

ОТРАЖЕНИЕ СВЧ-ВОЛН ОТ СЛОЯ КОМПОЗИТА $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ В ОКРЕСТНОСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Д. А. Кузьмин^{1,a}, М. О. Усик¹, И. В. Бычков¹,
М. Г. Вахитов², Д. С. Клыгач²

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет

(национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

^akuzminda@csu.ru

Исследуется отражение СВЧ-волны от слоя композитного материала из диоксида ванадия и диоксида кремния в окрестности фазового перехода полупроводник-металл. Рассчитаны зависимости коэффициента отражения от температуры, объёмной доли диоксида ванадия в композите и толщины слоя композита в области фазового перехода.

Ключевые слова: СВЧ-волна, диоксид ванадия, фазовый переход, композитный материал.

Введение

СВЧ-электроника и радиофотоника [1–3], активно развивающиеся в наше время, требуют элементов, способных динамически изменять свои электродинамические свойства. Одним из способов достижения этой цели является использование материалов с фазовым переходом. Особый интерес в этом отношении представляет диоксид ванадия (VO_2), который при нагревании до температуры [4] $T_{\text{crit}} \approx 340$ К испытывает фазовый переход полупроводник-металл. Это фазовый переход первого рода, сопровождающийся резким изменением электрических, теплофизических, магнитных, оптических и структурных свойств, а также скачком концентрации носителей, который достигает порядка 10 [5]. При температурах ниже температуры перехода ($T \lesssim T_{\text{crit}}$) диоксид ванадия является полупроводниковым материалом с шириной запрещённой зоны около $0,7$ эВ, т. е. почти диэлектриком.

Недавно возник интерес к исследованию перспектив использования диоксида ванадия в оптических метаповерхностях и наноструктурах [6–10], с целью динамического изменения их свойств. Однако исследование подобных свойств в СВЧ-диапазоне также остаётся актуальным. Особый интерес представляют композиты на основе диоксида ванадия [11–13], поскольку они позволяют установить минимальный размер частиц, при котором ещё наблюдается фазовый переход, и определить влияние размера на характеристики и параметры перехода. С другой стороны, в зависимости от объёмной доли диоксида ванадия в композите может наблюдаться явление перколяции, когда отдельные области диоксида ванадия начинают соприкасаться, образуя проводящие каналы внутри диэлектрической матрицы композита. Композиты обладают более высоким коэффициентом пропускания в оптическом

диапазоне и более низкой теплопроводностью, что может быть полезным при создании оптических элементов с переменными свойствами, например, оптических фильтров или зеркал.

Композиты VO_2/SiO_2 могут также использоваться для создания динамических метаматериалов, обладающих изменяемыми электродинамическими свойствами в зависимости от температуры и частоты. Этого можно достичь путём контроля толщины и концентрации компонентов, а также оптимизации их взаимодействия. На основе таких композитов могут быть созданы новые типы термисторов, полезных для измерения температуры в широком диапазоне частот, включая СВЧ-диапазон. Таким образом, композиты на основе диоксида ванадия и диоксида кремния представляют собой многообещающий материал для использования в различных приложениях СВЧ-электроники и оптической фотоники.

В настоящей работе исследовано отражение СВЧ-волн от композита $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ в окрестности фазового перехода.

1. Формулировка задачи

Рассмотрим СВЧ-характеристики плёнки композитного материала, состоящего из частиц диоксида ванадия (VO_2) в диэлектрической матрице из кварцевого стекла (SiO_2). Такой композитный материал может быть получен экспериментально с разной объёмной долей VO_2 в композите [14–16]. Из экспериментальных данных по исследованию оптических свойств такого композита можно сделать вывод, что теоретическое описание электродинамических свойств материала может быть проведено в рамках модели Бруггемана [14]. В модели предполагается, что композитный материал состоит из двух фаз, одна из которых — матрица, а другая — диспергированная фаза. Обе фазы имеют различные электродинамические свойства (диэлектрические постоянные ε_i и ε_m соответственно). Эффективное приближение Бруггемана использует самосогласованный подход для получения уравнений, которые связывают эффективные свойства композита со свойствами составляющих фаз. Теория нашла применение при описании широкого спектра композитных материалов, включая композиты с случайно распределёнными включениями, композиты с упорядоченными включениями и композиты со слоистой структурой. Одним из преимуществ такого подхода является то, что он относительно прост в реализации и может быть использован для оценки эффективных свойств композитного материала без необходимости получения подробной информации о его микроструктуре. В рамках модели Бруггемана, эффективная диэлектрическая проницаемость композита может быть вычислена из уравнения

