

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР

А.О.Никитин, В.А.Киселев, В.А.Мисилин, Р.В.Петров

APPLICATION OF MAGNETOELECTRIC GRADIENT STRUCTURES

A.O.Nikitin, V.A.Kiselev, V.A.Misilin, R.V.Petrov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, allnikotin@gmail.com

Изложены основные принципы применения слоистых структур нового типа, магнитоэлектрических градиентных структур при проектировании электронно-управляемых сверхвысокочастотных устройств. Показано, что магнитоэлектрические градиентные структуры представляют собой сложные композиты, в состав которых входят композитные материалы — слоистый мультиферроик и искусственный диэлектрик. На основе построенной ранее математической модели методом численного моделирования получены спектры собственных волн, распространяющихся в магнитоэлектрической градиентной структуре, при разных значениях прикладываемого внешнего электрического поля и относительной диэлектрической проницаемости слоя искусственного диэлектрика. Установлен взаимопротивоположный характер влияния этих факторов на дисперсионные характеристики, что закладывает основу для разработки принципов проектирования новых сверхвысокочастотных устройств на основе представленного в исследовании слоистого композитного материала.

Ключевые слова: спектр собственных волн, композитные структуры, магнитоэлектрические мультиферроидные структуры, искусственный диэлектрик, управляемые сверхвысокочастотные устройства

Для цитирования: Никитин А.О., Киселев В.А., Мисилин В.А., Петров Р.В. Применение магнитоэлектрических градиентных структур // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.102-107. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).102-107](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).102-107)

The paper outlines the basic principles of applying layered structures of a new type, magnetoelectric gradient structures, in the design of electronically controlled microwave devices. It is shown that magnetoelectric gradient structures are complex composites that consist of composite materials including a layered multiferroic and an artificial dielectric. On the basis of a previously constructed mathematical model by numerical simulation, the spectra of natural waves propagating in a magnetoelectric gradient structure have been obtained at different values of the applied external electric field and the relative permittivity of the artificial dielectric layer. The mutually contradictory nature of the influence of these factors on dispersion characteristics has been established, which lays the foundation for the development of design principles for new ultra-high-frequency devices, based on the layered composite material presented in the study.

Keywords: eigenwave spectrum, composite structures, magnetoelectric multiferroic structures, artificial dielectric, controlled microwave devices

For citation: Nikitin A.O., Kiselev V.A., Misilin V.A., Petrov R.V. Application of magnetoelectric gradient structures // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.102-107. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).102-107](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).102-107)

Введение

Научная мысль, придерживаясь тенденций развития и отвечая на вызовы реальности, всегда следовала как принципу совершенствования — от простого к сложному, так и основному принципу решения комплексных задач — от сложного к простому. Физика композитных структур — уникальный по своей сути раздел физики твердого тела, который лег в основу современного научно-технического прогресса. Вся современная технология, независимо от назначения и условий использования, напрямую обусловлена эффектами, возникающими при объединении компонентов, иногда различных по своей физической природе. Результатом такого объединения становится система, обладающая одной из следующих характеристик: суммарные свойства — взвешенная сумма вкладов от составляющих фаз; пропорциональные свойства — величина эффекта для композита больше, чем для составляющих фаз; умножаемые свойства — свойства присутствуют только в композите.

Магнитоэлектрические градиентные структуры [1] — это композитные структуры представляющие собой продукт интеграции МЭ мультиферроидной структуры и искусственного диэлектрика. Применение предлагаемых структур позволит расширить возможности электронного управления волновыми свойствами приборов, разработанных на основе таких структур. В дальнейшем планируется добавить через управляющее воздействие электрического поля к описанному [2] обобщенному механизму искусственное градиентное распределение диэлектрической проницаемости одного из диэлектрических слоев структуры.

Строение магнитоэлектрических градиентных структур

Мультиферроидные слоистые структуры сегнетоэлектрик-феррит. Началу исследования мультиферроиков предшествовал период интенсивного и успешного развития физики магнитных явлений и сегнетоэлектричества в отдельности. На сегодняшний день выделяют два типа мультиферроиков.

Первый тип содержит материалы, в которых электрическая поляризация независима (или слабо связана) от магнитного порядка, т. е. материалы, в которых магнитные и сегнетоэлектрические свойства обусловлены разными источниками. В этих материалах сегнетоэлектрические свойства обычно проявляются при более высоких температурах, чем магнитные, а спонтанная поляризация достигает довольно больших значений ($\sim 10\text{--}100$ мкКл/см²). Примерами мультиферроиков первого типа являются соединения BiFeO₃, YMnO₃ и др.

