

Активный управляемый экран для сантиметровых волн на основе тонких плёнок диоксида ванадия

Полозов В.И. *¹, Маклаков С.С.¹, Маклаков С.А.¹, Набоко А.С.¹, Басков К.М.¹,
Петров Д.А.¹, Кисель В.Н.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 01.09.2022

Одобрена после рецензирования 19.10.2022

Принята к публикации 31.10.2022

Аннотация

Разработан метод создания активного экрана для сантиметрового диапазона длин волн на основе неэпитаксиальной тонкой плёнки VO_2 большой площади на подложке из поликристаллического Al_2O_3 . Изменение частотного отклика осуществляется путём перевода VO_2 из диэлектрического состояния в металлическое, происходящего в процессе фазового перехода металл-диэлектрик. В открытом состоянии (VO_2 - диэлектрик) разработанная структура является полосовым фильтром с центральной частотой в 14 ГГц, коэффициентом прохождения (КП) на этой частоте -0,9 дБ и полосой пропускания по уровню -3 дБ, равной 10 ГГц. После перехода VO_2 в металлическое состояние при нагреве образца до 45 °С устройство становится отражателем: на центральной частоте КП резко падает и при температуре 80 °С составляет -10,1 дБ. Разработанный экран представляет собой массив прямоугольных апертур в металлическом слое, нанесённом непосредственно на слой VO_2 . Нанесение металлической плёнки и последующее формирование в ней апертур методом фотолитографии с последующим жидкостным травлением не повлияли на свойства функциональной плёнки VO_2 . Благодаря тому, что нанесение и слоя VO_2 , и слоя металла выполнено при помощи магнетронного распыления, предлагаемый метод может быть с лёгкостью масштабирован и применён для создания серийных образцов управляемых широкополосных экранов.

Ключевые слова: диоксид ванадия, тонкие плёнки, переход металл-диэлектрик, активные экраны, переключаемые СВЧ устройства

Введение

Тонкие плёнки диоксида ванадия (VO_2) толщиной 100-300 нм при нагреве до температуры ~68 °С испытывают обратимый фазовый переход металл-диэлектрик. Плёнки переходят из диэлектрического состояния с поверхностным сопротивлением (R_{Π}) порядка 10^4 - 10^6 Ом/квадрат в металлическое состояние с $R_{\Pi} \approx 10$ -1000 Ом/квадрат [1, 2]. Благодаря данной особенности VO_2 может быть использован в различных активных экранах с управляемым частотным откликом на основе частотно-селективных поверхностей (ЧСП) для решения задач электромагнитной совместимости или управления распространением излучения: пространственных фильтрах [3, 4], линзах [5], модуляторах [6], поляризаторах [7]. Однако подобные устройства на основе VO_2 реализованы только для ТГц и ИК диапазонов электромагнитного излучения. Существует необходимость в создании аналогичных устройств и для сантиметрового диапазона длин волн. Разработку активного экрана с применением VO_2 затрудняют две основные проблемы. Первая заключается в сложности разработки метода синтеза однородных плёнок с площадью, необходимой для создания устройств, работающих в сантиметровом диапазоне. Вторая связана с высоким R_{Π} (более 300 Ом/квадрат) плёнок VO_2 , синтезируемых неэпитаксиальными методами, допускающими получение плёнок большой площади в металлическом состоянии, в связи с чем коэффициент прохождения (КП) экрана изменяется не более, чем на 4-5 дБ при переключении.

Метод получения плёнок большой площади был продемонстрирован в нашей предыдущей работе [1]. Он позволяет получать однородные плёнки на подложке площадью не менее 30 см². При этом амплитуда перехода (отношение сопротивлений в диэлектрическом состоянии (при 30 °С) и металлическом состоянии (при 80 °С)) достигает 10^3 раз, а R_{Π} в металлическом состоянии - 300 Ом/квадрат. Полу-

* Автор, ответственный за переписку: Виктор Иванович Полозов, viktor.polozov@phystech.edu

ченные плёнки были применены в управляемом СВЧ-поглотителе с изменяемым частотным откликом на основе массива плоскопараллельных волноводов [8], а также управляемой узкополосной частотно-селективной поверхности, представляющей собой массив, состоящий из периодически расположенных элементарных ячеек в форме кольцевых апертур с интегрированными элементами VO_2 [9].

