

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ
С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ДЛЯ ПЕРЕСТРОЙКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКОГО
И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЕЙ**

Л.А. Калоша, Л.С. Гайда, Д.В. Заерко

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы

**MODELING OF SYSTEMS BASED ON MATERIALS WITH VARIABLE
DIELECTRIC PARAMETERS FOR RECONSTRUCTING THE SCATTERING
CHARACTERISTICS OF OPTICAL AND MICROWAVE FIELDS**

L.A. Kalosha, L.S. Gaida, D.V. Zaerko

Yanka Kupala State University of Grodno

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния изменения диэлектрической проницаемости диэлектрических включений в сложно структурированных средах на их рассеивающие свойства в оптическом и СВЧ-диапазонах. Приведены зависимости коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного поля от диэлектрической проницаемости материала, геометрических размеров элементов и частоты оптического и СВЧ-полей. Проведен анализ выявленных зависимостей и определены требования к диэлектрическим и геометрическим параметрам составляющих структур для обеспечения изменения коэффициентов прохождения и отражения по частоте и значению.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, периодическая структура, полимеры, коэффициент диэлектрической проницаемости, коэффициенты прохождения и отражения.

Для цитирования: Калоша, Л.А. Моделирование систем на основе материалов с изменяемыми диэлектрическими параметрами для перестройки характеристик рассеяния оптического и сверхвысокочастотного полей / Л.А. Калоша, Л.С. Гайда, Д.В. Заерко // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 4 (65). – С. 20–28. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_20. – EDN: ZRJSZY

Abstract. The results of the study of the influence of changes in the permittivity coefficient of dielectric inclusions in complexly structured medium on their scattering properties in the optical and microwave ranges are presented. The dependences of the transmission and reflection coefficients of the electromagnetic field on the dielectric constant of the material, the geometric dimensions of the elements and the frequency of the optical and microwave fields are given. An analysis of the identified dependencies was carried out and requirements for the dielectric and geometric parameters of the constituent structures were determined to ensure changes in the transmission and reflection coefficients by frequency and value.

Keywords: microwave radiation, periodic structure, polymers, permittivity coefficient, transmission and reflection coefficients.

For citation: Kalosha, L.A. Modeling of systems based on materials with variable dielectric parameters for reconstructing the scattering characteristics of optical and microwave fields / L.A. Kalosha, L.S. Gaida, D.V. Zaerko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 4 (65). – P. 20–28. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_20 (in Russian). – EDN: ZRJSZY

Введение

Получение материалов с изменяемыми физическими параметрами является одним из актуальных направлений в создании перестраиваемых технических устройств. Одним из способов изменения физических параметров материалов и систем является воздействие электромагнитных полей. При этом в сложно структурированных средах это позволяет эффективно использовать как свойства компонентов в отдельности, так и взаимосвязи их внутри системы. Разработка способов управления свойствами материалов является актуальной задачей, обеспечивающей совершенствование устройств микроволнового и оптического диапазонов [1].

Существуют следующие технологии управления свойствами материалов и систем, получившие наибольшее распространение: механические, магнитные, электрические, оптические, термические. При этом каждая из них имеет свои ограничения и сложности в применении, такие как: сложность реализации однородности магнитного поля в большом объеме или подмагничивающих элементов, высокие управляющие напряжения, малая скорость перестройки, нестабильность по температуре, большое энергопотребление, сложность конструктивной реализации управляющих устройств, высокие стоимость и сложность конструктивных решений, низкая стойкость к механическим воздействиям,

ограниченное количество переключений, дребезг контактов, существование механических резонансов и т. д.

Управление свойствами материалов с использованием электрического поля является одним из наиболее перспективных вследствие наименьшего количества недостатков. Данная технология подразумевает использование материалов, обладающих изменяемыми параметрами в условиях воздействия электрических полей различных частотных диапазонов. Примером таких материалов могут быть материалы с дисперсией диэлектрической проницаемости, возникающей при помещении их в поля различной напряженности при определенных температуре, давлении и т. д. [2], [3].

Однако для такой технологии при изменении свойств материалов характерно применение постоянных или переменных полей очень высокой напряженности, что вызывает сложности в технической реализации. Вследствие вышеупомянутого, разработка новых и усовершенствование существующих технологий управления является актуальной задачей, решение которой позволит улучшить параметры энергопотребления, быстродействия, эффективности, универсальности и безопасности систем электродинамики.

Проблему реализации управления электрическими полями высокой напряженности можно решить использованием явления резонанса, позволяющего уменьшить значения напряженности для изменения параметров материалов и систем. Так же это позволит упростить реализацию электрической технологии управления, сделав ее энергетически более эффективной.

Вопрос выбора материала и систем, для которых можно реализовать резонансное изменение диэлектрической проницаемости, является актуальной задачей. Материалы, проявляющие поляризационные свойства за счет изменения внутренней структуры при воздействии внешнего электрического поля, являются перспективными при разработке новых методов управления электромагнитными параметрами систем. В качестве примера таких материалов можно привести сегнетоэлектрики со значениями диэлектрической проницаемости свыше 100, обладающие доменной структурой и имеющие дисперсию диэлектрической проницаемости в электрических полях мегагерцового диапазона [1]–[4]. В то же время актуальна проблема создания материалов с более низкими значениями диэлектрической проницаемости и способов управления их параметрами.