Второй тип мультиферроиков — магнитные мультиферроики, в них электрическая поляризация порождается магнитным упорядочением. Материалы этой группы характеризуются сильной связью между магнитными и сегнетоэлектрическими свойствами, однако их спонтанная поляризация $\sim 10^{-2}$ мкКл/см² значительно меньше, чем у мультиферроиков первого типа. Практически все мультиферроики — синтезированные соединения, известны лишь два природных кристалла: конголит Fe₃B₇O₁₃Cl и чамберсит Mn₃B₇O₁₃Cl.

С точки зрения применения мультиферроики можно разделить на три типа: устройства, в которых используются сегнетоэлектрические или магнитные свойства в отдельности; устройства, где сегнетоэлектрические и магнитные свойства используются одновременно, но без магнитоэлектрического взаимодействия (фарадеевский фазовращатель); приборы, действие которых основано на магнитоэлектрических (МЭ) эффектах (используют мультиферроики второго типа). Взаимодействие электрической и магнитной подсистем в мультиферроиках может проявляться в виде целого ряда эффектов, которые лежат в основе приборов последнего типа.

Незначительная величина МЭ эффекта в кристаллах и, как следствие, бесперспективность практического их использования, сместили фокус исследований в область композитных материалов. Известно, что выходные свойства композитов определяются свойствами отдельных фаз и их взаимодействием — суммарными, пропорциональными и умножаемыми свойствами. К последнему классу и относятся МЭ мультиферроидные композиты (МЭМФ композиты).

С позиции конструктива МЭМФ композиты делят на три типа [3]: 0 — однофазные частицы, взвешенные в матрице другой фазы, которая обо-

значается цифрой 3, 1 — однофазные волокна, 2 — пленки или слои (рис.1).

В аспекте проектирования управляемых СВЧ-устройств комбинация сегнетоэлектрических и ферритовых материалов позволила реализовать электронную перестройку за счет двух эффектов. Один из них — МЭ эффект, который представляет собой так называемый вторичный эффект в цепочке «магнитострикция — упругая деформация — пьезоэлектрический эффект» и проявляется в индуцировании электрической поляризации под действием магнитного поля или, наоборот, в индуцировании намагниченности под действием электрического поля. В последнем случае мы имеем дело с обратным МЭ эффектом, который в СВЧ-диапазоне в области ферромагнитного резонанса (ФМР) и определяет практический интерес.

Тип устройств, в которых в качестве активного элемента выступает магнитоэлектрический композиционный материал, принято считать магнитоэлектрическими [4].

Второй из эффектов обусловлен взаимодействием электромагнитных волн (ЭМВ) в сегнетоэлектрическом слое и спиновых волн в ферритовом слое композитной структуры. Изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя при приложении электрического поля приводит к изменению дисперсионной характеристики электромагнитной волны в данном слое, и также приводит к изменению волновых свойств слоистой структуры в целом.

В работах [5,6] было показано, что в слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик появляются взаимные гибридные электромагнитно-спиновые волны, которые сочетают в себе свойства распространяющихся волн: в сегнетоэлектрических диэлектрических слоях — электромагнитных и в ферритовом слое — спиновых. Позднее построенная теоретическая модель была использована при разработке фазовращателей и резонаторов [7,8] с реализованным электрическим и магнитным управлением.

Также отдельно изучались СВЧ-устройства на МЭ эффекте, такие как приемная микрополосковая антенна [9], фильтр-преселектор [10], аттенюатор [11], фазовращатель [12], гиратор [13].

Искусственные диэлектрики. Весомый подраздел в теории композитных сред отводится искус-

