

文章编号: 1001-9014(2009)01-0020-05

基于微带传输线的由特异材料 构成的一维光子晶体

张利伟^{1,2}, 张冶文¹, 李海洋¹, 赫丽¹, 王治国¹

(1. 同济大学玻尔固体物理研究所, 上海 200092; 2. 河南理工大学 物理化学学院, 河南 焦作 454003)

摘要:通过左右手复合传输线(CRLH TLs)实现了一维的特异材料(Metamaterials),基于Metamaterials单元构成了光子晶体,并分析、测试了其传输特性.实验结果表明,由特异材料构成的一维光子晶体具有Bragg带隙和等效的单负带隙.当晶格尺度同比例改变时,等效的单负带隙基本上不发生移动,并且带边分别由零平均介电常数 $\bar{\epsilon}=0$ 和零平均磁导率 $\bar{\mu}=0$ 决定.零平均折射率(zero- \bar{n})带隙和零有效相位(zero- Φ_{eff})带隙可以理解为一种等效的单负带隙.对由Metamaterials构成的一维光子晶体传输特性的研究,有助于Metamaterials在射频/微波电路和仪器中的应用.

关键词:特异材料;左右手复合传输线;零平均折射率带隙;零有效相位带隙

中图分类号:0441.4 **文献标识码:**A

ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS CONSISTING OF METAMATERIALS BASED ON MICROSTRIP TRANSMISSION LINES

ZHANG Li-Wei^{1,2}, ZHANG Ye-Wen¹, LI Hai-Yang¹, HE Li¹, WANG Zhi-Guo¹

(1. Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Physics and Chemistry College of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: One-dimensional metamaterials were realized by using composite right/left-handed transmission lines (CRLH TLs), the transmission properties of the photonic crystals composed of metamaterials based on microstrips lines were measured and analyzed. The experimental results indicate that the photonic crystals possess Bragg gaps and effective-single-negative (ESNG) gap, and the ESNG gap does not shift when the lattice constant varies by the same factor, and the edges of the gap are determined by zero average permittivity $\bar{\epsilon}=0$ and zero average permeability $\bar{\mu}=0$, respectively. Zero- \bar{n} gap and zero- Φ_{eff} gap can be understood as an ESNG gap. The investigations of the photonic crystals consisting of metamaterials will benefit to the applications of the metamaterials in RF/microwave circuits and apparatus.

Key words: metamaterial; composite right/left-handed transmission line; zero- \bar{n} gap; zero- Φ_{eff} gap

引言

光子晶体是由不同的介电材料周期排列所构成的人工材料,它的主要特性是具有光子带隙结构,在其禁带频率范围内将禁止任何光或电磁波的传播^[1].这一性质可用于调控光子流的运动,进而广泛应用于滤波器、漏波天线等微波及光学工程中^[2,3].普通光子晶体带隙来源于周期性结构的多

重 Bragg 散射,晶格常数、入射角和电场极化方向将影响其带隙结构,无序结构会严重破坏光子带隙的性质,限制了光子晶体的实际应用.最近,一种新型的由特异材料(Metamaterials)构成的光子晶体具有奇异的光子带隙^[4,5].其中,由左手材料和右手材料构成的光子晶体具有 zero- \bar{n} 带隙^[4],由单负材料构成的光子晶体具有 zero- Φ_{eff} 带隙^[5].左手材料(相对右手材料而言)是介电常数(ϵ)和负磁导率(μ)同

收稿日期:2008-02-06,修回日期:2008-08-18

Received date: 2008-02-06, revised date: 2008-08-18

基金项目:973项目(2006CB921701),国家自然科学基金项目(10634050)和上海市科委资助项目(07DZ22302)

作者简介:张利伟(1979-),男,河南确山人,讲师,博士,主要从事特异材料与光子晶体方面的研究.