В работе представлены результаты исследования взаимодействия электромагнитного поля СВЧ и оптического диапазонов со структурами из элементов с изменяемой диэлектрической проницаемостью. Перспективным является использование композитных материалов на основе

полимеров. Данные материалы характеризуются значениями диэлектрической проницаемости от 2 до 120, а также обладают низким значением коэффициента поглощения для электромагнитного поля сверхвысокочастотного и оптического диапазонов.

Рассматривается возможность применения резонансного управления свойствами материалов для изменения характеристик рассеяния излучения СВЧ-диапазона на структурах с элементами из высокодобротного полимера [5]. Объектом исследования являются структуры на основе включений из материалов с перестраиваемой диэлектрической проницаемостью. Предметом исследования является влияние изменения диэлектрической проницаемости композитных полимерных включений периодических структур, а также геометрических размеров их компонентов на коэффициенты прохождения и отражения СВЧ-поля.

1 Выбор материалов и методика построения периодических структур

Для проведения исследования взаимодействия электромагнитного излучения со сложно структурированной средой методами численного моделирования была выбрана решетка, состоящая из металлических лент с диэлектрическими вставками между ними. Диэлектрик размещается в зазорах между металлическими проводниками, расположенными параллельно друг другу. Величина зазора между металлическими проводниками соответствует размеру диэлектрической вставки (рисунок 1.1). Пространство между рядами проводников и диэлектрических включений заполнено материалом с диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями равными единице, и не имеющим частотной дисперсии данных параметров во всем рассматриваемом частотном диапазоне (воздушная прослойка).

Оценивалось влияние геометрических размеров элементов решетки, диэлектрической проницаемости и добротности диэлектрических вставок на коэффициенты прохождения и отражения электромагнитного поля.

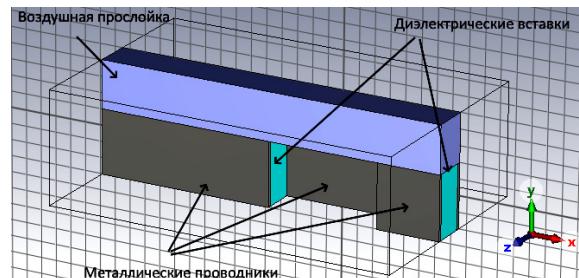


Рисунок 1.1 – Модель фрагмента решетки

В случае значений диэлектрической проницаемости элементов решетки от 550 и выше

возникает большое количество собственных резонансов. Это обуславливает наличие резкого изменения коэффициентов прохождения и отражения поля от 0,01 до 80 дБ во всем рассматриваемом частотном диапазоне (1–10 ГГц), однако количество экстремумов коэффициентов и близость их расположения по частоте затрудняет реализацию управления рассеянием поля на решетках с указанными параметрами [6].

Более низкие значения диэлектрической проницаемости материала позволяют уменьшить количество собственных резонансов. При этом сохраняется возможность управления коэффициентами прохождения и отражения в широком диапазоне значений.

2 Моделирование взаимодействия излучения СВЧ и оптического диапазонов с периодическими решетками из металлических и диэлектрических элементов

Для создания модели периодической решетки взяты структуры на основе проводящих лент. Такие решетки удобны для оценки влияния конструктивных и материальных характеристик вследствие известной постановки задачи дифракции электромагнитного поля и ее решения [7], [8].

Численный эксперимент проводился с помощью программного продукта CST MICROWAVE STUDIO, который позволяет выполнять

математическое моделирование высокочастотных устройств и рассеяние электромагнитного излучения на объектах сложной формы и структуры.

В ходе проведения численного моделирования варьировались следующие геометрические параметры элементов: длина, ширина, высота диэлектрических включений и металлических фрагментов в виде лент; расстояние между рядами лент (период решетки), диэлектрическая проницаемость материала. Значение тангенса диэлектрических потерь не превышало 10^{-3} . Рассматривался только случай нормального падения плоской электромагнитной волны на периодическую решетку. Направление распространения электромагнитного поля вдоль оси Z , а его электрической компоненты вдоль оси X . Используемый диапазон частот от 7 до 12 ГГц. Анализировались значения коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного поля для TE и TM гармоник.

Для выбора оптимальных размеров металлических лент было проведено моделирование структуры с длинами лент в диапазоне от 15 до 30 мм. Остальные параметры не изменялись и равнялись: диэлектрическая проницаемость 25; длина, ширина, высота диэлектрической вставки 4 мм; период по оси Y 15 мм. Коэффициенты прохождения и отражения для TE и TM гармоник представлены на рисунках 2.1–2.2.

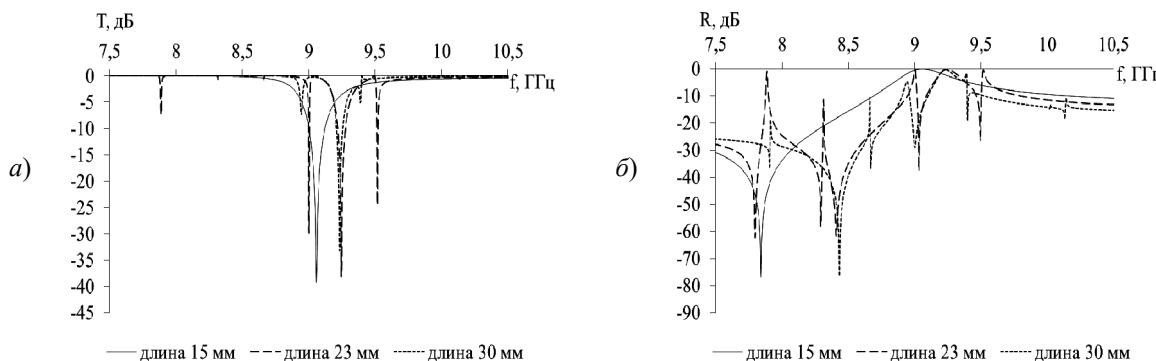


Рисунок 2.1 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для TE гармоники при различных значениях длины ленты