$$\Phi \frac{(\varepsilon_m - \varepsilon_{\text{eff}})}{(\varepsilon_m + 2\varepsilon_{\text{eff}})} + (1 + \Phi) \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{eff}})}{(\varepsilon_i + 2\varepsilon_{\text{eff}})} = 0, \quad (1)$$

где ε_{eff} — искомая эффективная диэлектрическая проницаемость композита, ε_m — диэлектрическая проницаемость матрицы, ε_i — диэлектрическая проницаемость включений, Φ — объёмный фактор заполнения композита.

Из имеющихся экспериментальных данных [17] 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:

$$\varepsilon_i(\omega, T) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2(T)}{\omega(\omega - i\tau^{-1}(T))},$$

$\omega_p(T)$ — плазменная частота, $\tau^{-1}(T)$ — частота межэлектронных соударений. При учёте фазового перехода достаточно неплохо работает линейная аппроксимация температурной зависимости параметров модели Друде [18]. Как известно, фазовый переход протекает не мгновенно, а в диапазоне температур примерно от 337 и до 352 К.

Для исследования СВЧ-свойств плёнок композита VO₂-SiO₂ рассмотрим для определённости прямоугольный волновод, в который помещена исследуемая плёнка композита (см. рис. 1). Пусть по волноводу распространяется волна Н₁₀, которая, падая на образец, частично отражается, частично проходит через него, а частично — поглощается. Рассчитаем частотную зависимость коэффициента отражения и пропускания электромагнитной волны при различных температурах образца и различной объёмной доле VO₂ в композите. 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 плёнку композита матрицей, связывающей тангенциальные компоненты полей на двух границах слоя:

$$\begin{pmatrix} E_\tau \\ H_\tau \end{pmatrix} \Big|_{x=0} = \widehat{M} \begin{pmatrix} E_\tau \\ H_\tau \end{pmatrix} \Big|_{x=d}, \quad (2)$$

$$\widehat{M} = \begin{pmatrix} \cos hd & -i\frac{k}{h} \sin hd \\ -i\frac{h}{k} \sin hd & \cos hd \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В формулах (2), (3) использованы следующие обозначения: d — толщина плёнки композита, $k = \sqrt{\varepsilon\mu}\omega/c$ — волновое число в плёнке композита с эффективными диэлектрической и магнитной проницаемостями ε и μ соответственно, ω — циклическая частота электромагнитной волны, c — скорость света в вакууме, $h = \sqrt{k^2 - g^2}$ — волновое число моды Н₁₀, распространяющейся по волноводу, заполненному композитом, $g = \pi/a$ — поперечное волновое число моды Н₁₀, a — ширина волновода. Зная матрицу переноса плёнки, можно рассчитать амплитудный коэффициент отражения электромагнитной волны:

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

где M_{ij} — элемент матрицы в i -й строке и j -м столбце, $i, j = 1, 2$. Здесь $k_0 = \omega/c$ — волновое число электромагнитной волны в вакууме, $h = \sqrt{k_0^2 - g^2}$ — волновое число моды Н₁₀, распространяющейся по незаполненной композитом части волновода. Тогда энергетический коэффициент отражения может быть рассчитан следующим образом: $R = P_R/P_0 = |r|^2$.

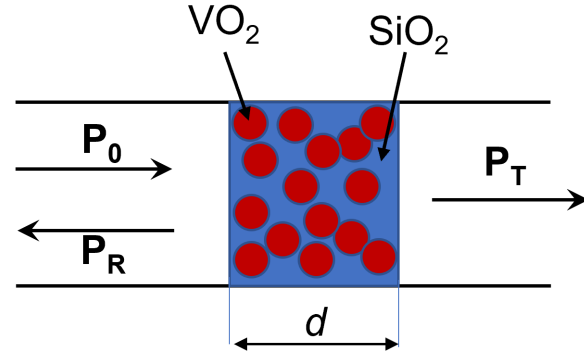


Рис. 1. Схема прямоугольного СВЧ-волновода с образцом, состоящим из тонкой плёнки композита VO₂-SiO₂. На образец падает СВЧ-волна моды Н₁₀ с мощностью P₀, частично отражается (мощность отражённой волны P_R) и частично проходит сквозь образец (мощность прошедшей волны P_T)

