

УДК 537.87

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РЕЗОНАНСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РАССЕЙНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Д. В. ЗАЕРКО¹⁾, Л. С. ГАЙДА¹⁾, А. Ч. СВИСТУН¹⁾, Л. А. КАЛОША²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

²⁾Гродненский государственный колледж техники, технологий и дизайна,
ул. Горького, 86, 230009, г. Гродно, Беларусь

Изучались возможности управления характеристиками распространения СВЧ-излучения за счет изменения коэффициента диэлектрической проницаемости компонентов структур. Рассматривались сложноструктурированные периодические решетки с изменяемыми электрофизическими параметрами. Определялось их влияние на характеристики распространения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Представлены результаты исследования рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона в периодических структурах на основе сегнетоэлектрических брусьев с изменяемыми электрофизическими параметрами. Показано влияние изменения диэлектрической проницаемости компонентов структуры на перераспределение энергии между гармониками рассеянного

Образец цитирования:

Заерко Д. В., Гайда Л. С., Свистун А. Ч., Калоша Л. А. Использование высокочастотного резонанса сегнетоэлектрических материалов для управления характеристиками рассеяния СВЧ-излучения // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 65–72.

For citation:

Zaerko D. V., Gaida L. S., Svistun A. C., Kalosha L. A. Using high-frequency resonance of ferroelectric materials to control the characteristics of microwave-radiation scattering. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 3. P. 65–72 (in Russ.).

Авторы:

Дмитрий Владимирович Заерко – старший преподаватель кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета.

Леонид Станиславович Гайда – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физико-технического факультета.

Андрей Чеславович Свистун – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры технической механики инженерно-строительного факультета.

Любовь Александровна Калоша – преподаватель.

Authors:

Dmitry Zaerko, senior lecturer at the department of electrical engineering and electronics, faculty of physico-technical. dim.dia2011@yandex.by

Leonid Gaida, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physico-technical. gls@grsu.by

Andrey Svistun, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of technical mechanics, faculty of engineering and construction. laser777@gmail.com

Liubou Kalosha, lecturer. ya-2009@tut.by

электромагнитного излучения. Описан способ управления рассеянием СВЧ-поля на периодической решетке из сегнетоэлектрических брусьев за счет изменения диэлектрической проницаемости компонент решетки высокочастотным полем на резонансной частоте материала. Изложены сведения о механизме резонансного управления диэлектрическими характеристиками сегнетоэлектрика и рассеянием СВЧ-поля на эквидистантной решетке. Приведены результаты измерения рассеяния на периодической решетке электромагнитных волн СВЧ-диапазона. Полученные результаты позволяют определить требования к электрофизическим свойствам материалов, использование которых дает возможность осуществить контроль за распространением электромагнитных волн в системах с регулируемыми электрофизическими параметрами и управление им. Данные структуры могут быть использованы при разработке новых электронно-управляемых устройств в опто- и СВЧ-электронике.

Ключевые слова: периодические диэлектрические структуры; сегнетоэлектрики; коэффициент диэлектрической проницаемости; изменения S -параметров; управление характеристиками рассеяния СВЧ-излучения.

USING HIGH-FREQUENCY RESONANCE OF FERROELECTRIC MATERIALS TO CONTROL THE CHARACTERISTICS OF MICROWAVE-RADIATION SCATTERING

D. V. ZAERKO^a, L. S. GAIDA^a, A. C. SVISTUN^a, L. A. KALOSHA^b

^a*Yanka Kupala State University of Grodno, Ažėška Street, 22, 230023, Grodno, Belarus*

^b*Grodno State College of Engineering, Technology, and Design, Gorki Street, 86, 230009, Grodno, Belarus*

Corresponding author: L. A. Kalosha (ya-2009@tut.by)