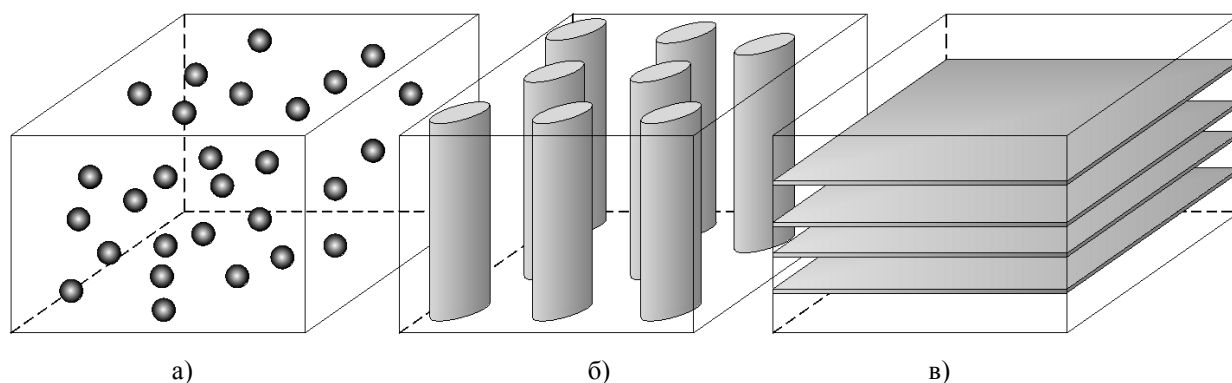


Рис.1. Конструктивные типы МЭМФ композитов: а) композит типа 3-0; б) композит типа 1-3; в) композит типа 2-2

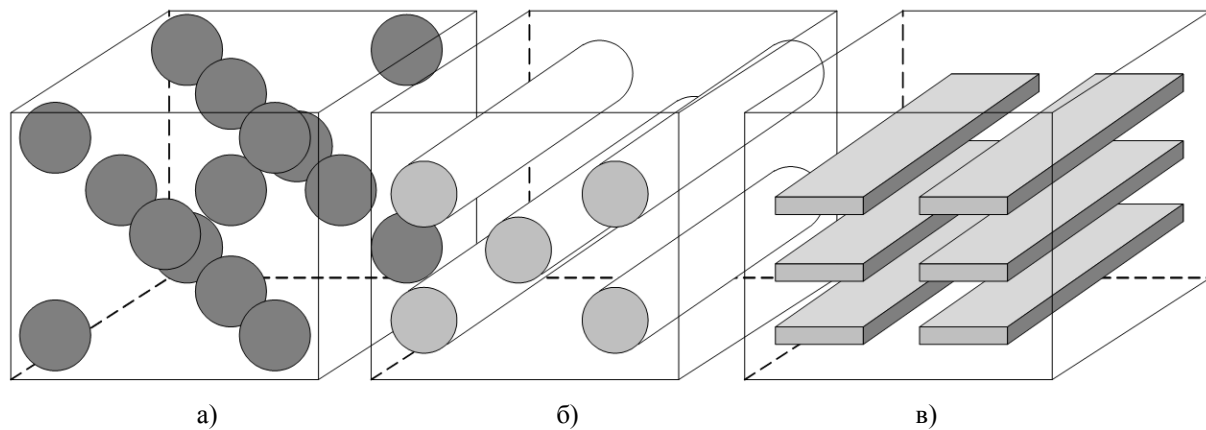


Рис.2. Фрагменты периодических последовательностей металлических частиц ИД

ственным диэлектрикам (ИД), которые представляют собой искусственно созданные металлодиэлектрические структуры. На практике ИД являют собой крупномасштабные модели реально существующих диэлектриков. По своему конструктиву ИД схожи с МЭМФ композитами и представляют собой набор металлических частиц, вкрапленных с заданным пространственным распределением в диэлектрическую среду (рис.2) [14].

Под действием внешнего электрического поля заряды на каждой из проводящих пластинок смещаются, тем самым имитируя поведение диполей в обычном диэлектрике [15]. Конструкцию ИД зачастую отождествляют однородной сплошной средой (гомогенизация) с некоторыми эффективными материальными параметрами, в случае длины волны, превышающей период вкраплений.

ИД нашли свое применение в СВЧ в качестве подложек, в которых искусственное увеличение диэлектрической проницаемости позволило перейти к проектированию компактных СВЧ-резонаторов [16]. Также подложки из ИД нашли свое применение при проектировании антенн [17], высокоимпедансных поверхностей и антиотражающих покрытий [18].

Структура искусственный диэлектрик — магнитоэлектрический мультиферроик. Предполагаемые преимущества объединения данного типа основывались на следующих соображениях. МЭМФ композит обладает рядом интересных свойств в области СВЧ. В основе каждого из них лежит возможность электронного управления дисперсионными характеристиками собственных волн через изменения стационарных электрического и магнитного полей. Здесь мы имеем для феррита — зависимость области ФМР от величин стационарных электрического и магнитного полей [4], а для сегнетоэлектрика — зависимость диэлектрической проницаемости от величины стационарного электрического поля [19].

