

加载异向介质非辐射介质波导中的慢波传输及应用*

杨 锐† 谢拥军 王元源 傅焕展

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

(2007 年 12 月 17 日收到 2008 年 1 月 22 日收到修改稿)

将开口谐振环作为加载单元, 分析了含有开口谐振环结构非辐射介质波导的新型传输特性. 由于异向介质的双各向异性效应, 纵剖面磁波型和纵剖面电波型在此新型非辐射介质波导中的传输速度能够减慢, 甚至达到零速度. 对于波导中的能量关系也进行了分析, 研究表明, 在一定情况下, 慢波传输将引起功率流动的增强. 这些特性使得此新型非辐射介质波导更能满足小型化的设计要求.

关键词: 开口谐振环, 异向介质, 非辐射介质波导, 慢波传输

PACC: 4110H

1. 引 言

自 1981 年由 Yoneyama 等人^[1]提出以来, 非辐射介质波导(nonradiative dielectric waveguide, NRD 波导)以其传输损耗低、机械加工方便、成本低廉等优点成为了极具发展潜力的导波结构. 迄今为之, 传统 NRD 波导的各基础特性已被人们所熟知, 并且广泛地应用于微波和毫米波无源器件的设计中^[2-5].

随着人工复合材料的发展, 改良的 NRD 波导结构引起了各国学者的高度关注. 例如, 加载磁性铁氧体介质 NRD 波导将出现非互易效应^[6]. 利用 Ω 介质填充 NRD 波导可以增大单模传输范围等等^[7]. 本世纪以来, 异向介质的超常规电磁特性在各学科领域获得了广泛青睐^[8-27], 因而利用异向介质来改善传统 NRD 波导电气性能引起了科学家们的兴趣. Topa 等研究了基于双负异向介质的 NRD 波导中的后向波传输、模式分岔及耦合效应^[26]. Yang 等则对使用单负异向介质填充 NRD 波导所带来的改变进行了研究^[27]. 但是, 用于异向介质制造的开口谐振环(split ring resonator, SRR)结构是由两个同心金属开口环组成. 因为结构上的非对称性, 含有 SRR 的异向介质对于入射场的电磁响应除了电耦合, 磁耦合之外, 还存在磁电耦合, 构成了双各向异性介

质^[10,11]. 这使得在分析加载异向介质 NRD 波导时必须考虑双各向异性效应, 而不是单纯的将介电常数和磁导率视为负数.

本文通过对加载 SRR 异向介质 NRD 波导的全波分析, 研究了此新型 NRD 波导中的传输特性. 由于异向介质的双各向异性效应, 纵剖面磁(LSM)波型和纵剖面电(LSE)波型的传输速度能够减慢, 甚至达到零速度. 对于波导中能量关系也进行了分析, 研究表明, 在一定情况下, 慢波传输将引起功率流动的增强. 这些特性使得此新型 NRD 波导更能满足小型化的设计要求.

2. 加载异向介质 NRD 波导的全波分析

考虑到双各向异性效应, SRR 异向介质可用下式描述^[28]:

$$D = \epsilon_0(\bar{\epsilon} \cdot E + Z_0 \bar{\kappa} \cdot H), \quad (1a)$$

$$B = \mu_0 \left(-\frac{1}{Z_0} \bar{\kappa}^T \cdot E + \bar{\mu} \cdot H \right), \quad (1b)$$

其中 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, $\bar{\epsilon}$, $\bar{\mu}$ 和磁电耦合效应 $\bar{\kappa}$ 均为张量. 将两组具有不同摆向的相同 SRR 结构嵌入均匀介质构成如图 1 所示的异向介质, 则各参量可表示为^[29]

* 国家自然科学基金(批准号: 60771040)和教育部新世纪优秀人才基金(批准号: NCET-04-0950)资助的课题.

