

基于近零折射率材料准直和分光器件的设计

朱宇光^{1,2} 方云团³ 胡维礼¹

¹南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094

²常州工学院计算机信息工程学院, 江苏 常州 213002

³江苏大学计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 由于零折射率介质对于自由空间来说具有零相移和阻抗匹配的特性,因而可以用来控制电磁辐射模式。设计了新型的准直和分光器件结构,该器件建立在近零折射率材料基础上。该结构能将散射光转化成准直光束及分光的功能,分光束数、光束宽度和光束方向可以精确控制。仿真结果表明设计的结构具有完美的性能。

关键词 光学设计;零折射率材料;准直器;分光器

中图分类号 O436.2; TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.012205

Design of Collimator and Optical Splitter Based on Near-Zero-Index Materials

Zhu Yuguang^{1,2} Fang Yuntuan³ Hu Weili¹

¹*School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

²*School of Computer Information and Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China*

³*School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*

Abstract Due to the zero phase variation and impedance matching to free space, zero-index material is used to control the electromagnetic radiation patterns. We design a new type collimator and optical splitter structure based on near-zero-index material. Such structures can implement the beam transformation from cylindrical wave to parallel wave and optical splitting. The numbers of the splitting beams, the width and the direction of the beams can be correctly tailored. All the simulation results show that our designs have perfect performance.

Key words optical design; zero-index material; collimator; optical splitter

OCIS Codes 220.2740; 140.3300; 230.1360; 160.4670

1 引言

超材料的出现打开了用超常值介电常数和磁导率介质设计新材料的大门^[1-2]。这些新材料大大提高了人们利用和控制电磁(EM)场的能力。研究者已经设想出很多有趣的电磁波功能器件,例如隐形斗篷^[3-4],电磁场集中器^[5-6]、场旋转器^[7]及超级透镜^[8]。近期,介电常数和磁导率同时或分别等于零的零折射率材料(ZIM)作为一种特定类型的超常材料,已成为一个方兴未艾的科学研究主题^[9-14]。Enoch等^[9]的研究报告称这种超材料可以用来提高嵌入式波源发射的方向性;Silveirinha等^[10-11]提出,电磁波可以隧穿充满了介电常数 ϵ 近零(ENZ)材料的非常狭窄的通道;Adams等^[12]的研究表明可以用ENZ材料的亚波长孔径来提高光的

收稿日期: 2013-08-15; 收到修改稿日期: 2013-09-20; 网络出版日期: 2013-12-16

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(11KJD520002)、常州市科技计划(CC20120030)

作者简介: 朱宇光(1966—),男,博士研究生,副教授,主要从事光电通信技术、智能控制、下一代网络技术等方面的研究。E-mail: zhuyg@czu.cn

导师简介: 胡维礼(1941—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事智能控制与智能系统、非线性控制理论及应用、高精度数字交流伺服系统等方面的研究。E-mail: wsk6092@126.com

注入; Ziolkowski^[13]研究了一个匹配的零折射率平板, 可以将产生自一个内部或外部线源的圆柱形波转化成平面波前。该现象的物理原理是在零折射率介质中电磁波的传播具有零相位变化。对于一个内部线光源, 电磁波在输出面有相同的相位, 这样就转换成一个平面波前。然而, 对于外部线光源, 电磁波在输入面的各点上有不同的相位, 这是因为光源点与输入面各点间的距离不同。因此, 电磁波在输出面的各点也有不同的相位。通过详细的观察可以发现, 在文献[13]的图 10 中电磁波的输出不是完全平行的光束。同样地, 从零折射率平板^[13]输出光束的宽度不能绝对确定。Alù等^[14]用数值方法研究了从复杂形状的 ENZ 材料发出的波的散射并得出结论: 通过恰当地裁剪 ENZ 平板的出射面, 人们可以控制和改变出射波的形状和相位的分布。他们的重点在于调节电磁波的波相分布。然而, 由于 ENZ 材料和自由空间之间的强阻抗失配, 在 ENZ 材料表面存在很大的反射。虽然反射不影响相位分布, 但它改变了电场强度的分布。因此, 具有均匀的场分布和确定宽度的电磁波束是无法获得的。另外, 文献[15]通过改变椭圆介质柱与水平轴之间的角度设计了一种基于正方形晶格二维光子晶体自准直效应的 1×3 分束器; 文献[16]设计了用于 LED 光源准直的一种折、反射式光学系统; 文献[17]基于不同结构的光子晶体具有不同禁带范围的特性, 设计了一种光子晶体偏振光分束器。