时具有负的媒质,它最早是由 Veselago 于 1968 年首次提出的^[6],他从理论上预言了这种材料具有一些奇异的电磁特性,如逆多普勒效应、逆斯涅尔折射效应及逆 Cerenkov 辐射效应等.近几年,基于开口谐振环阵列^[7]和传输线^[8]的多种结构的左手材料得以实现.单负材料是介电常数和磁导率两个参量中只有一个为负的材料.介电常数为负($\varepsilon < 0$),而磁导率为正($\mu > 0$)的材料被称为负 ε 材料(ENG);介电常数为正($\varepsilon > 0$),而磁导率为负($\mu < 0$)的材料被称为负 μ 材料(MNG)^[5].左手材料和单负材料均可以由具有非谐振结构、低损耗和较宽带宽的左右手复合传输线(CRLH TLs)来实现.进一步的理论研究表明^[9],由 Metamaterials 构成的光子晶体具有等效的单负带隙,这种带隙不是基于 Bragg 散射机制,是单向带隙.带隙分别由平均介电常数($\bar{\varepsilon}$)和平均磁导率($\bar{\mu}$)决定,所以带隙的位置和宽度受晶格尺度、波的极化方向和入射角的影响不大^[5]. zero- \bar{n} 带隙和 zero- Φ_{eff} 带隙也可以理解成一种等效的单负带隙.

在本文中,主要通过 CRLH TLs 构造了一维的 Metamaterials,基于具有特异材料特性的 CRLH TLs 单元构成了一维亚波长级的微带光子晶体,并分析、测试了其传输特性.实验结果表明由 Metamaterials 构成的一维光子晶体在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} < 0$ 的区域,形成等效的单负带隙,这一带隙在晶格尺度同时改变相同倍数时基本不发生移动,在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} > 0$ 的区域形成通带或 Bragg 带隙.

1 原理

考虑真空中由 A、B 两种特异性材料构成的一维光子晶体,其中两种特异材料的介电常数和磁导率可以表示为以下形式:

$$\varepsilon_{A/B} = \varepsilon_{\alpha/\beta} - \frac{\alpha_{A/B}}{\omega^2}, \mu_{A/B} = \mu_{\alpha/\beta} - \frac{\beta_{A/B}}{\omega^2}, \quad (1)$$

这两种参数在微波波段可以由不同参数的 CRLH TLs 来实现. $\omega/2\pi$ 是以 GHz 为单位的频率, $\varepsilon_{\alpha(\beta)}$ 和 $\mu_{\alpha(\beta)}$ 是结构常数, $\alpha_{A(B)}$ 和 $\beta_{A(B)}$ 为变量,可以由 CRLH TLs 的电路参数来调节. A、B 两种特异材料在低频段均表现为左手特性,在高频段为右手特性,在左右手之间它们是单负材料,要么是负 ε 材料要么是负 μ 材料.假设材料层的厚度分别为 d_A 和 d_B . 对于一维无限周期的光子晶体,满足周期性边界条件,TE 波的色散关系可以写为^[5]:

$$\cos(\beta d) = \cos(k_{Az}d_A)\cos(k_{Bz}d_B) - \frac{1}{2}\left(\frac{k_{Az}/\mu_A}{k_{Bz}/\mu_B}\right)$$

$$+ \frac{k_{Bz}/\mu_B}{k_{Az}/\mu_A}\sin(k_{Az}d_A)\sin(k_{Bz}d_B), \quad (2)$$

其中, β 为有效 Bloch 波数, $d = d_A + d_B$, $k_{Az/Bz}^2 = (\omega^2/c^2)(\mu_{A/B}\varepsilon_{A/B} - \sin^2\theta_{A/B})$, c 为光速, $\theta_{A/B}$ 为材料中电磁波的传输角度.对于 TM 波也可以作类似的分析.对于微波段的特异性材料来说,一般情况下 $k_{Az}d_A \ll 1$, $k_{Bz}d_B \ll 1$, 则色散关系式(2)可以在带边处对正旋和余旋函数进行泰勒展开.对于垂直入射的情况,当采用到泰勒展开的二阶近似时^[9],有 $\frac{\varepsilon_A d_A + \varepsilon_B d_B}{d_A + d_B} \cdot \frac{\mu_A d_A + \mu_B d_B}{d_A + d_B} = 0$, 即: $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} = 0$, $\bar{\varepsilon}$ 和 $\bar{\mu}$ 分别为光子晶体的平均介电常数和平均磁导率.对于由特异材料构成的光子晶体来说,存在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} < 0$ 的区域,这一区域内,有效 Bloch 波数 β 没有实数解,将有一个带隙打开,带边处分别有 $\bar{\varepsilon} = 0$ 和 $\bar{\mu} = 0$, 这一特殊的光子带隙可以看成是等效的单负带隙.对于斜入射的情况,带边的决定条件跟入射角有一定的关系,但受入射角的影响不大^[5].