2. Результаты и обсуждение

Для проведения расчётов нужно определиться с рассматриваемым частотным диапазоном и толщиной исследуемой плёнки композита. Один из потенциальных способов использования слоя композита $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ для СВЧ-фильтров заключается в создании резонатора на основе этого композита. Когда слой композита находится вблизи температуры фазового перехода, его диэлектрическая проницаемость быстро меняется, что приводит к изменению резонансной частоты резонатора. Это свойство может быть использовано для создания перестраиваемых СВЧ-фильтров, которые могут перестраиваться в зависимости от температуры.

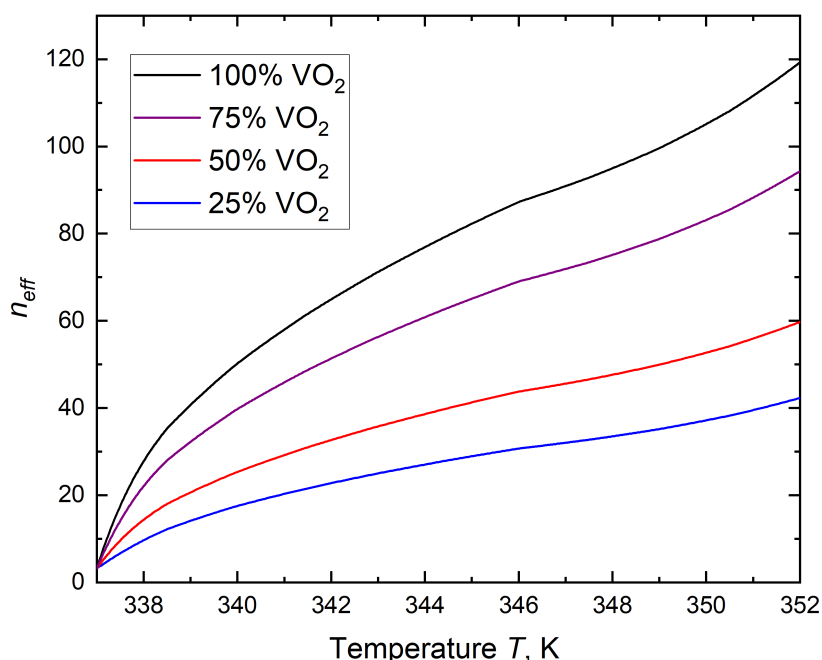


Рис. 2. Температурные зависимости эффективного коэффициента преломления композита $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ при различной объёмной доле VO_2

следовательно, комплексного коэффициента преломления $N = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = n_{\text{eff}} + i\alpha_{\text{eff}}$, где n_{eff} — эффективный коэффициент преломления, показывающий, насколько пространственная периодичность усреднённого поля в композите отличается от длины электромагнитной волны в вакууме, α_{eff} — эффективный коэффициент поглощения, показывающий, насколько глубоко электромагнитная волна проникает в образец. Зависимость n_{eff} от температуры на частоте 30 ГГц для различных значений объёмной доли VO_2 приведена на рис. 2.

Видно, что в полупроводниковой фазе коэффициент преломления практически не зависит от доли VO_2 в композите. При фазовом переходе коэффициент преломления растёт и может достигать значений порядка 100 в чистом образце VO_2 . Использование композитного материала позволяет уменьшить значение коэффициента преломления до желаемого уровня.

