

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

¹ Федеральное 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

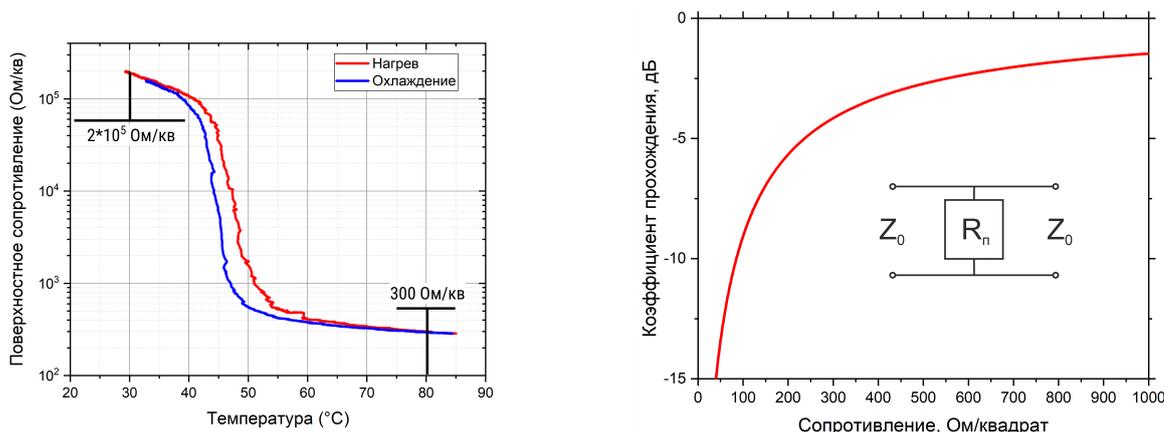


Рисунок 1 – Слева - $R(T)$ тонких плёнок VO_2 , использованных в разработанной ЧСП. Температура перехода найдена путём вычисления производной логарифма сопротивления по температуре. Ширина гистерезиса составляет 3 °C. Справа - теоретическая оценка КП тонкой плёнки в зависимости от её поверхностного сопротивления (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 .

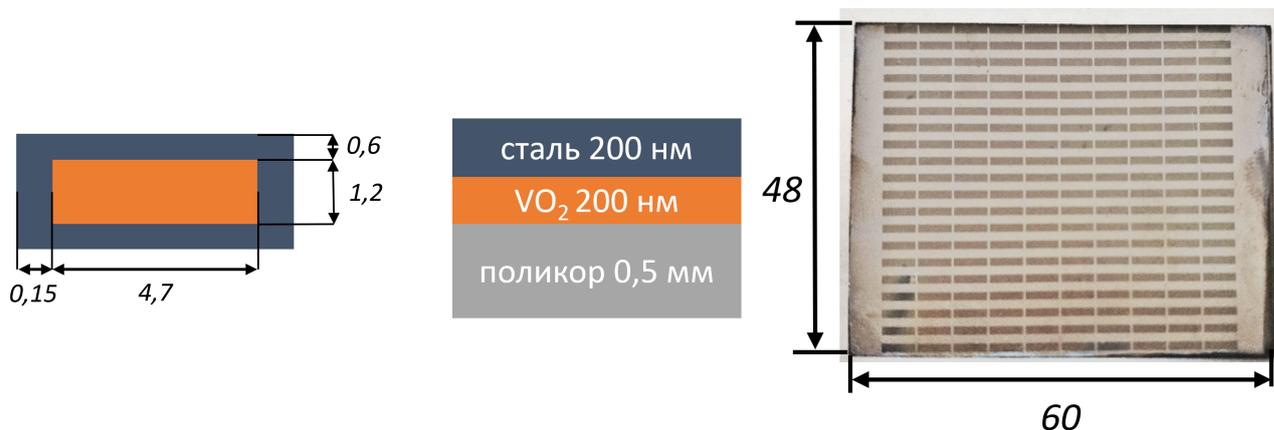


Рисунок 2 – Слева направо: параметры реализованной элементарной ячейки, послойная структура ЧСП, фотография готовой ЧСП. Все размеры указаны в мм.