Наиболее часто в качестве активных элементов управляемых экранов для СВЧ диапазона используются полупроводниковые компоненты: PIN-диоды [10] или варакторы – диоды, ёмкость которых зависит от напряжения [11]. Данные компоненты широко доступны и позволяют осуществлять изменение параметров элементарных ячеек ЧСП в течение десятков наносекунд. Недостатком диодных ЧСП является необходимость подключения диодов к цепи управления постоянного тока, что может приводить к росту вносимых потерь до 4 дБ [12]. Минимизация вносимых потерь требует существенного роста стоимости и сложности устройства: разработки многослойной структуры с переходными отверстиями между слоями и применения диодов с низкими тепловыми потерями [13]. Аналогичные проблемы возникают при использовании микроэлектромеханических систем [14].

При отсутствии необходимости в быстром переключении состояния экрана могут быть использованы следующие способы изменения импеданса элементарных ячеек: введение в ячейки металлических элементов при помощи микрофлюидных устройств [15], сжатие или растяжение подложки [16], применение тонкого фотопроводящего слоя [17]. Подобные методы управления существенно усложняют конструкцию устройства, а время переключения между состояниями может занимать десятки секунд, как в случае с фотопроводником. Применение тонких плёнок VO_2 с переходом полупроводник-металл позволит упростить и удешевить систему управления ЧСП, а также увеличить скорость переключения.

Цель данной работы – разработка метода применения плёнок VO_2 с высоким сопротивлением в металлическом состоянии (более 300 Ом/квadrat) в качестве активного экрана, амплитуда изменения КП которого при переключении составляет ~ 10 дБ. R_{Π} в 300 Ом/квadrat и не позволяет использовать чистую плёнку в качестве СВЧ экрана в связи с недостаточно низким для электромагнитного экранирования КП в -4,8 дБ в металлическом состоянии (рисунок 1). Нанесение металлической структуры ЧСП поверх VO_2 позволяет дополнительно уменьшить КП в металлическом состоянии за счёт уменьшения рабочего диапазона частот. Для уменьшения вносимых потерь в открытом состоянии интеграция элементов VO_2 в структуру ЧСП выполнена без механической обработки плёнок и длительного процесса их позиционирования на готовой ЧСП. Разработанный экран представляет собой тонкий проводящий слой с прямоугольными апертурами, сформированный поверх тонкой плёнки VO_2 . Его частотный отклик в диапазоне 4-24 ГГц изменяется при нагреве. При температуре 30 °С, когда R_{Π} тонкой плёнки VO_2 составляет $4 \cdot 10^5$ Ом/квadrat, такая структура представляет собой полосовой фильтр с полосой пропускания 9-19 ГГц (в случае нормального падения линейно-поляризованной плоской волны с вектором E , параллельным длинной стороне элементарной ячейки массива апертур). При переходе VO_2 в металлическое состояние при температуре 80 °С, в котором R_{Π} тонкой плёнки $VO_2 = 300$ Ом/квadrat, данная поверхность отражает СВЧ излучение, в связи с чем коэффициент прохождения излучения через поверхность уменьшается на 9 дБ на центральной частоте.

Экспериментальная часть

Создание активного экрана проводилось в 2 этапа. На первом этапе была нанесена тонкая плёнка VO_2 с фазовым переходом металл-диэлектрик. На втором этапе поверх плёнки был нанесен проводящий слой с прямоугольными апертурами.

