

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.396.677.31

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).824-832

ГРНТИ 47.45.29

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ АНТЕНН

Петров Р. В., Никитин А. О., Захаров М. А., Эминов С. И.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация Статья посвящена моделированию магнитоэлектрического материала для антенн. В ней обсуждается эффект, наблюдаемый в магнитоэлектрических градиентных структурах. Градиентные магнитоэлектрические структуры представляют собой новый тип композитных структур, состоящий из магнитоэлектрического материала и искусственного диэлектрика. Рассматривается новый принцип управления волновыми свойствами антенны, основанный на геометрическом смещении точки возбуждения за счет приложения внешнего электрического поля. Использование искусственного диэлектрика в мультиферроидной структуре позволит более гибко управлять областями преобразования магнитостатической поверхностной волны в электромагнитную волну, что в практическом плане даст новые возможности для управления характеристиками антенн. В результате расчётов на основе разработанной модели путем подбора значений стационарных магнитного и электрического полей, и значений диэлектрической проницаемости слоя искусственного диэлектрика было получено заключение о возможности управления преобразования магнитостатической поверхностной волны в электромагнитную волну.

Ключевые слова: антенны, магнитоэлектрические градиентные структуры, диаграмма направленности

Для цитирования: Петров Р. В., Никитин А. О., Захаров М. А., Эминов С. И. Моделирование магнитоэлектрического материала для антенн // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 824-832. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).824-832

Research Article

MODELING OF MAGNETOELECTRIC MATERIAL FOR ANTENNAS

Petrov R. V., Nikitin A. O., Zakharov M. A., Eminov S. I.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The paper is devoted to the modeling of magnetoelectric material for antennas. The effect observed in magnetoelectric gradient structures is discussed. Gradient magnetoelectric structures are a new type of composite structures consisting of a magnetoelectric material and an artificial dielectric. A new principle of controlling the antenna wave properties based on the geometric displacement of the excitation point due to the application of an external electric field is being considered. The use of an artificial dielectric in a multiferroic structure will make it possible to more flexibly control the areas of conversion of a magnetostatic surface wave into an electromagnetic wave, which in practical terms will give new opportunities for controlling the characteristics of antennas. The conclusion about the possibility of controlled conversion of a magnetostatic surface wave into an electromagnetic wave was obtained as a result of calculations based on the developed model by selecting the values of stationary magnetic and electric fields, and the values of the permittivity of the artificial dielectric layer.

Keywords: antennas, magnetoelectric gradient structures, radiation pattern

For citation: Petrov R. V., Nikitin A. O., Zakharov M. A., Eminov S. I. Modeling of magnetoelectric material for antennas // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 824-832. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).824-832

Введение

В радиоэлектронных излучающих комплексах в настоящее время большое развитие и применение получили антенные решетки. Это продиктовано их существенными преимуществами, такими как максимальное количество энергии, излучаемой в главном лепестке при одновременном снижении энергии, излучаемой в боковых лепестках, далее быстрое управление лучом антенной решетки и, наконец, возможность излучать несколько лучей одновременно. В то же время такой тип антенных устройств не лишен недостатков, где ключевой проблемой является повышенное энергопотребление в целом. Так как большое количество элементов антенной решетки управляется независимо друг от друга, то цепей питания соответственно необходимо использовать пропорционально много, то есть управление происходит каждым отдельным элементом, а это гигантская нагрузка на энергетическое устройство системы в целом. Следовательно, существует потребность к переходу на управление излучающими элементами антенной решетки электрическим полем, и одним из решений этой проблемы может быть использование магнитоэлектрических (МЭ) градиентных структур.

Градиентные МЭ структуры представляют собой новый тип композитных структур [1]. Это сложный композит, состоящий из магнитоэлектрического мультиферроидного материала и искусственного диэлектрика (ИД). Комбинация структур такого типа позволила расширить возможности электронного управления МЭ СВЧ антенн [2, 3]. Обобщенный механизм расчёта, описанный в [4], где посредством управляющего воздействия электрическим полем происходит управление параметрами градиента диэлектрической проницаемости в слое ИД. Предметом рассмотрения статьи является способ управления диаграммой направленности микрополосковой антенны.

