

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЕ С ТОНКОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКОЙ

Головкина М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Рассмотрено распространение электромагнитных волн в волноводе, который содержит слои обычного диэлектрика и нанокompозитного метаматериала с отрицательным показателем преломления, разделенные тонкой пленкой сверхпроводника второго рода в резистивном состоянии. Показана возможность усиления электромагнитных волн за счет энергии движущейся решетки вихрей Абрикосова в тонкой сверхпроводящей пленке. Контроль над параметрами затухания и усиления осуществляется за счет магнитного поля.

В настоящее время пристальное внимание исследователей вызывают нанокompозитные материалы, обладающие необычными свойствами, не присущими природным материалам. К таким новым искусственным материалам относятся метаматериалы. Метаматериалами называются композитные среды, содержащие искусственные включения или неоднородности, размер которых меньше или сравним с длиной волны. Такие материалы можно описывать как однородные среды, используя понятия эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости. Особое место занимают метаматериалы с отрицательным значением показателя преломления, которые впервые были предсказаны в работе Веселаго [1]. Первые искусственные композитные среды, обладающие отрицательным показателем преломления, были созданы в конце 90-х годов [2, 3]. На основе метаматериалов с отрицательным показателем преломления предложены различные конструкции для создания фильтров, модуляторов, усилителей, резонаторов и других устройств [4]. Материалы с отрицательным показателем преломления обладают одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости, вследствие чего фазовая и групповая скорость направлены противоположно друг другу, соответственно волновой вектор и вектор Пойнтинга направлены антипараллельно. Для создания отрицательной диэлектрической проницаемости в метаматериалах часто применяют массив из тонких металлических проволок, для создания отрицательной магнитной проницаемости используют массив из периодически расположенных разомкнутых резонаторов. Практическая ценность устройств на основе метаматериалов повышается, если появляется возможность изменения их характеристик. Следует отметить, что отрицательная диэлектрическая проницаемость в предложенных структурах наблюдается в широком частотном диапазоне, тогда как зависимость магнитной проницаемости от частоты в метаматериалах с отрицательным показателем преломления носит резонансный характер, и отрицательные значения μ наблюдаются только в узком частотном диапазоне. Поэтому основное внимание при создании управляемых метаматериалов уделяется контролю магнитной проницаемости.

Для контроля отрицательной магнитной проницаемости предлагаются различные методы. Резонансная частота конструкций на основе разомкнутых резонаторов зависит от геометрических размеров резонаторов и характеристик материалов [5]. При этом

резонансная частота может меняться при изменении свойств подложки или среды, в которую вмонтированы сами резонансные элементы [6]. Предложены конструкции метаматериалов, свойства которых можно контролировать электрическим полем [7, 8, 9], магнитным полем [10, 11], оптической накачкой [12], температурой [13]. Возможность управления осуществляется за счет того, что один из компонентов композитного метаматериала является электро-оптическим материалом, ферритом [14, 15], жидким кристаллом [16, 17]. Другой подход для создания метаматериалов с изменяемыми свойствами - изготовление самих разомкнутых резонаторов из материала, свойства которого можно изменять [18] или внедрение в резонаторы варакторов [19, 20, 21] или конденсаторов [22]. В данной работе мы рассматриваем конструкцию, в которой метаматериал с отрицательным показателем преломления граничит с управляющим элементом, в роли которого выступает тонкая сверхпроводящая пленка.

Рассмотрим прямоугольный двухслойный волновод (Рис. 1). Один из слоев толщиной d_1 представляет метаматериал с отрицательным значением показателя преломления ($\epsilon_1 < 0$, $\mu_1 < 0$), второй слой толщиной d_2 - обычный диэлектрик ($\epsilon_2 > 0$, $\mu_2 > 0$). Ширина волновода $a = d_1 + d_2$. Слои метаматериала и обычного диэлектрика разделены тонкой пленкой сверхпроводника второго рода в резистивном состоянии. Толщина сверхпроводящей пленки $t \ll \lambda$, где λ - лондоновская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник. По пленке протекает транспортный ток с плотностью j_{y0} . Магнитное поле $B_{c1} < B < B_{c2}$, где B_{c1} и B_{c2} - первое и второе критическое поле для сверхпроводника соответственно, направлено перпендикулярно поверхности пленки. Магнитное поле проникает в толщу тонкого сверхпроводника в виде решетки вихрей Абрикосова, которая под действием транспортного тока начинает движение параллельно поверхности пленки вдоль оси Oz [23].