本文以控制电磁辐射模式为目的进一步开发了零折射率材料的应用。不同于前述研究^[13-17], 我们侧重于调节电磁波的场强分布。通过对近零折射率材料的结构设计, 可以将一散射电磁波转换成几束形状完全相同的平行波束, 即同时实现准直和分光双重功能。

2 主要研究内容与结果

2.1 设计原理和方法

本工作是在前期设计的基础上^[18]进行的, 前期设计如图 1 所示。一个二维带弧形孔的矩形平板由零折射率材料组成[图 1(a)], 该结构被称为凹板。一激发出柱面波的线源被放置在弧形的中心。弧形面和右侧的水平界面分别成为入射面和输出面。所有从凹板发出的电磁波将转变成一个平行波束, 波束的宽度正好与输出面的宽度相等, 且可以通过改变输出面的尺寸来调整。图 1(a)的一个变化的设计显示在图 1(b)中, 矩形平板改成了三角形平板。因此输出平行波束改变了方向, 方向由三角形平板内部角 α 决定。

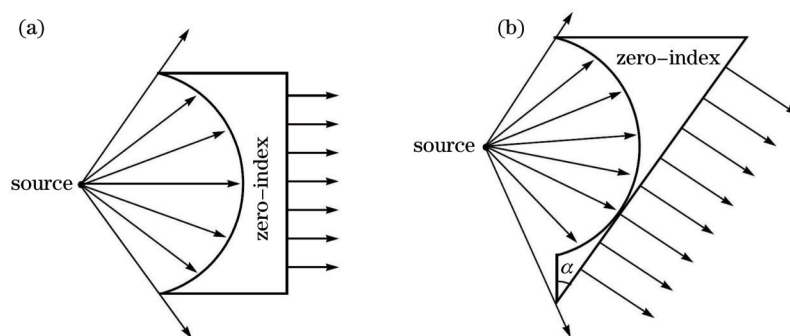


图 1 凹板结构的电磁波转化示意。(a) 矩形板结构; (b) 三角形板结构

Fig.1 Structures of a concave slab to transform the EM waves. (a) Rectangular slab; (b) triangular slab

图 1 是设计光准直器件的原理, 用来将发散光转变成准直平行光。本文在此基础上进一步设计新型的分光器。

传统分光器是一种无源器件, 由入射和出射狭缝、反射镜和色散元件组成。分光器的关键部件是色散元件, 现在一般使用光栅。本设计的示意图如图 2 所示, 在图 1 的凹板结构基础上进行了改进, 将原来结构的一个出射平面变为数个截面为半等变形的平面。

在空气与介电常数为 ϵ 和磁导率为 μ 的各向同性材料的界面, 根据菲涅耳方程, 对 TE 和 TM 波的反射率分别为

$$R_{\text{TE}} = \left(\frac{\cos \theta_i - \cos \theta_t / z}{\cos \theta_i + \cos \theta_t / z} \right)^2, \quad (1)$$

$$R_{\text{TM}} = \left(\frac{\cos \theta_i - \cos \theta_r}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \right)^2, \quad (2)$$

式中 θ_i 和 θ_r 分别为入射角和折射角, $z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 为各向同性材料的阻抗。由于 ε 和 μ 均接近 0, 材料的阻抗和空气阻抗相匹配, 导致反射率近似为 0。在图 1 中, 由于孔的形状和波源的位置, 所有电磁波都从法线方向进入凹板结构中。对任何从线源发射到凹板的电磁波, 从菲涅耳方程可得出

$$R_{\text{TE}} = R_{\text{TM}} \approx 0. \quad (3)$$

由于波源到所有入射面上的点之间的距离是相同的, 电磁波进入凹板具有相同的相位和最小的反射率。在 ZIM 材料中因为折射率近似为 0, 电磁波传播的光程也近似为 0, 因此电磁波在 ZIM 材料中几乎没有相位的变化。当离开输出面时电磁波仍有相同的相位, 这时电磁波总是沿与输出表面垂直的方向传播。对于图 2 所示结构, 从线光源发出的发散光从结构出射时将等分成垂直于各个出射平面的平行光束, 实现了准直和分光双重功能。此时光束数目和方向可以按需要调节。进一步, 如果调节各出射平面的宽度, 那么就可以得到不同比例宽度的准直光束。