Моделирование магнитоэлектрического материала для антенн

Рассмотрим как происходит управление диаграммы направленности простейшей полосковой антенны с ферритовой поверхностью. Во-первых, хорошо известна зависимость диаграммы направленности от геометрического положения точки возбуждения. Во-вторых, имеется эффект преобразования магнитостатической поверхностной волны (МСПВ) в электромагнитную волну (ЭМВ) [5]. Общий смысл последнего явления заключается в следующем: если длина волны увеличивается по мере распространения МСПВ в неоднородно намагниченных пленках железоиттриевого граната (ЖИГ), то в области поверхности пленки, где волновое число МСПВ становится близким к волновому числу ЭМВ смежного пространства, происходит преобразование МСПВ в ЭМВ (рисунок 1 а).

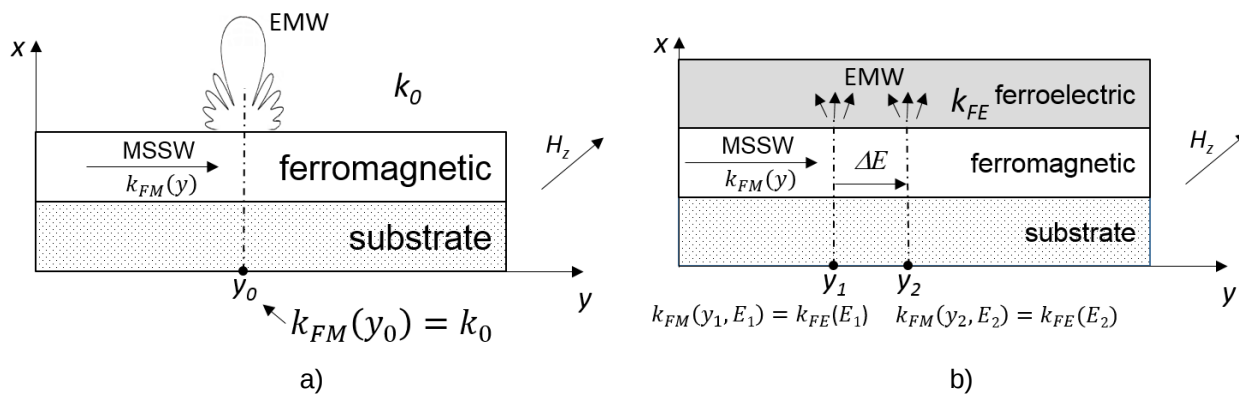


Рисунок 1. Графическое представление процесса преобразования МСПВ в ЭМВ: а) в свободном пространстве; б) в случае магнитоэлектрического композита

Добавление дополнительного слоя искусственного диэлектрика к мультиферроидной структуре позволит установить области преобразования МСПВ в ЭМВ за счёт искусственного распределения диэлектрической проницаемости слоя ИД, то есть за счёт контролируемого изменения эффективной диэлектрической проницаемости верхних слоев (рисунок 2).

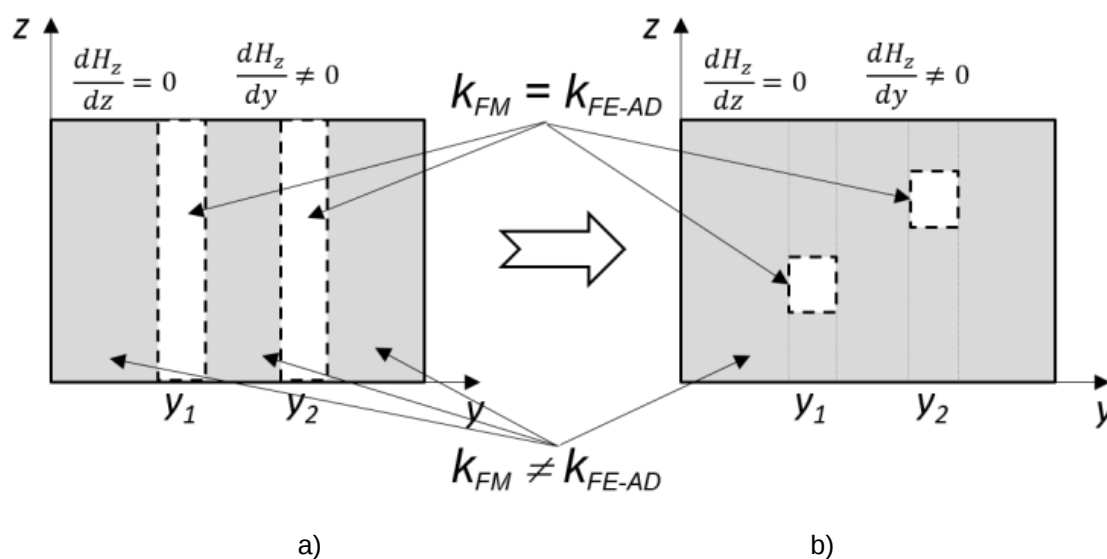


Рисунок 2. Мультиферроидная структура (вид сверху). Схематическое изображение области преобразования МСПВ в ЭМВ: а) структура без ИД; б) структура с ИД.