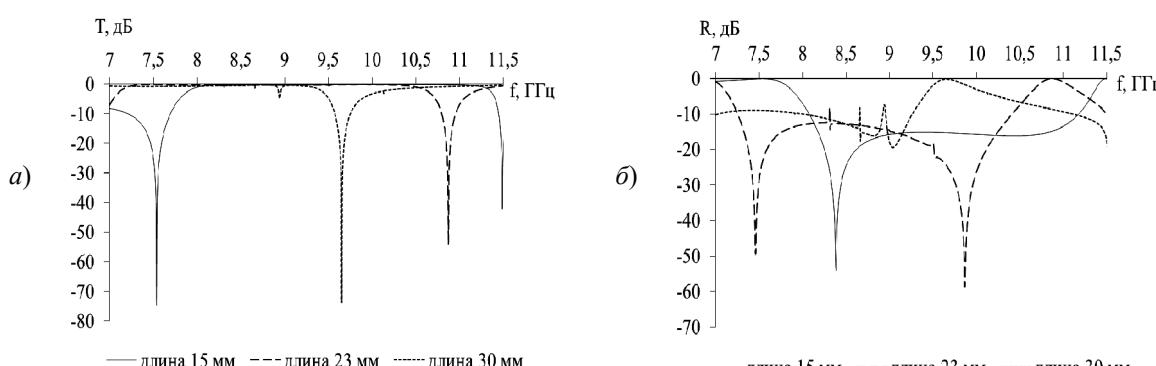


Рисунок 2.2 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для TM гармоники при различных значениях длины ленты

Для TE гармоники при увеличении длины характерно наличие нескольких минимумов в пределах 0,5 ГГц. При этом для всех значений длины минимальные значения наблюдаются в районе частоты 9–9,5 ГГц. Для TM гармоники расстояние между минимумами порядка 2,5–3 ГГц, при этом они разнесены по частотному диапазону. Коэффициент отражения принимает максимальные значения на частотах, соответствующих минимальным значениям коэффициента прохождения и принимает значения –75––65 дБ для TE гармоники и до –60 дБ для TM гармоники.

Изменение коэффициента отражения обусловлено наличием резонансного характера взаимодействия электромагнитного поля с решеткой. Наблюдаемые закономерности изменения коэффициентов отражения и прохождения позволяют определить частоты, на которых решетка максимально чувствительна к изменению диэлектрической проницаемости элементов.

Исходя из результатов, была выбрана длина лент 15 мм, для которой наблюдался один минимум коэффициента прохождения в диапазоне 7,5–10 ГГц.

Изменение расстояния между лентами по оси Y (периода) также оказывает влияние на картину рассеяния (рисунки 2.3, 2.4).

Оптимальным расстоянием между лентами для дальнейшего моделирования выбрано 15 мм, так как увеличение периода сопровождается изменением частоты наблюдения минимума в сторону более высоких частот и появлением дополнительных экстремумов.

Исследование влияния изменения длины диэлектрической вставки (вдоль оси x) проводилось при следующих постоянных параметрах: диэлектрическая проницаемость 20; ширина и высота диэлектрической вставки 4 мм; период по оси Y 15 мм, длина металлических лент 15 мм. Коэффициенты прохождения и отражения для TE и TM гармоник представлены на рисунках 2.5, 2.6.

Изменение длины диэлектрических вставок влияет на частоту наблюдения минимумов коэффициента прохождения. При этом для TE гармоники увеличение длины приводит к сдвигу минимума в сторону более низких частот, с 11,3 ГГц для 2 мм до 8,1 ГГц для 15 мм. Для TM гармоники разброс по частоте присутствует, но зависимость уже не такая однозначная как для TE гармоники. Глубина минимумов коэффициента прохождения для TE гармоники составляет от –50 до –35 дБ, а для TM гармоники от –50 до –30 дБ. В обоих случаях коэффициент отражения максимальен при минимальном коэффициенте прохождения и принимает значения до –60 дБ.

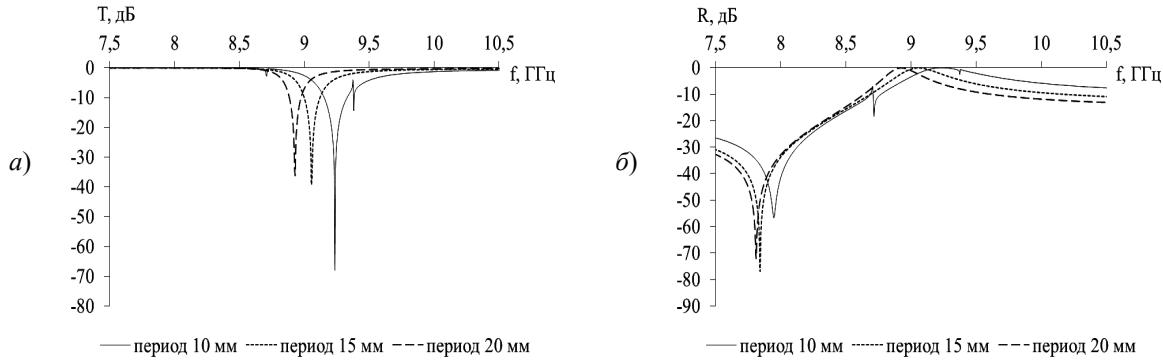


Рисунок 2.3 – Коэффициенты прохождения (a) и отражения (б) для TE гармоники при различных значениях периода вдоль оси Y

