基于单负材料光子晶体异质结构的可调多通道滤波器

邓新华, 刘念华, 安丽萍

南昌大学理学院, 南昌 330031;

南昌大学高等研究院, 南昌 330031;

燕山大学理学院, 秦皇岛 066004

E-mail: dengxinhua@ncu.edu.cn

2008-12-13 收稿, 2009-02-24 接受

国家自然科学基金(批准号: 10664002)、江西省自然科学基金(编号: 2008GZW0003)、江西省教育厅科学技术研究项目(编号: GJJ09073)和教育部长江学者与创新团队发展计划(编号: IRT0730)资助项目

摘要 用传输矩阵方法研究了由两种单负材料构成的光子晶体异质结构多通道滤波器, 结果表明, 随着异质界面数的增加, 零有效位相带隙内出现的共振模的个数增多, 并且共振模的数目与异质界面数相等, 为多通道滤波器的通道个数的调节提供了精确方法. 当介质存在耗散时, 我们得到: 异质界面数越大, 共振模衰减的幅度越大; 耗散因子越大, 共振模衰减的幅度越大. 多通道滤波器的品质因子 Q 值与异质界面数成线性关系, 随耗散系数的增大而减小, 为多通道滤波器的品质因子的调节提供了一种可行的方法.

关键词

异质结构

多通道滤波器

品质因子

最近, 可调的光子晶体滤波器由于在光通讯与超快光处理方面的重要应用前景引起了人们的广泛关注. 当多通道滤波器的通带数量为 N 时, 它所携带的信息量是单通带滤波器的 N 倍; 对于整个系统来说, 承载同样多的信息量所需要的滤波器数量是单通带滤波器的 N 倍. 采用多通道滤波器对空间光学仪器来说可以简化光学系统, 减轻载荷. 同时, 也正是空间光学有效载荷的集成化、轻量化的发展, 促进了多通道滤波器的出现和发展, 对于发展超高密度波分复用光通信技术和超高精度光学信息测量仪器具有重要应用价值.

对于由常规材料构成的光子晶体, 主要是通过增大两种介质折射率的比值来拓宽光子带隙, 从而使得位于带隙内的局域模半高宽(FWHM)变窄, 由于滤波器的品质因子 Q 值与局域模半高宽(FWHM)成反比, 由此可以提高滤波器的品质因子 Q 值. 然而, 要达到很高的折射率比值是非常困难的. 另外, 常规材料构成的光子晶体中的局域模随着入射角的增大而向高频

移动, 很难实现全方向滤波器, 因此, 常规材料构成的光子晶体的实际应用方面受到了一定程度的制约. 单负材料^[1~11]由于具有特殊的带隙(零有效位相带隙)^[1], 用单负材料光子晶体替代普通材料构成的光子晶体可望得到新的、异常的光学传输特性, 并且单负材料中的迅衰场可以实现许多传播场不能实现的功能, 为设计功能器件提供了崭新的物理机制. 本文用传输矩阵方法^[12]研究基于单负材料光子晶体异质结构的多通道滤波器, 通过构建光子晶体异质结构来实现多通道滤波器. 我们发现, 共振模的个数与结构的异质界面的数目相等, 可为多通道滤波器的通道个数的设计提供参考. 介质的耗散和异质界面数与共振模衰减的幅度之间存在递减关系, 多通道滤波器的品质因子 Q 值随耗散系数 γ 的增大而减小. 这些结论为多通道滤波器实际制作提供了理论指导方法. 此外我们还得到, 多通道滤波器的品质因子 Q 值与异质界面数 M 成线性关系. 我们能够利用这种定量关系精确地调节多通道滤波器的品质因子.

引用格式: 邓新华, 刘念华, 安丽萍. 基于单负材料光子晶体异质结构的可调多通道滤波器. 科学通报, 2009, 54: 1405~1409

Deng X H, Liu N H, An L P. Tunable multiple-channel filters based on photonic heterostructures using single-negative materials. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0337-6