对于由两种单负材料组成的光子晶体,波在两种材料中的有效相位和有效波阻抗不匹配的情况下会形成 zero- Φ_{eff} 带隙^[5],由左手材料和右手材料组成的光子晶体在满足零平均折射率的条件下会形成 zero- \bar{n} 带隙^[4]. zero- Φ_{eff} 带隙来源于迅衰模之间的相互作用,而 zero- \bar{n} 带隙来源于传播模之间的相互作用.这两种带隙在晶格尺度同时改变相同倍数时,带隙的位置基本上不发生移动,带隙内 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} < 0$, 也可以理解成一种等效的单负带隙.由单负材料和左手材料或右手材料构成的光子晶体,基于迅衰模和传播模的界面模之间的相互作用,会在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} > 0$ 的条件下在单负材料的阻带区出现传播模,否则也会出现等效的单负带隙.另外,在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} > 0$ 的区域,由特异性材料构成的光子晶体在满足一定条件时会出现 Bragg 带隙,

$$k'_A d_A + k'_B d_B = m\pi, \quad (3)$$

其中, k'_A 和 k'_B 分别为 A、B 两种材料中波数的实部, m 为 Bragg 带隙指数,可以为正整数、负整数,也可以为零.

2 Metamaterials 的实现

一维的 Metamaterials 是通过在普通微带传输线上周期性加载集总 L-C 元件的 CRLH TLs 来实现的.图 1 是 CRLH TLs 的基本单元,由分布参数为 L_0 和 C_0 , 单元长度为 d 的 50Ω 微带线和加载的串联电容(C)及并联电感(L)组成, L_0 和 C_0 分别为微带

线的分布电感和分布电容. 当周期单元的长度远小于导波波长时, 则由基本单元组成的传输线可以被认为是等效均匀的, 经过周期性分析, 它的等效的相对介电常数和磁导率分别为^[8]:

$$\begin{aligned} \varepsilon &\approx \left(C_0 - \frac{1}{\omega^2 Ld} \right) / (\varepsilon_0 \cdot p), \\ \mu &\approx p \cdot \left(L_0 - \frac{1}{\omega^2 Cd} \right) / \mu_0, \end{aligned} \quad (4)$$

p 为微带线的结构常数.

电磁波在材料中传播时的波数为:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{\mu}, \quad (5)$$

对于不平衡时的左右手复合传输线, 它的色散关系中出现三个明显的特征频率:

$$f_1 = \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}, f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_0 Ld}}, f_3 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 Cd}}, \quad (6)$$

f_1 为电路结构的低阻截止频率, f_2 和 f_3 为 CRLH TLs 的本征频率. 在 f_1 和 $\min(f_2, f_3)$ 之间是左手通带, 在 $f > \max(f_2, f_3)$ 的频段是右手通带, f_2, f_3 的大小取决于电路参数的选取. f_2 和 f_3 之间是单负阻带区, 如果 $f_2 > f_3$, CRLH TLs 为负 ε 材料, $f_2 < f_3$ 时, 为负 μ 材料, 当 $f_2 = f_3$ 时, CRLH TLs 满足平衡条件, 单负阻带消失, $f_2(f_3)$ 为左手通带和右手通带的分界点.

在本文实验中, 采用介电常数为 4.75, 厚度为 1.6mm 的 FR-4 环氧树脂复合玻璃纤维布覆铜板为基材制作一维的周期性结构传输线, 微带线的特征阻抗设计为 50Ω , 结构参数 $p \approx 4.05$ ^[8]. 可以选择不同的集总元件和单元长度, 在某一频段实现具有左手性、负 ε 或负 μ 特性的 CRLH TLs, 为此, 我们以微带线为基础制备了两种具有特异材料性质的 CRLH TLs, A 和 B. 在 A 中, 单元长度选择为 6.2mm, 加载的电容 $C = 5.1\text{pF}$, 电感 $L = 4.7\text{nH}$; 在 B 中, 单元长度为 6.2mm, 电容 $C = 1.0\text{pF}$, 电感 $L = 6.8\text{nH}$. 由理想元件制备的 CRLH TLs 的有效介电常数和磁导率, 在等效均匀的条件下可以根据式(4)进行计算, 图 2 是 A 和 B 两种一维 CRLH TLs 的有效介电常数和磁导率的计算值. 从图中可以看出, A 在频率低