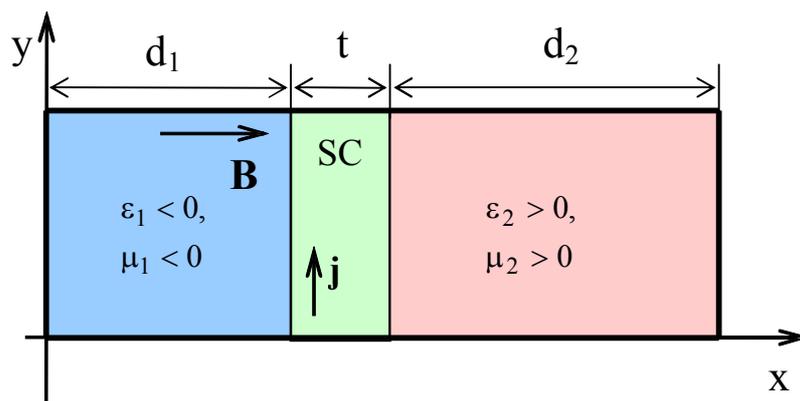


Рис. 1. Геометрия структуры

Наличие тонкой сверхпроводящей пленки учтем введением специального граничного условия [24, 25]. В безынерционном приближении граничное условие записывается в следующем виде

$$\frac{\partial B_x}{\partial t}(x = d_1) - \frac{j_{y0} \Phi_0}{\eta} \frac{\partial B_x}{\partial z}(x = d_1) = - \frac{B_{x0}}{t\eta} \frac{\partial}{\partial z} [H_z(x = d_1) - H_z(x = d_1 + t)], \quad (1)$$

где B_{x0} - величина внешнего магнитного поля, η - коэффициент вязкости магнитного вихря, Φ_0 - квант магнитного потока. В исследуемом волноводе могут распространяться волны типа H_{m0} и гибридные волны. Рассмотрим распространение волн H_{m0} , которые эффективно взаимодействуют с движущейся вихревой структурой в слое сверхпроводника. Дисперсионное уравнение для H_{m0} - волн представлено в [26]. В работах [24, 25] показано, что электромагнитная волна может эффективно взаимодействовать с движущейся решеткой вихрей Абрикосова и даже испытывать усиление за счет энергии вихревой решетки.

Численный расчет дисперсионных характеристик проводился для волноводной структуры с тонкой пленкой из высокотемпературного сверхпроводника (иттриевой керамики). Присутствие в волноводе сверхпроводящей пленки привело к появлению мнимой части у постоянной распространения β . Временная зависимость в работе выбрана в виде $\exp(i\omega t)$. Результаты расчета представлены на Рис. 2 и 3. Если скорость движения вихревой структуры мала по сравнению со скоростью электромагнитной волны, то волна практически не взаимодействует с решеткой вихрей Абрикосова. Этому случаю соответствует кривая 1 на Рис. 2 и 3. Из Рис. 3 видно, что мнимая часть постоянной распространения β принимает отрицательные значения, что соответствует затуханию волны. Ниже частоты отсечки мнимая часть β велика, и электромагнитная волна не распространяется. В том же случае, когда скорость движущейся решетки вихрей Абрикосова сравнивается со скоростью электромагнитной волны, взаимодействие с вихревой решеткой велико, и наблюдается усиление, соответствующее положительным значениям мнимой части постоянной распространения β (кривая 2 на рис. 1 и 2). Усиление наблюдается при частотах, превышающих частоту отсечки.