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-10-1405>

图1 两种单负材料构成的光子晶体异质结构示意图

1 理论模型

我们考虑一个由负磁导率材料和负介电常数材料交替生长形成的一维光子晶体 $PC1[(AB)_8]$ 和 $PC2[(A'B')_8]$ 及由它们构成的异质结构 $(PC1PC2)_N$, N 是异质结构的周期数, 如图1所示. $A(A')$ 和 $B(B')$ 分别表示负介电常数材料和负磁导率材料, 即负介电常数材料 $A(A')$:

$$\varepsilon_{A(A')} = \varepsilon_a - \frac{\alpha}{\omega^2}, \quad \mu_{A(A')} = \mu_a; \quad (1)$$

负磁导率材料 $B(B')$:

$$\varepsilon_{B(B')} = \varepsilon_b, \quad \mu_{B(B')} = \mu_b - \frac{\beta}{\omega^2}. \quad (2)$$

以上色散关系可以在特殊的集总电容-电感结构上实现^[13], 在(1)和(2)式中, ω 是单位为GHz的频率, α 和 β 为可调的电路参数.

2 异质结构共振模的产生

我们选取材料参数 $\varepsilon_a = \mu_b = 2$, $\mu_a = \varepsilon_b = 3$ 和 $\alpha = \beta = 100$, $A(A')$ 与 $B(B')$ 的厚度分别取为 $d_A = 6$ mm, $d_{A'} = 18$ mm, $d_B = 15$ mm 和 $d_{B'} = 9$ mm. 在图2中, 我们计算了正入射时光子晶体 $PC1$ 和 $PC2$ 及由这两个光子晶体构成的异质结构 $PC1PC2$ 的透射谱. 从图中我们可以看到, 单个的 $PC1$ 与 $PC2$ 的带隙中不出现共振模(图2(a)与(b)), 而由它们组合的异质结构 $PC1PC2$ 在零有效位相带隙内出现一个共振模(图2(c)). 这是因为, 在我们所选取材料参数 $\varepsilon_a = \mu_b = 2$, $\mu_a = \varepsilon_b = 3$ 和 $\alpha = \beta = 100$ 以及结构参数 $d_A = 6$ mm, $d_B = 15$ mm, $d_{A'} = 18$ mm 和 $d_{B'} = 9$ mm 下, 组合后的异质结构 $PC1PC2$ 带隙中央频率为 0.71175 GHz 的共振模满足.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_A(md_A + nd_{A'}) + \varepsilon_B(md_B + nd_{B'})}{m(d_A + d_B) + n(d_{A'} + d_{B'})} = 0, \quad (3)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_A(md_A + nd_{A'}) + \mu_B(md_B + nd_{B'})}{m(d_A + d_B) + n(d_{A'} + d_{B'})} = 0, \quad (4)$$

其中 m 和 n 分别为 $PC1$ 和 $PC2$ 的周期数. 从而有效折射率 $n=0$, 在零有效位相带隙内将出现一个共振模.

从图中我们还可以看到, 组合后的异质结构 $PC1PC2$ 的带隙宽度比单个的光子晶体 $PC1$ 与 $PC2$ 的带隙要宽. 所以, 我们可以通过异质结构来拓宽带隙宽度.

图2 正入射时光子晶体 $PC1$ 和 $PC2$ 及异质结构 $PC1PC2$ 的透射谱

(a) $PC1$ 的透射谱; (b) $PC2$ 的透射谱; (c) $PC1PC2$ 的透射谱

3 光子晶体异质结构多通道滤波器通道的实现

在图 3 中, 我们计算了正入射时光子晶体异质结构($PC1PC2$)_N 的透射谱, 从图中我们可以看到, 当异质结构的周期数 N 等于 1 时, 带隙内出现 1 个共振模, 而当 N 等于 2 时, 带隙内增加到 3 个共振模, 当周期数 N 等于 3 时, 带隙内增加到 5 个共振模. 随着周期数 N 的增大, 零有效位相带隙内出现的共振模的个数增多, 并且, 共振模的个数与异质界面的数目 M 相等. 另外, 不论周期数 N 是偶数还是奇数, 在带隙中心处频率为 0.71175 GHz 的共振模总是保持不变的.