This paper presents a study of the possibilities to control the microwave-radiation propagation characteristics by varying the dielectric constant of the structural components. The complex structured periodic lattice with adjustable electrophysical parameters is considered. The influence of electromagnetic parameters on the propagation characteristics of microwave-range electromagnetic radiation is studied. The construction method and choice of the periodic structures based on hollow dielectric rods with filling, offering the possibility to vary the dielectric constant, are substantiated. The measuring results for scattering of the microwave-range electromagnetic waves from the periodic structures when using ferroelectric beams with variable electrophysical parameters are given. The effect of variations in the dielectric constant of the structural components on the energy redistribution of the harmonics of scattered electromagnetic radiation is demonstrated. The technique to control scattering of the microwave field on a periodic lattice of ferroelectric due to changes in the dielectric constant of the lattice components by the high-frequency field at the resonance frequency of the material is proposed. A mechanism of the resonance control over the dielectric characteristics of ferroelectric and scattering of the microwave field at the equidistant lattice is given. Based on the simulation results, the requirements for the electrophysical properties of materials offering the control over the propagation of electromagnetic waves in systems with adjustable electrophysical parameters may be determined. Such structures can be used for the development of new electronics-controlled opto- and microwave devices.

Key words: periodic dielectric structures; ferroelectrics; dielectric constant; S -parameter changes; the control of the propagation characteristics of microwave scattering.

Введение

В настоящее время в результате создания и изучения новых материалов актуальна проблема управления электромагнитным излучением за счет его взаимодействия с периодическими решетками с управляемыми электрофизическими характеристиками [1; 2]. Выбор материалов и знание их свойств определяют характеристики новой электронной аппаратуры. Показателем этого являются исследования искусственных периодических структур на основе сегнетоэлектриков. Эти структуры составляют основу новых устройств обработки сигналов и активно применяются в СВЧ-электронике и оптоэлектронике. Примером могут служить переключающие и управляющие СВЧ-элементы, элементы памяти и др. [1–3].

Результаты численных исследований спектров рассеяния электромагнитного поля периодической структуры с периодами, обеспечивающими распространение только основных гармоник и гармоник высших порядков, которая состоит из параллельных диэлектрических брусьев с управляемой диэлектрической проницаемостью, показали, что в периодических структурах из диэлектрических брусьев с изменяемым коэффициентом диэлектрической проницаемости возможно управление характеристиками рассеяния СВЧ-излучения за счет перераспределения энергии электромагнитного поля между гармониками рассеянного спектра. Изменения значений амплитуд гармоник рассеянного спектра носят периодический характер, а частоты, соответствующие минимумам и максимумам амплитуд, зависят от

диэлектрической проницаемости брусьев периодической структуры. Полученный эффект может использоваться при создании устройств для управления направлением распространения и амплитудой электромагнитных волн [3–6].

Для проведения экспериментальных исследований использовались эквидистантные структуры на основе сегнетоэлектриков, которые представляют научный интерес как модельные объекты для изучения особенностей распространения электромагнитных волн в пространстве в целях выработки практических рекомендаций по созданию различных устройств СВЧ-диапазона, работающих на их основе.

Цель настоящей работы – дальнейшее исследование диэлектрических свойств сегнетоэлектриков и реализация возможности управления рассеянием СВЧ-излучения в периодических решетках из диэлектрических брусьев с изменяемыми электрофизическими характеристиками [4].

Материалы и методика измерений

В классе кристаллических диэлектриков отдельно выделяются материалы, обладающие, в отсутствие внешнего электрического поля, самопроизвольной ориентацией дипольных моментов частиц, входящих в состав кристаллической решетки, – сегнетоэлектрики. В отсутствие внешнего электрического поля сегнетоэлектрик имеет произвольную спонтанную поляризацию, но разбит на отдельные области – так называемые области Вейсса. Каждая из областей поляризована, но интеграционная поляризация всех областей равна нулю, так как электрический момент одних областей нейтрализуется действием других с противоположно направленной поляризацией.

Внешнее электрическое поле в таком веществе вызывает поляризацию не только из-за смещения электрических зарядов, но и благодаря ориентации в электрическом поле целых областей (доменов). Электрическое поле заставляет сегнетоэлектрические домены, ориентированные хаотично, приобретать одинаковую ориентацию, при этом с ростом напряженности поля поляризация достигает насыщения.

