. V., Kuzmin D. A., Tolkachev V. A., Kamantsev A. P., Koledov V. V., Shavrov V. G.** Diffraction of a plane electromagnetic wave by a VO_2 microsphere in the phase transition region // Physics of the Solid State. 2020. Vol. 62, no. 6. P. 993–997.
7. **Long L., Taylor S., Wang L.** Enhanced infrared emission by thermally switching the excitation of magnetic polariton with scalable microstructured VO_2 metasurfaces // ACS Photonics. 2020. Vol. 7, no. 8. P. 2219–2227.
8. **Kang T., Ma Z., J. Qin, et al.** Large-scale, power-efficient Au/VO_2 active metasurfaces for ultrafast optical modulation // Nanophotonics. 2021. Vol. 10., no. 2. P. 909–918.
9. **Tripathi A., John J., Kruk S., et al.** Tunable Mie-resonant dielectric metasurfaces based on VO_2 phase-transition materials // ACS Photonics. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 1206–1213.
10. **Usik M. O., Kharitonova O. G., Kuzmin D. A., Bychkov I. V., Tolkachev V. A., Shavrov V. G., Temnov V. V.** Excitation of surface plasmon-polaritons in hybrid graphene metasurface — vanadium dioxidenanostructure using prism coupling // Челяб. физ.-мат. журн. 2021. Т. 6, вып. 3. С. 375–383.
11. **Лазукова Н. И., Губанов В. А.** Оптический спектр двуокиси ванадия при фазовом переходе полупроводник-металл // Оптика и спектроскопия. 1977. Т. 42, № 6. С. 1200–1202.
12. **Осмоловская О. М., Смирнов В. М., Селютин А. А.** Синтез и магнитные свойства двумерных ванадий (IV) кислородных наноструктур на поверхности кремнезема // Журн. общей химии. 2008. Т. 78, № 10. С. 1633—1638.
13. **Кириленко В. В., Жигарновский Б. М., Бейрахов А. Г. и др.** Синтез пленкообразующих материалов из оксидов ванадия и исследование возможностей получения на их основе оптических покрытий // Оптический журнал. 2010. № 9. С. 75–87.

14. **Tazawa M., Jin P., Tanemur S.** Optical constants of $V_{1-x}W_xO_2$ films // Applied Optics. 1998. Vol. 37, no. 10. P. 1858–1861.

Поступила в редакцию 11.01.2022.
После переработки 10.03.2022.

Сведения об авторах

Кузьмин Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; e-mail: kuzminda@csu.ru.
Бычков Игорь Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.
Вахитов Максим Григорьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Клыгач Денис Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», заведующий лабораторией электродинамических измерений НИИ перспективных материалов и технологий ресурсосбережения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.

Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 123–130.

DOI: 10.47475/2500-0101-2022-17109

REFLECTION OF MICROWAVES FROM THIN FILM OF VANADIUM DIOXIDE

D.A. Kuzmin[1,a], I.V. Bychkov[1], M.G. Vakhitov[2], D.S. Klygach[2]

[1] *Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*
[2] *South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia*
[a] *kuzminda@csu.ru*

The reflection of a microwaves from a thin film of vanadium dioxide on a dielectric substrate in the vicinity of the semiconductor-metal phase transition is studied. The frequency dependences of the reflectance at various temperatures in the region of the phase transition are calculated. A dip is found in the frequency dependence of the reflection coefficient, which shifts to lower frequencies during the phase transition.

Keywords: *microwaves, vanadium dioxide, phase transition.*

References

1. **Capmany J., Novak D.** Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, iss. 6, pp. 319–330.
2. **Capmany J., Li G., Lim C., Yao J.** Microwave photonics: current challenges towards widespread application. *Optics Express*, 2013, vol. 21, iss. 19, pp. 22862–22867.
3. **Marpaung D., Yao J., Capmany J.** Integrated microwave photonics. *Nature Photonics*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 80–90.
4. **Morin F.J.** Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. *Physical Review Letters*, 1959, vol. 3, iss. 1, pp. 34–35.
5. **Mott N.** *Metal-Insulator Transitions.* London, CRC Press, 1990.
6. **Bychkov I.V., Kuzmin D.A., Tolkachev V.A., Kamantsev A.P., Koledov V.V., Shavrov V.G.** Diffraction of a plane electromagnetic wave by a VO_2 microsphere in the phase transition region. *Physics of the Solid State*, 2020, vol. 62, no. 6, pp. 993–997.
7. **Long L., Taylor S., Wang L.** Enhanced infrared emission by thermally switching the excitation of magnetic polariton with scalable microstructured VO_2 metasurfaces. *ACS Photonics*, 2020, vol. 7, no. 8, pp. 2219–2227.
8. **Kang T., Ma Z., Qin J., et al.** Large-scale, power-efficient Au/VO_2 active metasurfaces for ultrafast optical modulation. *Nanophotonics*, 2021, vol. 10., no. 2, pp. 909–918.
9. **Tripathi A., John J., Kruk S., et al.** Tunable Mie-resonant dielectric metasurfaces based on VO_2 phase-transition materials. *ACS Photonics*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 1206–1213.
10. **Usik M.O., Kharitonova O.G., Kuzmin D.A., Bychkov I.V., Tolkachev V.A., Shavrov V.G., Temnov V.V.** Excitation of surface plasmon-polaritons in hybrid graphene metasurface — vanadium dioxidenanostructure using prism coupling. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*, 2021, vol. 6, iss. 3, pp. 375–383.
11. **Lazukova N.I., Gubanov V.A.** Opticheskiy spektr dvuokisi vanadiya pri fazovom perekhode poluprovodnik-metall [Optical spectrum of vanadium dioxide at the semiconductor-metal phase transition]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 1977, vol. 42, no. 6, pp. 1200–1202. (In Russ.).

The work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-07-00466). Numerical calculations were carried out with the support of the Russian Scientific Foundation (grant No. 21-79-10115).

12. **Osmolovskaya O.M., Smirnov V.M., Selyutin A.A.** Synthesis and magnetic properties of two-dimensional vanadium (IV) oxide nanostructures on silica surface. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. 78, no. 10, pp. 1872—1876.
13. **Kirilenko V.V., Zhigarnovskii B.M., Beirakhov A.G., et al.** Synthesizing film-forming materials from vanadium oxides and investigating the possibilities of producing optical coatings based on them. *Journal of Optical Technology*, 2010, vol. 77, iss. 9, pp. 582–591.
14. **Tazawa M., Jin P., Tanemur S.** Optical constants of $V_{1-x}W_xO_2$ films. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, no. 10, pp. 1858–1861.

Article received 11.01.2022.
Corrections received 10.03.2022.