

平均折射率为零的光子晶体中缺陷模频率特性的实验研究*

刘丽想 董丽娟 刘艳红 杨春花 杨成全 石云龙[†]

(山西大同大学固体物理研究所,大同 037009)

(2011年1月14日收到;2011年5月10日收到修改稿)

利用传输线技术制备了左手材料,将左手材料与正常材料交替排列组合成平均折射率为零的一维光子晶体.该光子晶体在特定频段具有光子带隙,带隙不随晶格尺度和入射角的变化而改变.通过掺杂技术破坏光子晶体的周期性,可在禁带中引入缺陷模,这种结构的光子晶体可用于实现滤波器小型化和超强耦合.研究表明,通过调节缺陷的厚度可以控制缺陷模的频率,这为调节频率提供了一种方法.实验与仿真结果相符.

关键词: 左手材料, 复合左右手传输线, 光子晶体

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb

1. 引言

光子晶体是一种由介电材料周期性排列构成的人工晶体,电磁波在光子晶体中传播时由于多重相干散射形成能带和能隙结构^[1-3].左手材料也是一种人工合成微结构器件,由于其结构尺度远远小于入射电磁波波长,因此在该频段可视其为均匀介质,定义为传统意义的“材料”.当电磁波在该介质中传播时,电矢量、磁矢量和波矢方向形成左手螺旋关系,介质折射率为负,这样就会产生许多新的物理现象,如逆斯涅耳定律、逆 Cherenkov 效应、逆多普勒效应和逆 Goos-Hanchen 位移效应等等^[4-8].通过改变左手材料结构单元及排列方式可实现众多奇特的电磁性质,在左手材料的研究过程中还利用了光子晶体理论.2000年,Smith等^[9]把金属线和金属谐振环进行周期性排列,第一次制造出了左手材料.左手螺旋特性得到实验的证明,使得左手材料迅速成为物理学和材料科学领域的一个研究热点.由于左手材料的电磁特性取决于结构单元,因此等效参数随频率的不同而改变,表现出很强的色散特性.左手材料应用研究的关键是参数设计要

与实际相一致,即能够制备具有特定功能的器件.当介质折射率为零时,电磁波的传播可表现出相位变化为零、隧穿和超强耦合等特性^[10-12].Jiang等^[13]提出由正负折射率材料交替排列形成的一维光子晶体,通过调节折射率和结构参数可在光子晶体平均折射率为零的频段实现光子带隙,这种带隙的带边几乎不随入射角和偏振变化,与晶格常数的标度无关且受晶格无序的影响很小.当光子晶体的周期性被破坏后,禁带中将引入局域化缺陷模,该缺陷模频率也不随晶格常数标度的变化,这一特性在滤波器小型化领域具有广阔的应用前景.平均折射率为零的光子晶体中缺陷模的频率研究为该项技术的应用提供了有力依据.

文献[13]通过改变集总元件的参数来控制带隙的带边,但有关带隙中缺陷模频率的变化规律研究的报道较少.本文根据传输线理论,采用贴片电容和贴片电感技术设计左手材料^[14,15].将左手材料与正常材料进行周期性排列,制备出在特定频段平均折射率为零且在该频段具有带隙的光子晶体.通过掺杂技术破坏光子晶体的周期性,从而在光子带隙中引入局域化缺陷模,改变掺杂厚度得到缺陷模的变化规律.利用 CST 仿真软件、LPKEH100 型刻板机和 N5230C 型

* 国家自然科学基金(批准号:10974123)、山西省自然科学基金(批准号:2010021006)和山西省高新技术产业化基金(批准号:2010018)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: Shi_yunlong@yahoo.com.cn

矢量网络分析仪进行仿真和实验研究.

2. 原理及结构参数设定

电磁波在普通微带线中传播时具有损耗低、带宽宽的特点. 使用微带线加工成电磁器件不仅结构连续而且操作简单, 这使得以微带线为基础的加工技术成为制备左手材料的重要方法. 这一技术的理论依据是分布参数电路理论, 将基本电路理论和电磁场理论相结合, 研究微波传输和微波网络特性. 利用电路板制作技术把微带线加工成具有一定形状的结构单元, 当电磁波在微带线中传播时, 由于结构不同电磁波体现不同的传播特性. 通过调整结构或添加集总元件可实现对电磁波传播特性的控制, 在特定频段内电磁波波矢与能流反相, 呈现左手螺旋关系, 此时该结构单元的等效介电常数 ϵ_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 同时为负值, 则折射率 n 为负值. 大量研究结果表明, 在普通微带线上加载串联的电容

