

文章编号: 0258-7025(2009)02-0458-04

近零材料特性及应用探讨

吴中元¹ 黄铭¹ 杨晶晶² 余江¹ 彭金辉²

(¹ 云南大学信息学院, 云南 昆明 650091; ² 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 分析了二维平行板波导与近零材料(ENZ)的电磁相互作用,证实了近零材料的电磁压缩和超耦合效应。通过改变近零材料区平行板波导的几何形状,发现二维平行板波导存在低频谐振峰、特征峰和高频谐振峰,低频峰的位置由近零材料决定,高频峰的位置由几何形状决定。在超耦合区填充不同介电常数的材料,发现谐振峰产生红移,并且低频峰位于特征峰的左侧。基于近零材料的特性,提出光传感器和光功分器两个应用方案,在 1.2~2 μm 波段,光传感器的灵敏度为 $\Delta\lambda/\Delta\epsilon=100$ nm;在 1.3 μm 波段,光功分器的插入损耗接近 0 dB。仿真结果表明近零材料具有特异的电磁性能,可用于设计光传感器和光分配器,有望在光通信和光电子器件领域得到广泛应用。

关键词 物理光学; 近零材料; 有限积分法; 光传感器; 光分配器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0458

Properties of Epsilon-Near-Zero Materials and its Potential Application

Wu Zhongyuan¹ Huang Ming¹ Yang Jingjing² Yu Jiang¹ Peng Jinhui²

¹ School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China
² Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract The interaction of epsilon-near-zero (ENZ) materials with two dimensional parallel-plate waveguide has been analyzed. Electromagnetic wave energy squeezing and supercoupling effects are verified using the full wave simulations. Lower-frequency resonant peak, characteristic peak, higher-frequency resonant peak was observed by varying the shape of the waveguide filled with ENZ materials. It is shown that the position of lower-frequency resonant peak is dependent on ENZ materials, and the position of higher-frequency resonant peak is dependent on Fabry-Pérot resonances. Red shift of the resonant peak is observed by selective tuning the permittivity of the materials in the supercoupling region, and lower-frequency resonant peak is on the left-hand side of characteristic peak. Based on the properties of ENZ materials, two potential applications for optical sensor and optical power divider are suggested and numerically studied. In the wavelength range of 1.2~2 μm, sensitivity of the optical sensor is $\Delta\lambda/\Delta\epsilon=100$ nm; Insertion loss of the optical power divider is 0 dB at 1.3 μm. Simulating results show that ENZ materials with intriguing electromagnetic properties are favorable for the tailoring optical sensor and power divider, and may have interesting potential applications in optical communication and optoelectronics devices.

Key words physical optics; epsilon-near-zero materials; finite integration theory; optical sensor; optical power divider

1 引言

众所周知,介电常数和磁导率是用于描述物质电磁特性的基本物理量,决定电磁波在物质中的传播特性。迄今为止,自然界中天然物质的介电常数

和磁导率均大于或等于 1。2000 年,Smith 等^[1,2]利用金属铜的开环共振器和导线组成二维周期性结构,首次在实验室制造出微波频段具有负介电常数和负磁导率的介质材料,引起科学界的轰动。随后,

收稿日期: 2008-08-29; **收到修改稿日期**: 2008-10-17

基金项目: 教育部重点项目(208133)、云南省自然科学基金(2007F005M)、云南省教育厅基金(07Z10875)、国家自然科学基金重点项目(50734007)和国家 973 计划(2007CB613606)资助课题。

作者简介: 吴中元(1984—),男,硕士研究生,主要从事电磁场数值计算方面的研究。E-mail: wzy581@yahoo.com.cn

导师简介: 黄铭(1963—),男,博士,主要从事电磁场数值计算及微波技术应用方面的研究。

E-mail: huangming@ynu.edu.cn (通信联系人)