Формирование слоя VO_2 происходило при помощи разработанного ранее двухстадийного процесса. Нанесение плёнки было выполнено методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления мишени из чистого V в атмосфере $Ar+O_2$. В качестве подложки использован поликристаллический Al_2O_3 (поликор) размером $48 \times 60 \times 0,5$ мм. При нанесении на подложке поддерживалась температура в 350 °С. Толщина полученной плёнки, измеренная при помощи микроинтерферометра, составила 200 нм. После нанесения плёнка была подвергнута высокотемпературной обработке в нейтральной атмосфере при 720 °С. Температурная зависимость поверхностного сопротивления полученной плёнки ($R(T)$) была измерена четырёхзондовым методом.

Измерение $R(T)$ позволило подтвердить получение плёнки VO_2 с переходом металл-диэлектрик высокой амплитуды (рисунок 1). Поверх полученной плёнки методом магнетронного распыления на постоянном токе был нанесён слой стали толщиной 200 нм. В этом слое методом фотолитографии с последующим жидкостным травлением были сформированы прямоугольные апертуры, формирующие ЧСП.

Частотный отклик (коэффициенты прохождения и отражения) полученной структуры был измерен на специализированном стенде методом измерения в свободном пространстве [18] в диапазоне

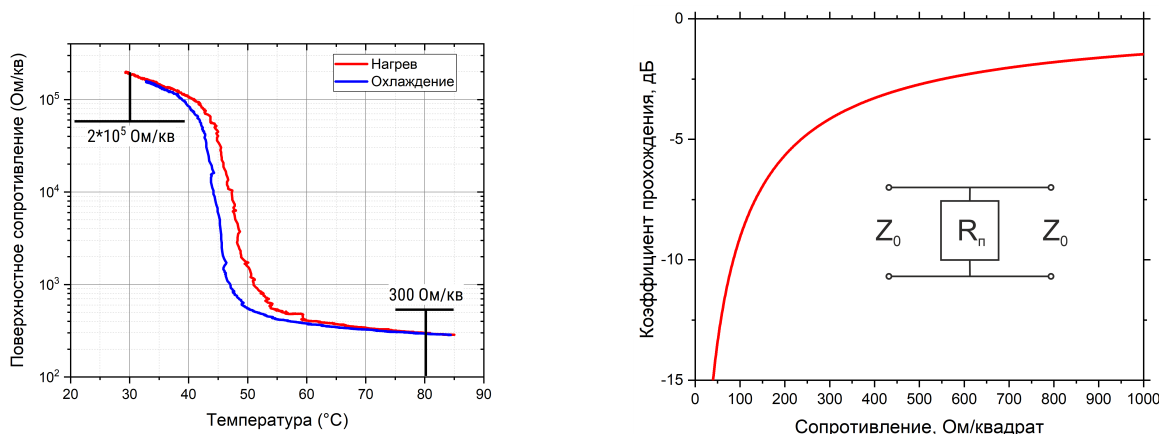


Рисунок 1 – Слева - $R(T)$ тонких плёнок VO_2 , использованных в разработанной ЧСП. Температура перехода найдена путём вычисления производной логарифма сопротивления по температуре. Ширина гистерезиса составляет 3 °C. Справа - теоретическая оценка КП тонкой плёнки в зависимости от её поверхностного сопротивления (при нормальном падении волны в свободном пространстве). КП найден по формуле $2Z_{вх}/(Z_{вх} + Z_0)$, где $Z_{вх} = Z_0 R_n / (Z_0 + R_n)$, а $Z_0 = 377 \text{ Ом}$

4-24 ГГц при температуре в пределах 25-80 °C. В целях сравнения с полученной структурой тем же методом измерена плёнка чистого VO_2 .

Результаты и обсуждение

Фазовый переход в плёнке VO_2 происходит при температуре 45 °C, что значительно меньше характерной для этого вещества температуры перехода в 68 °C [19] и связано с наличием напряжений в тонкой плёнке [1]. Сопротивление плёнки плавно изменяется с температурой, что позволяет плавно регулировать частотный отклик полученного электромагнитного экрана.