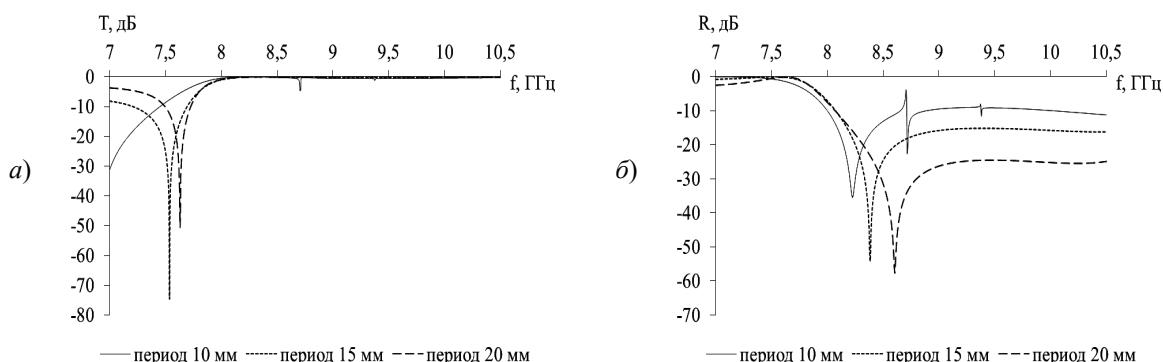


Рисунок 2.4 – Коэффициенты прохождения (a) и отражения (б) для TM гармоники при различных значениях периода вдоль оси Y

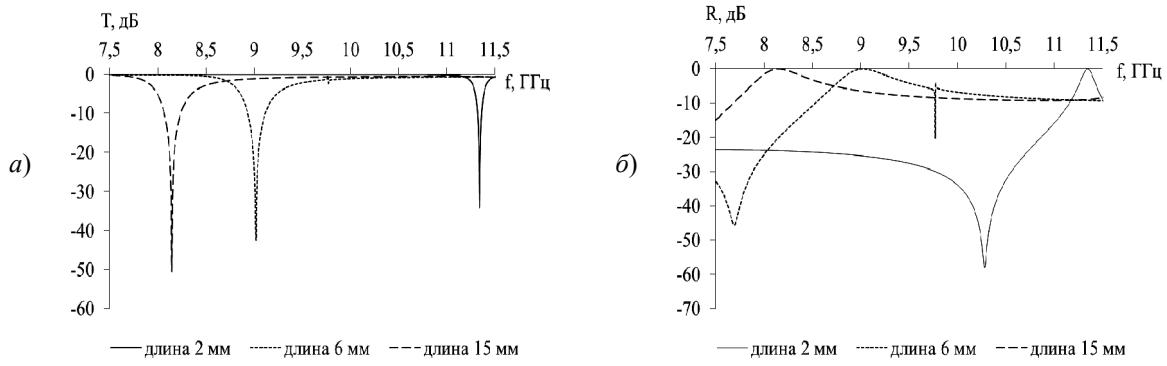


Рисунок 2.5 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТЕ гармоники при различных значениях длины диэлектрических вставок

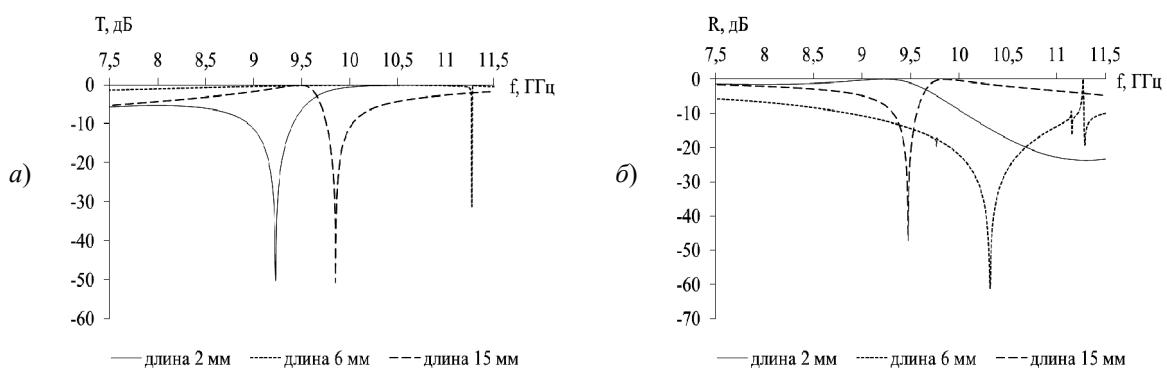


Рисунок 2.6 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТМ гармоники при различных значениях длины диэлектрических вставок