双负材料(DNG)、左手材料(LHM)、零电(ZE)材料、零磁(ZM)材料、零折射率材料(ZIM)、无穷折射率材料(IIM)、理想电导体(PEC)和理想磁导体(PMC)等电磁材料成为科学研究的热点^[3-6], 科学界将这些材料统称为超材料^[7,8]。由于超材料具有一系列异常的电磁特性,因而具有广阔的应用前景。在超材料的诸多电磁特性中,如何用超材料控制电磁波的辐射方向、传输特性和谐振特性成为人们研究的热点。2006年,Pendry等^[9]理论研究发现通过改变超材料介电常数和磁导率的空间分布可以灵活地控制电磁波的辐射方向;Leonhardt等^[10]创建了基于广义相对论的描述完美透镜、完美电磁斗篷和视界等现象的统一理论;Schurig等^[11]在微波频段实验证明理论。同年,Silveirinha等^[12]理论研究发现用近零材料(ENZ)可压缩电磁波,形成电磁波隧道,从而实现电磁波辐射模式的转换。2007年,Silveirinha等^[13]又提出了用ENZ材料实现电磁波超耦合、压缩和约束的理论;Alù等^[14]分析了ENZ材料表面对电磁波相位的影响。2008年,Edwards等^[15]在微波频段用ENZ材料实验证实电磁波隧道的存在;最近,Alù等^[16]提出在亚波长等离子体波导内的光能压缩和异常光传输机理,并证明ENZ材料光谐振传输与波导形状和长度的弱相关性。

利用 CST 软件模拟二维平行板波导与 ENZ 材料的电磁相互作用,证实 ENZ 材料的电磁压缩和超耦合效应,发现二维平行板波导存在低频谐振峰、特征峰和高频谐振峰。基于 ENZ 材料的特性,提出光传感器和光分配器两个应用方案,该方案有望在光通信和光电子器件领域得到应用。

2 电磁模型

图 1 给出了基于 ENZ 材料的波导结构电磁模型,模型中 H 型隧道(图中阴影部分)为 ENZ 材料,图 1 中电场、磁场和波传输方向分别沿 y 轴、 z 轴和

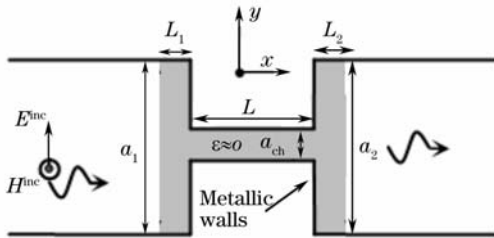


图 1 二维 H 型平行板波导近零材料材料模型

Fig. 1 Geometry of a 2D H-shape parallel-plate waveguide with an ϵ -near zero material section

x 轴, $a_1 = a_2 = a, L_1 = L_2 = a_{ch} = 0.1a, L = a$, 二维平行板金属波导沿 z 轴无限长,图 1 为 $z = 0$ 的剖面图。ENZ 材料采用无耗 Drude 色散模型: $\epsilon = 1 - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\Gamma)$, 其中 ω_p 为等离子频率, Γ 为碰撞角频率(rad/s),在仿真中 $\omega_p a / c = \pi/2$, 当 $\omega = \omega_p$, 且 $\omega_p \geq \Gamma$ 时,模型中阴影部分材料的介电常数近似为零,即阴影部分为 ENZ 材料,计算中取 $a = 326 \text{ nm}$, 则 $\omega_p = 2\pi f_p, f_p = 230 \text{ THz}$ 。

3 仿真结果与讨论

3.1 电磁压缩和超耦合效应

为了研究 ENZ 材料对电波传输的影响,仿真了图 1 所示电磁模型中的能流分布图($f = f_p$ 和 $\Gamma/\omega_p = 0.001$),结果如图 2 所示。由图 2 可见, TM 波从波导左端输入,经过 ENZ 材料向右端传输, H 型隧道左边的 ENZ 材料起到能量压缩作用,右边起到能量扩展作用,中间区能量密度最高, a_{ch} 越小,中间区域能量密度越高, ENZ 分别起到电磁能量压缩、电磁波隧道和电磁能量扩展作用,即在二维平行板波导与 ENZ 材料相互作用模型中,存在电磁压缩和超耦合效应。