С учётом полученной $R(T)$ было выполнено численное моделирование частотного отклика ЧСП в программном пакете HFSS. Параметры элементарной ячейки выбраны таким образом, чтобы структура представляла собой широкополосный полосовой фильтр с центральной частотой 14 ГГц и полосой пропускания 10 ГГц. Приведённые далее форма и размеры апертур (рисунок 2) выбраны для иллюстрации предлагаемого метода формирования активного экрана и могут быть изменены. Аналогично могут быть применены другие методы нанесения проводящего слоя и формирования в нём апертур при условии, что они не будут влиять на свойства тонкой плёнки VO_2 .

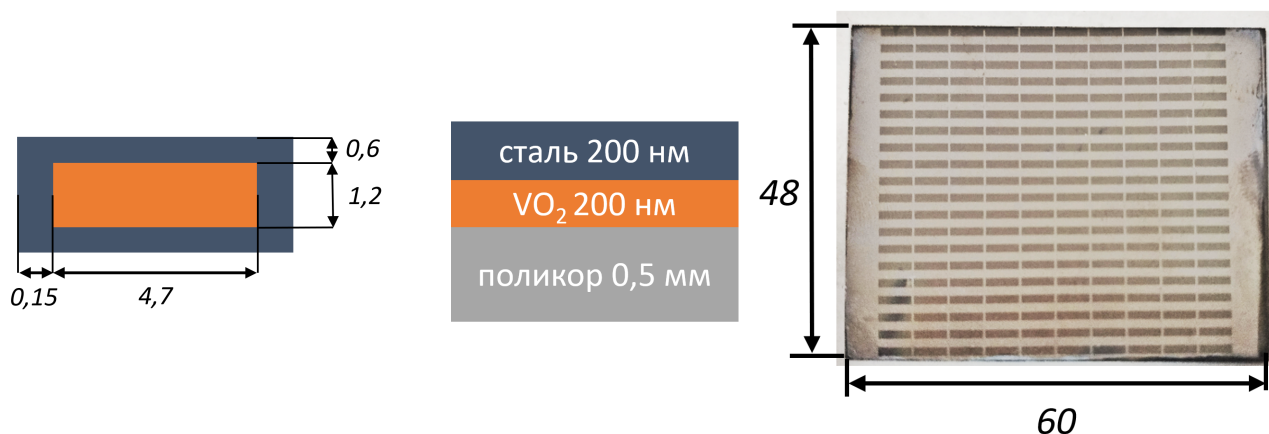


Рисунок 2 – Слева направо: параметры реализованной элементарной ячейки, послойная структура ЧСП, фотография готовой ЧСП. Все размеры указаны в мм.

Для численного моделирования была рассмотрена одна ячейка ЧСП с периодическими граничными условиями и портами Флоке, что эквивалентно бесконечной ЧСП, располагающейся в плоскости XY (рисунок 3). Элементарная ячейка такой ЧСП может быть рассмотрена при помощи сосредоточенных элементов [20] как RLC цепь в волноводе с импедансом $Z_0 = 377 \text{ Ом}$ (импеданс свободного пространства). R_{Π} – переменное поверхностное сопротивление плёнки VO_2 . В полупроводниковом состоянии

сопротивление VO_2 не оказывает влияния на частотный отклик устройства, которое представляет собой резонансный LC контур (рисунок 4). При переходе в металлическое состояние в связи с ростом проводимости открытой от металла части плёнки VO_2 происходит увеличение ёмкости C' и падение R_{Π} , что приводит к рассогласованию импеданса ячейки с импедансом свободного пространства в рассмотренной частотной области. Это, в свою очередь, приводит к сглаживанию кривой КП, не имеющей при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ резонанса в диапазоне 3-24 ГГц. Результаты моделирования хорошо сходятся с результатами измерений (рисунок 4).

Результаты измерений сплошной плёнки VO_2 без частотно-селективной поверхности показывают, что её коэффициент прохождения выше, чем коэффициент прохождения ЧСП при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент прохождения сплошной плёнки соответствует теоретической оценке (рисунок 4).