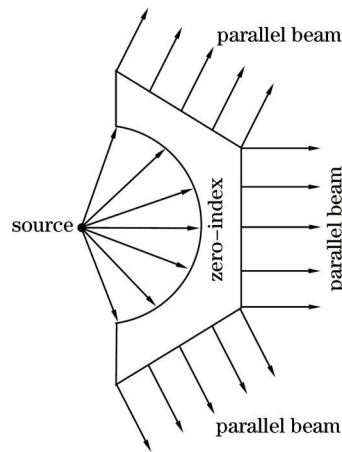


图 2 基于近零折射率材料的准直分光器示意图

Fig.2 Schematic of the the collimator and optical splitter based on near-zero-index materials

2.2 仿真结果

为了证明上述设计, 对模拟结构的准直分光器进行了基于有限元方法的 COMSOL Multiphysics 软件数值仿真。在仿真中, 折射率近零材料的介电常数 ε 和磁导率 μ 均假设为 0.0001。仅做了电磁波在 TM 模式下的仿真, 但结果对 TE 波同样有效。

在图 2 的基础上, 零折射率材料出射面分别设计为正方形的两条边, 正六边形的三条边, 正八边形的四条边。图 3 分别显示了准直分光器二分束、三分束和四分束情形下磁场强度 Z 分量分布的仿真结果, 光源频率均为 20 GHz。采用的结构尺寸分别为: 二分束情形下的边长为 0.2121 m; 三分束情形下的边长为 0.15 m; 四分束情形下的边长为 0.115 m。从图中可见每种结构中的各个出射面上均得到了均匀的准直光束, 各光束的光强分布和相位分布均是等价的。

为观察传播中波束的变化情况, 我们作出了磁场振幅随方向的分布图。图 4 分别显示了二分束、三分束和四分束模拟结构磁场振幅在 9 GHz 和 20 GHz 下的分布。可见各分束呈等角分布且形状相同, 每个面光束的宽度在各个方向是一致的, 且在传播中变化很小。

从仿真结果可以看出, 在折射率近零材料内部, 电磁场在空间保持不变。此特性缘于材料的介电常数 ε 近似为 0。对于单色波, 按照 Maxwell 方程有

$$\mathbf{E} = \frac{i}{\omega \varepsilon \varepsilon_0} \nabla \times \mathbf{H}. \quad (4)$$

为保持 \mathbf{E} 为有限值, $\nabla \times \mathbf{H}$ 必须等于 0, 因此在近零折射率材料中的磁场 (H_z) 必须为常数。

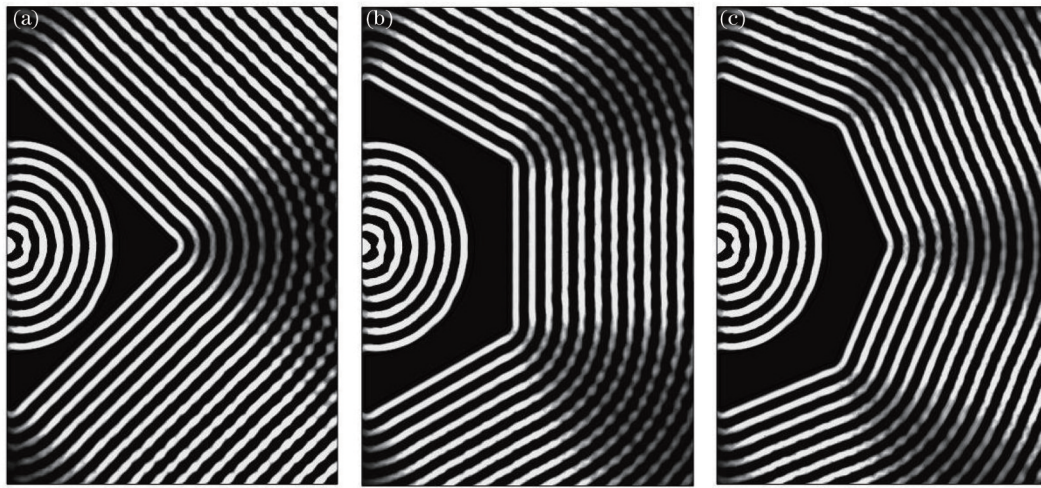


图3 磁场强度 H_z 分量分布,光源频率均为 20 GHz。(a)二分束;(b)三分束;(c)四分束

Fig. 3 Distribution of the magnetic field H_z . The sources are all with the frequency of 20 GHz. (a) Twin beams; (b) triple beams; (c) quaternion beams