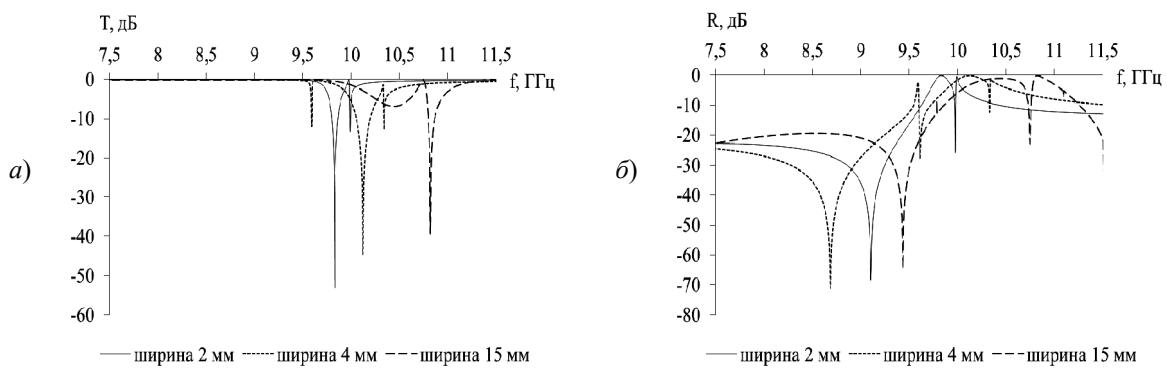


Рисунок 2.7 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТЕ гармоники при различных значениях ширины диэлектрических вставок

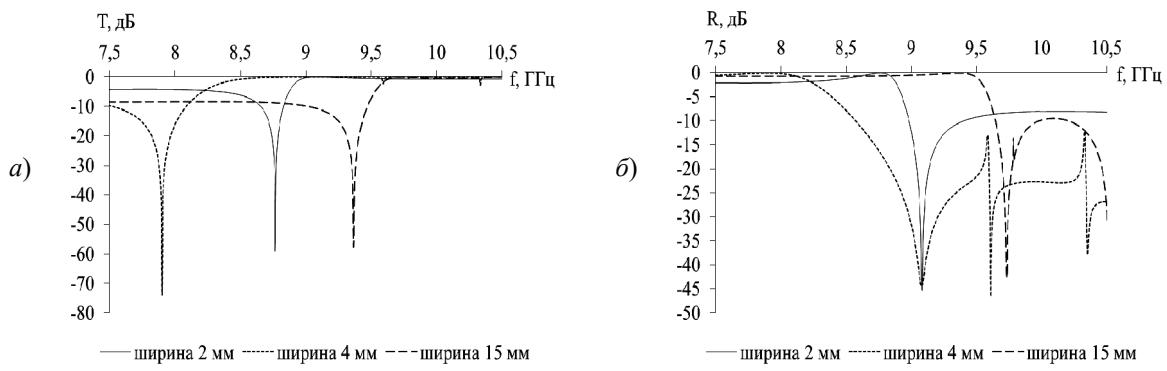


Рисунок 2.8 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТМ гармоники при различных значениях ширины диэлектрических вставок

Варьирование ширины диэлектрической вставки (вдоль оси Z) осуществлялось при сохранении следующих значений параметров структуры: диэлектрическая проницаемость 20; длина и высота диэлектрической вставки 4 мм; период по оси Y 15 мм, длина металлических лент 15 мм. Коэффициенты прохождения и отражения для TE и TM гармоник представлены на рисунках 2.7, 2.8.

При изменении ширины диэлектрических элементов решетки, а, следовательно, и расстояния между металлическими лентами, для TE гармоники также наблюдается сдвиг максимумов по частоте, только в сторону более высоких частот с 9,8 ГГц до 10,8 ГГц. Для TM гармоники сдвиг по частоте присутствует, но максимумы находятся как на более низких, так и на более высоких частотах по сравнению с частотой для ширины, равной 2 мм. Глубина минимума принимает значения от -53 до -40 для TE гармоники и от -75 до -60 для TM гармоники. В обоих случаях наблюдается соответствие максимальных значений коэффициента отражения на частотах минимальных значений коэффициента прохождения. Для TE гармоники значение коэффициента отражения до -70 дБ, а для TM – до -45 дБ.

Изменение высоты диэлектрических вставок (вдоль оси Y), а, следовательно, и высоты

лент, также оказывает влияние на расположение и глубину минимумов коэффициента прохождения (рисунки 2.9, 2.10).

Коэффициент прохождения для TE гармоники сдвигается по частоте как в сторону более низких, так и более высоких частот. Также наблюдаются дополнительные минимумы вблизи основных максимумов для высоты элементов 10 мм. Для TM гармоники в данном случае однозначно можно видеть сдвиг минимумов в сторону более низких частот. При этом дополнительные минимумы вблизи основных максимумов отсутствуют. Изменение коэффициента прохождения находится в диапазоне до -45 – -30 дБ для TE гармоники и -75 – -70 для TM гармоники. Коэффициент отражения для TE гармоники не менее -70 дБ, а для TM – до -60 дБ.

Исходя из вышеприведенного, для дальнейшего исследования влияния изменения диэлектрической проницаемости материалов на рассеяние электромагнитного излучения были выбраны следующие габаритные размеры периодической структуры: длина лент 15 мм, период по оси Y 15 мм, длина, ширина, высота диэлектрического элемента 4 мм.

Рассматривалось влияние изменения диэлектрической проницаемости элементов решетки с 2 до 140 на картину рассеивания.