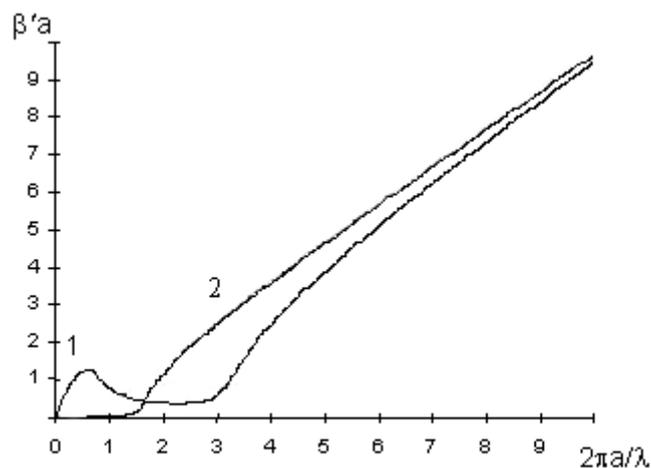


Рис. 2. Зависимость действительной части постоянной распространения от нормированной частоты для волны H_{20} . Параметры: $j_{y0} = 10^{12} \text{ A/m}^2$, $t = 60 \text{ нм}$, $B_{x0} = 10 \text{ Тл}$, $d_1 = d_2$, $\varepsilon_1 = -2$, $\mu_1 = -1$, $\varepsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$. Кривая 1: $\eta = 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$,
кривая 2 : $\eta = 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$.

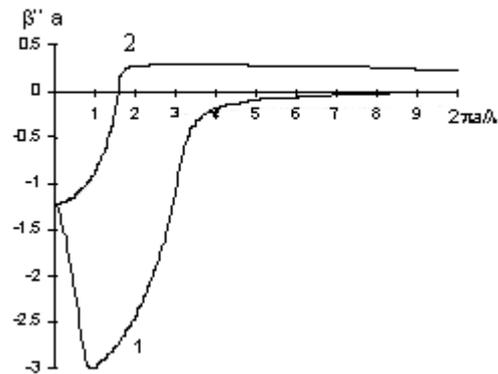


Рис. 3. Зависимость мнимой части постоянной распространения от нормированной частоты для волны H_{20} . Параметры те же, что на Рис. 2.

Величина и знак мнимой части постоянной распространения зависят от величины внешнего магнитного поля B_{x0} . Поэтому затуханием и усилением волн в данной волноводной структуре со слоем метаматериала можно управлять, меняя величину внешнего магнитного поля. Результаты данной работы актуальны потому, что в большинстве практических реализаций метаматериалы с отрицательным показателем преломления обладают достаточно высоким уровнем потерь в области существования отрицательных значений показателя преломления. Наличие тонкой сверхпроводящей пленки позволяет скомпенсировать потери в метаматериале, а комбинация метаматериала и обычного диэлектрика приводит к замедлению электромагнитных волн и обеспечивает возможность для выполнения условия равенства скоростей вихревой структуры и скорости электромагнитной волны.

Таким образом, в работе показано, что электромагнитная волна может испытывать усиление в волноводной структуре, содержащей комбинацию метаматериала с отрицательным показателем преломления, обычного диэлектрика и тонкой сверхпроводящей пленки в резистивном состоянии. Причем затуханием и усилением волны можно управлять путем изменения внешнего магнитного поля. На основе рассмотренной волноводной структуры возможно создание устройств (усилителей и фильтров) для СВЧ и оптического диапазона, управляемых посредством изменения внешнего магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . // УФН. 1967. Т. 92. № 3. С. 517–526.
2. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. № 18. P.4184–4187.

3. Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. // *Science*. 2001. Vol. 292. P.77–79.
4. *Metamaterials. Physics and engineering explorations*. Edited by Engheta N., Ziolkowski R. Wiley. 2006. 414 P.
5. Cai W., Chettiar U. K., Yuan H. K., Silva V. C., Kildishev A. V., Drachev V. P., Shalaev V. M., *Metamagnetics with rainbow colors* // *Opt. Express*. 2007. Vol. 15. P.3333.
6. Sheng Z. Y., Varadan V. V. Tuning the effective properties of metamaterials by changing the substrate properties // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 101. P. 014909-1- 014909-7.
7. Hand T. H., Cummer S. A., Frequency tunable electromagnetic metamaterial using ferroelectric loaded split rings // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. P. 066105.
8. Zhao Q., Kang L., Du B., Li B., Zhou J., Tang H., Liang X., Zhang B. Electrically tunable negative permeability metamaterials based on nematic liquid crystals // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 011112.
9. Chen H.-T., Padilla W. J., Zide J. M. O., Gossard A. C., Taylor A. J., Averitt R. D. Active terahertz metamaterial devices // *Nature*. 2006. Vol. 444. P.579-600.
10. He Y., He P., Harris V. G., Vittoria C. Role of ferrites in negative index metamaterials, // *IEEE Trans. Magn.* 2006. Vol. 42, P.2852-2854.
11. Kang L., Zhao Q., Zhao H., Zhou J. Magnetically tunable negative permeability metamaterial composed by split ring resonators and ferrite rods // *Opt. Express*. 2008. Vol. 16. P.8825-8834.
12. Degiron A., Mock J. J., Smith D. R. Modulating and tuning the response of metamaterials at the unit cell level // *Opt. Express*. Vol. 15. P.1115-1127.
13. Xiao S., Chettiar U. K., Kildishev A.V., Drachev V., Khoo I. C., Shalaev V. M. Tunable magnetic response of metamaterials // *Appl. Phys. Letters*. 2009. Vol. 95, P. 033115-1-033115-3.
14. He Y.X., He P., Yoon S.D., Parimi P.V., Rachford F.J., Harris V.G., C.Vittoria C. Tunable negative index metamaterial using yttrium iron garnet // *J. Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. Vol.313. P.187–191.
15. Zhao H.J., Zhou J., Zhao Q., Li B., Kang L., Bai Y. Magnetotunable left-handed material consisting of yttrium iron garnet slab and metallic wires // *Appl. Phys. Lett.*. 2007. Vol.91, P.131107.
16. Werner D. H., Kwon D.-H., Khoo I.-C., Kildishev A. K., Shalaev V. M. Liquid crystal clad near-infrared metamaterials with tunable negative-zero-positive refractive indices. // *Opt. Express*. 2007. V.15. P. 3342-3347.
17. Zhang F., Zhao Q., Kang L., Gaillot D. P., Zhao X., Zhou J. Magnetic control of negative permeability metamaterials based on liquid crystals // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92. P.193104.
18. Han J., Lakhtakia A., Qiu C.-W. Terahertz metamaterials with semiconductor split-ring resonators for magnetostatic tunability // *Optic Express*. 2008. Vol. 16. Iss. 19. P. 14390-14396.
19. Wang, D.X., Ran L.X., Chen H.S., Mu M.K., Kong J.A., Wu B.-I. Active left-handed material collaborated with microwave varactors // *Appl. Phys. Lett.*. 2007. Vol.91. P.164101.
20. Chen, H.S., B.-I.W u, L.X.Ran, T.M.Grzegorzcyk, and J.A.Kong, “Controllable left-handed metamaterial and its application to a steerable antenna,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.89, 053509, 2006.
21. Velez A., Bonache J., Martín F. Varactor-loaded complementary split ring resonators (VLCSSRR) and their application to tunable metamaterial transmission lines // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*. 2008. Vol.18. No.1. P.28–30.
22. Baena, J.D., Marques R., Medina F. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators // *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 69. P.014402.
23. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. -М. : Наука. -1982. -240 С.
24. Попков А.Ф. Усиление магнитостатической волны потоком магнитных вихрей в структуре феррит-сверхпроводник. // *Письма в ЖТФ*. -1989. -Т. 15. -Вып. 5. -С. 9-14.

25. Глущенко А.Г., Головкина М.В. Отражение электромагнитной волны слоистой структурой сверхпроводник - диэлектрик. // Письма в ЖТФ. -1998. - Т. 24. -Вып. 1. - С. 9-12.
26. Головкина М.В. Электродинамические свойства двухслойной волноводной структуры со слоем метаматериала и тонкой сверхпроводящей пленкой. // XII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн», 25 - 30 мая 2009 г., МГУ, Москва.

Головкина Мария Вилевна, доцент кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара.

Область научных интересов: электродинамика тонкопленочных структур, электродинамика слоистых структур, содержащих нанокompозитные метаматериалы с отрицательным показателем преломления.

e-mail: nauka77@yandex.ru