В суммарную поляризацию сегнетоэлектриков вносят вклад различные механизмы поляризации, причем для каждого вида поляризации характерен свой частотный диапазон и характер зависимости от частоты, обусловленные физической природой поляризации. Известно, что с поляризацией диэлектрика связана его диэлектрическая проницаемость. Исходя из вышеперечисленных электрофизических особенностей, для исследования выбраны сегнетоэлектрические материалы. На свойства сегнетоэлектриков существенно влияет их доменная структура. Процесс поляризации сегнетоэлектрика включает три этапа: зарождение доменов, их разрастание, слияние нескольких доменов в один. Для обеспечения данного процесса необходимо внешнее синусоидальное высокочастотное (ВЧ) электрическое поле, в котором поляризация кристалла с исходной полидоменной структурой осуществляется дополнительно за счет колебаний существующих доменных стенок около их начальных положений. Частота ВЧ-поля устанавливается на основе существования условия совпадения частоты поля с одной из собственных частот материала сегнетоэлектрика, определяемой частотой колебаний стенок доменов. Движение доменных стенок под действием электрического поля обуславливает нелинейные и частотные свойства сегнетоэлектриков в высокочастотном диапазоне [3].

Для исследования выбрана сегнетоэлектрическая керамика, основным компонентом которой является CaTiO_3 .

Методика измерений

Изучение изменения диэлектрической проницаемости композитного образца в ВЧ-диапазоне проводилось с помощью мостового метода в диапазоне частот 0,5–110,0 МГц. При измерениях диэлектрической проницаемости использовался измеритель импеданса ВМ-538 фирмы *Tesla* (Чехия) [5].

Напряженность внешнего электрического высокочастотного поля оказывает влияние на степень поляризации сегнетоэлектрика и, как следствие, на изменение его диэлектрической проницаемости. Измерена зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности приложенного высокочастотного поля с частотой, на которой достигается максимальное значение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Рассматривалось рассеяние электромагнитных волн СВЧ-диапазона на периодической решетке из сегнетоэлектрических брусьев (рис. 1), математическое решение данной задачи дифракции описано в [6; 7].

Результаты моделирования в программном продукте *CST MICROWAVE STUDIO* рассеяния электромагнитного поля СВЧ-диапазона на представленной периодической решетке показали наличие перераспределения энергии основных гармоник между гармониками рассеянного спектра. Для постоянной частоты СВЧ-поля распределение энергии между пространственными гармониками зависит от диэлектрической проницаемости брусьев решетки. Методика проведения моделирования и основные результаты приведены в [7; 9]. На рис. 2 представлена диаграмма распределения энергии $\text{TE}(0,0)$ гармоники в гармонике высшего порядка.