Исследуем зависимость отражательной способности композита от толщины плёнки. Для этого рассчитаем зависимость коэффициента отражения от толщины слоя композита при различных температурах, выбрав для определённости фиксированные значения объёмной доли VO_2 и частоты ($\Phi = 0.5$, $f = 30$ ГГц) (см. рис. 3). Из расчётов видно, что коэффициент отражения электромагнитной волны имеет максимум. Когда диоксид ванадия находится в диэлектрической фазе, этот максимум лежит в миллиметровом диапазоне толщин плёнки, а в полупроводниковой фазе — смещается в область десятков микрометров. Можно заметить, что при

Рассмотрим для определённости волновод с шириной стенки 7.11 мм (R320 согласно классификации IEC), что соответствует рабочему диапазону частот от 26.5–40 ГГц. Выберем за основу частоту 30 ГГц, которая попадает в этот рабочий диапазон частот. В общем случае композит обладает как диэлектрическими, так и проводящими свойствами, что находит отражение в комплексных значениях эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} и,

больших значениях толщины слоя зависимость коэффициента отражения выходит на плато и он слабо меняется с дальнейшим увеличением толщины. Это связано с тем, что при отличной от нуля проводимости электромагнитная волна проникает в материал только на толщину скин-слоя. Следовательно, увеличение толщины композита влияет на коэффициент отражения только при толщинах композита, не превышающих этой величины.

Рассмотрим также, как изменяется отражательная способность композита при изменении объёмной доли диоксида ванадия. Для определённости выберем толщину плёнки равной 10 мкм. Результаты расчётов приведены на рис. 4.

Из рисунка можно заметить, что коэффициент отражения растёт с увеличением доли диоксида ванадия в композите. При этом при объёмной доле VO_2 до 0.3 коэффициент отражения скачком изменяется при $T = 337 \text{ K}$, и практически не изменяется при дальнейшем росте температуры. Можно также отметить, что в зависимости коэффициента отражения от объёмной доли VO_2 есть область наиболее сильного роста при $\Phi = 0.3\text{--}0.4$. В этом же диапазоне наблюдается наиболее сильное изменение коэффициента отражения с ростом температуры.

Полученные результаты показывают особенности СВЧ-характеристик композита $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ в области фазового перехода. При фазовом переходе полупроводник-металл происходит резкое изменение электрических свойств композитного слоя, таких как проводи-

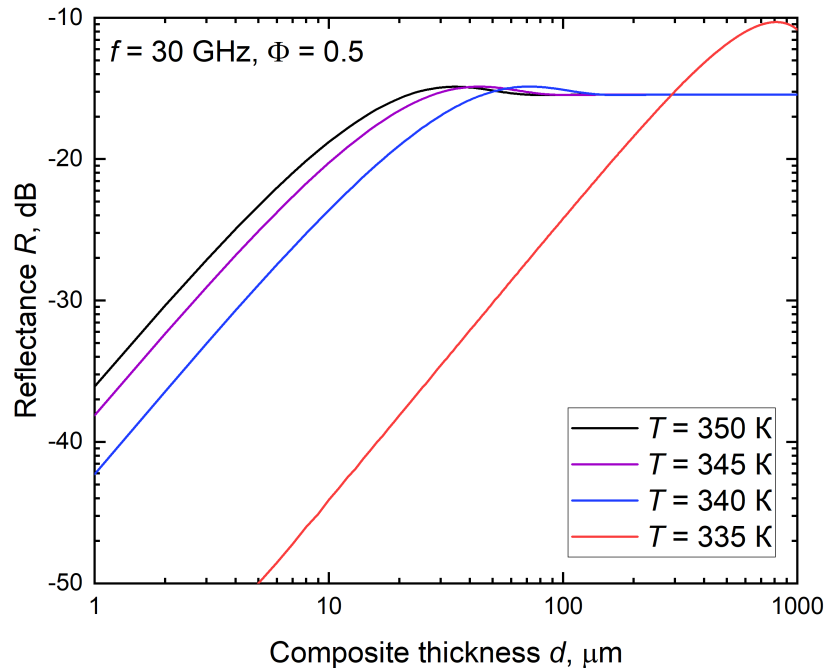


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения в дБ ($10 \lg R$) электромагнитной волны от толщины слоя композита $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ в области фазового перехода в диоксиде ванадия