Совместно эти зависимости можно охарактеризовать математически, используя термодинамическое описание мультиферроидных композитов через дифференциальное выражение свободной энергии Гиббса [20]:

$$dG = -SdT - x d\sigma - P dE - M dH, \quad (1)$$

где S — энтропия, T — температура, x — деформация, σ — внешнее приложенное механическое на-

пряжение, P — поляризация, M — намагниченность, E , H — приложенные внешние электрическое и магнитное поля соответственно. Для случая изотермальной адиабатической системы выражение (1) будет иметь вид:

$$\begin{cases} x = s\sigma + d^e E + d^m H, \\ P = d^{e,c}\sigma + \chi^e E + \alpha^m H, \\ M = d^{m,c}\sigma + \alpha^e E + \chi^m H, \end{cases} \quad (2)$$

где d^e , $d^{e,c}$ и d^m , $d^{m,c}$ — прямой и обратный пьезоэлектрический и магнитострикционный коэффициенты соответственно, $\chi^{e,m}$ — диэлектрическая и магнитная восприимчивости, $\alpha^{e,m}$ — магнитоэлектрический коэффициент.

Как показывает система выражений (4), намагниченность и поляризация МЭМФ композита, а следовательно, частотный спектр собственных волн всей структуры зависят от величин прикладываемых полей. Такому влиянию подвергается вся структура целиком.

Однако если необходимо иметь частичные изменения, не в объеме всей конструкции, а в заданной области, в качестве решения можно создать систему точечных полей. Но этот метод технически сложен и малоэффективен.

Решить эту задачу смогут МЭ структуры с интегрированным ИД. Интеграция в МЭМФ композит дополнительного диэлектрического слоя приводит к изменению диэлектрической проницаемости всей структуры, а следовательно, меняется частотный спектр. Поскольку на этапе проектирования существует вероятность градиентного задания диэлектрической проницаемости дополнительного интегрируемого слоя (искусственный диэлектрик), появляется возможность назначить разным областям одной структуры вариативное поведение на одно и то же прикладываемое поле.

Применение магнитоэлектрических градиентных структур

Спектр собственных волн МЭ градиентной структуры. Для математического подтверждения вышеприведенных предположений рассмотрим четырехслойную структуру (рис.3), в которой слои 2-3-4 представляют собой МЭ мультиферроик, а в качестве ИД зададим слой 1.

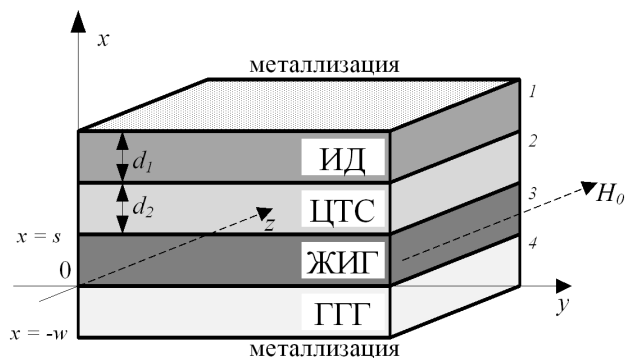


Рис.3. Исследуемая структура

С точки зрения электродинамики Максвелла данная задача подробно была разобрана в работе [1]. В результате было получено дисперсионное уравнение, в которое были введены зависимости: для слоя сегнетоэлектрика — зависимости диэлектрической проницаемости от электрического поля; для слоя феррита — зависимости эффективного внутреннего магнитного поля от электрического поля.

При расчете дисперсионной характеристики представленной на рис.3 структуры были использованы следующие параметры: 1 слой — ИД, толщина $d_1 = 100$ мкм; 2 слой — сегнетоэлектрик, цирконат-титанат свинца (ЦТС), толщина $d_2 = 100$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_1 = 1870$; 3 слой — ферритовый, железо-иттриевый гранат (ЖИГ), толщина $s = 5$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_3 = 14$, намагниченность насыщения $M_0 = 1750$ Гс, внешнее постоянное подмагничивающее поле феррита $H_{e0} = 2022$ Э; 4 диэлектрический слой — гадолиний-галлиевый гранат (ГГГ), толщина $w = 500$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_4 = 11$. Расчет проводился для двух значений диэлектрической проницаемости

ИД: 1) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2(0) = 1870$, диэлектрическая проницаемость ИД равна диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика при нулевом электрическом поле; 2) $\varepsilon_1 = 3400$; и для двух значений прикладываемого стационарного электрического поля: 0 и 40 кВ/см. Результаты представлены на рис.4.