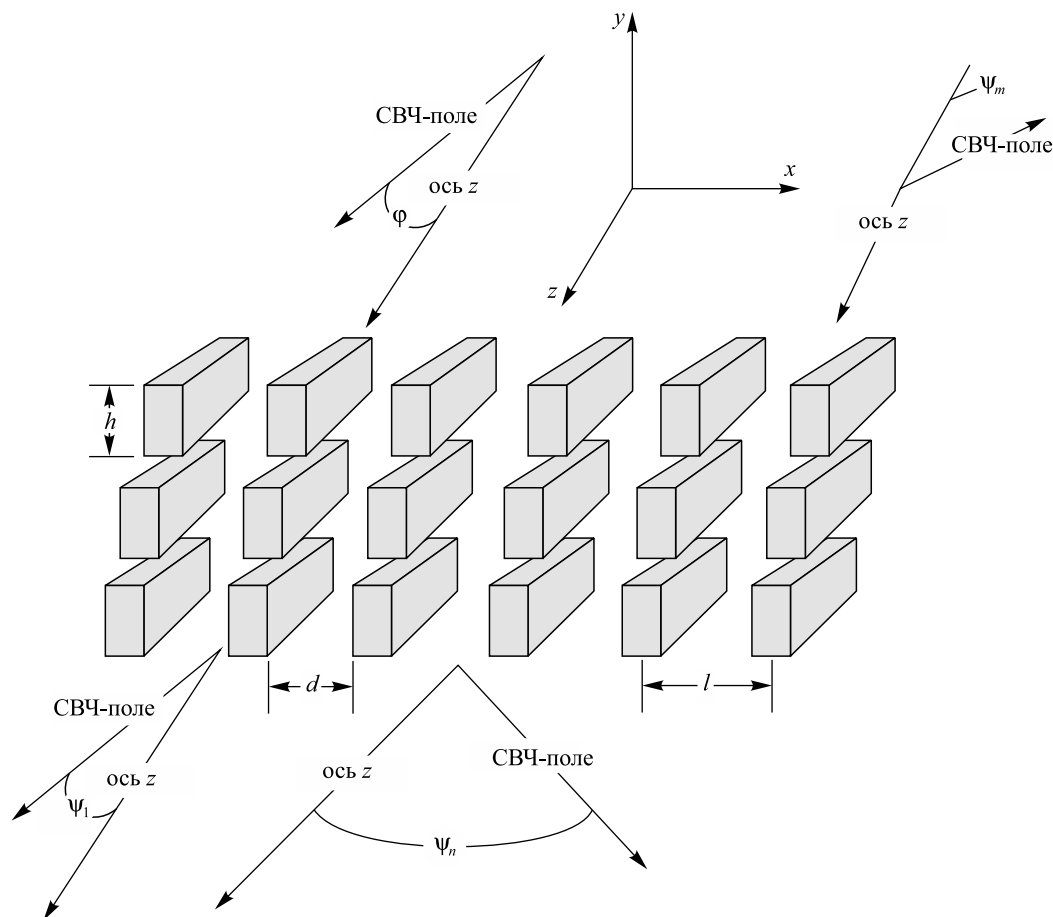


Рис. 1. Фрагмент решетки из диэлектрических брусьев:

l – период; d – расстояние между брусьями решетки;

h – высота брусьев решетки; φ – угол падения электромагнитной волны на решетку;

ψ_n – угол рассеяния n -й гармоники; ψ_m – угол рассеяния m -й гармоники

Fig. 1. Fragment of the lattice of dielectric rods:

l – period; d – space between the lattice rods; h – height of the lattice rods;

φ – incidence angle of an electromagnetic wave on the lattice;

ψ_n – scattering angle for the n harmonic; ψ_m – scattering angle for the m harmonic

Условием распространения m -й пространственной гармоники является положительное значение постоянной распространения:

$$\Gamma_m^\varepsilon = \sqrt{k^2 \varepsilon - \left[\frac{2m\pi + \psi}{d} \right]^2},$$

где Γ_m – постоянная распространения волны в среде; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ψ – значение угла рассеяния m -й гармоники; k – волновой вектор; d – расстояние между элементами решетки [6; 8].

Для проведения исследования использовалась эквидистантная решетка с периодом, большим длины волны облучающего СВЧ-излучения, равным 4,5 см, позволяющая рассмотреть широкий спектр гармоник. При проведении исследования рассматривалось влияние изменения диэлектрической проницаемости брусьев решетки на амплитуду прошедших и отраженных электромагнитных волн в диапазоне облучающих частот 7,5–10,0 ГГц. Изменение диэлектрической проницаемости достигалось за счет помещения решетки во внешнее управляющее высокочастотное поле с частотой, совпадающей с резонансной частотой сегнетоэлектрика [4].

Экспериментальная периодическая решетка помещалась в отверстие поглощающего экрана, расположенного между передающей и приемной (с углом вращения 360°) рупорными пирамидальными антеннами. Управляющее ВЧ-поле формировалось с помощью прямоугольных пластин, расположенных за поглощающим экраном, между которыми размещалась исследуемая решетка. Размеры и расположение