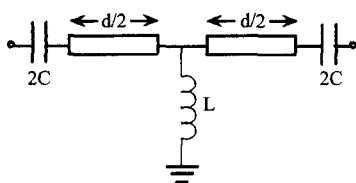


图 1 CRLH TL 基本单元的等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of a CRLH TL unit

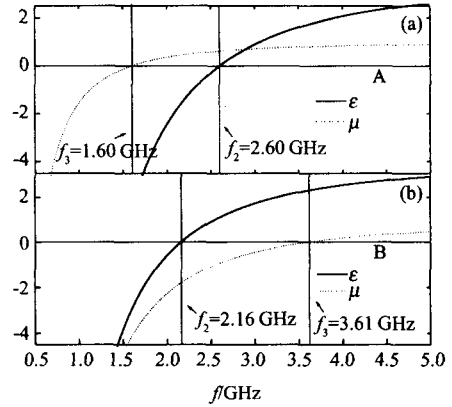


图 2 A 和 B 两种不同结构参数的 CRLH TLs 的有效介电常数和磁导率的计算值

Fig.2 The calculated relative permittivity (ε) and permeability (μ) of A and B with different circuit parameters

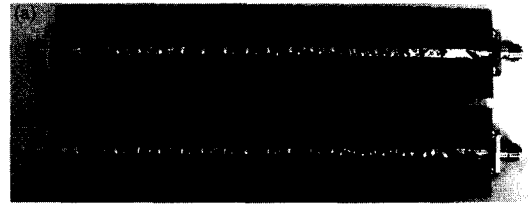


图 3 A₁₆(a) 和 B₁₆(b) 两种 CRLH TL 的照片

Fig.3 Photographs of two kinds of fabricated CRLH TLs A₁₆(a) and B₁₆(b)

于 1.60GHz 时表现出左手特性, 介电常数和磁导率同时为负, 电磁波在其中传播会引起负的相位移, 在 1.60~2.60GHz, 介电常数小于 0, 而磁导率大于 0, 是负 ε 材料, 当频率高于 2.60 GHz 时, 介电常数和磁导率同时大于 0, 表现出右手特性, 电磁波在其中传播会引起正的相位移. B 在频率低于 2.16GHz 时是左手材料, 在 2.16~3.61GHz 内, 介电常数大于 0, 而磁导率小于 0, 是负 μ 材料. A 和 B 在 2.16~2.60GHz 有一个公共的单负区. 事实上, 可以通过改变集总元件值和单元长度在一定频率范围内调节 CRLH TL 的左手区和单负区. 实验上, 基于这些 CRLH TLs 单元, 构造了不同的光子晶体, 借助于 ADS 模拟、Agilent 8722ES 矢量网络分析仪测量研究了由特异性材料构成的光子晶体的传输特性.

3 实验结果与分析

图 3 是包含 16 个周期单元的两种 CRLH TLs A₁₆ 和 B₁₆ 的照片, 制备方法与文献[8]的一样. 图 4 是 A₁₆ 和 B₁₆ 基于真实元件模拟和测量的 S_{21} 参数, 从模拟结果可以看出 A 种 CRLH TL 约在 0.48 ~

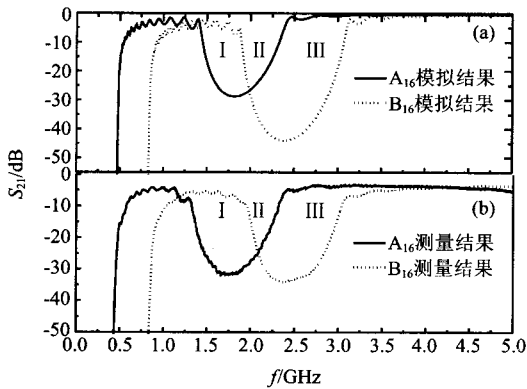


图4 A_{16} 和 B_{16} 两种CRLH TLs基于真实元件模拟(a)和测量(b)的 S_{21} 参数

Fig.4 The simulated (a) and measured (b) S_{21} of the two kinds of CRLH TLs A_{16} and B_{16} using real lumped-elements