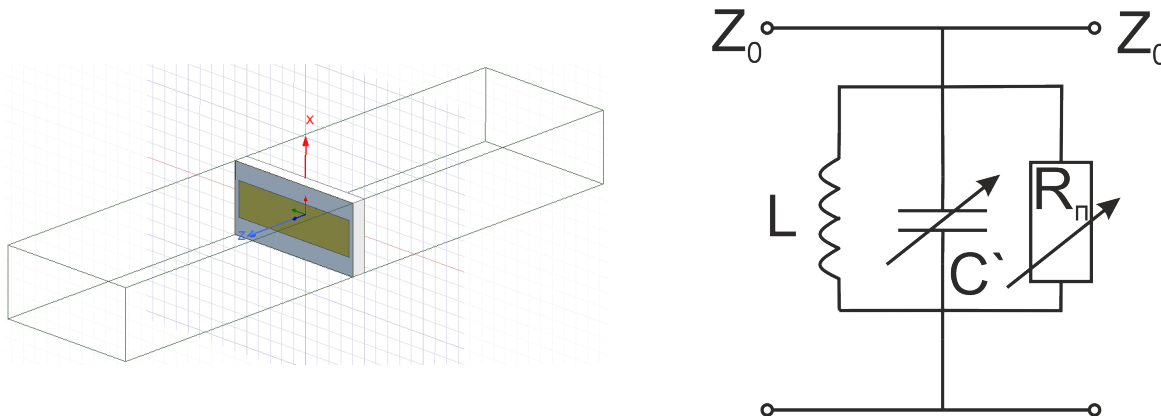


Рисунок 3 – Элементарная ячейка частотно-селективной поверхности, использованная для моделирования, и эквивалентная схема ячейки

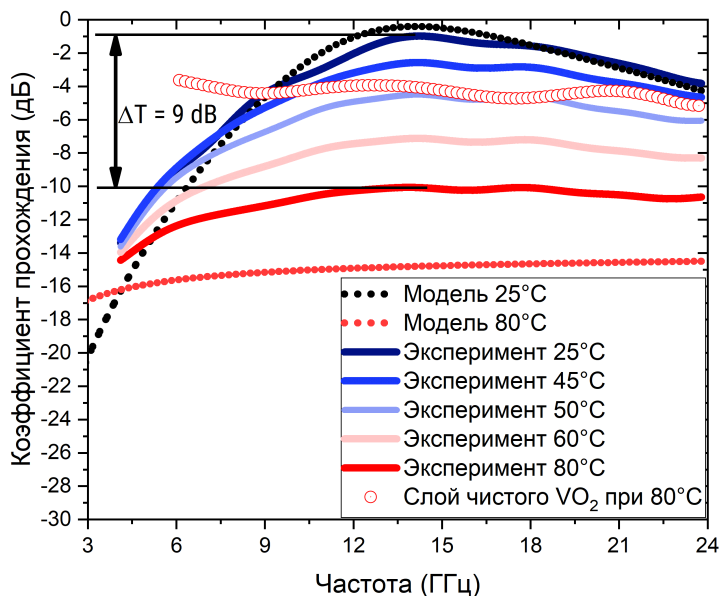


Рисунок 4 – Частотные зависимости коэффициента прохождения ЧСП и чистой плёнки VO_2 при различных температурах: результаты моделирования и экспериментальные измерения

Наибольшее расхождение результатов моделирования и измерений наблюдается при высоких температурах. Измеренный коэффициент прохождения (КП) на центральной частоте составляет $-10,1\text{ дБ}$ и выше ожидаемого на $4,6\text{ дБ}$. Это связано с тем, что при моделировании слой металла рассматривался как идеальный проводник, в то время как нанесённый на VO_2 металл имел толщину порядка толщины своего скин-слоя. Тем не менее использование даже такого металла позволяет получить КП устройства менее -10 дБ в закрытом (металлическом) состоянии, несмотря на высокое $R_{\Pi} VO_2$ в 300 Ом/кв адрат, большее на несколько порядков R_{Π} металлической плёнки. Таким образом, применение

VO_2 в качестве активного слоя управляемых экранов позволяет компенсировать его недостаточно низкое R_{Π} в проводящем состоянии за счёт взаимодействия с элементарной ячейкой ЧСП. Кроме того, в качестве такого активного слоя могут быть использованы неэпитаксиальные (например, на поликристаллическом AlO_3 или кварце) плёнки на поликристаллических подложках, синтез которых хорошо поддаётся масштабированию.