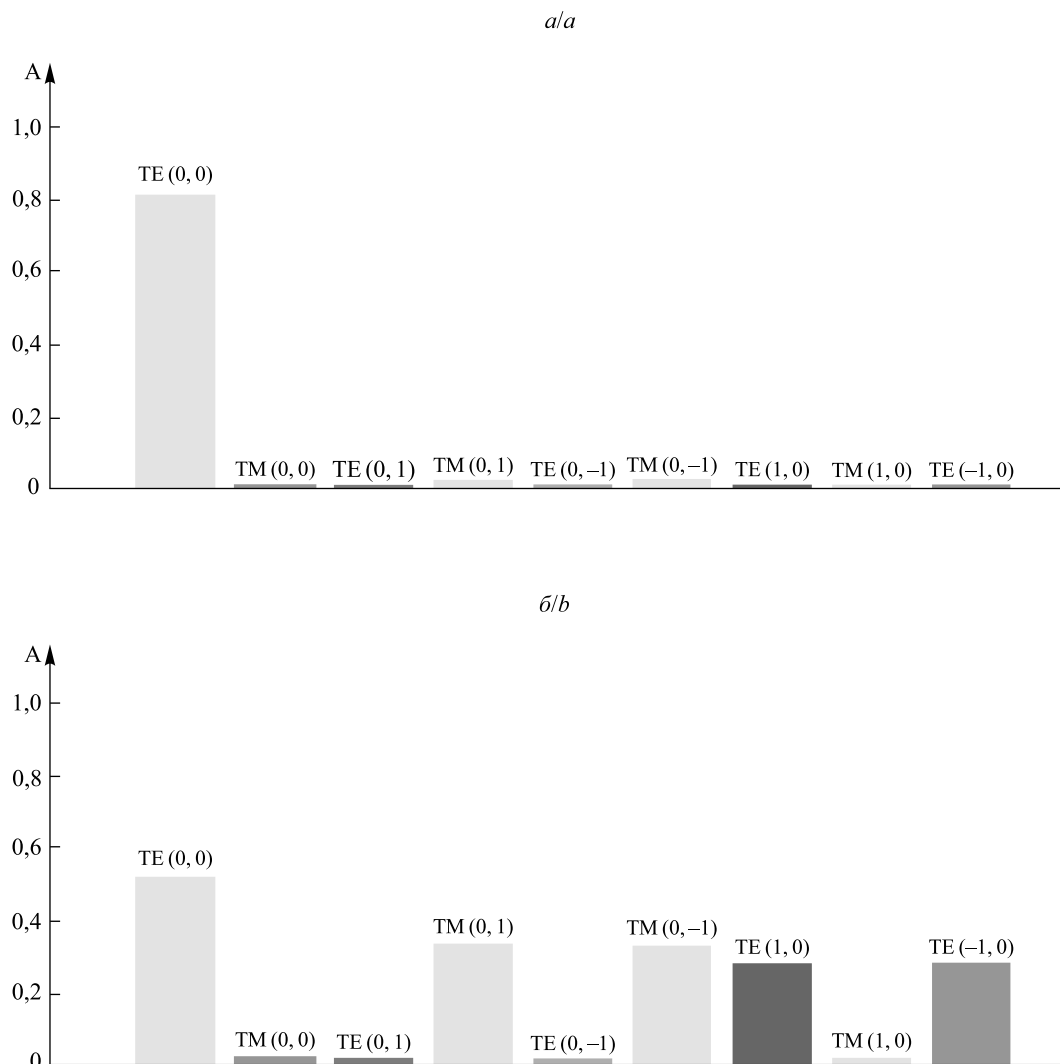


Рис. 2. Спектр прошедшего электромагнитного поля: *a* – для $\epsilon = 75$; *б* – для $\epsilon = 560$.

A – нормированные амплитуды гармоник рассеянного спектра

Fig. 2. Spectrum of the transmitted field: *a* – for $\epsilon = 75$; *b* – for $\epsilon = 560$.

A – normalized amplitudes of the harmonics of the scattered spectrum

пластин выбирались таким образом, чтобы формировалось однородное управляющее электрическое поле и не оказывалось влияние на диаграмму рассеяния СВЧ-поля. Расстояние от антенны до экрана выбиралось на основе условия существования плоской электромагнитной волны. Регистрировались показания напряжения на детекторе приемной антенны. Описание методики эксперимента представлено в [4; 5].

Результаты измерений

Зависимость относительной диэлектрической проницаемости ϵ от частоты высокочастотного поля F для исследуемого материала приведена на рис. 3.

Максимум значения диэлектрической проницаемости соответствует резонансной частоте 72 МГц сегнетоэлектрика, обусловленной частотой колебаний стенок доменов.

В случае увеличения напряженности E внешнего ВЧ-поля при нахождении в нем сегнетоэлектрика в состоянии полной поляризации происходит дезориентация изначально упорядоченных доменов, что приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Данная зависимость представлена на рис. 4.