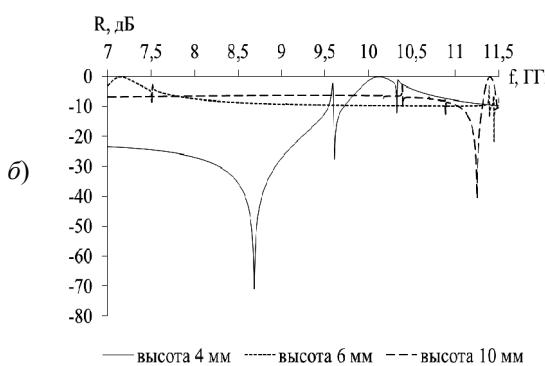
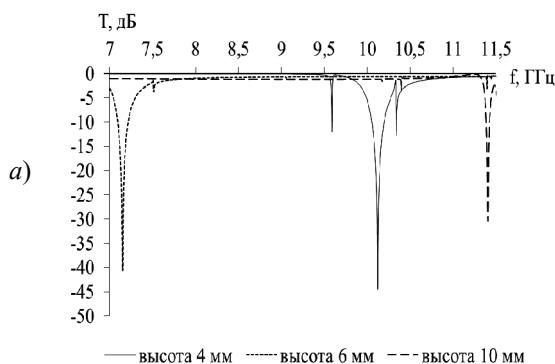


Рисунок 2.9 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для TE гармоники при различных значениях высоты диэлектрических вставок

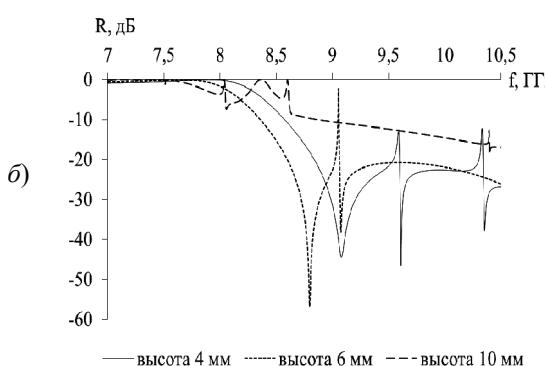
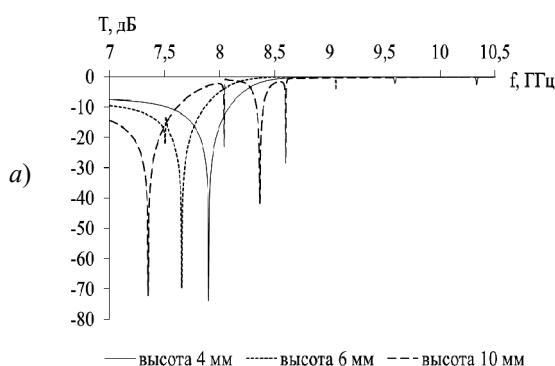


Рисунок 2.10 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для TM гармоники при различных значениях высоты диэлектрических вставок

Изменение диэлектрической проницаемости от 2 до 10 для ТЕ гармоники не приводит к появлению минимумов коэффициента прохождения. Его значения не опускаются ниже -1 дБ. При этом для ТМ гармоники при диэлектрической проницаемости равной 2, коэффициент прохождения плавно изменяется от -8 дБ до $-0,2$ дБ на частотах от 7 до $9,5$ ГГц, и затем остается постоянным. Для диэлектрической проницаемости 5 и 10 наблюдаются минимумы коэффициента прохождения на частотах $7,6$ ГГц и $8,5$ ГГц соответственно.

Зависимости коэффициентов прохождения и отражения от частоты для значений диэлектрической проницаемости 2, 20 и 40 для ТЕ гармоники и 10, 20, 30 для ТМ гармоники приведены на рисунках 2.11, 2.12.

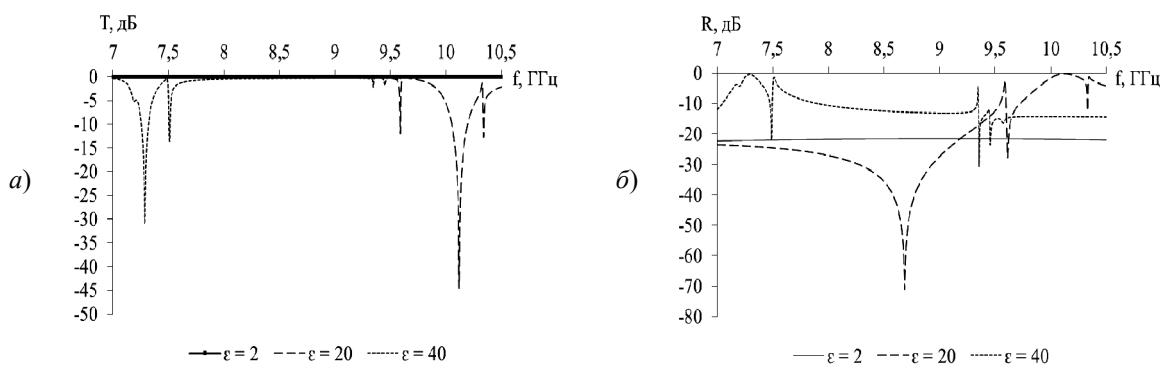


Рисунок 2.11 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТЕ гармоники при различных значениях диэлектрической проницаемости вставок

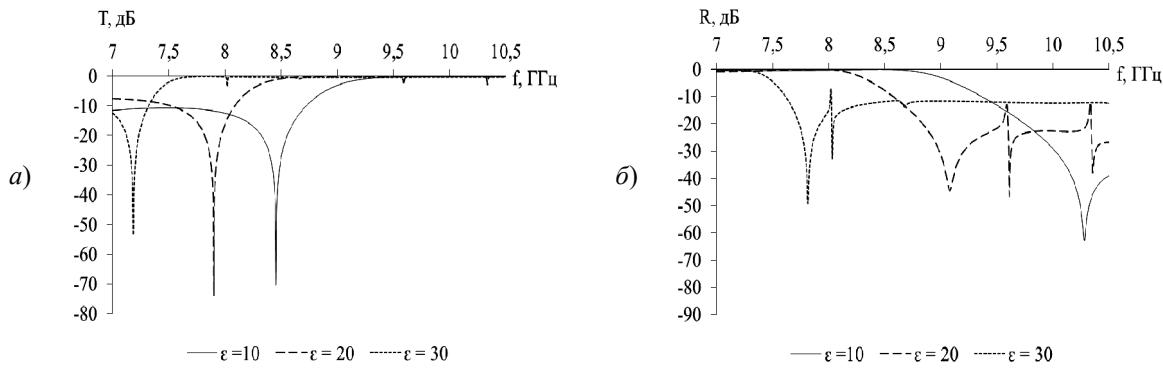


Рисунок 2.12 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТМ гармоники при различных значениях диэлектрической проницаемости вставок