† E-mail: mattomato811118@yahoo.com.cn

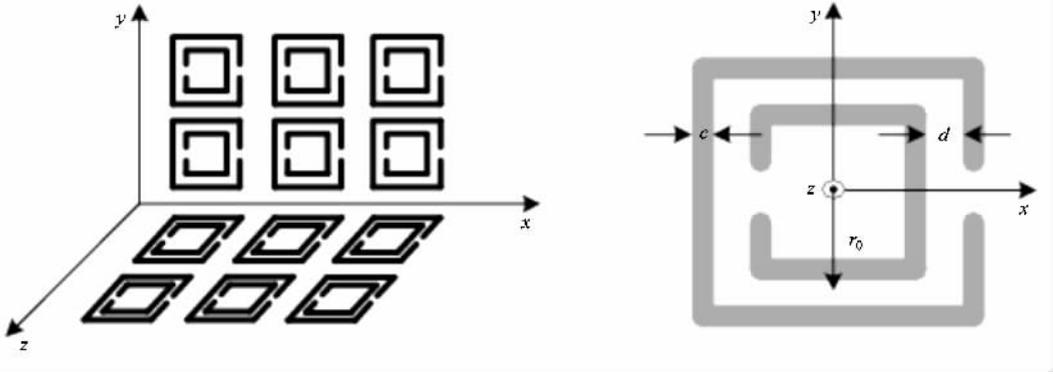


图 1 异向介质中两组 SRR 的摆向及其具体尺寸

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{\mu} &= \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{\kappa} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa \\ 0 & -\kappa & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

考虑无耗情形^[10,11]

$$\epsilon_1 \propto a, \epsilon_2 \propto 1 + \zeta \frac{a(\omega_0^2 - \omega^2) + b\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (3a)$$

$$\mu_1 \propto 1, \mu_2 \propto \xi + \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) + c\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (3b)$$

$$\kappa \propto \frac{d\omega_0\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (3c)$$

其中 ω_0 为谐振频率, $a = r_0 - c/2$, $b = r_0 + c/2$, c , d , r_0 如图 1 所示, 由 SRR 的几何参数决定. ζ, ξ 表示了 ϵ 和 μ 在分量在 $\hat{y}\hat{y}$ 和 $\hat{z}\hat{z}$ 方向上的改变. 所以, ϵ_1 和 μ_1 将只可能存在正值, 而 ϵ_2 和 μ_2 则可能在某一特定频段内出现负值, 构成双负异向介质. 引入归一化的磁场 $h = Z_0 H$, 结合 (1) (2) 式, 对于无源场, 从麦克斯韦旋度方程可以得到

$$-i\nabla' \times h = \bar{\epsilon} \cdot E + \bar{\kappa} \cdot h, \quad (4a)$$

$$i\nabla' \times E = -\bar{\kappa}^T \cdot E + \bar{\mu} \cdot h, \quad (4b)$$

其中 $\nabla' = \nabla/k_0$. 图 2 所示为加载 SRR 异向介质 NRD 波导的几何结构, 假定波沿 z 轴方向传播 $\exp(-i\beta z')$, 其中 $\beta = k_z/k_0$ 为 z 方向的归一化波数即传播常数, 则

$$\nabla' = \partial_x \hat{x} + \partial_y \hat{y} - i\beta \hat{z}, \quad (5)$$

其中 ∂_x 表示 $\partial/\partial x'$, ∂_y 表示 $\partial/\partial y'$, $x' = k_0 x$, $y' =$

$$k_0 y, z' = k_0 z.$$

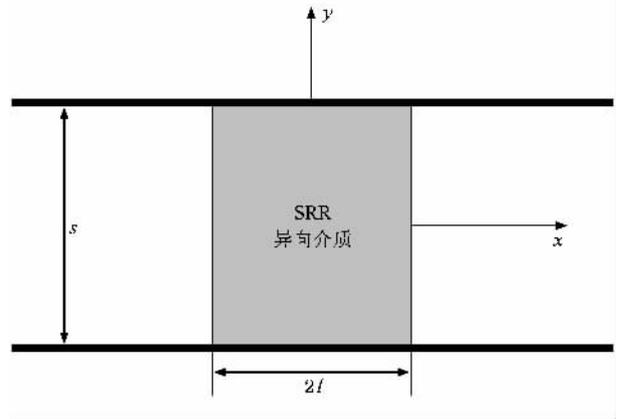


图 2 加载 SRR 异向介质 NRD 波导的几何结构

LSM 波型的特征为 $h_x = 0$, 将其他场分量用 h_y 表式, 即

$$h_z = -i \frac{1}{\beta} \partial_y h_y, \quad (6a)$$

$$E_x = -\frac{1}{\beta \epsilon_1} (\partial_y^2 h_y - \beta^2 h_y), \quad (6b)$$

$$E_y = \frac{1}{\beta \epsilon_2} (\partial_y \partial_x h_y - x \partial_y h_y), \quad (6c)$$

$$E_z = -i \frac{1}{\epsilon_2} (\partial_x h_y - \kappa h_y), \quad (6d)$$

而 h_y 本身满足

$$\partial_x^2 h_y + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \partial_y^2 h_y = - \left(\epsilon_2 \mu_2 - \kappa^2 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \beta^2 \right) h_y, \quad (7)$$