ЧСП с прямоугольными апертурами выбрана в связи с удобством её численного моделирования и производства. Продемонстрированный метод, в отличие от ЧСП на диодах или МЭМС, может быть использован для создания ЧСП с любой формой элементарных ячеек: структура элементарной ячейки ЧСП не ограничена линейными размерами компонентов поверхностного монтажа, в стандартных корпусах которых выпускаются диоды, что позволяет использовать его в более широких полосах частот.

Заключение

В рамках данной работы был создан активный экран для саниметрового диапазона длин волн на основе неэпитаксиальной тонкой плёнки VO_2 большой площади (30 см^2) на подложке из поликристаллического Al_2O_3 . Разработанная структура представляет собой массив прямоугольных апертур в слое металла, нанесённого поверх слоя VO_2 . Такая структура позволяет не использовать механическую обработку плёнок VO_2 в отличие от управляемой ЧСП, представленной ранее [12]. При открытом (диэлектрическом) состоянии VO_2 устройство является полосовым фильтром с центральной частотой 14 ГГц, КП на этой частоте -0,9 дБ и полосой пропускания по уровню -3 дБ, равной 10 ГГц. После перехода VO_2 в металлическое состояние КП устройства на центральной частоте падает на 9,2 дБ. КП разработанного экрана в закрытом состоянии меньше -10 дБ при температуре окружающей среды 80 °С и может быть дополнительно уменьшен до -16 дБ при использовании более толстого или более проводящего слоя металла. Управление частотным откликом экрана осуществляется при помощи нагрева, что позволяет отказаться от размещения цепей управления на обратной или лицевой сторонах устройства и обуславливает высокий КП, близкий к 0 дБ, в открытом состоянии. Продемонстрированный метод применения плёнок VO_2 позволяет использовать их в качестве элементов управляемых экранов, несмотря на то, что такие плёнки обладают высоким (более 300 Ом/квadrat) сопротивлением в металлическом состоянии. Активный экран из VO_2 обеспечивает изменение КП при переходе металл-диэлектрик не более, чем на 4 дБ в рассмотренном частотном диапазоне 4-24 ГГц, а после нанесения поверх него периодической металлической структуры амплитуда изменения КП составляет ~ 10 дБ, но в более узком частотном диапазоне.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90067.

Список литературы

- [1] Maklakov S.S. et al. Post-deposition annealing of thin RF magnetron sputter-deposited VO2 films above the melting point // *J. Alloys Compd.* 2018. Vol. 763.
- [2] Polozov V.I. et al. Blow-up overheating instability in vanadium dioxide thin films // *Phys. Rev. B.* 2020. Vol. 101, № 21.
- [3] Huang Y. et al. Switchable band-pass filter for terahertz waves using VO2-based metamaterial integrated with silicon substrate // *Opt. Rev.* Springer Japan, 2021. Vol. 28, № 1. P. 92–98.
- [4] Long L. et al. Thermally-switchable spectrally-selective infrared metamaterial absorber/emitter by tuning magnetic polariton with a phase-change VO2 layer // *Mater. Today Energy.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 13. P. 214–220.
- [5] Solyankin P.M. et al. Terahertz Switching Focuser Based on Thin Film Vanadium Dioxide Zone Plate // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves.* Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2018. Vol. 39, № 12. P. 1203–1210.
- [6] Wang T. et al. Thermally switchable terahertz wavefront metasurface modulators based on the insulator-to-metal transition of vanadium dioxide // *Opt. Express.* 2019. Vol. 27, № 15. P. 20347.
- [7] Vegesna S. et al. Reconfigurable terahertz frequency selective structures using vanadium dioxide // *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. IEEE,* 2013. P. 1–3.