После поляризации сегнетоэлектрика постепенное увеличение напряженности ВЧ-поля позволило осуществлять управление диэлектрической проницаемостью брусьев решетки. Увеличение напряженности поля в диапазоне 0,9–2,6 В/см после полной поляризации сегнетоэлектрика приводит к появлению доменов с новой амплитудой и частотой колебаний, т. е. дезориентации доменов и образованию новых с различными энергиями зародышеобразования. Вследствие этого поляризация доменов принимает

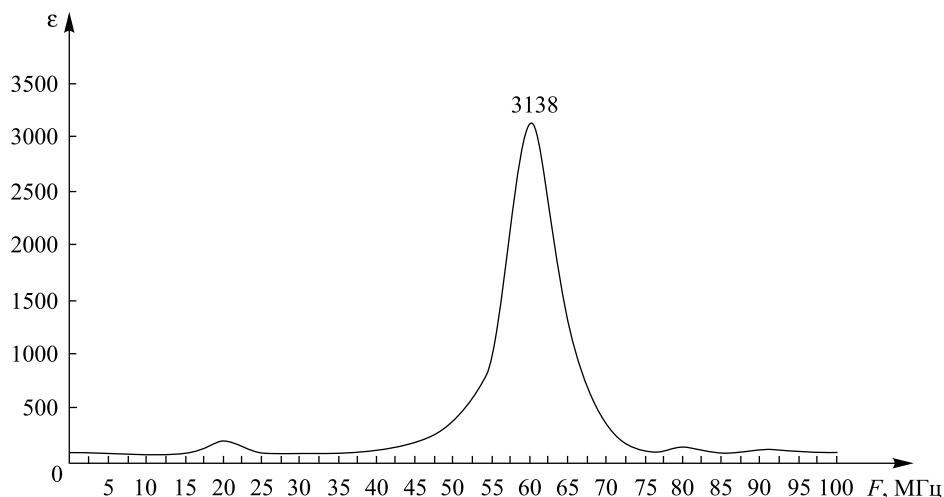


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости образца от частоты ВЧ-поля

Fig. 3. Dielectric constant as a function of the microwave-field frequency

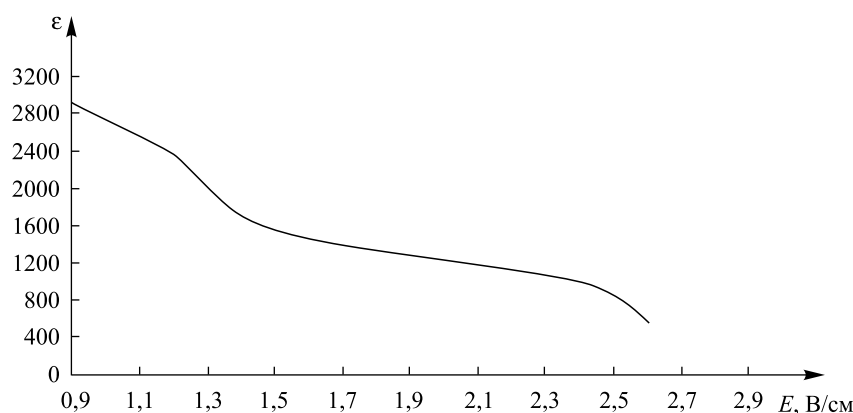


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости образца от напряженности ВЧ-поля

Fig. 4. Dielectric constant of a sample as a function of the microwave-field strength

хаотический характер, что приводит к возникновению областей с различной диэлектрической проницаемостью и, как следствие, разными коэффициентами прохождения и отражения. Поляризованность материала будет уменьшаться, что обусловлено снижением диэлектрической проницаемости [9–11].

Данный эффект позволяет осуществить управление значением диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Реализация управления диэлектрической проницаемостью с использованием высокочастотного поля возможна за счет снижения энергий образования зародышей доменов при воздействии поля с частотой, соответствующей резонансной частоте сегнетоэлектрика.

В результате получены диаграммы рассеяния СВЧ-поля на периодической решетке из исследуемых материалов, отражающие зависимость амплитуд набора пространственных гармоник от напряженности управляющего ВЧ-электрического поля и, следовательно, от значения коэффициента диэлектрической проницаемости фрагментов решетки. Диаграммы направленности представлены на рис. 5.