通过分离变量

$$h_y = f(x') g(y') \exp(-j\beta z'). \quad (8)$$

而

$$\partial_x^2 f(x') + \beta_x^2 f(x') = 0, \quad (9a)$$

$$\partial_y^2 g(y') + \beta_y^2 g(y') = 0, \quad (9b)$$

其中 $\beta_x = k_x/k_0$, $\beta_y = k_y/k_0$. 将上式代入 (7) 式, 归一

化的波数之间的关系可用下式表示:

$$\gamma^2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}(\beta_y^2 + \beta^2) = \epsilon_2\mu_2 - \kappa^2, \quad (10a)$$

$$-\alpha^2 + \beta_y^2 + \beta^2 = 1. \quad (10b)$$

当 $|x'| < l'$ 时, $\beta_x = \gamma$, 而当 $|x'| > l'$ 时, $\beta_x = -j\alpha$, 其中 $\alpha > 0$. 利用上下两金属板的边界条件, 可以得到

$$g(y') = G \sin(\beta_y y') \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (11)$$

其中 $\beta_y = n \frac{\pi}{s}$, 而 $s' = k_0 s$, n 表示了波导中 γ 方向的半波长数. 而

$$f(x') = \begin{cases} F_1 \exp[\alpha(x' + l')] & x' < -l', \\ F_2 [\cos(\gamma x') + R \sin(\gamma x')] & -l' < x' < l', \\ F_3 \exp[-\alpha(x' - l')] & l' < x'. \end{cases} \quad (12)$$

利用在 $x' = \pm l'$ 处的场连续条件, 得到 LSM 波形的传输方程

$$[\gamma \coth(\gamma l') + \alpha \epsilon_2] [\gamma \tanh(\gamma l') - \alpha \epsilon_2] + \kappa^2 = 0, \quad (13)$$

上式的本征解最终给出模式 LSM_{mn} 中的 m 值 ($m = 0, 1, 2, \dots$).

通过类似的推导, 可以得到 LSE 波形的传输方程

$$[\gamma \coth(\gamma l') + \alpha \mu_2] [\gamma \tanh(\gamma l') - \alpha \mu_2] + \kappa^2 = 0. \quad (14)$$

对应 (10a) 式, 其归一化波数之间的关系可表示为

$$\gamma^2 + \frac{\mu_2}{\mu_1}(\beta_y^2 + \beta^2) = \epsilon_2\mu_2 - \kappa^2. \quad (15)$$

可见, LSE 波型与 LSM 波型存在对应性, 所以在下面的讨论中我们只给出 LSM 波型的数值结果.

3. 加载异向介质 NRD 波导中的慢波传输及能量关系

图 3(a) 给出了 LSM_{mn} 模式的传输特性, 可以看出当 ϵ_2 和 μ_2 都为负数时, 传播常数的绝对值 $|\beta_z|$ 将随 SRR 异向介质磁电耦合效应 κ 的增强而变大. 另外, 在相同的磁电耦合效应影响下, LSM 波型的高阶模式相比于其主模式 LSM_{01} 具有更大的传播常数. 最后, 利用 NRD 波导的截止条件 $\beta = 0$, 由 (10a) 式可以得到磁电耦合效应的最小值

$$|\kappa_{\min}| = \sqrt{\epsilon_2\mu_2 + \left| \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right| \beta_y^2 - \gamma^2}. \quad (16)$$

当传播常数增大时, 波导的中波长 $\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta}$ 将随之减小. 也就是说, 在此波导中各模式传播的群速度 $v_g = \lambda_g/f$ 将变慢. 从 (3) 式可以看出, 当 ω 略大于谐振频率 ω_0 时, SRR 异向介质的 ϵ_2 和 μ_2 将取得负数. 同时, 磁电耦合效应 κ 在此频段内将取得极大值, 甚至达到无穷大, 从而使得 LSM 波型在此新型 NRD 波导中的传播速度变慢, 甚至达到零速度传输.