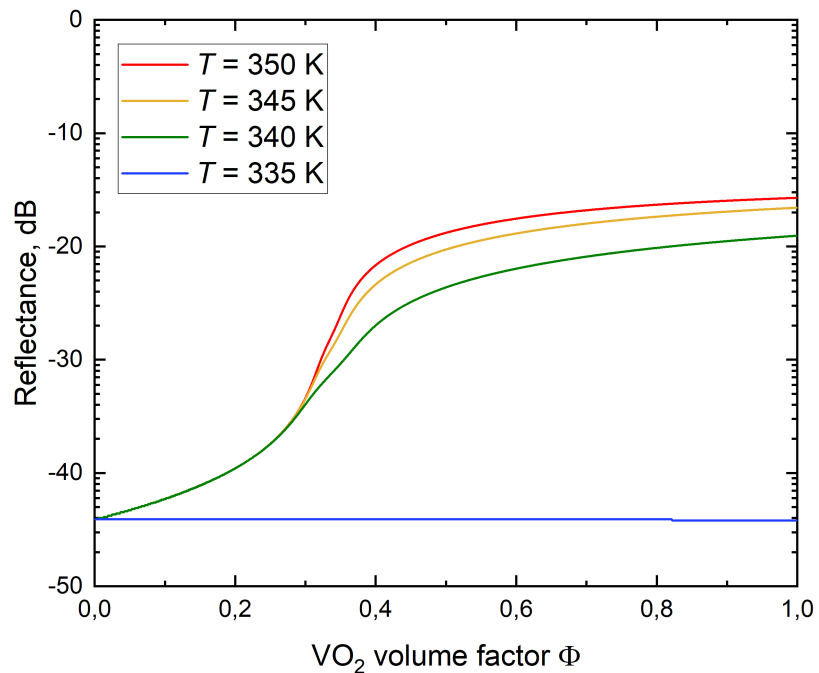


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения в дБ ($10 \lg R$) электромагнитной волны от объёмной доли диоксида ванадия в композите $\text{VO}_2\text{-SiO}_2$ в области фазового перехода

мости и пр.

мость и диэлектрическая проницаемость. Это приводит к тому, что коэффициент отражения СВЧ-волн от композитного слоя сильно зависит от температуры, объёмной доли диоксида ванадия в композите и толщины слоя композита. Изменение СВЧ-характеристик при увеличении доли диоксида ванадия в композите позволяет подобрать оптимальный состав для применений в СВЧ-фильтрах и других устройствах СВЧ-электроники.

Список литературы

1. **Capmany J., Novak D.** Microwave photonics combines two worlds // *Nature Photonics*. 2007. Vol. 1. P. 319–330.
2. **Capmany J., Li G., Lim C., Yao J.** Microwave photonics: current challenges towards widespread application // *Optics Express*. 2013. Vol. 21, no. 19. P. 22862–22867.
3. **Marpaung D., Yao J., Capmany J.** Integrated microwave photonics // *Nature Photonics*. 2019. Vol. 13. P. 80–90.
4. **Morin F. S.** Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature // *Physical Review Letters*. 1959. Vol. 3. P. 34–38.
5. **Морт Н. Ф.** Переходы металл-изолятор. М. : Наука, 1979.
6. **Bychkov I. V.** Diffraction of a plane electromagnetic wave by a VO₂ 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 VO₂ metasurfaces // *ACS Photonics*. 2020. Vol. 7, no. 8. P. 2219–2227.
8. **Kang T., Ma Z., Qin J., et al.** Large-scale, power-efficient Au/VO₂ 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 VO₂ phase-transition materials // *ACS Photonics*. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 1206–1213.
10. **Usik M. O., Kharitonova O. G., Kuzmin D. A., et al.** Excitation of surface plasmon-polaritons in hybrid graphene metasurface — vanadium dioxidenanostructure using prism coupling // *Челяб. физ.-мат. журн.* 2021. Т. 6, вып. 3. P. 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 кремнезёма // *Журнал общей химии*. 2008. Т. 78, № 10. С. 1633–1638.
13. **Кириленко В. В., Жигарновский Б. М., Бейрахов А. Г., и др.** Синтез плёнообразующих материалов из оксидов ванадия и исследование возможностей получения на их основе оптических покрытий // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77, № 9. С. 75–87.
14. **Zhao L., Miao L., Liu C., et al.** Solution-processed VO₂-SiO₂ composite films with simultaneously enhanced luminous transmittance, solar modulation ability and anti-oxidation property // *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4. P. 7000.
15. **Wang C., Zhao L., Liang Z., et al.** New intelligent multifunctional SiO₂/VO₂ composite films with enhanced infrared light regulation performance, solar modulation capability, and superhydrophobicity // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2017. Vol. 18, no. 1. P. 563–573.
16. **Zhang J., Wang T., Xu W., et al.** Thermochromic VO₂-SiO₂ composite coating from ammonium citrate-oxovanadate (IV) // *Nanotechnology*. 2021. Vol. 32, no. 22. P. 225402.
17. **Tazawa M., Jin P., Tanemur S.** Optical constants of V_{1-x}W_xO₂ films // *Applied Optics*. 1998. Vol. 37, no. 9. P. 1858–1861.