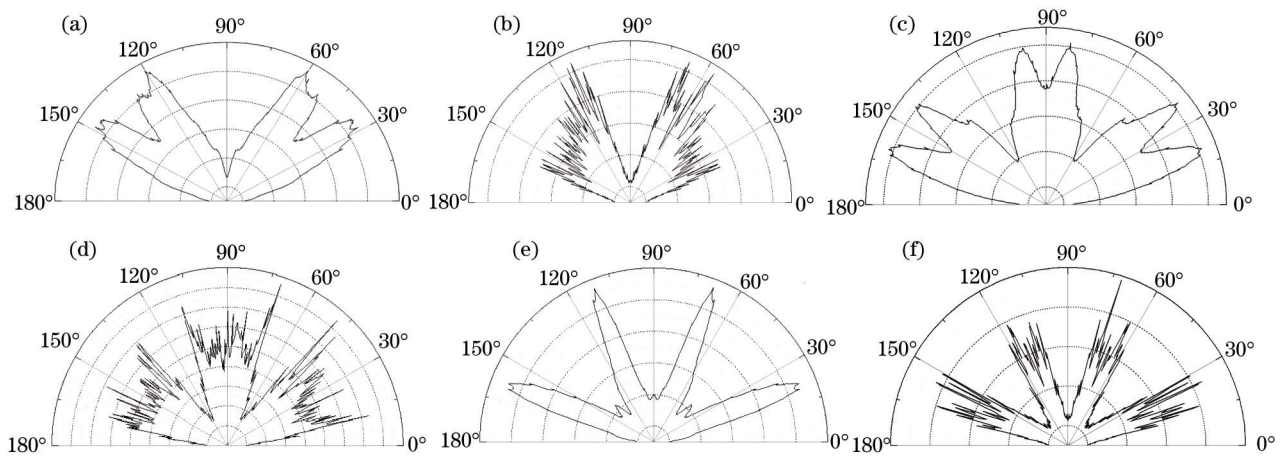


图4 磁场振幅分布。(a)二分束,频率为 9 GHz;(b)二分束,频率为 20 GHz;(c)三分束,频率为 9 GHz;(d)三分束,频率为 20 GHz;(e)四分束,频率为 9 GHz;(f)四分束,频率为 20 GHz

Fig.4 Amplitude distribution of magnetic field. (a) Twin beams with source frequency of 9 GHz;(b) twin beams with source frequency of 9 GHz; (c) triple beams with source frequency of 9 GHz; (d) triple beams with source frequency 20 GHz; (e) quaternion beams with source frequency of 9 GHz;(f) quaternion beams with source frequency of 20 GHz