另一方面, 当 ω 小于谐振频率 ω_0 时, ϵ_2 和 μ_2 都为正数, 如图 3(b) 所示, 此时传播常数的绝对值 $|\beta_z|$ 将随 SRR 异向介质磁电耦合效应 κ 的增强而变小. 而且, 在相同的磁电耦合效应影响下, 主模式 LSM_{01} 相对于其他高阶模式具有较大的传播常数. 最后, 从 (10a) 中利用 NRD 波导的截止条件 $\beta = 0$, 磁电耦合效应将存在最大值, 即

$$|\kappa_{\max}| = \sqrt{\epsilon_2\mu_2 - \left| \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right| \beta_y^2 - \gamma^2}. \quad (17)$$

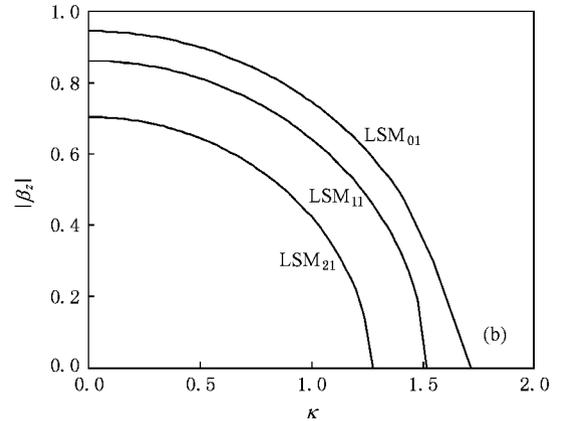
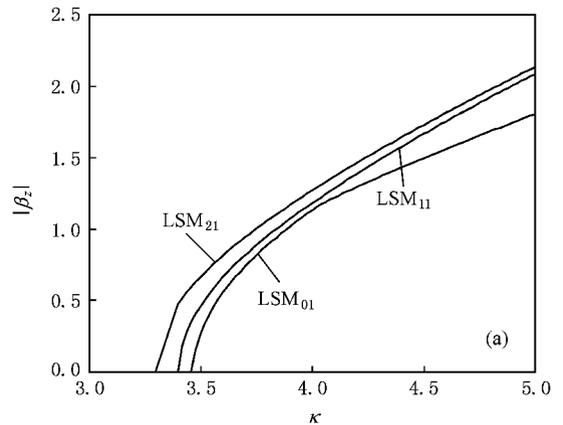


图 3 加载 SRR 异向介质 NRD 波导中传播常数与磁电耦合效应之间的关系 (a) $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = -3, \mu_2 = -2.5, f = 35 \text{ GHz}, s = 0.4\lambda_0, l = 0.6\lambda_0$ (b) $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 3, \mu_2 = 2.5, f = 35 \text{ GHz}, s = 0.4\lambda_0, l = 0.6\lambda_0$

需要强调的是,当磁电耦合效应 κ 消失 (13), (14) 式变成了与传统 NRD 波导相类似的两传输方程的乘积. 图 4 给出了加载 SRR 异向介质 NRD 波导和传统 NRD 波导中主模 LSM_{01} 的传播特性. 因为 ϵ_2 和 μ_2 会在谐振频率 ω_0 后窄频带内同时出现负值, 这里我们假设 $\bar{\epsilon}, \bar{\mu}, \kappa$ 在此频段内为常数. 另外, 由于双负参数情况下, 由 (6) 式磁电耦合效应存在最小值, 所以取 $\kappa = 5$ 和 $\kappa = 10$ 从而保证 LSM_{01} 能够在此波导中传播. 如图所示, 在 [30 GHz, 31 GHz] 中, 加载 SRR 异向介质 NRD 波导中 LSM_{01} 的传播常数总大于传统 NRD 波导, 从而具有更慢的传播速度. 这说明了在相同的长度内, 加载 SRR 结构 NRD 波导将传播更多数目的波数, 使得 NRD 波导能够实现小型化.

进一步来看加载异向介质 NRD 波导中的能量传输, 如果 LSM_{01} 慢速传播不会引起能量流动的减少将对 NRD 波导小型化更有意义. LSM_{01} 模的功率流由下式求得:

$$\begin{aligned}
 P_{01} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{x'=-l}^l \int_{y'=0}^{s'} E \times h^* \cdot \hat{z} dy' dx' \\
 &= \pm \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{x'=-l}^l \int_{y'=0}^{s'} E_x h_y^* dy' dx' \\
 &= \pm \frac{F_2^2 G^2 s' l'}{2\epsilon_1} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\beta} \left(\frac{\lambda_0}{2s} \right) + \beta \right]. \quad (18)
 \end{aligned}$$

对于 ϵ_2, μ_2 为双正参数时, 取正号; 而对于 ϵ_2, μ_2 为双负参数时, 取负号, 此时因为 β 为负数从而保证了 P_{01} 的正值. 首先考虑 $s = 0.5\lambda_0$ NRD 波导的极限情况, 不考虑 (18) 式中常系数, 如图 5(a) 中点实线所示, $|\beta| > 1$ 时 LSM_{01} 功率流动将随着 $|\beta|$ 的增大而增大. 若取 $s = 0.4\lambda_0$, 如图 5(a) 中实线所示, 在 $|\beta| > 1.118$ 时 LSM_{01} 功率流动将随着 $|\beta|$ 的增大而增大. 所以需要满足 $|\beta| > \sqrt{\lambda_0/2s}$, 则保证了功率流动的增强.