图 3 正入射时光子晶体异质结构($PC1PC2$)_N 的透射谱

(a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=3$; (d) $N=4$; (e) $N=5$

当异质结构具有零有效折射率时(即处于异质结构的中心共振频率点), 在异质结构的每一个分界面上电场都被强烈局域, 在界面出现共振隧穿模^[14]. 各界面模的相互作用导致光会在多种频率点出现共振模. 随着异质结构的周期数增加, 异质结构界面数增加, 因而共振模的个数增加. 由于光子晶体异质结构($PC1PC2$)_N 总共有 M 个界面, $M=2N-1$, 所以带隙中出现共振模的数目为 M . 当我们选取材料参数 $\epsilon_a = \mu_b = 2$, $\mu_a = \epsilon_b = 3$ 和 $\alpha = \beta = 100$ 以及结构参数 $d_A = 6$ mm, $d_{A'} = 18$ mm, $d_B = 15$ mm 和 $d_{B'} = 9$ mm 时, 不论周期数

N 是偶数还是奇数, 由(1)~(4)式易得到频率为 0.71175 GHz 的隧穿模满足 $\bar{\epsilon} = 0$ 和 $\bar{\mu} = 0$, 因而在带隙中心处总有一频率为 0.71175 GHz 的共振模出现.

4 材料耗散对多通道滤波器透射的影响

由于实际材料耗散是不可避免的, 要研究单负材料的实际应用, 就必须考虑材料耗散. 当介质存在耗散时, 可以采用 Drude 模型来表示, (1)式中的介电常数和(2)式的磁导率必须修正为

$$\epsilon_A = \epsilon_a - \frac{\alpha}{\omega^2 + i\omega\gamma_e}, \quad \mu_B = \mu_b - \frac{\beta}{\omega^2 + i\omega\gamma_m}, \quad (5)$$

其中 γ_e 和 γ_m 分别为介质的电性和磁性的耗散因子, 代表介质的吸收与损耗^[15,16]. 我们假定 $\gamma_e = \gamma_m = \gamma$. 图 4, 5 和 6 中, 我们分别计算了正入射时介质存在耗散时的光透射谱.

综合图 4, 5 和 6, 我们可以得到三点结论: () 在相同的耗散因子下, 结构的异质界面数 M 越大, 共振模衰减的幅度越大; () 结构的异质界面数 M 相同时, 耗散因子越大, 共振模衰减的幅度越大; () 随着耗散因子的增大, 中央共振模缓慢衰减, 而两侧共振模离中心越远衰减越快. 这些结论为多通道滤波器实际制作提供了理论指导方法, 即设计光子晶体多通道滤波器

图 4 正入射时光子晶体异质结构 $PC1PC2$ 介质存在耗散时的透射谱

(a) $\gamma = 0$; (b) $\gamma = 1 \times 10^5$ Hz; (c) $\gamma = 3 \times 10^5$ Hz; (d) $\gamma = 5 \times 10^5$ Hz

图5 正入射时光子晶体异质结构 $(PC1PC2)_2$ 介质存在耗散时的透射谱

(a) $\gamma = 0$; (b) $\gamma = 1 \times 10^5$ Hz; (c) $\gamma = 3 \times 10^5$ Hz; (d) $\gamma = 5 \times 10^5$ Hz

图6 正入射时光子晶体异质结构 $(PC1PC2)_3$ 介质存在耗散时的透射谱

(a) $\gamma = 0$; (b) $\gamma = 1 \times 10^5$ Hz; (c) $\gamma = 3 \times 10^5$ Hz; (d) $\gamma = 5 \times 10^5$ Hz

时, 应选择耗散系数尽可能小的材料, 并且光子晶体异质界面数 M 不宜大。

5 多通道滤波器的品质因子

品质因子 Q 是滤波器的重要参数, 品质因子 Q

定义为共振模的中心频率与共振模的半高宽(FWHM)的比值。图7中, 我们计算了光子晶体异质结构为 $(PC1PC2)_N$ 的多通道滤波器的品质因子 Q 值与异质界面数 M 的关系。从图中可以看到, 多通道滤波器的品质因子 Q 值与异质界面数 M 成线性关系。我们只要增大异质界面数 M , 多通道滤波器的品质因子 Q 值就可以按相应的比值增大, 这为多通道滤波器的品质因子的调节提供了一种可行的方法。