1.43GHz是左手材料,在1.43~2.36GHz的频率范围内是负 ϵ 材料,当频率高于2.36GHz时,表现出右手特性.对于B种CRLH TL,约在0.85~1.89GHz是左手材料,在1.89~3.08GHz内是负 μ 材料,当频率高于3.08GHz时,表现出右手特性.测量结果和模拟结果有很好的吻合.但这两种CRLH TL的左手区和单负区的位置和宽度与式(6)的计算值有一定的差别,分别向低频有一定的移动,主要是由于真实元件和理想元件的差别所致.

A和B两种CRLH TLs在不同的频段表现出不同的特性,如图4所示,在I区,A是单负的,B是左手性的,II区约在1.89~2.36GHz是A和B的公共单负区,在III区,A是右手性的,B是单负的.具有负 ϵ 和负 μ 特性的CRLH TL单元构成的特异材料光子晶体,从实验上很好地验证了Fredkin等人的理论,即单负材料组成的光子晶体在一定的条件下由于迅衰波基的界面模之间的相互耦合,会出现左手通带,可以等效为左手材料^[8,10].在此仍然以CRLH TL单元为基础,研究一般的特异性材料构成的光子晶体.根据式(4)和(5)可知,在低频段两种特异材料的波数均为负数,且随频率的增大而增大,在较高频段,波数大于零,但它们的色散较弱.由A和B两种特异性材料构成的光子晶体在满足式(3)的条件下会存在Bragg带隙,其中在低频段的Bragg带隙指数为负整数,当晶格增大时,就要求特异材料的波数也随之增大,意味着频率要向高频移动,所以低频段的Bragg带隙会随着晶格尺度的增大而向高频移动;而在高频段,两种特异材料的波数基本不变,当晶格增大时,Bragg带隙的位置向低频移动才

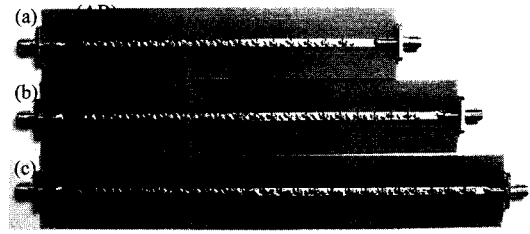


图5 一维光子晶体 $(AB)_8$ (a)、 $(A_2B_2)_5$ (b)和 $(A_4B_4)_4$ (c)的照片

Fig.5 Photographs of the fabricated one-dimensional photonic crystals $(AB)_8$ (a), $(A_2B_2)_5$ (b) and $(A_4B_4)_4$ (c)

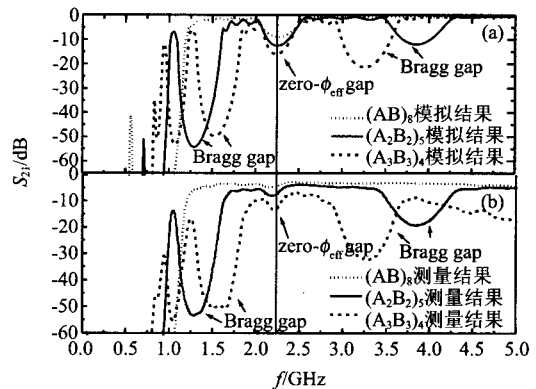


图6 一维光子晶体 $(AB)_8$ 、 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_4B_4)_4$ 基于真实元件模拟(a)和测量(b)的 S_{21} 参数

Fig.6 The simulated (a) and measured (b) S_{21} -parameters of the one-dimensional photonic crystals of $(AB)_8$, $(A_2B_2)_5$ and $(A_4B_4)_4$ using real lumped-elements