Обсуждение полученных результатов. Как видно из полученных дисперсионных характеристик, приложение электрического поля к исследуемой структуре приводит к изменению спектра собственных волн (росту по частоте дисперсионных ветвей) (рис.4а) за счет уменьшения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика в частности и общей диэлектрической проницаемости верхних слоев (искусственный диэлектрик — сегнетоэлектрик) в целом. С другой стороны, увеличение диэлектрической проницаемости ИД приводит к частотному снижению дисперсионных ветвей (рис.4а), т.е. возможна ситуация, при которой эти два процесса приобретут относительное равенство. В данном примере (рис.4а и 4б) методом подбора значений прикладываемого электрического поля и диэлектрической проницаемости ИД это было достигнуто: спектр собственных волн на частотах до 12-14 ГГц при нулевом значении электрического поля и значении относительной диэлектрической проницаемости ИД $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1870$ (рис.4а) практически совпал со спектром при $E = 40$ кВ/см и значении $\varepsilon_1 = 3400$ (рис.4б).

Принципы использования МЭ градиентных структур. Проанализируем следующий случай. Предположим, что рассматриваемая магнитоэлектрическая градиентная структура состоит из четырех слоев, подобно исследуемой (рис.3), но имеет две области **А** и **В**, в которых значения относительной диэлектрической проницаемости ИД имеют значения $\varepsilon_1 = 1870$ и $\varepsilon_1 = 3400$ (рис.5), y — направление распро-

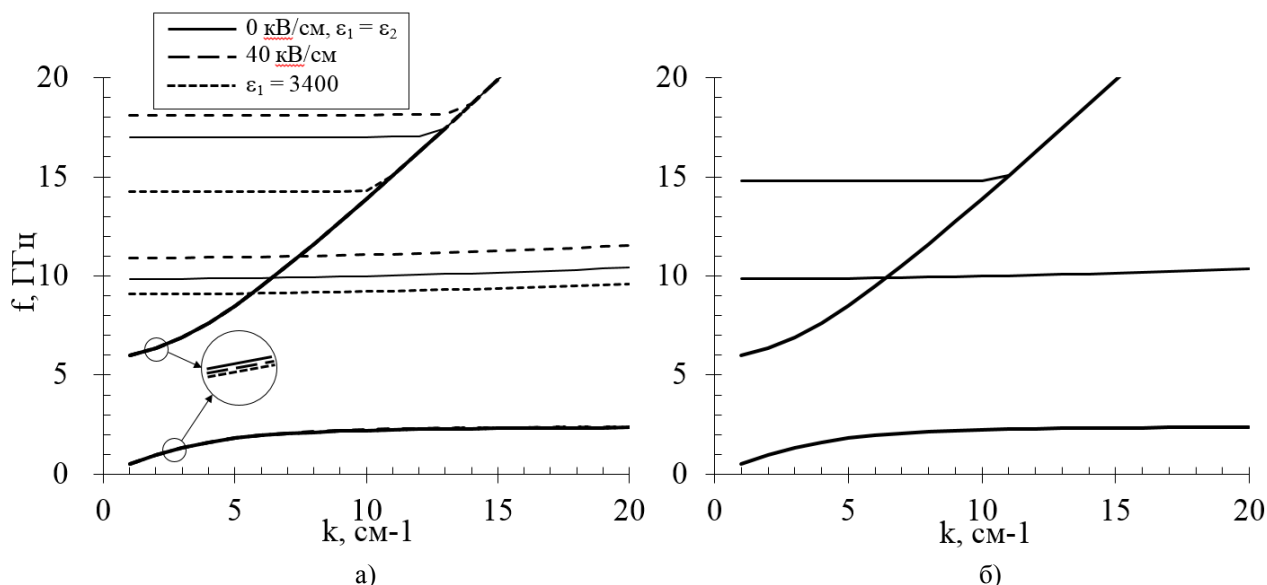


Рис.4. Спектр собственных волн исследуемой структуры при значениях приложенного электрического поля и относительной диэлектрической проницаемости слоя ИД для случаев: а) для трех случаев, где $(E, \varepsilon_1) = (0 \text{ кВ/см}, \varepsilon_2), (40 \text{ кВ/см}, \varepsilon_2), (0 \text{ кВ/см}, 3400)$; б) для случая, где $(E, \varepsilon_1) = (40 \text{ кВ/см}, 3400)$