和并联的电感可使结构单元折射率为负值, ϵ_{eff} 和 μ_{eff} 与频率 ω 的关系可表示为^[13-15]

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx \frac{C_0 - \frac{1}{\omega^2 Ll}}{\epsilon_0 p}, \quad (1)$$

$$\mu_{\text{eff}} \approx \frac{p \left(L_0 - \frac{1}{\omega^2 Cl} \right)}{\mu_0}, \quad (2)$$

其中 ϵ_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率, L_0 和 C_0 分别为微带线的分布电感和分布电容, L 和 C 分别为并联电感和串联电容, p 为微带线的结构常数^[16], l 为单元长度. 如图 1 所示, 正常材料与左手材料组合在一起构成光子晶体时可实现平均折射率为零, 即

$$n = \frac{n_1 l_1 + n_2 l_2}{l_1 + l_2} = 0, \quad (3)$$

其中 n_1 和 n_2 分别为正常材料和左手材料折射率, l_1 和 l_2 分别为正常材料和左手材料的厚度.

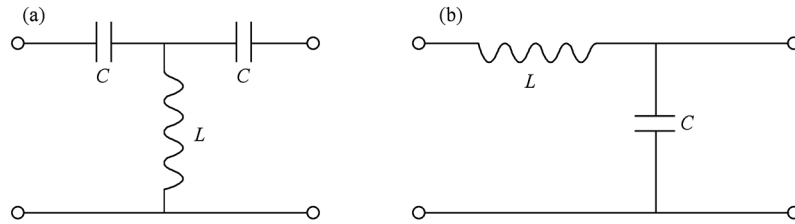


图 1 平均折射率为零时结构单元等效电路图 (a)左手材料等效电路图, (b)正常材料等效电路图

当电磁波在左手材料中传播时, 由 $n = c/\lambda$ 可知此时电磁波波长为无穷大, 相位改变量 $\Delta\phi = nl$ 为零, 即相位不变. 由斯涅耳定律 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ 可知: 当电磁波从左手材料传播至正常材料时, 无论入射角如何变化, 出射波总是垂直于界面. 在这种由平均折射率为零的材料周期性排列形成的光子晶体中掺杂其他材料, 则光子带隙中会出现杂质能级.

在双面覆铜的 FR-4 环氧玻璃布上按照图 1 所示电路的结构单元交替加工 10 个周期, 得到平均折射率为零的光子晶体. FR-4 环氧玻璃布的介电常数 $\epsilon = 4.75$, 厚度 $t = 1.6$ mm. 由传输线理论可知, 在频率 $f = 1$ GHz、特征阻抗 $Z = 50 \Omega$ 时微带线宽度 $w = 2.945$ mm, 因此本文取 $w = 2.945$ mm, 则根据文献^[15]可知正常材料的等效相对介电常数为 $\epsilon_{\text{eff},r} \approx 3.57$, 等效相对磁导率 $\mu_{\text{eff},r} \approx 1$, 又因受微带线的

分布电感和分布电容的影响, 得到频率 $f = 1$ GHz 时正常材料的折射率 $n \approx 2$, 且色散较小. 为阻抗匹配, 令左手材料单元微带线宽度 $w = 2.945$ mm, 则得

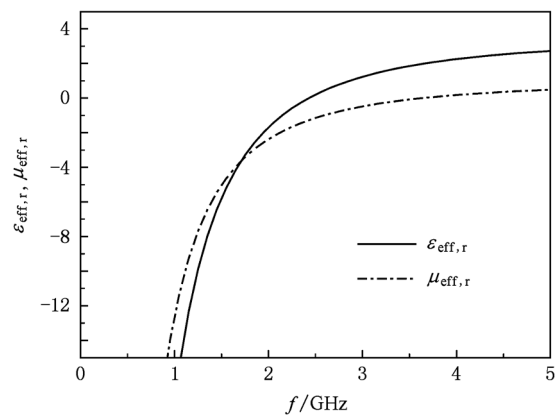


图 2 左手材料单元等效相对介电常数 $\epsilon_{\text{eff},r}$ 和等效相对磁导率 $\mu_{\text{eff},r}$ 随频率 f 的变化

到微带线的结构常数 p 为 4.05. 设 $L = 5.6$ nH, $C = 1.0$ pF, $l = 6$ mm, 则由(1), (2)式可得到左手材料单元的 $\epsilon_{\text{eff},r}$ 和 $\mu_{\text{eff},r}$, 结果如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 当频率 $f = 2$ GHz 时左手材料的 $\epsilon_{\text{eff},r} = -1.69$, $\mu_{\text{eff},r} = -2.37$, $n \approx -2.0$, 说明相等长度的正常材料和左手材料的平均折射率为零.