Этот сдвиг точки преобразования будет аналогичен сдвигу точки возбуждения полосковой антенны. В подтверждение вышеизложенного было проведено моделирование в программном комплексе электродинамического моделирования Ansys Electronics для модели антенны на подложке толщиной 1 мм размером 30 x 30 мм и размером излучающего участка 18 x 27 мм для различных геометрических положений точки возбуждения (рисунок 3).

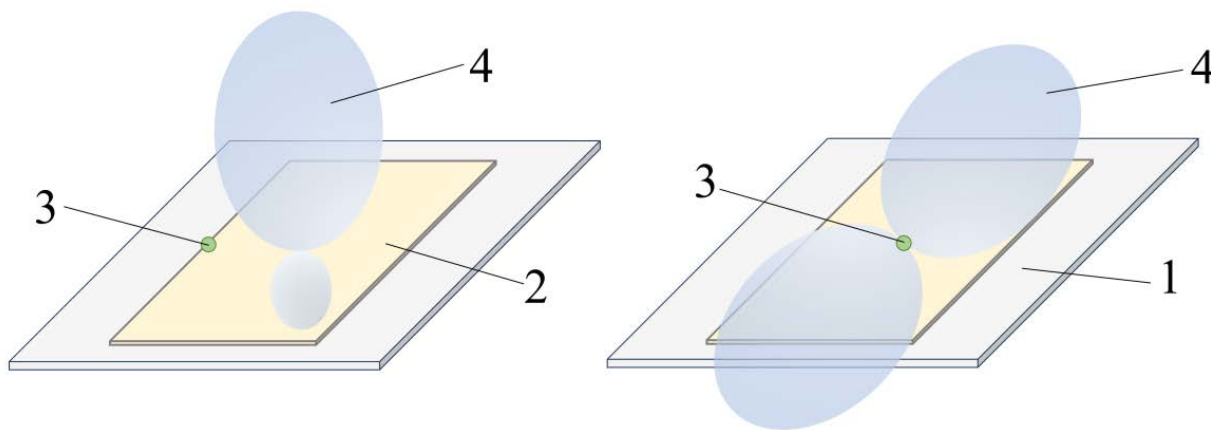


Рисунок 3. Графическое отображение зависимости диаграммы направленности модели полосковой антенны от положения точки возбуждения. 1 – основание антенны, 2 – металлизация, 3 – точка возбуждения, 4 – диаграмма направленности излучения антенны

Таким образом, зададимся целью применяя сложную многослойную структуру создавать управляемую область преобразования МСПВ в ЭМВ. Для моделирования была использована структура, представляющая собой градиентную МЭ структуру состоящую из последовательности слоёв: металлизация, подложка, ферромагнетик, сегнетоэлектрик, искусственный диэлектрик, металлизация.

Математическая модель такой структуры была построена в работе [1]. При моделировании было внесено следующее уточнение: были учтены эффективные размагничивающие факторы для случая распространения магнитостатических волн в тангенциально намагниченной структуре.

$$\omega_H = \gamma \sqrt{H_0(H_0 + 4\pi M_0)}, \quad (1)$$

$$H_0 = H_{e0} + M_0 \sum_i (N_{x,y}^i - N_z^i), \quad (2)$$

где $N_{x,y,z}^i$ – эффективные размагничивающие факторы, H_{e0} – внешнее подмагничивающее поле, M_0 – намагниченность насыщения.

Для расчета дисперсионных характеристик градиентной МЭ структуры были использованы следующие параметры: слой 1 – ИД толщиной $d_1 = 100$ мкм; слой 2 – сегнетоэлектрический слой цирконат-титаната свинца (ЦТС) толщиной d_2 , равной 100 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_2(0)$ равна около 1870; ферромагнитный слой 3 представляет собой ЖИГ толщиной s , равной примерно 5 мкм, намагниченность насыщения M_0 составляет около 1750 Гс, относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_3 составляет 14, внешнее постоянное подмагничивающее поле H_{e0} составляет около 1930 Э; диэлектрический слой 4 представляет собой гадолиний-галлиевый гранат (ГГГ) толщиной w , равной 500 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_4 составляет 11. Математическое моделирование проводилось для следующих двух случаев: 1) феррит был заменен обычным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью равной

диэлектрической проницаемости ЖИГ, диэлектрическая проницаемость слоя ИД была взята равной диэлектрической проницаемости слоя ЦТС ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1870$); 2) диэлектрическая проницаемость слоев 1 и 2 была взята равной диэлектрической проницаемости вакуума ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$).