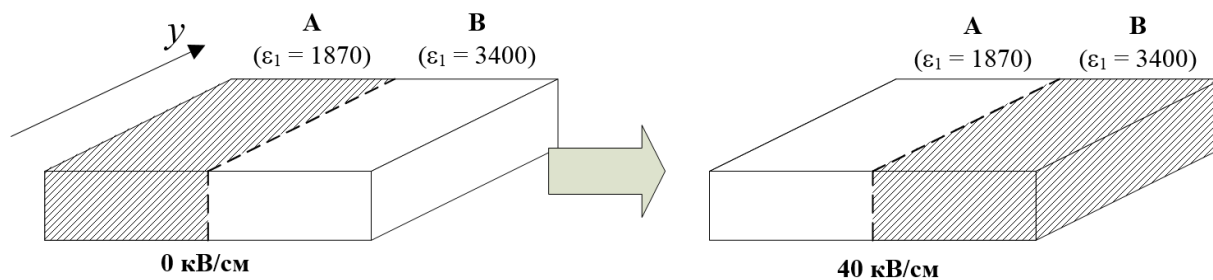


Рис.5. Принцип применения МЭ градиентных структур

странения волны. Спектр собственных волн в каждой из областей данной структуры будет иметь вид, представленный на рис.4. Допустим, что спектральная область структуры А является заданной, проходя через которую, ЭМВ приобретает заданный фазовый набег. Приложение электрического поля приводит к «смещению» заданной спектральной области, т.е. частотный спектр области В при приложении электрического поля становится подобным спектру области А при нулевом внешнем электрическом поле. В итоге при подборе значений диэлектрической проницаемости ИД и величин прикладываемого электрического поля появляется возможность формировать заданный, электронно-управляемый, фазовый фронт на выходе всей структуры.

Следующим примером использования МЭ градиентных структур является частный случай, основанный на экспериментально выявленном свойстве преобразования поверхностных магнитостатических волн в электромагнитные [21–23], обнаруженном учеными А.В.Вашковским и Э.Г.Локком. Общий смысл заключался в следующем: при исследовании распространения волновых пучков поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в неоднородно намагниченных пленках ЖИГ было установлено, что если по мере распространения ПМСВ длина волны увеличивается, то в области поверхности плёнки, где волновое число ПМСВ становится близким к волновому числу ЭМВ прилегающего пространства, происходит преобразование поверхностной магнитостатической волны в электромагнитную. В экспериментальных работах фиксировалось до 90% преобразованной мощности.

При добавлении слоя сегнетоэлектрика (классическая МЭ структура) появляется возможность управления геометрической областью ПМСВ-в-ЭМВ преобразования приложением электрического поля E через МЭ-эффект и зависимость диэлектрической проницаемости диэлектрика от величины этого поля. Добавление же в мультиферроидную структуру дополнительного слоя искусственного диэлектрика позволит задать области ПМСВ-в-ЭМВ преобразования за счет искусственного распределения диэлектрической проницаемости.

Заключение

Таким образом, магнитоэлектрические градиентные структуры являются новым и перспективным типом электронно-управляемых СВЧ-структур. Конструктивно они представляют собой композит более высокого уровня, компоненты которого (магнито-

электрический мультиферроик и искусственный диэлектрик) тоже являются композитами. Обладая свойствами своих компонентов, МЭ градиентные структуры расширяют спектр управления построенных на их основе СВЧ устройств, добавляя к достаточно подробно изученным механизмам электронного управления МЭ СВЧ-устройств искусственно заданное распределение диэлектрической проницаемости дополнительного диэлектрического слоя.

Как было показано выше, магнитоэлектрические градиентные структуры наиболее предпочтительно применять при разработке твердотельных СВЧ электронно-управляемых устройств направленной передачи энергии: направленные ответвители, циркуляторы, вентили, микрополосковые антенны.

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной научной программы №22-29-00085, <https://rscf.ru/project/22-29-00085/>.

1. Nikitin A.O., Petrov R.V. Magnetolectric gradient structures // Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol.2052. Article number: 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2052/1/012029>
2. Nikitin A.O., Petrov R.V., Havanova M.A. Control of magnetolectric antenna by electric field // CriMiCo'2019. ITM Web of Conferences 2019. Vol.30(1). Article number: 05028. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193005028>
3. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S. et al. Multiferroic magnetolectric composites: historical perspective, status, and future directions // J. of Appl. Phys. 2008. Vol.103(3). Article number: 031101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
4. Bichurin M., Petrov V., Petrov R., Tatarenko A. Magnetolectric Composites. Singapore: Pan Stanford Publ., 2019. 280 p.
5. Demidov V.E., Kalinikos B.A. The spectrum of dipole-exchange spin waves in tangentially-magnetized metal-ferroelectric-ferromagnet-ferroelectric-metal sandwich structures // Tech. Phys. Lett. 2000. Vol.26. P.273–275. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1262815>
6. Demidov V.E., Kalinikos B.A. Spectra of exchange dipole electromagnetic-spin waves in asymmetric metal-insulator-ferromagnetic-insulator-metal systems // Tech. Phys. 2001. Vol.46(2). P.219–222. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1349280>
7. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A. A microwave phase shifter based on a planar ferrite-ferroelectric thin-film structure // Tech. Phys. Lett. 2014. Vol.40. P.277–279. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785014040087>
8. Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G. et al. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: 4Experiment and theory // J. Appl. Phys. 2006. Vol.100. Article number: 093905. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2372575>
9. Petrov R.V., Tatarenko A.S., Srinivasan G., Mantese J.V. Antenna miniaturization with ferrite-ferroelectric composites // Mic. Opt. Tech. Lett. 2008. Vol.50. P.3155–3157. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.23939>
10. Бичурин М.И., Петров Р.В., Воробьев Ю.Д., Килиба Ю.В. Полосовой перестраиваемый магнитоэлектрический СВЧ-