Направление падающего СВЧ-излучения нормально к плоскости решетки. Частота СВЧ-поля постоянна и равна 8,6 ГГц. Частота управляющего поля соответствует резонансной частоте сегнетоэлектрика в ВЧ-диапазоне. С ростом напряженности воздействующего внешнего электрического высокочастотного поля наблюдаются увеличение амплитуды прошедшего излучения, изменение формы диаграммы направленности.

Рост амплитуды прошедшего излучения обусловлен изменением диэлектрической проницаемости под воздействием управляющего поля, а изменение формы может быть связано с наличием областей с различной ориентацией доменов, что определяет изменение коэффициента прохождения для СВЧ-излучения.

При прохождении в сегнетоэлектрической среде СВЧ-волны на участках, где домены переориентированы под воздействием управляющего поля, вследствие неоднородности диэлектрической проницаемости материала возможна передача энергии одной моды в другие, причем условия передачи энергии зависят от поляризации и конфигураций мод [9–11].

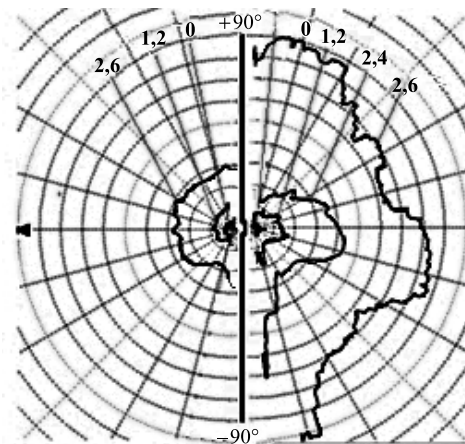


Рис. 5. Диаграммы рассеяния СВЧ-поля на периодической структуре при воздействии управляющего ВЧ-поля, В/см

Fig. 5. Diagrams of the scattering of a microwave field on a periodic structure under the influence of an RF control field, V/cm

Вклад в суммарное поле вносят все гармоники, распространение которых возможно в рассматриваемой периодической решетке. Математические расчеты и моделирование показали, что в рассеянном на исследуемой периодической решетке электромагнитном поле могут распространяться до 18 пространственных гармоник. Перераспределение энергии происходит в основном между первыми девятью гармониками (см. рис. 3). Углы распространения второй – четвертой гармоник находятся в диапазоне $10\text{--}20^\circ$. Пространственное распределение плотности энергии поля зависит от коэффициента прохождения, который неодинаков для гармоник с различной поляризацией. Все перечисленное обуславливает изменение формы диаграммы направленности для различной напряженности управляющего высокочастотного электрического поля.

Указанный выше способ управления диэлектрическими свойствами решетки, амплитудами прошедшего и отраженного полей, направленностью рассеянного поля можно осуществлять и в импульсном режиме. В импульсном режиме длительность фронта импульса управляющего поля определяется периодом управляющего поля и временем поляризации доменов.

Заключение

Получены зависимости диэлектрической проницаемости исследуемого сегнетоэлектрика от частоты и напряженности приложенного высокочастотного поля, а также диаграммы рассеяния электромагнитного СВЧ-поля на периодической решетке из параллельных диэлектрических брусьев из материала с управляемой диэлектрической проницаемостью.

Установлено, что при фиксированных частоте и направлении распространения облучающего электромагнитного СВЧ-поля изменение диэлектрической проницаемости элементов решетки может осуществляться путем приложения внешнего высокочастотного электрического поля с частотой, соответствующей одной из резонансных частот сегнетоэлектрического материала, обусловленной его доменной структурой. Управляющее воздействие приводит к изменению диаграмм направленности СВЧ-поля за счет перераспределения энергии между пространственными гармониками вследствие изменения диэлектрической проницаемости элементов решетки.

Резонансное управление электрофизическими параметрами материалов может использоваться при создании устройств с изменяемыми характеристиками рассеяния электромагнитных волн. Воздействие высокочастотного электрического поля на периодические структуры из сегнетоэлектрических компонент также может быть эффективно использовано для разработки, проектирования и построения новых устройств волновой техники, например пассивных антенно-фазированных решеток, разветвителей, оптических переключателей, модуляторов и т. д.