Был получен спектр собственных волн для этих двух случаев (рисунок 4).

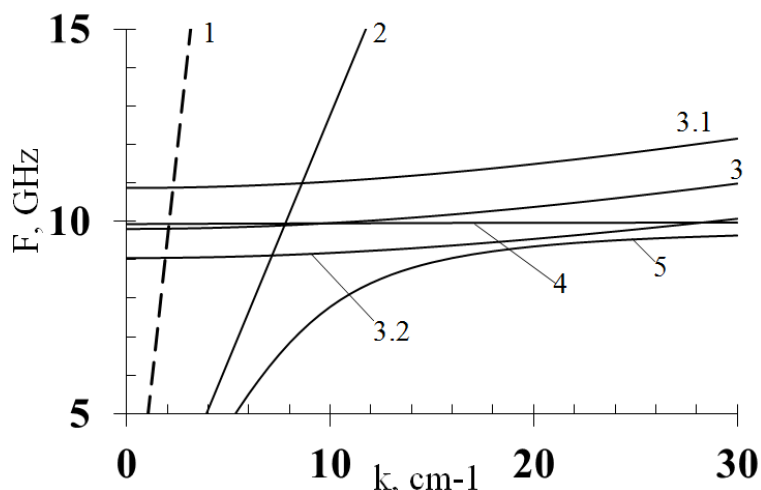


Рисунок 4. Спектр собственных волн исследуемой структуры

Как видно из рисунка 4, построенная математическая модель способна описать спектр волн, существующих в слоистой структуре: электромагнитных в диэлектрических слоях – дисперсионные ветви 2, 3, 3.1, 3.2; магнитостатических волн в ферромагнитном слое – дисперсионная ветвь 4; гибридных электромагнитных спиновых волн – дисперсионная ветвь рассеивания 5. Последний тип волн был достаточно полно описан в работах [6-9].

На рисунке 4 дисперсионная ветвь 2 определяется диэлектрическими свойствами ферритового слоя ЖИГ. В свою очередь, дисперсионная ветвь 3 определяется диэлектрическими свойствами верхних слоев структуры: слоя ИД и сегнетоэлектрического слоя ЦТС. Последнее подтверждается следующим: приложение внешнего электрического поля $E = 40$ кВ/см приводит к сдвигу частоты (вверх по частоте) этой ветви из-за зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика ЦТС от величины приложенного электрического поля (дисперсионная ветвь 3.1 на рисунке 4). С другой стороны, изменение диэлектрической проницаемости слоя искусственного диэлектрика ($\epsilon_1 = 3400$) приводит к снижению его частоты (дисперсионная ветвь 3.2 на рисунке 4). Дисперсионная ветвь 1 характеризует распространение электромагнитной волны в вакууме.

Давайте подробнее рассмотрим область пересечения дисперсионных ветвей 3 и 4 (рисунок 4) – область преобразования МСПВ в ЭМВ, используя пример МЭ градиентной структуры, помещенной в неоднородное магнитное поле (рисунок 5).

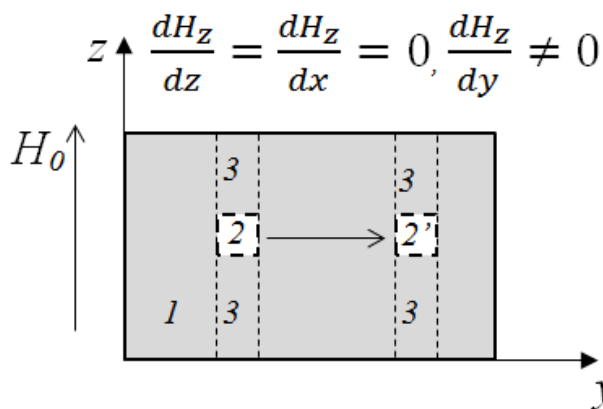


Рисунок 5. Сдвиг области преобразования МСПВ в ЭМВ в исследуемой МЭ градиентной структуре (вид сверху)

Объясним процессы, происходящие при преобразовании МСПВ в ЭМВ, и сдвиг этой области преобразования, основываясь на полученной дисперсионной характеристике (рисунок 6).