- фильтр // Сб. докл. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. М.: МИИГАиК, 1997. С.234–238.
11. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Filippov D.A. Magnetolectric microwave attenuator // *Electronics Lett.* 2007. Vol.43(12). P.674–675. DOI: <https://doi.org/10.1049/el:20070949>
 12. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetolectric phasers for PAS // *Proceedings of the 2nd International conference and exhibition on satellite communications (ICSC'96)*. Moscow, 1996. P.172–176. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSC.1996.864274>
 13. Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьёв И.Н. и др. Исследование магнитоэлектрического СВЧ гиратора [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. №2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5370> (дата обращения: 12.05.2022).
 14. Казанский В.Б., Туз В.Р., Хардинов В.В. Электродинамическая теория композитных сред: монография. Харьков: ХНУ им. В.Н.Каразина, 2015. 220 с.
 15. Zhang Y., Aratani Y., Nakazima H. A microwave free-space method using artificial lens with anti-reflection layer // *Sens. Imaging*. 2017. Vol.18(17). P.1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11220-017-0166-7>
 16. Awai I. Artificial dielectric resonators for miniaturized filters // *IEEE Microwave Magazine*. 2008. Vol.9(5). P.55–64. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMM.2008.927709>
 17. Zhang Y., Imahori T., Fujita Y. Artificial material for patch antenna gain enhancement and its application in microwave free-space method // *Int. Conf. on Electromagnetic in Advanced Applications*. 2019. P.203. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2019.8879209>
 18. Biber S., Richter J., Martius S., Schmidt L. Design of artificial dielectrics for ant-reflection coatings // *33 Eur. Microwave Conf. Proceedings*. 2003. Vol.8024048. P.1115–1118.
 19. Ang Ch., Yu Zh. DC electric-field dependence of the dielectric constant in polar dielectrics: Multipolarization mechanism model // *Physical review B*. 2004. Vol.69. Article number: 174109. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.174109>
 20. Vopson M.V. Fundamental of multiferroic materials and their possible application // *J Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015. Vol.40(4). P.223–250. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408436.2014.992584>
 21. Локк Э.Г., Васьковский А.В. Диаграммы направленности излучения, возникающего в результате преобразования поверхностных магнитостатических волн в электромагнитные // *Радиотехника и электроника*. 1995. №7. С.1030–1037.
 22. Vashkovskij A.V., Lokk E. H. On the parameters of patterns of radiation arising in the process of transformation of a magnetostatic surface wave into an electromagnetic wave // *J. of Communication Technology and Electronics*. 2004. Vol.49(8). P.904–909.
 23. Vashkovskij A.V., Lokk E.H. The mechanism of transformation of a magnetostatic surface wave into an electromagnetic wave // *J. of Communication Technology and Electronics*. 2009. Vol.54(4). P.456–467. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226909040111>
- ### References
1. Nikitin A.O., Petrov R.V. Magnetolectric gradient structures. *Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2052, art. no. 012029, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2052/1/012029>
 2. Nikitin A.O., Petrov R.V., Havanova M.A. Control of magnetolectric antenna by electric field. *CriMiCo2019, ITM Web of Conferences*, 2019, vol. 30(1), art. no. 05028, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193005028>
 3. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetolectric composites: historical perspective, status, and future directions. *J. of Appl. Phys.*, 2008, vol. 103(3), art. no. 031101, pp. 1–35. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
 4. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. *Magnetolectric composites*. Singapore, Pan Stanford Publ., 2019. 280 p.
 5. Demidov V.E., Kalinikos B.A. The spectrum of dipole-exchange spin waves in tangentially-magnetized metal-ferroelectric-ferromagnet-ferroelectric-metal sandwich structures. *Tech. Phys. Lett.*, 2000, vol. 26, pp. 273–275. doi: <https://doi.org/10.1134/1.1262815>
 6. Demidov V.E., Kalinikos B.A. Spectra of exchange dipole electromagnetic-spin waves in asymmetric metal-insulator-ferromagnetic-insulator-metal systems. *Tech. Phys.*, 2001, vol. 46(2), pp. 219–222. doi: <https://doi.org/10.1134/1.1349280>