能满足Bragg散射条件,进而高频段的Bragg带隙会随着晶格尺度的增大而向低频移动^[8].将A和B两种CRLH TLs单元交替周期性排列构成光子晶体 $(AB)_8$ 、 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_3B_3)_4$,图5是一维光子晶体的照片.则在I和III区,基于迅衰模和传播模的界面模之间的相互作用,光子晶体可能会出现传播模,在公共的单负II区内可能形成 $zero-\Phi_{eff}$ 带隙.图6为3种光子晶体基于真实元件模拟和测量的 S_{21} 参数.从图中可以看出,测量结果和模拟结果吻合的比较好,光子晶体 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_3B_3)_4$ 在低频和低频分别出现了Bragg带隙,低频的Bragg带隙随着晶格尺度的增大而向高频移动,而高频的Bragg带隙随着晶格尺度的增大向低频移动.3种光子晶体 $(AB)_8$ 、 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_3B_3)_4$ 均在I和III区出现了通带,而在两通带间,约2.25GHz处出现了一个 $zero-\Phi_{eff}$ 带隙,带隙的位置在单元长度同时增大2倍、3倍时基本上没有发生移动.

为了更好地理解由A和B两种特异材料组成

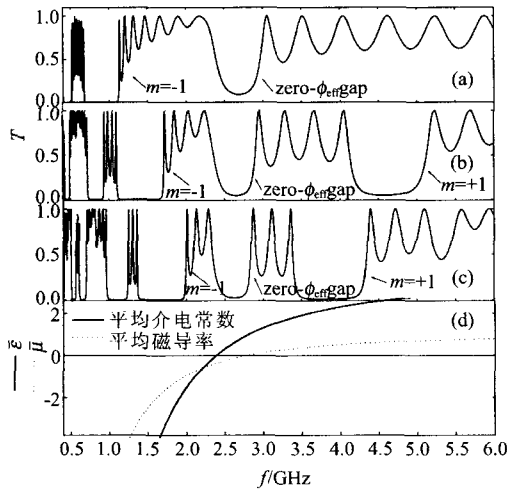


图 7 基于理想原件的一维光子晶体 $(AB)_8$ (a)、 $(A_2B_2)_5$ (b) 和 $(A_3B_3)_4$ (c) 的透射率、 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\mu}$ (d) 的计算结果
 Fig. 7 The calculated transmission of the one-dimensional photonic crystals $(AB)_8$ (a), $(A_2B_2)_5$ (b), $(A_3B_3)_4$ (c), (d) shows the average permittivity ($\bar{\epsilon}$) and the average permeability ($\bar{\mu}$) of the photonic crystals

的光子晶体的传输特性,我们借助于一维光子晶体传输矩阵方法^[10]进行了分析.基于理想元件的 A 和 B 两种 CRLH TLs 的具体介电常数和磁导率参数在等效均匀的条件下可由式(4)获得.图 7 中(a)、(b)、(c)和(d)分别为 TEM 波传输模式下,在理想元件的基础上计算的光子晶体 $(AB)_8$ 、 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_3B_3)_4$ 的透射率 T 、 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\mu}$.从图 7 可以看出,3 种光子晶体 $(AB)_8$ 、 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_3B_3)_4$ 均在 2.55GHz 附近出现了一个 zero- Φ_{eff} 带隙,带隙内 $\bar{\epsilon} \cdot \bar{\mu} < 0$,带隙在晶格常数同时增大 2 倍、3 倍时基本不发生移动,光子晶体相当于一个等效的单负材料.在等效的单负带隙外, $\bar{\epsilon} \cdot \bar{\mu} > 0$,或者是通带,或者是 Bragg 带隙.光子晶体 $(A_2B_2)_5$ 和 $(A_3B_3)_4$ 分别在 1.4GHz、1.7GHz 附近出现了带隙指数为 -1 的 Bragg 带隙,分别在 4.6GHz、3.8GHz 附近出现了带隙指数为 +1 的 Bragg 带隙.