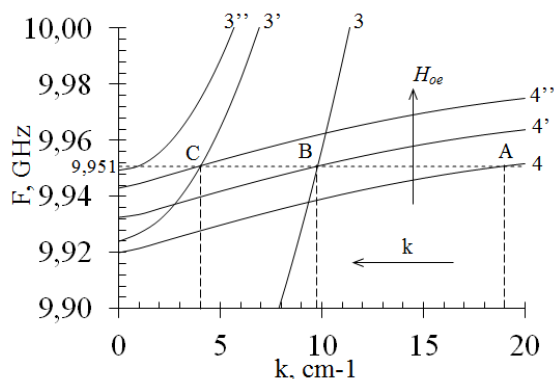


Рисунок 6. Иллюстрация местного сдвига в процессе трансформации МСПВ в ЭМВ

Предположим, что исследуемая МЭ градиентная структура находится в стационарном магнитном поле H_{e0} , которое монотонно увеличивается в направлении оси y . Как видно из рисунка 6, это приводит к изменению волновой характеристики структуры, а именно к увеличению дисперсионной ветви МСПВ (дисперсионная ветвь 4 соответствует полю $H_{e0} = 1926$ Э; дисперсионная ветвь 4' – 1930 Э). Далее, мы предполагаем, что МСПВ на частоте $f = 9,951$ ГГц также распространяется в направлении оси y . Увеличение стационарного магнитного поля приведет к уменьшению волнового числа этого МСПВ (от области точки А до области точки В). На рисунке 5 это соответствует области 1. При значении $H_{e0} = 1930$ Э МСПВ принимает значение волнового числа, равного волновому числу ЭМВ, которое распространяется в верхних диэлектрических слоях структуры ($k = 9,8$). В области этой точки происходит преобразование МСПВ в ЭМВ, и на рис. 6 это соответствует области 2. Преобразование происходит по всей ширине структуры из-за того, что поле неоднородно только в направлении одной координаты y . Чтобы ограничить

область преобразования, значение диэлектрической проницаемости ИД в области 3 было установлено равным $\varepsilon_1 = 1625$. При таком значении дисперсионная ветвь электромагнитной волны будет иметь форму 3' (рисунок 6). То есть условия для распространения электромагнитной волны будут сохранены, в то же время условия для преобразования МСПВ в ЭМВ будут отсутствовать.

Приложение внешнего электрического поля $E = 5$ кВ/см к исследуемой структуре приводит, во-первых, к изменению дисперсионных характеристик магнитостатических волн из-за влияния МЭ эффекта, во-вторых, к изменению дисперсионных характеристик ЭМВ из-за существующей зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от величина приложенного электрического поля. Ветвь 3 дисперсионной характеристики сместится вверх по частоте (3'), а область преобразования МСПВ в ЭМВ из точки В переместится в область большего магнитного поля $H_{e0} = 1933$ Э (ветвь 4' дисперсионной характеристики). В области точки С рисунка 6, которая соответствует зоне 2' на рисунке 5, условие для преобразования МСПВ в ЭМВ было получено для вышеуказанного значения приложенного электрического поля и установленного для этой области значения диэлектрической проницаемости ИД равного $\varepsilon_1 = 1670$. Также, чтобы ограничить область преобразования, было установлено значение диэлектрической проницаемости ИД в зонах 3 равное $\varepsilon_1 = 1625$.

В результате на основе разработанной модели было получено управляемое преобразование МСПВ в ЭМВ путем подбора значений стационарных магнитного и электрического полей, и значений диэлектрической проницаемости слоя ИД.

Заключение

Введение искусственного диэлектрика в мультиферроидную структуру позволит более гибко управлять областями преобразования МСПВ в ЭМВ. Этот процесс аналогичен геометрическому сдвигу точки возбуждения. Таким образом, возможно электронное управление направлением излучения антенны сделанной на основе магнитоэлектрической градиентной структуры.

Антенное устройство с представленным типом управления за счет магнитоэлектрической градиентной структуры обладает следующими преимуществами, которые привносятся материалами входящими в композит: скорость перестройки (за счет сегнетоэлектрика); возможность управления электрическим полем, то есть энергоэффективность; широкий частотный диапазон (за счет ферромагнетика); возможность проектирования различных форм излучающей поверхности (благодаря искусственному диэлектрику).