另一方面, 通常实际中 NRD 波导的尺寸 s 是一定值, 考虑频率 f 对它特性的影响. 图 5(b) 给出了当 $s = 4 \text{ mm}$, LSM_{01} 功率流动将随着 f 的变化情况. 可以看出, 在一定情况下, LSM_{01} 功率流动将随着 f 的增大而增大. 而且, 由 (18) 式得到 P_{01} 将在较宽的 NRD 工作频带内取得随着 f 增大而增大这一趋势, 增大的频率 f 同时使得 $\sqrt{\lambda_0/2s}$ 减小, 保证了 $|\beta| > \sqrt{\lambda_0/2s}$ 这一条件易于满足, 从而保证了慢波传输引起功率流动的增强, 进而更有利于实现加载异向介质 NRD 波导的小型化.

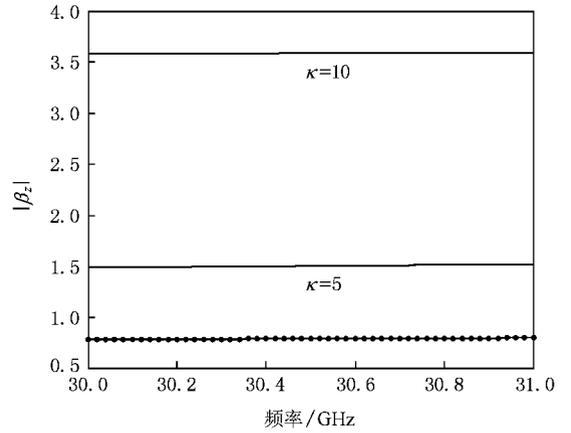


图 4 主模 LSM_{01} 的传播常数随频率变化的关系 (点实线表示传统 NRD 波导 $\epsilon_r = 4, \mu_r = 1, s = 4 \text{ mm}, l = 5 \text{ mm}$; 实线表示加载 SRR 异向介质 NRD 波导 $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = -4, \mu_2 = -1, \kappa = 5$ 和 $10, s = 4 \text{ mm}, l = 5 \text{ mm}$)

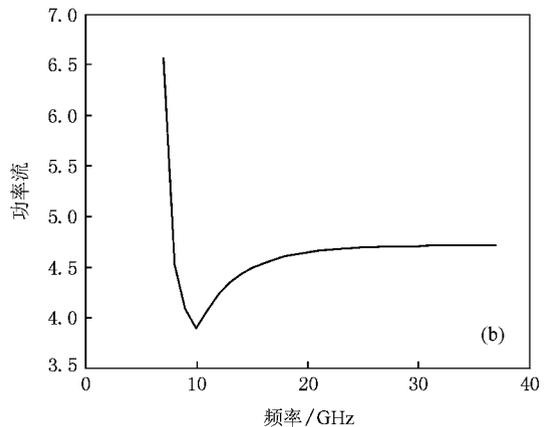
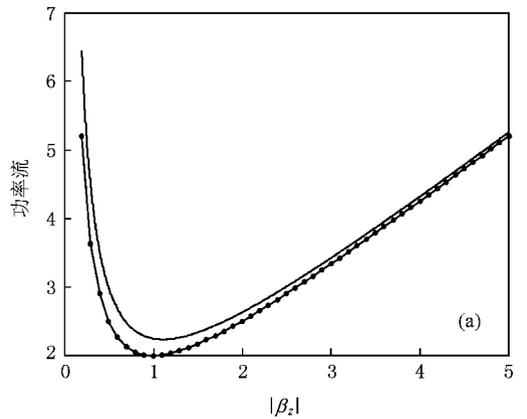


图 5 加载 SRR 异向介质 NRD 波导中 LSM_{01} 模的功率流 (a) 与传播常数的关系 (b) 与频率的关系 ($\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = -3, \mu_2 = -1, \kappa = 10, s = 4 \text{ mm}, l = 5 \text{ mm}$)

4. 结 论

本文通过对加载异向介质 NRD 波导的全波分析,研究了此新型 NRD 波导中的传输特性.由于

SRR 异向介质的双各向异性效应,LSM 波型和 LSE 波型的传输速度能够减慢,甚至达到零速度.对于波导中能量关系也进行了分析,研究表明,在一定情况下,慢波传输将引起功率流动的增强.这些特性使得此新型 NRD 波导更能满足小型化的设计要求.