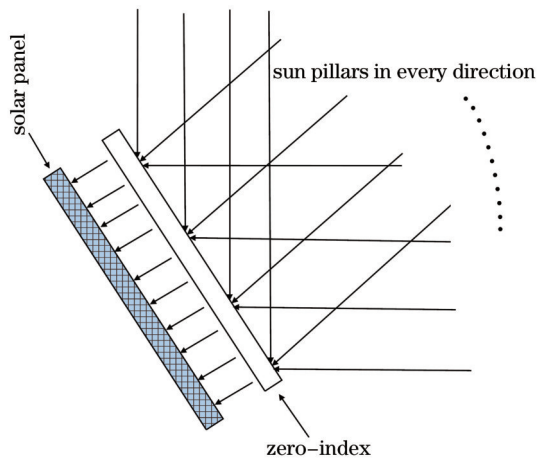


图5 太阳能增效板示意图
Fig.5 Schematic of the solar energy synergia slab

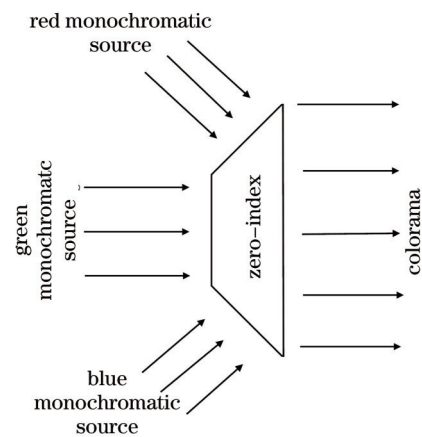


图6 可调彩色光发生器示意图
Fig.6 Schematic of the tailoring chromatic generator

在本文准直分光器设计的基础上,将来还可以进一步推广近零折射率材料的应用研究。比如,可以设计基于近零折射率材料的太阳能增效板,如图5所示。无论太阳光线从何角度入射至增效板上,增效板均将其转化成垂直于板面出射,将太阳能多晶硅板与增效板平行安装,那么太阳能多晶硅板将接收所有方向入射的太阳光,大大提高接收效率。这种方法显然比文献[19]所提方案简单、易实现且高效。另外,将三分束分光器结构稍做改变,将其出射面变为三个入射面、而原入射面改成平面并作为出射面,那么当用单色红蓝绿准直光束分别垂直入射至三个入射面时,分别控制入射三原色光的强度,可在出射面得到颜色可控的彩色光(图6)。

自然界不存在零折射率材料,但零折射率材料可以通过人工的设计来实现,某些金属在特定频率下也可以实现介电常数近零。Silveirinha等以介电常数近零的金属材料为背景,嵌入特定的非磁性材料,通过合适的设计实现了整体结构的等效介电常数和磁导率均近似为零,从而实现了人工的近零折射率材料。

3 结 论

基于近零折射率材料设计了一种新型的准直分光器。此种准直分光器不仅可以由散射的光转换成垂直于出射面的均匀光束,还可以根据结构的设计实现不同要求的分光功能,有望在未来的光子器件中发挥重要作用。

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(18): 4184-4187.
- 2 D R Smith, J B Pendry, M C K Wiltshire. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, 305(5865): 788-792.
- 3 U Leonhardt. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- 4 J B Pendry, D Schurig, D R Smith. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- 5 M Rahm, D Schurig, D A Roberts, *et al.*. Design of electromagnetic cloaks and concentrators using form-invariant coordinate transformations of Maxwell's equations[J]. *Photon Nanostruct Fundam Appl*, 2008, 6(1): 87-95.
- 6 H Y Chen, C T Chan. Transformation media that rotate electromagnetic fields[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(24): 241105-241107.
- 7 M Yan, W Yan, M Qiu. Cylindrical superlens by a coordinate transformation[J]. *Phys Rev B*, 2008, 78(12): 125113-125119.
- 8 T Yang, H Y Chen, X D Luo, *et al.*. Superscatterer: enhancement of scattering with complementary media[J]. *Opt Express*, 2008, 16(22): 18545-18550.
- 9 S Enoch, G Tayeb, P Sabouroux, *et al.*. A metamaterial for directive emission[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(21): 213902-213905.
- 10 M Silveirinha, N Engheta. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(15): 157403-157406.
- 11 M Silveirinha, N Engheta. Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using ϵ near-zero metamaterials[J]. *Phys Rev B*, 2007, 76(24): 245109-245125.
- 12 D C Adams, S Inampudi, T Ribaudou, *et al.*. Funneling light through a subwavelength aperture with epsilon-near-zero materials[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107(13): 133901-133905.
- 13 R W Ziolkowski. Propagation in and scattering from a matched metamaterial having a zero index of refraction[J]. *Phys Rev E*, 2004, 70(4): 046608-046619.
- 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(15): 155410-155422.
- 15 Zhou Xingping, Shu Jing. Novel 1×3 splitter based on photonic crystal self-collimation effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0423002.
- 周兴平, 疏 静. 基于光子晶体自准直效应的新型 1×3 分束器[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0423002.
- 16 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, *et al.*. Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. *Laser*

- & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 022203.
- 苏宙平, 阙立志, 朱焯炜, 等. 用于LED光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 022203.
- 17 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062304.
- 周飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062304.
- 18 Yuntuan Fang, Jijun Wang, Zhili Lin. Tailoring radiation pattern through designed structures using near-zero-index materials[J]. Optics and Spectroscopy, 2013, 115(1):121-127.
- 19 Hao Wenwen, Yu Guiying, Hu Xing. Solar concentrating system based on planar waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 082202.
- 郝雯雯, 余桂英, 胡兴. 基于平板型导光板的太阳能聚光系统[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 082202.
- 20 M Silveirinha, N Engheta. Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media[J]. Phys. Rev. B, 2007, 75(7): 075119.