如果把 A 和 B 两种 CRLH TLs 的单负阻带区分别向低频和高频做一定的移动,则会在两单负区之间出现一公共的通带区,在这一通带内,A 是右手材料,而 B 是左手材料.根据式(6),我们可以通过改变 A 和 B 两种 CRLH TLs 中的集总元件来实现,分别称之为 C 和 D.在 C 种 CRLH TLs 中,电感增大为 5.6nH,保持电容 $C = 5.1\text{pF}$,单元长度 $d = 6.2\text{mm}$ 不变,在 D 种 CRLH TL 中,电感减小为 2.2nH,保持

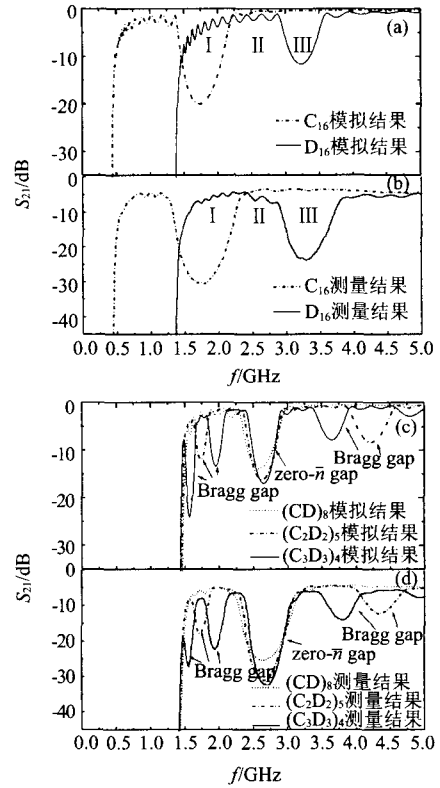


图 8 一维的 C_{16} 、 D_{16} 两种 CRLH TLs 和光子晶体 $(CD)_8$ 、 $(C_2D_2)_5$ 、 $(C_3D_3)_4$ 基于真实元件模拟和测量的 S_{21} 参数
 Fig. 8 The simulated and measured S_{21} -parameters of C_{16} , D_{16} and the photonic crystals of $(CD)_8$, $(C_2D_2)_5$, $(C_3D_3)_4$ using real lumped-elements

电容 $C = 1.0\text{pF}$,单元长度 $d = 6.2\text{mm}$ 不变.这样由 C 和 D 两种 CRLH TL 单元组成的光子晶体 $(CD)_8$ 、 $(C_2D_2)_5$ 和 $(C_3D_3)_4$ 会在不同频段表现出由左手材料和右手材料组成的光子晶体、单负材料和左手材料或右手材料组成的光子晶体的特性.这里我们没有给出光子晶体的照片.图 8(a) 和 (b) 分别为包含 16 个基本单元的两种 CRLH TLs, C_{16} 和 D_{16} 基于真实元件模拟和测量的 S_{21} ,从图中可以看出,测量结果和模拟结果也吻合的比较好. C 种 CRLH TL 约在 0.46 ~ 1.43GHz 是左手材料,在 1.43 ~ 2.17GHz, I 区为负 ϵ 材料, D 种 CRLH TL 约在 1.40 ~ 2.96GHz 是左手材料,在 2.96 ~ 3.54GHz, III 区是负 μ 材料,当频率高于 3.54GHz 时,表现出右手特性.在 II 区,约 2.17 ~ 2.96GHz, C 种 CRLH TLs 表现为右手特性,而 D 种 CRLH TLs 表现为左手特性,在这一频段内,由 C 和 D 种 CRLH TLs 单元构成的光子晶体可能形成 zero- \bar{n} 带隙.图 8(c) 和 (d) 分别为光子晶体 $(CD)_8$ 、 $(C_2D_2)_5$ 和 $(C_3D_3)_4$ 基于真
 (下转第 76 页)

REFERENCES

- [1] YANG Shu-Yuan, WANG Min, JIAO Li-Cheng. High-ratio compression of remote sensing image based on ridgelet and neural network[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(杨淑媛,王敏,焦李成.基于脊波和神经网络的大压缩比遥感图像压缩. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4), 297—301.
- [2] LIU Sheng-Peng, FANG Yong. Infrared image fusion algorithm based on contourlet transform and improved pulse coupled neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘盛鹏,方勇.基于Contourlet变换和IPCNN的融合算法及其在可见光与红外线图像融合中的应用. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3), 217—221.
- [3] JIAO Li-Cheng, Tan Shan Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*(焦李成,谭山.图像的多尺度几何分析:回顾和展望. *电子学报*), 2003, **31**(12):1975—1981.
- [4] Mallat S A. Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674—693.