图7 光子晶体异质结构为 $(PC1PC2)_N$ 的多通道滤波器的品质因子 Q 值与异质界面数 M 的关系

由于波在介质中传播时, 耗散是必然要发生的。下面我们来研究品质因子 Q 随介质耗散的变化关系。图8中, 我们计算了光子晶体异质结构为 $(PC1PC2)_2$

图8 光子晶体异质结构为 $(PC1PC2)_2$ 的多通道滤波器的品质因子 Q 值与耗散的关系

的多通道滤波的品质因子 Q 值与耗散系数 γ 的关系. 图 8 给出了异质结构 $(PC1PC2)_2$ 3 个通道(见图 5)的品质因子 Q 值与耗散关系. 从图中可以看到, 多通道滤波器的品质因子 Q 值随耗散系数 γ 的增大而减小, 两者之间是一种非线性关系. 其中, 当耗散系数 γ 增大时, 中心通道 2 的品质因子 Q 值缓慢减小, 而两侧通道 1 与 3 的品质因子 Q 值迅速减小.

6 结论

本文用传输矩阵方法研究了基于光子晶体异质结构的多通道滤波器, 结果表明, 随着异质界面数 M 的增大, 零有效位相带隙内出现的共振模的个数增

多, 并且, 共振模的数目与异质界面数 M 相等, 为多通道滤波器的通道个数调节提供了精确方法. 当介质存在耗散时, 我们得到: (1) 在相同的耗散因子下, 结构的异质界面数 M 越大, 共振模衰减的幅度越大; (2) 结构的异质界面数 M 相同时, 耗散因子越大, 共振模衰减的幅度越大; (3) 随着耗散因子的增大, 中央共振模缓慢衰减, 而两侧共振模离中心越远衰减越快. 这些结论为多通道滤波器实际制作提供了理论指导方法. 其次, 我们得到: 多通道滤波器的品质因子 Q 值与异质界面数 M 成线性关系, 随耗散系数 γ 的增大而减小. 这些为多通道滤波器的品质因子的调节提供了一种可行的方法.

参考文献

- 1 Jiang H T, Chen H, Li H Q, et al. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials. *Phys Rev E*, 2004, 69: 066607[DOI]
- 2 Kim K Y. Properties of photon tunneling through single-negative materials. *Opt Lett*, 2005, 30: 430—432[DOI]
- 3 项元江, 文双春, 唐康淞. 含单负介质层受阻全内反射结构的光子隧穿现象研究. *物理学报*, 2006, 55: 2714—2719
- 4 Deng X H, Liu N H. Polarization-dependent angle filters based on one-dimensional photonic crystals using mu-negative materials. *J Mod Optic*, 2009, 56: 482—486[DOI]
- 5 Wang L G, Chen H, Zhu S Y. Wave propagation inside one-dimensional photonic crystals with single-negative materials. *Phys Lett A*, 2006, 350: 410—415[DOI]
- 6 Deng X H, Liu N H. Tunable pair transmission in one-dimensional photonic crystals consisting of single-negative materials. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 3168—3171[DOI]
- 7 邓新华, 刘念华. 单负材料光子晶体共振隧穿特性. *科学通报*, 2007, 52: 2821—2825
- 8 Deng X H, Liu N H. Resonant tunneling properties of photonic crystals containing mu-negative materials. *J Phys D: Appl Phys*, 2009, 42: 045420
- 9 Zhang L W, Zhang Y W, He L, et al. Experimental investigation on zero- Q_{eff} gaps of photonic crystals containing single-negative materials. *Eur Phys J B*, 2008, 62: 1—6[DOI]
- 10 Chen Y H. Defect modes merging in one-dimensional photonic crystals with multiple single-negative material defects. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 011925
- 11 Zhang H Y, Zhang Y P, Wang P, et al. Frequency response in photonic heterostructures consisting of single-negative materials. *J Appl Phys*, 2007, 101: 013111[DOI]
- 12 Liu N H, Zhu S Y, Chen H, et al. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect. *Phys Rev E*, 2002, 65: 046607[DOI]
- 13 Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines. *IEEE Trans Microw Theor Tech*, 2002, 50: 2702—2712[DOI]
- 14 邓新华, 刘念华, 刘根泉. 单负材料异质结构光子晶体的频率响应. *物理学报*, 2007, 56: 7280—7285
- 15 O'Brien S, Pendry J B. Magnetic activity at infrared frequencies in structured metallic photonic crystals. *J Phys: Cond Matter*, 2002, 14: 6383—6394
- 16 Pendry J B, Smith D R. Reversing light with negative refraction. *Phys Today*, 2004, 57: 37—44[DOI]