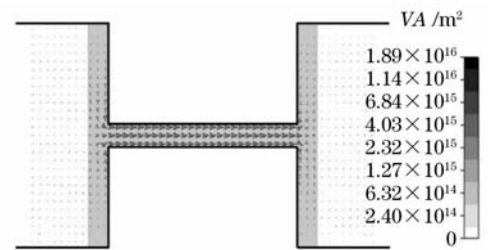


图 2 图 1 所示电磁模型中的能流分布图

Fig. 2 Distribution of the power flow of the model in Fig. 1

为了深入研究该效应,并探讨其应用,仿真了 ENZ 材料在不同碰撞频率下的传输系数以及 H 型

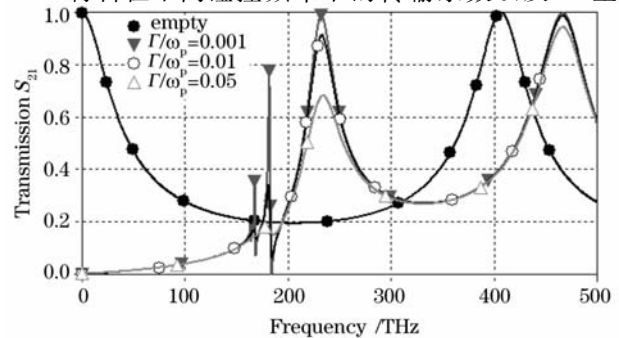


图 3 传输系数幅度与频率和 Γ/ω_p 的关系

Fig. 3 Amplitude of the transmission coefficient as a function of frequency and different values of Γ/ω_p

隧道内填充材料为空气时的传输系数,结果如图3所示。由图3中可知,在H型隧道内填充材料为ENZ时,频带内存在特征峰、低频谐振峰和高频谐振峰,特征峰频率约为183 THz,低频峰谐振频率为 $f_p=230$ THz,高频峰频率约为465 THz;ENZ材料的碰撞频率越小,低频谐振峰强度越大,对高频谐振峰强度影响小,谐振峰的位置都不变;在H型隧道内填充空气时,低频谐振峰和特征峰均消失,仅存在高频峰。该结果与文献[13]中图2的结果相符,证明了仿真模型和方法的正确性。

图4显示了隧道的几何结构对电磁波传输特性的影响,图4中模型1为H型隧道,模型2为异型隧道($b=h=0.1a$),仿真时 $\Gamma/\omega_p=0.001$ 。从图4可知,波导隧道的几何结构对二维平行板波导的特征峰和低频谐振峰没有影响,ENZ材料决定了它们的传输特性;隧道的几何结构对高频峰的影响非常明显,法布里-珀罗谐振决定了高频峰的特性。分别改变H型隧道ENZ材料左右两侧和中间区域的厚度,发现对特征峰和低频谐振峰无影响(图4中未画出)。

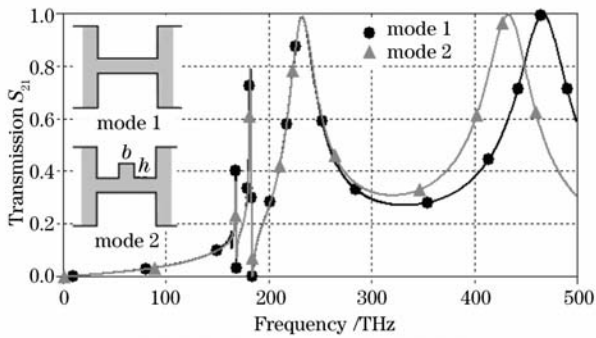


图4 传输系数幅度与频率和隧道几何结构的关系

Fig. 4 Amplitude of the transmission coefficient as a function of frequency for different models