- [5] Do M N, Vetterli M V. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2005, **14**(12):2091—2106.
- [6] Eslami R, Radha H. A new family of non-redundant transforms using hybrid wavelets and directional filter banks[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, **16**(4):1152—1167.
- [7] Nadenau M J, Reichel J, Kunt M. Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, **12**(1):58—70.
- [8] Sheikh H R, Wang Z, Bovik A C, et al. Image and Video Quality Assessment Research at LIVE [DB]. <http://live.ece.utexas.edu/rese-arch/quality/>, 2003. s.
- [9] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2004, **13**(4):600—612.
- [10] Wang Z, Simoncelli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model [J]. *Human Vision and Electronic Imaging X. Proc.*, 2005, **5666**(1):149—159.

(上接第 24 页)

实元件模拟和测量的 S_{21} 参数. 在 C 和 D 两种 CRLH TLs 的单负区, 即 I 和 III 区, 3 种光子晶体分别出现了一定的通带, 其中 $(C_2D_2)_5$ 和 $(C_3D_3)_4$ 在 C 的单负区和高频段分别出现了 Bragg 带隙, Bragg 带隙在低频也随着晶格尺度的增大而向高频移动, 而在高频性质相反. 约在 2.65GHz 处, 3 种光子晶体均出现了 $zero-\bar{n}$ 带隙, 带隙的位置和带宽在单元长度同时增大 2 倍、3 倍时基本上也没有发生移动, $zero-\bar{n}$ 带隙也可以理解作为一种等效的单负带隙.

4 结语

由一维光子晶体的色散关系出发, 得出由特异性材料构成的光子晶体具有 Bragg 带隙和等效的单负带隙, 等效的单负带隙在晶格尺度同时改变相同倍数时基本不发生移动, 带边分别由 $\bar{\varepsilon} = 0$ 和 $\bar{\mu} = 0$ 决定. 在实验上, 通过 CRLH TLs 实现了一维的 Metamaterials, 基于 CRLH TLs 单元构成了光子晶体, 并测试、分析了其传输特性. 实验和理论结果表明由特异材料构成的一维光子晶体在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} > 0$ 的条件下形成通带或 Bragg 带隙, Bragg 带隙随着晶格尺度的改变而发生移动. 在 $\bar{\varepsilon} \cdot \bar{\mu} < 0$ 的条件下形成等效的单负带隙, $zero-\bar{n}$ 带隙和 $zero-\Phi_{\text{eff}}$ 带隙可以理解为一种等效的单负带隙.

REFERENCES

- [1] TANG Bing-Shu, SHEN Ting-Gen, Effect of disorder on transmission spectra of two-dimensional photonic crystals

with transfer matrix method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汤炳书,沈延根.用转移矩阵法研究无序对二维光子晶体透射谱的影响. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 73—76.

- [2] FANG Wei-Hai, XU Shan-Jia. New frequency selective surface composed of left-handed materials [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (方维海,徐善驾.由左手媒质构成的新的频率选择表面. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):121—124.
- [3] LI Yan, XU Shan-Jia, ZHANG Zhong-Xiang. Novel microstrip antenna array FED with left-handed transmission line [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李雁,徐善驾,张忠祥.新型左手传输线馈电微带阵列天线. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):137—140.
- [4] Li J, Zhou L, Chan C T. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(8): 0839011-0839014.
- [5] Gao L, Tang C T, Wang S M. Photonic band gap from a stack of single-negative materials [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2006, **301**(2):371—377.
- [6] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4):509—514.
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18):4184—4187.
- [8] Zhang L W, Zhang Y W, He L, et al. Experimental study of photonic crystals consisting of ε -negative and μ -negative materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **74**(5):0566151-0566156.
- [9] Weng Y, Wang Z G, Chen H. Band structures of one-dimensional subwavelength photonic crystals containing metamaterials [J]. *Phys. Rev. E*, 2007, **75**(4):046601-0466014.
- [10] Fredkin D R, Ron A. Effectively left-handed (negative index) composite material [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(10):1753—1755.