3. 结果分析

分别利用 CST 仿真软件、LPKEH100 型刻板机和 N5230C 型矢量网络分析仪对平均折射率为零的光子晶体中缺陷模频率特性进行仿真和实验研究. 仿真和实验得到散射参数 S_{21} 与频率 f 关系如图 3 所示.

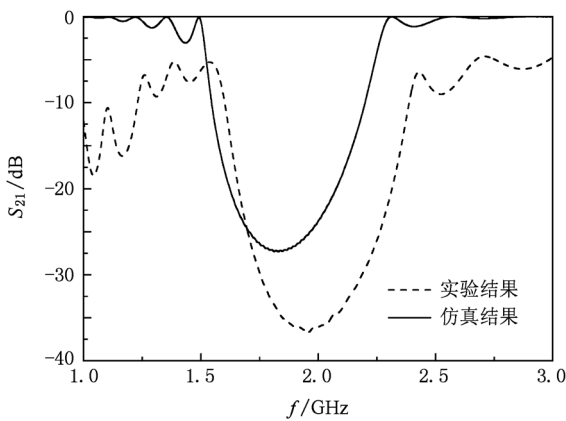


图 3 散射参数 S_{21} 随频率 f 的变化

图 3 中仿真结果显示频率在 1.47—2.3 GHz 之间时为禁带; 实验结果显示频率在 1.54—2.425 GHz 之间时为禁带. 仿真结果和实验结果都显示在 2 GHz 频率附近出现禁带, 带边频率偏差主要来源于加工精度和集总元件性能, 散射参数误差则来源于实际材料的损耗.

由于正常材料具有色散小和便于加工的特点, 本文在光子晶体的中心处添加厚度为 d 的正常材料破坏其周期性, 则禁带中会出现缺陷模. 为阻抗匹配, 选择光子晶体中心处所添加正常材料的结构和参数与上述构成光子晶体的正常材料相同. 当缺陷厚度 $d = 34$ mm 时, 得到的仿真结果和实验结果如图 4 所示.

实验和仿真结果都表明, 在添加缺陷后禁带中出现了透射模(即缺陷模), 实验结果中缺陷模频率为 1.81 GHz. 文献[13]的研究结果表明, 该缺陷模

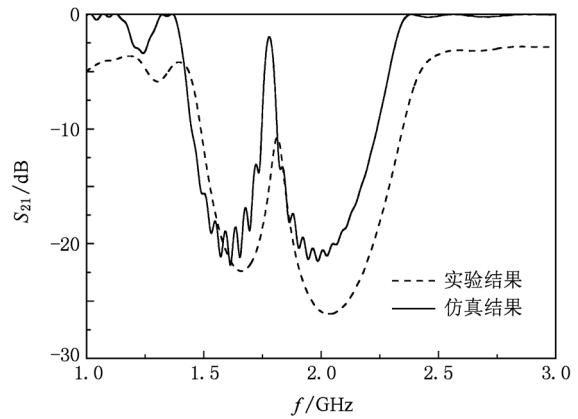


图 4 缺陷厚度 $d = 34$ mm 时散射参数 S_{21} 随频率 f 的变化

的频率具有不随晶格尺度改变而变化的特点. 由此可知, 若需要使滤波器小型化, 可采用减小晶格尺度的方法来减小滤波器的尺寸, 达到小型化的目的, 同时这种方法又不会影响滤波器的频率.

为研究缺陷模频率的变化规律, 调节缺陷的厚度是一种较简单的方法. 逐渐增加缺陷的厚度, 当厚度 d 为 24 和 14 mm 时, 禁带中缺陷模分别如图 5 和图 6 所示.