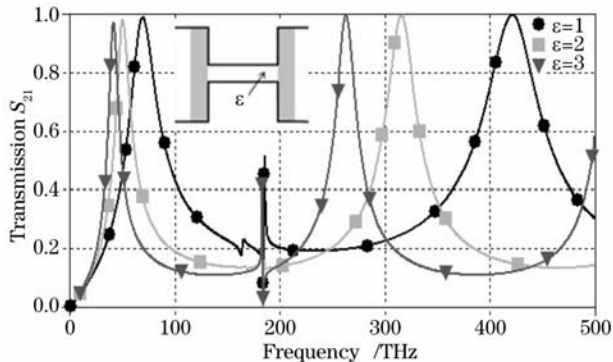


图5 传输系数幅度与频率和介质材料 ϵ 的关系

Fig. 5 Amplitude of the transmission coefficient as a function of frequency and dielectric material with different permittivity ϵ

当H型隧道中间的ENZ材料用其它传统介质填充时,其传输特性如图5所示。由图5可知,在几何结构不变的情况下,中间材料为传统介质时,其介电常数变化不仅改变了高频谐振峰的位置,而且对低频谐振峰也产生了很大影响,只有特征峰(约183 THz)的位置不变;中间材料的介电常数增大时,高频峰和低频峰都发生了红移,高频峰的红移现象更明显。更有趣的是,低频谐振峰移到了特征峰的左边,尚不清楚产生这种奇异现象的物理机制。

3.2 应用探讨

为了探讨ENZ材料在传感器中的应用,建立了图6插图中所所示的光传感器模型,图6中深灰色区为待检测样品(sample),样品介电常数分别为2,5和10,宽度为20 nm;浅灰色区为ENZ材料。由图6所示仿真结果可以看出,样品介电常数增大,低频谐振峰产生了红移,而高频谐振峰不变,在1.2~2 μm 波段,光传感器的灵敏度可以达到 $\Delta\lambda/\Delta\epsilon=100$ nm。与微波传感器比较^[17,18],其灵敏度高。

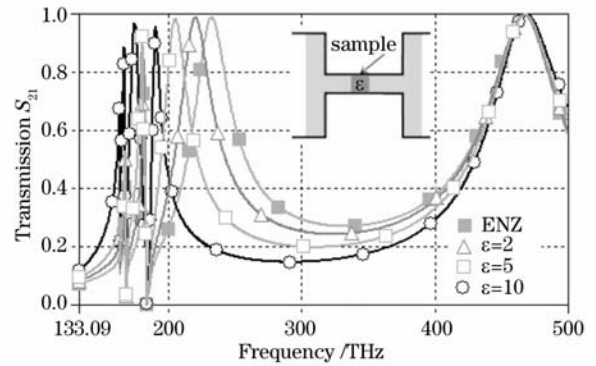


图6 光传感器模型及其传输系数

Fig. 6 A model of optical sensor and the transmission coefficient

图7为光功分器模型,其中 $a_1=a=326$ nm, $a_2=a_3=a_4=a/2$, $\Gamma/\omega_p=0.001$,浅灰色区为ENZ材料,厚度为 $0.1a$,TM波由 a_1 端口输入。对于图7(a)所示的二功分器,仿真结果如图7(b)所示,主要技术参数:插入损耗为0.04 dB,输出均匀度为0.09 dB,3 dB带宽为47 THz。对于图7(c)所示的三功分器,仿真结果如图7(d)所示,主要技术参数为:插入损耗为0.04 dB;输出均匀度0.09 dB,3 dB带宽为44 THz。在1.3 μm 波段,插入损耗接近0 dB。更有趣的是,与其他光功分器比较^[19,20],只要增加输出端口,根据上面的方法即可方便的设计出N功分器。