- [1] Yoneyama T, Nishida S 1981 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **29** 1188
- [2] Yoneyama T, Kuroki F, Nishida S 1984 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **32** 1622
- [3] Malherbes J A G 1999 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **21** 313
- [4] Boone F, Wu K 2000 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **48** 482
- [5] Li D C, Cassivi Y, Yang P, Wu K 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2546
- [6] Céasar A, Souza R 1993 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **41** 647
- [7] Topa A L, Paiva C R, Barbosa A M 1998 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **46** 1263
- [8] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [9] Pendry J B 2000 *Phys Rev Lett.* **85** 3966
- [10] Marqués R, Medina F, Rafii-El-Idrissi R 2002 *Phys. Rev. B* **65** 144440
- [11] Smith D R, Gollub J, Mock J J, Padilla W J, Schurig D 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 024507
- [12] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 772 (in Chinese) [张东科、张治文、赫 丽、李宏强、陈鸿 2005 物理学报 **54** 772]
- [13] Zhuang F, Shen J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 955 (in Chinese) [庄 飞、沈建其 2005 物理学报 **54** 955]
- [14] Luo C R, Kang L, Zhao Q, Fu Q H, Song J, Zhao X P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康 雷、赵 乾、付全红、宋 娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]
- [15] Zheng Q, Zhao X P, Fu Q H, Zhao Q, Kang L, Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、付全红、赵乾、康 雷、李明明 2005 物理学报 **54** 5683]
- [16] Zhang G M, Peng J C, Jian Z J, Huang X Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1846 (in Chinese) [张高明、彭景翠、翦知渐、黄小益 2006 物理学报 **55** 1846]
- [17] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2194 (in Chinese) [孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 2194]
- [18] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2200 (in Chinese) [孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 2200]
- [19] Wu M F, Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5790 (in Chinese) [武明峰、孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 5790]
- [20] Wang H L, Wu Q, Meng F Y, Li L W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2608 (in Chinese) [王海龙、吴 群、孟繁义、李乐伟 2007 物理学报 **56** 2608]
- [21] Cao J X, Hu W, Luo H L, Yang X B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2131 (in Chinese) [曹京晓、胡 巍、罗海陆、杨湘波 2007 物理学报 **56** 2131]
- [22] Dai X Y, Wen S C, Xiang Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 186 (in Chinese) [戴小玉、文双春、项元江 2008 物理学报 **57** 186]
- [23] Shi H Y, Jiang Y Y, Sun X D, Guo R H, Zhao Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 1571
- [24] Jiang Y Y, Shi H Y, Zhang Y Q, Hou C F, Sun X D 2007 *Chin. Phys.* **16** 1959
- [25] Hu Y H, Fu X Q, Wen S C, Su W H, Fan D Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2970
- [26] Topa A L, Paiva C R, Barbosa A M 2005 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **47** 185
- [27] Yang P, Lee D, Wu K 2005 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **45** 207
- [28] Krowne C 1984 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **32** 1224
- [29] Tretyakov S A 1998 *J. Electromagn. Wave Applic.* **12** 821

Slow wave propagation in metamaterial based nonradiative dielectric waveguides and its application^{*}

Yang Rui[†] Xie Yong-Jun Wang Yuan-Yuan Fu Huan-Zhan

(*National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 17 December 2007 ; revised manuscript received 22 January 2008)

Abstract

Different dispersion properties are imparted to nonradiative dielectric (NRD) waveguides by split ring resonator metamaterials. Both longitudinal-section magnetic and longitudinal-section electric modes are capable of propagating very slowly due to the metamaterial bianisotropic effects, and can even approach zero velocity. Enhanced energy flow in the considered structure is also demonstrated under certain conditions. Finally, miniaturization of NRD waveguide based on these unusual properties is proposed.

Keywords : split ring resonator, metamaterials, nonradiative dielectric waveguides, slow wave propagation

PACC : 4110H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60771040) and the New Century Excellent Talents in University (NCET-04-0950).

[†] E-mail : mattomato811118@yahoo.com.cn