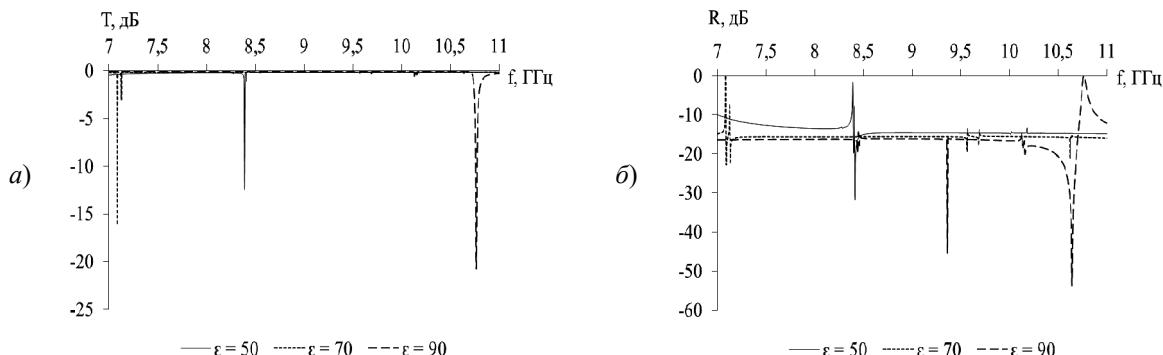


Рисунок 2.13 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТЕ гармоники при значениях диэлектрической проницаемости вставок 50, 70, 90

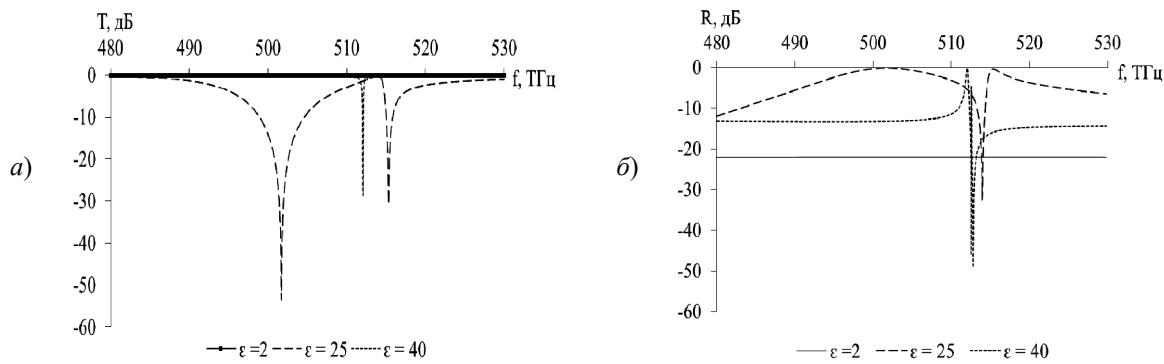


Рисунок 2.14 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТЕ гармоники при значениях диэлектрической проницаемости вставок 2, 25, 40

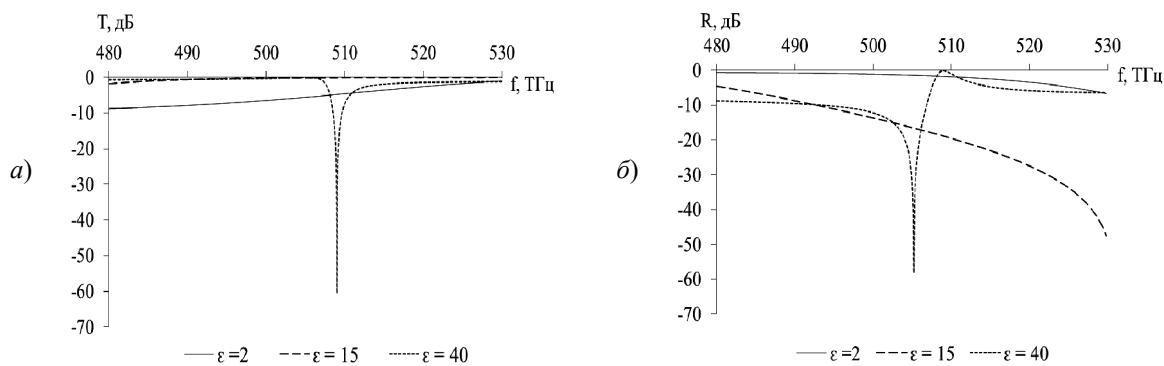


Рисунок 2.15 – Коэффициенты прохождения (а) и отражения (б) для ТМ гармоники при значениях диэлектрической проницаемости вставок 2, 15, 40

При дальнейшем увеличение значений диэлектрической проницаемости, для ТЕ гармоники происходит смещение глубоких минимумов в сторону более высоких частот, начиная с 10,5 ГГц. Для ТМ гармоники наблюдается большое число минимумов, глубина которых до -50 дБ.