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-29-00085, <https://rscf.ru/project/22-29-00085/>).

Список литературы

1. Nikitin A. O., Petrov R. V. Magnetoelectric gradient structures // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012029
2. Petrov R. V., Nikitin A. O., Bichurin M. I., Srinivasan G. Magnetoelectric antenna array // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). 2020. 10(6). 371-375. DOI: 10.15866/irecap.v10i6.18658
3. Nikitin A. O., Petrov R. V., Havanova M. A. Control of magnetoelectric antenna by electric field // ITM Web of Conferences: 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019), Sevastopol, Russia, 08–14 September 2019. Sevastopol, Russia: EDP2019. Vol. 30(1). P. 05028. DOI: 10.1051/itmconf/20193005028
4. Никитин А. О. Симуляция магнитоэлектрической структуры в СВЧ диапазоне // Вестник НовГУ. 2018. 3(109). 27-31.
5. 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 // Journal of Communication Technology and Electronics. 2004. 49(8). 904-909.
6. Demidov V. E., Kalinikos B. A. The spectrum of dipole-exchange spin waves in tangentially-magnetized metal-ferroelectric-ferromagnet-ferroelectric-metal sandwich structures // Technical Physics Letters. 2000. 26(4). 273-275. DOI: 10.1134/1.1262815
7. Demidov V. E., Kalinikos B. A. Spectra of exchange dipole electromagnetic-spin waves in asymmetric metal-insulator-ferromagnetic-insulator-metal systems // Technical Physics. 2001. 46(2). 219-222. DOI: 10.1134/1.1349280
8. 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 // Technical Physics Letters. 2014. 40(4). 277-279. DOI: 10.1134/S1063785014040087
9. Ustinov A. B., Tiberkevich V. S., Srinivasan G., Slavin A. N., Semenov A. A., Karmanenko S. F., Kalinikos B. A., Mantese J. V., Ramer R. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory // Journal of Applied Physics. 2006. 100(9). 093905-093912. DOI: 10.1063/1.2372575

References

1. Nikitin A. O., Petrov R. V. Magnetoelectric gradient structures // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012029
2. Petrov R. V., Nikitin A. O., Bichurin M. I., Srinivasan G. Magnetoelectric antenna array // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). 2020. 10(6). 371-375. DOI: 10.15866/irecap.v10i6.18658
3. Nikitin A. O., Petrov R. V., Havanova M. A. Control of magnetoelectric antenna by electric field // ITM Web of Conferences: 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019), Sevastopol, Russia, 08–14 September 2019. Sevastopol, Russia: EDP2019. Vol. 30(1). P. 05028. DOI: 10.1051/itmconf/20193005028
4. Nikitin A. O. Simuliatsiia magnitoelektricheskoi struktury v SVCh diapazone [Magnetoelectric structure simulation in the microwave range] // Vestnik NovSU. 2018. 3(109). 27-31.
5. 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 // Journal of Communication Technology and Electronics. 2004. 49(8). 904-909.
6. Demidov V. E., Kalinikos B. A. The spectrum of dipole-exchange spin waves in tangentially-magnetized metal-ferroelectric-ferromagnet-ferroelectric-metal sandwich

structures // Technical Physics Letters. 2000. 26(4). 273-275. DOI: 10.1134/1.1262815

7. Demidov V. E., Kalinikos B. A. Spectra of exchange dipole electromagnetic-spin waves in asymmetric metal-insulator-ferromagnetic-insulator-metal systems // Technical Physics. 2001. 46(2). 219-222. DOI: 10.1134/1.1349280

8. 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 // Technical Physics Letters. 2014. 40(4). 277-279. DOI: 10.1134/S1063785014040087

9. Ustinov A. B., Tiberkevich V. S., Srinivasan G., Slavin A. N., Semenov A. A., Karmanenko S. F., Kalinikos B. A., Mantese J. V., Ramer R. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory // Journal of Applied Physics. 2006. 100(9). 093905-093912. DOI: 10.1063/1.2372575

Информация об авторах

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru

Никитин Александр Олегович – старший научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-0726-4047, nikitinao@okbplaneta.ru

Захаров Максим Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9144-340X, Maxim.Zakharov@novsu.ru

Эминов Стефан Ильич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9497-8234, Stefan.Eminov@novsu.ru