18. **Кузьмин Д. А., Бычков И. В., Вахитов М. Г., Клыгач Д. С.** Отражение СВЧ-волн от тонкой плёнки диоксида ванадия // Челяб. физ.-мат. журн. 2022. Т. 7, вып. 1. Р. 123–130.

Поступила в редакцию 31.03.2023.

После переработки 11.06.2023.

Сведения об авторах

Кузьмин Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; e-mail: kuzminda@csu.ru.

Усик Максим Олегович, аспирант кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

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», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); заведующий лабораторией электродинамических измерений, Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий ресурсосбережения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.

REFLECTION OF MICROWAVES FROM VO₂-SiO₂ COMPOSITE LAYER IN THE VICINITY OF PHASE TRANSITION**D.A. Kuzmin^{1,a}, M.O. Usik¹, I.V. Bychkov¹, M.G. Vakhitov², D.S. Klygach²**¹*Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*²*South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia*^a*kuzminda@csu.ru*

The paper investigates the reflection of microwaves from a composite material layer consisting of vanadium dioxide and silicon dioxide near the semiconductor-to-metal phase transition. The dependencies of the reflection coefficient on temperature, the volume fraction of vanadium dioxide in the composite, and the thickness of the composite layer in the phase transition region were calculated.

Keywords: *microwave, vanadium dioxide, phase transition, composite material.*

References

1. **Capmany J., Novak D.** Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, pp. 319–330.
2. **Capmany J., Li G., Lim C., Yao J.** Microwave photonics: current challenges towards widespread application. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 19, pp. 22862–22867.
3. **Marpaung D., Yao J., Capmany J.** Integrated microwave photonics. *Nature Photonics*, 2019, vol. 13, pp. 80–90.
4. **Morin F.S.** Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. *Physical Review Letters*, 1959, vol. 3, pp. 34–38.
5. **Мотт Н.Ф.** *Perekhody metall-izolyator* [Metal-insulator transitions]. Moscow, Nauka, 1979. (In Russ.).
6. **Bychkov I.V.** Diffraction of a plane electromagnetic wave by a VO₂ 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 VO₂ 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/VO₂ 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 VO₂ phase-transition materials. *ACS Photonics*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 1206–1213.
10. **Usik M.O., Kharitonova O.G., Kuzmin D.A., et al.** 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 dvoukisi 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.).

12. **Osmolovskaya O.M., Smirnov V.M., Selyutin A.A.** Synthesis and magnetic properties of two-dimensional vanadium(IV) oxyde nanostructures on silica surface. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. 78, no. 10, pp. 1872–1876.
13. **Kirilenko V.V., Zhigarnovskiy B.M., Beyrakhov 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, no. 9, pp. 582–591.
14. **Zhao L., Miao L., Liu C., et al.** Solution-processed VO₂-SiO₂ composite films with simultaneously enhanced luminous transmittance, solar modulation ability and anti-oxidation property. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, p. 7000.
15. **Wang C., Zhao L., Liang Z., et al.** New intelligent multifunctional SiO₂/VO₂ composite films with enhanced infrared light regulation performance, solar modulation capability, and superhydrophobicity. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 563–573.
16. **Zhang J., Wang T., Xu W., et al.** Thermochromic VO₂-SiO₂ composite coating from ammonium citrato-oxovanadate (IV). *Nanotechnology*, 2021, vol. 32, no. 22, p. 225402.
17. **Tazawa M., Jin P., Tanemur S.** Optical constants of V_{1-x}W_xO₂ films. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, no. 9, pp. 1858–1861.
18. **Kuzmin D.A., Bychkov I.V., Vakhitov M.G., Klygach D.S.** Reflection of microwaves from thin film of vanadium dioxide. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*, 2022, vol. 7, iss. 1, pp. 123–130.

Article received 31.03.2023.

Corrections received 11.06.2023.