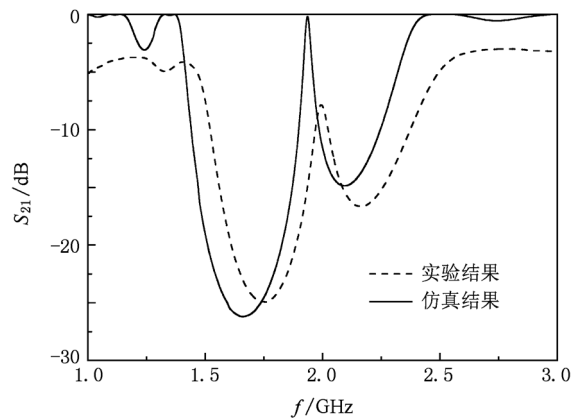


图 5 缺陷厚度 $d = 24$ mm 时散射参数 S_{21} 随频率 f 的变化

图 5 中实验结果显示缺陷模频率为 1.99 GHz, 与厚度 $d = 34$ mm 时相比频率增大了 0.18 GHz. 图 6 中实验结果显示缺陷模频率为 2.23 GHz, 与厚度为 24 mm 时相比频率又有增大. 实验中透射模的频率都在图 3 所示 1.54—2.425 GHz 的禁带频率范围内, 可视为禁带中的缺陷模. 随着缺陷厚度的增加, 缺陷模向低频方向移动, 实验结果和仿真结果相符.

利用仿真软件简便的特点, 在证明理论与实验结果相符合的基础上, 可改变缺陷厚度, 仿真计算得到不同情况下缺陷模的频率, 从而得到缺陷模频

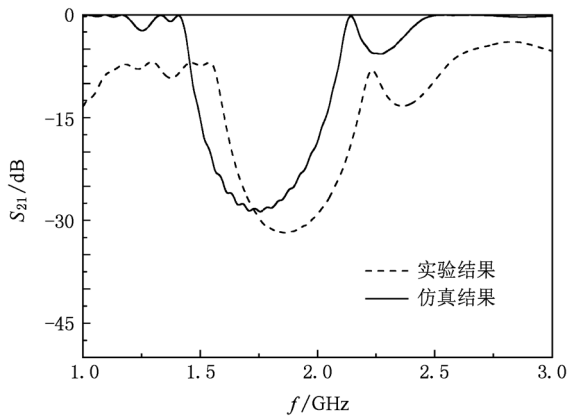


图6 缺陷厚度 $d = 14 \text{ mm}$ 时散射参数 S_{21} 随频率 f 的变化

率 f 随厚度 d 的变化规律,结果如图7所示.本文中厚度选择范围为 $14\text{--}34 \text{ mm}$,即缺陷模首次引入禁带的情况,采样间隔为 2 mm .

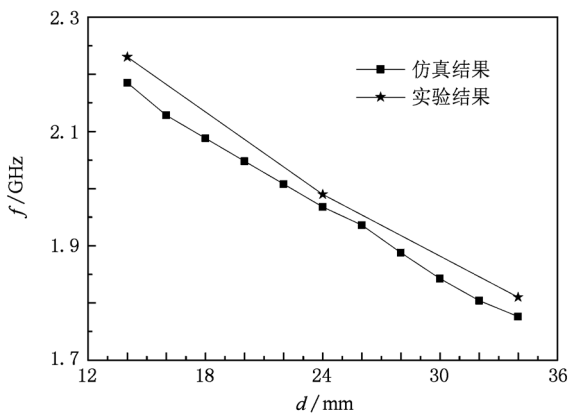


图7 缺陷模频率 f 随厚度 d 的变化

由图7可以看出,随着缺陷厚度的增加,缺陷模频率在禁带中单调减小.由此可知,可通过调节缺陷厚度来调节缺陷模频率.若应用于窄带滤波器,则可通过改变集总元件的参数来确定滤波器的工作频率范围,再根据缺陷模频率随缺陷厚度增加而减小的特点,精确确定滤波器的频率点.

采用上述参数设计得到的样品如图8所示.