 7. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A. A microwave phase shifter based on a planar ferrite-ferroelectric thin-film structure. *Tech. Phys. Lett.*, 2014, vol. 40, pp.277–279. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063785014040087>
 8. Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G., et al. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory. *J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 100, art. no. 093905, pp. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2372575>
 9. Petrov R.V., Tatarenko A.S., Srinivasan G., Mantese J.V. Antenna miniaturization with ferrite-ferroelectric composites. *Mic. Opt. Tech. Lett.*, 2008, vol. 50, pp. 3155–3157. doi: <https://doi.org/10.1002/mop.23939>
 10. Bichurin M.I., Petrov R.V., Vorobyev Yu.D., Kiliba Yu.V. Polosovoy perestraivayemyy magnitoelektricheskiy SVCh fil'tr [Bandpass tunable magnetolectric microwave filter]. *Sb. dokl. Mezhdunar. foruma po problemam nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Proc. of the International Forum on Problems of Science, Technology and Education]. Moscow, 1997, pp. 234–238.
 11. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Filippov D.A. Magnetolectric microwave attenuator. *Electronics Lett.*, 2007, vol. 43(12), pp. 674–675. doi: <https://doi.org/10.1049/el:20070949>
 12. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetolectric Phasers for PAS. *Proc. of the 2nd International Conference and Exhibition on Satellite Communications (ICSC'96)*. Moscow, 1996, pp. 172–178. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSC.1996.864274>
 13. Bichurin M.I., Petrov R.V., Solov'jov I.N., Solov'jov A.N., Kovalenko D.V. Issledovanie magnitoelektricheskogo SVCh giratora [Research of a magnetolectric microwave gyrator]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya — Modern problems of science and education*, 2012. no. 2. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5370> (accessed: 12.05.2022).
 14. Kazanskij V.B., Tuz V.R., Hardikov V.B. *Elektrodinamicheskaja teorija kompozitnyh sred: monografija* [Electrodynamics theory of composite media: monograph]. Kharkiv, V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 2015. 220 p.
 15. Zhang Y., Aratani Y., Nakazima H. A microwave free-space method using artificial lens with anti-reflection layer. *Sens. Imaging*, 2017, vol. 18(17), pp. 1–12. doi: <https://doi.org/10.1007/s11220-017-0166-7>
 16. Awai I. Artificial dielectric resonators for miniaturized filters. *IEEE Microwave Magazine*, 2008, vol. 9(5), pp. 55–64. doi: <https://doi.org/10.1109/MMM.2008.927709>
 17. Zhang Y., Imahori T., Fujita Y. Artificial material for patch antenna gain enhancement and its application in microwave free-space method. *Int. Conf. on Electromagnetic in Advanced Applications*, 2019, p. 203. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2019.8879209>
 18. Biber S., Richter J., Martius J., Schmidt L. Design of artificial dielectrics for ant-reflection coatings. *33 Eur. Microwave Conf. Proceedings*, 2003, vol. 8024048, pp. 1115–1118.
 19. Ang Ch., Yu Zh. DC electric-field dependence of the dielectric constant in polar dielectrics: Multipolarization mechanism model. *Physical review B*, 2004, vol. 69, art. no. 174109, pp. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.174109>
 20. Vopson M.V. Fundamental of multiferroic materials and their possible application. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2015, vol. 40(4), pp. 223–250. doi: <https://doi.org/10.1080/10408436.2014.992584>
 21. Lokk E.G., Vashkovskii A.V. Diagrammy napravlenosti izlucheniya, vznikajushhego v rezul'tate preobrazovaniya poverhnostnyh magnitostaticheskikh voln v jelektromagnitnye [Directional diagrams of radiation resulting from the transformation of surface magnetostatic waves into electromagnetic waves]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1995, vol.7, pp. 1030–1037.
 22. Vashkovskii A.V., Lokk E.G. On the parameters of patterns of radiation arising in the process of transformation of a magnetostatic surface wave into an electromagnetic wave. *J. of Communication Technology and Electronics*, 2004, vol. 49(8), pp. 904–909.
 23. Vashkovskii A.V., Lokk E.G. The mechanism of transformation of a magnetostatic surface wave into an electromagnetic wave. *J. of Communication Technology and Electronics*, 2009, vol. 54(4), pp. 456–467. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064226909040111>