Библиографические ссылки

1. Photonic band gap materials / ed. by C. M. Soukoulis // Proc. NATO ASI Ser. E. Appl. Sci. 2014. Vol. 315.
2. Gaponenko S. Introduction to Nanophotonics. Cambridge, 2010.
3. Поплавко Ю. М., Переверзева Л. П., Раевский И. П. Физика активных диэлектриков / под ред. В. П. Сахненко. Ростов н/Д., 2009.
4. Рычков Ю. М., Акимов А. И., Василевич А. Е. Распространение электромагнитных волн СВЧ-диапазона в управляемых двумерных периодических структурах // Докл. НАН Беларуси. 2010. Т. 54, № 1. С. 50–53.

5. Акимов А. И., Василевич А. Е., Зайкова С. А. Особенности распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в периодических структурах // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т. 53, № 3. С. 49–52.
6. Шестопалов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А. и др. Дифракция волн на решетках. Харьков, 1973.
7. Заерко Д. В., Гайда Л. С., Свистун А. Ч. и др. Моделирование рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона на структурах с изменяемыми электрофизическими параметрами // Вестн. БГУ Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 3. С. 90–96.
8. Амтей Н., Галиндо В., Ву Ч. и др. Теория и анализ фазированных антенных решеток. М., 1974.
9. Заерко Д. В., Гайда Л. С. Моделирование управления рассеянием электромагнитных волн СВЧ-диапазона в сложно структурированных эквидистантных структурах с изменяемыми электрофизическими параметрами // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і ўпраўленне. 2016. Т. 6, № 2. С. 64–69.
10. Заерко Д. В., Хацук Д. В., Самородов А. П. и др. Моделирование распространения СВЧ-излучения в структурированных диэлектрических системах // Инновации в науке : сб. ст. по материалам LVI Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 27 апр. 2016 г.). Новосибирск, 2016. С. 64–69.
11. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М., 1987.

References

1. Photonic band gap materials. *Proc. NATO ASI Ser. E. Appl. Sci.* 2014. Vol. 315.
2. Gaponenko S. Introduction to Nanophotonics. Cambridge, 2010.
3. Poplavko Yu. M., Pereverzeva L. P., Raevsky I. P. [Physics of active dielectrics]. Rostov-on-Don, 2009 (in Russ.).
4. Rychkov Yu. M., Akimov A. I., Vasilevich A. E. [The electromagnetic wave propagation of the microwave range in controlled three-dimensional periodic structures]. *Dokl. Nats. akad. nauk Belarusi.* 2010. Vol. 54, No. 1. P. 50–53 (in Russ.).
5. Akimov A. I., Vasilevich A. E., Zaikova S. A. [Features of distribution of electromagnetic waves of the microwave range in periodic structures]. *Dokl. Nats. akad. nauk Belarusi.* 2009. Vol. 53, No. 3. P. 50–53 (in Russ.).
6. Shestopalov V. P., Litvinenko L. N., Masalov S. A., et al. [Diffraction of waves on lattices]. Kharkov, 1973 (in Russ.).
7. Zaerko D. V., Gaida L. S., Svistun A. Ch., et al. [Simulation of scattering of the microwave-range electromagnetic radiation by the structures with variable electrophysical parameters]. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 3. P. 90–96 (in Russ.).
8. Amitay N., Galindo V., Vu Ch., et al. [Theory and analysis of phased array antennas]. Moscow, 1974 (in Russ.).
9. Zaerko D. V., Gaida L. S. [The modeling of electromagnetic waves scattering with microwave range in the complex structured and equidistant structures with adjustable electro-physical parameters]. *Vesnik Grodzenskaga dzjarzhavnaga universitjeta imja Janki Kupaly. Ser. 2, Matjematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naja tjehnika i wprawlenne.* 2016. Vol. 6, No. 2. P. 64–69 (in Russ.).
10. Zaerko D. V., Hatsuk D. V., Samorodov A. P., et al. [Modeling the propagation of microwave radiation in structured dielectric systems]. *Innovatsii v nauke* [Innovations in science] : a collection of articles on the mater. of LVI Intern. scientific and practical conf. (Novosibirsk, 27 April, 2016). Novosibirsk, 2016. P. 64–69 (in Russ.).
11. Yariv A., Yuh P. [Optical waves in crystals]. Moscow, 1987 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 19.05.2017.
Received by editorial board 19.05.2017.