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°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°C . Коэффициент прохождения сплошной плёнки соответствует теоретической оценке (рисунок 4).

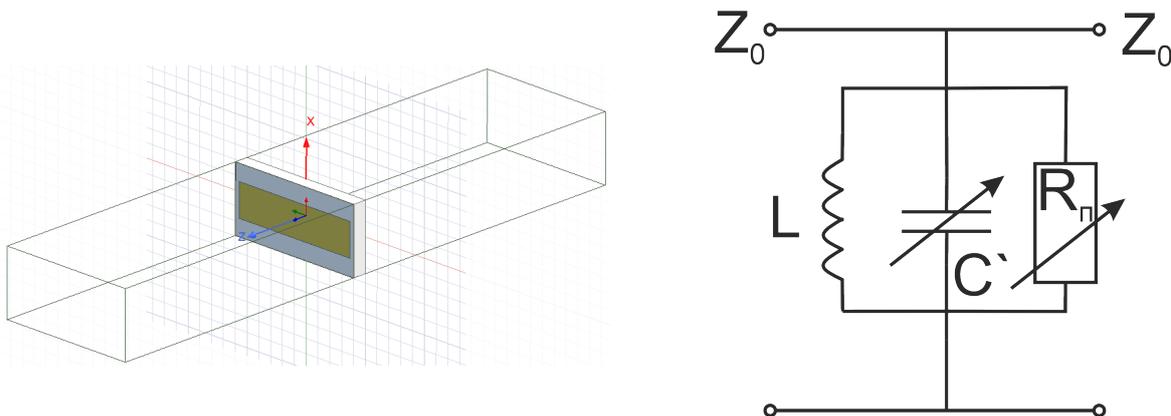


Рисунок 3 – Элементарная ячейка частотно-селективной поверхности, использованная для моделирования, и эквивалентная схема ячейки

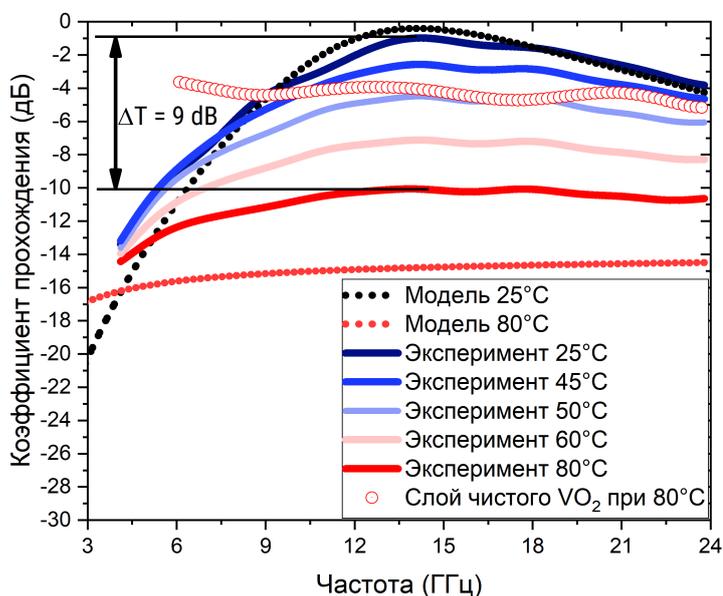


Рисунок 4 – Частотные зависимости коэффициента прохождения ЧСП и чистой плёнки VO_2 при различных температурах: результаты моделирования и экспериментальные измерения

Наибольшее расхождение результатов моделирования и измерений наблюдается при высоких температурах. Измеренный коэффициент прохождения (КП) на центральной частоте составляет $-10,1$ дБ и выше ожидаемого на $4,6$ 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_{Π} VO_2 в 300 Ом/квadrat, 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.