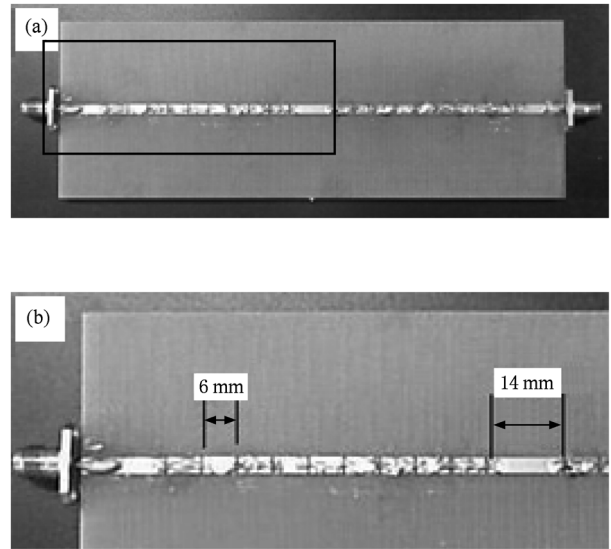


图8 设计得到的样品照片 (a)顶层结构,(b)局部放大

图8(a)为双面覆铜的环氧玻璃布顶层结构,自左至右为连接器,5个平均折射率为零的光子晶体的周期结构,缺陷结构,5个平均折射率为零的光子晶体的周期结构和连接器.图8(b)为(a)图中线框内部分的放大,构成光子晶体的结构单元尺寸均为 6 mm ,结构单元之间焊接贴片电容,在双面覆铜的环氧玻璃布上打孔焊接贴片电感,缺陷的厚度为 14 mm .

4. 结 论

利用传输线技术制备了平均折射率为零的光子晶体,通过掺杂技术在禁带中引入缺陷模.实验研究了缺陷模频率随缺陷厚度不同而变化的规律.研究表明,缺陷模频率随缺陷厚度的增加而减小.这种平均折射率为零的光子晶体所具有的带隙和缺陷模频率不随晶格尺度和入射角的不同而变化,这一特点可用于实现滤波器小型化和超强耦合.器件制备中频率的选择是关键,通过调节缺陷的厚度来确定频率的方法更为简单方便.

[1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059

[2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486

[3] Veselago G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509

[4] Rao X S, Ong C K 2003 *Phys. Rev. B* **68** 113103

[5] Ramakrishna S A 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 449

[6] Chen X F, Jiang M P, Shen X M, Jin Y, Huang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5709 (in Chinese) [陈宪峰、蒋美萍、沈小明、金 钰、黄正逸 2008 物理学报 **57** 5709]

[7] Zhang C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [张淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平

- 2009 物理学报 **58** 1758]
- [8] Su A, Gao Y J 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 842 (in Chinese)
[苏安、高英俊 2010 光子学报 **39** 842]
- [9] Smith D R, Padilla W J, Vier D C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [10] Wang L G, Wang Z G, Zhu S Y 2009 *Europhys. Lett.* **86** 47008
- [11] Andrea A, Mário G S, Alessandro S, Nader E 2007 *Phys. Rev. B* **75** 155410
- [12] Mário S, Nader E 2007 *Phys. Rev. B* **75** 075119
- [13] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang L W, Zhu S Y 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 013101
- [14] Zhang L W, Zhang Y W, He L, Li H Q 2006 *Phys. Rev. E* **74** 056615
- [15] Zhang L W, Zhang Y W, He L, Wang Z G, Li H Q, Chen H 2007 *J. Phys. D* **40** 2579
- [16] Eleftheriades G V, Balmain K G 2005 *Negative-refraction Metamaterial: Fundamental Principles and Application* (New York: Wiley & Sons)

Frequency properties of the defect mode inside a photonic crystal band-gap with zero average refractive index *

Liu Li-Xiang Dong Li-Juan Liu Yan-Hong Yang Chun-Hua Yang Cheng-Quan Shi Yun-Long[†]

(*Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China*)

(Received 14 January 2011; revised manuscript received 10 May 2011)

Abstract

Left-handed metamaterial has been designed based on transmission line technology. A left-handed and a normal materials are studied alternately to form a one-dimensional photonic crystal with an average refractive index of zero but a special band-gap emerges. The two band-edge frequencies of this gap are insensitive to the incident angle and lattice constant. These characteristics can be used in the miniaturization of filters and high-quality coupling. Studies show that we can regulate the mode frequency by controlling the thickness of the defect layer, which can provide a method for the adjusting frequency in applications. The experimental results are consistent with numerical simulation.

Keywords: left-handed metamaterial, composite of left/right handed transmission line, photonic crystal

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974123), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2010021006) and the Industrial Application of New and High Technologies Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2010018).

[†] Corresponding author. E-mail: Shi_yunlong@yahoo.com.cn