- [8] Polozov V.I. et al. Tunable parallel plate waveguide array based on VO₂ thin films // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 848, № 1.
- [9] Polozov V. et al. Thermally Tunable Frequency-Selective Surface Based on VO₂ Thin Film // Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci. 2020. Vol. 217, № 21. P. 1–5.
- [10] Kiani G.I. et al. Active frequency selective surface using PIN diodes // IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp. IEEE, 2007. P. 4525–4528.
- [11] Mias C. Varactor-tunable frequency selective surface with resistive-lumped-element biasing grids // IEEE Microw. Wirel. Components Lett. 2005. Vol. 15, № 9. P. 570–572.
- [12] Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П. Управляемые Полосно-Пропускающие Частотно-Селективные Поверхности // Радиотехника И Электроника. 2014. Vol. 59, № 9. P. 908–916.
- [13] Lin B. et al. Varactor-Tunable Frequency Selective Surface With an Appropriate Embedded Bias Network // Radio Sci. Blackwell Publishing Ltd, 2018. Vol. 53, № 4. P. 535–543.
- [14] Safari M., Shafai C., Shafai L. X-band tunable frequency selective surface using MEMS capacitive loads // IEEE Trans. Antennas Propag. IEEE, 2015. Vol. 63, № 3. P. 1014–1021.
- [15] Li M. et al. Liquid-Tunable Frequency Selective Surfaces // IEEE Microw. Wirel. COMPONENTS Lett. 2010. Vol. 20, № 8. P. 423–425.
- [16] Huang B.C., Hong J.W., Lo C.Y. Mechanical stress-controlled tunable active frequency-selective surface // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing LLC AIP Publishing, 2017. Vol. 110, № 4. P. 044101.
- [17] Wang J. et al. Fabrication and Photoelectric Properties of Optically Controlled Active Frequency Selective Surface // Acta Opt. Sin. Chinese Optical Society, 2018. Vol. 38, № 5. P. 0524002.
- [18] Семенов В.Н. et al. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника. 2019. Vol. 2. P. 72.
- [19] Morin F.J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature // Phys. Rev. Lett. 1959. Vol. 3, № 1. P. 34–36.
- [20] Munk B.A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley, 2000. 410 p.
- [21] Polozov V. et al. Thermally Tunable Frequency-Selective Surface Based on VO₂ Thin Film // Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci. 2020. Vol. 217, № 21.

Tunable electromagnetic screen for centimeter wavelength based on vanadium dioxide thin films

Polozov V.I.*, Maklakov S.S., Maklakov S.A., Naboko A.S., Baskov K.M., Petrov D.A., Kisel V.N.

Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* viktor.polozov@phystech.edu

Abstract

A new design of a tunable electromagnetic screen (ES) for centimeter wavelength based on VO₂ thin film is demonstrated. A rectangular slot metallic ES formed on a functional VO₂ thin film is described. A frequency response of the resulting structure can be thermally tuned. The tuning is based on a sharp change of conductivity of the VO₂ film, caused by heating from room temperature to a temperature of the metal-insulator phase transition of 45 °C. A tuning mechanism of the ES allows continuous change of frequency response from a room temperature state, where the ES acts as a band-pass filter with 10 GHz bandwidth, to a high-temperature state, where the ES works as a reflector. In the process of tuning, a transmission coefficient at a central frequency of the filter of 14 GHz can be lowered from -0,9 dB down to -10,1 dB. The proposed approach can be used for the design of tunable ES for applications that allow thermal control of the frequency response. Both layers of the tunable ES are synthesized using magnetron sputtering that ensures an ease of scaling of the ES production.

Key words: vanadium dioxide, thin films, metal-insulator transition, RF electromagnetic screen, tunable RF devices