Полимерные материалы за счет своих свойств используются для создания покрытий с требуемыми селективно-частотными свойствами. В частности, композиты с добавлением проводящих или иных наполнителей, где свойства изменяются как по толщине, так и по площади поверхности материала. Некоторые технические приложения требуют использования тонких металлических слоев для создания градиентов и неоднородностей диэлектрической проницаемости.

Сочетание материалов позволяет создать гладкие градиентные покрытия, отличающиеся широким рабочим диапазоном в случае правильного подбора электромагнитных параметров. Эффективность взаимодействия структуры с излучением определяется подстройкой электромагнитных параметров материалов ее элементов. Толщина слоя с градиентом изменения параметров выбирается в зависимости от рабочей длины волны. Таким образом, однотипные структуры могут использоваться в различных частотных диапазонах с соответствующим приведением их габаритных размеров.

В оптическом диапазоне при изменении диэлектрической проницаемости материала в тех же пределах также возможно использование решетки с полученными выше параметрами для управления коэффициентами прохождения и отражения излучения. Параметры решетки были адаптированы для видимого оптического диапазона 480–530 ТГц и составили: длина, ширина и высота диэлектрической вставки 73 нм; длина ленты и период по оси Y 275 нм.

На рисунке 2.14 показано влияние различных значений диэлектрической проницаемости вставок на уровень прошедшего и отраженного излучения для ТЕ гармоники.

Для значений диэлектрической проницаемости равной 2 не наблюдается изменений коэффициентов прохождения и отражения в рассматриваемом частотном диапазоне. При увеличении диэлектрической проницаемости для ТЕ гармоники картина рассеяния изменяется. Таким образом, для коэффициента прохождения существует возможность изменения до -50 дБ. При этом, коэффициент отражения принимает значения до -50 дБ.

Для ТМ гармоники (рисунок 2.15) минимум коэффициента прохождения наблюдается для значения диэлектрической проницаемости 40 на частоте 509 ТГц.

Варьирование диэлектрической проницаемости приводит к перестройке значений минимумов и максимумов коэффициентов прохождения и отражения по частоте и глубине, как для ТЕ, так и для ТМ гармоники. Таким образом, рассматриваемая структура может использоватьсь для управления рассеянием излучения как в сверхвысокочастотном, так и оптическом диапазонах.

Заключение

Изменение характеристик рассеяния электромагнитного излучения на приведенных периодических структурах может быть осуществлено путем изменения диэлектрической проницаемости элементов решеток. Это является более перспективным по сравнению с механической перестройкой структуры.

Оптимальные размеры периодической структуры для проведения натурного эксперимента по оценке влияния изменения материальных параметров элементов решеток на характеристики рассеяния электромагнитного поля оптического и СВЧ-диапазона зависят от электромагнитных параметров используемых материалов и частоты облучающего поля.

В качестве диэлектриков с изменяемым коэффициентом диэлектрической проницаемости могут выступать композитные материалы на основе поливинилового спирта с сегнетоэлектрическими включениями, а также включениями различных материалов. Изменение диэлектрической проницаемости композитного материала возможно при условии его размещения в электрическом поле. Локальное управление диэлектрической проницаемостью элементов решетки при минимальных напряженностях управляющих электрических полей эффективно при условии минимизации зазоров, в которых эти поля локализованы и являются однородными. Так же это позволяет разработать энергетически эффективно перестриваемые структуры.

Описанные технологические решения позволяют использовать решетку с приведенной конфигурацией в качестве чувствительного инструмента для идентификации наличия изменения диэлектрической проницаемости материала элементов решетки при воздействии внешних полей малой напряженности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fan, K. Dynamic electromagnetic metamaterials / K. Fan, W.J. Padilla // Materials Today. – 2014. – Vol. 18, № 1. – P. 39–50.
2. Вендик, И.Б. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот: обзор / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 1. – С. 3–28.
3. Распространение электромагнитных волн СВЧ-диапазона в управляемых двумерных периодических структурах / Ю.М. Рычков [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2010. – Т. 54, № 1. – С. 50–53.
4. Заерко, Д.В. Применение резонансных свойств доменной структуры сегнетоэлектрических материалов для энергетически эффективного управления их диэлектрической проницаемостью / Д.В. Заерко, Л.А. Калоша, Л.С. Гайда // Квантовая электроника: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 ноября. 2021 г. / Мин. обр. РБ, БГУ, НИИ ПФП БГУ имени А.Н. Севченко; Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ. – Минск: БГУ, 2021. – С. 114–118.
5. Управление высокочастотной дисперсией диэлектрической проницаемости пленок на основе полярных диэлектриков / Л.А. Калоша [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 82–89.
6. Моделирование применения поляризационных свойств сегнетоэлектриков для разработки решеток и сложноструктурированных сред для СВЧ-диапазона / Л.А. Калоша [и др.] // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 41–49.
7. Дифракция волн на решетках / В.П. Шестопалов [и др.]. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1973. – 288 с.
8. Амитей, Н. Теория и анализ фазированных антенных решеток: пер. с англ. / Н. Амитей, В. Галиндо, Ч. Ву; под ред. А.Ф. Чаплина. – Москва: МИР, 1974. – 456 с.

Поступила в редакцию 22.05.2025.

Информация об авторах

Калоша Любовь Александровна – аспирант
Гайда Леонид Станиславович – д.ф.-м.н., профессор
Заерко Дмитрий Владимирович – к.ф.-м.н.