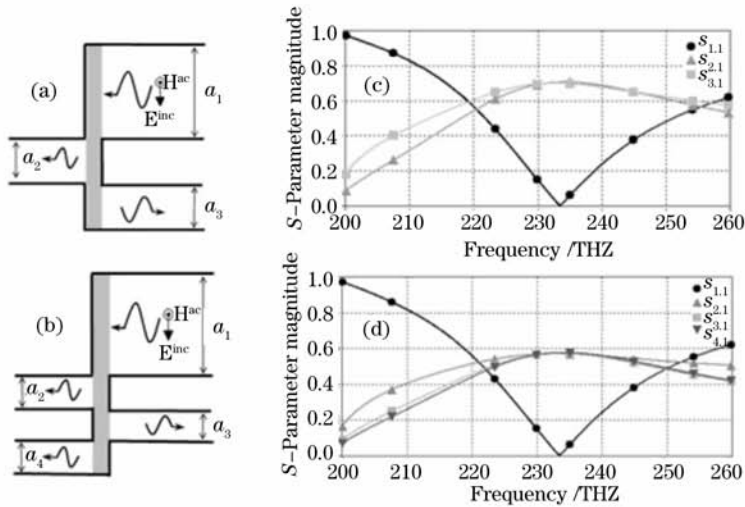


图7 光功分器模型及其传输系数

Fig. 7 Model of optical power divider and its transmission coefficient

4 结 论

通过分析二维平行板波导与 ENZ 材料的电磁相互作用,证实了 ENZ 材料的电磁压缩和超耦合效应,并在此基础上提出了光传感器和光功分器两个应用方案,结果表明在 $1.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 波段,光传感器的灵敏度可以达到 $\Delta\lambda/\Delta\epsilon = 100 \text{ nm}$;在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段,光功分器的插入损耗接近 0 dB 。

参 考 文 献

- 1 D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**: 4184~4187
- 2 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**: 77~79
- 3 Ding Wei, Zhang Yu, Liang Changhong. Characteristics of Gaussian beam propagation through double negative media slab [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 129~133
- 丁伟,张玉,梁昌洪. 高斯波束在双负媒质中的传播特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 129~133
- 4 Hu Baojing, Huang Ming, Yang Jingjing *et al.*. Focus character for double-negative dielectric volume with regular polygon structure under electric line source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 301~303
- 胡宝晶,黄铭,杨晶晶等. 线电流源激励下正多边形双负介质的聚焦特性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2): 301~303
- 5 Liu Yahong, Luo Chunrong, Zhao Xiaopeng. H-shaped structure of left-handed metamaterials with simultaneous negative permittivity and permeability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5883~5889
- 刘亚红,罗春荣,赵晓鹏. 同时实现介电常数和磁导率为负的 H 型结构单元左手材料[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 5883~5889
- 6 Wen Shuangchun, Dai Xiaoyu, Xiang Yuanjiang. Research advances in nonlinear optics of metamaterials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 803~810
- 文双春,戴小玉,项元江. 超常介质非线性光学研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 803~810
- 7 A. Sihvola. Metamaterials in electromagnetics [J].

- Metamaterials*, 2007, **1**: 2~11
- 8 E. Shamonina, L. Solymar. Metamaterials: How the subject started [J]. *Metamaterials*, 2007, **1**: 12~18
- 9 J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780~1782
- 10 U. Leonhardt. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1777~1780
- 11 D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977~980
- 12 M. G. Silveirinha, N. Engheta. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**: 157403
- 13 M. G. Silveirinha, N. Engheta. Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **76**: 245109
- 14 A. Alù, M. G. Silveirinha, A. Salandrino *et al.*. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: Tailoring the radiation phase pattern[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **75**: 155410
- 15 B. Edwards, A. Alù, M. E. Young *et al.*. Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**: 033903
- 16 A. Alù, N. Engheta. Light squeezing through arbitrarily shaped plasmonic channels and sharp bends[J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **78**: 035440
- 17 Huang Ming, Yang Jingjing, Wang Jiaqiang *et al.*. Microwave sensor for measuring the properties of a liquid drop [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**: 1934~1938
- 18 Huang Ming, Peng Jinhui, Yang Jingjing *et al.*. Microwave cavity perturbation technique for measuring the moisture content of minerals sulphide concentrate [J]. *Minerals Engineering*, 2007, **20**: 92~94
- 19 Ma Huilian, Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing *et al.*. Study and fabrication of 1×16 MMI GaAs optical power splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 878~881
- 马慧莲,杨建义,江晓清等. 1×16 多模干涉型 GaAs 光功分器的研制[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 878~881
- 20 Li Shu, Lin Qiao, Ni Wei *et al.*. A novel compact soft-lithography based polymeric multimode power splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1062~1066
- 李书,林巧,倪玮等. 基于软光刻的高聚物多模光功率分配器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1062~1066