

利用单负材料设计全向滤波器

陈宪锋 张辉霞 王 光 沈小明

(常州大学数理学院, 江苏 常州 213164)

摘要 基于法布里-珀罗腔理论,研究了由 2 块相同单负材料作为反射镜构成微腔结构的共振特性。若反射镜是负 ϵ 材料,在一定条件下可实现 TM 腔模的全向透射;若是负 μ 材料,则可实现 TE 腔模的全向透射。随着入射角的增大,全向透射谱变窄,品质因子提高。腔中介质折射率的提高,可有效缩短 TM 全向透射微腔结构的尺寸,但对 TE 全向透射微腔结构尺寸的调制就稍弱。单负材料损耗的存在,不会破坏两种微腔结构的全向共振特性,但随着入射角的增大腔模的透射率有所降低。通过优化处理给出了这两种微腔结构能实现全向透射时所需满足的各种条件,为全向滤波器的设计提供理论指导。

关键词 光学器件;全向滤波器;法布里-珀罗腔;单负材料;偏振

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0406004

Design of Omnidirectional Filter Using Single-Negative Materials

Chen Xianfeng Zhang Huixia Wang Guang Shen Xiaoming

(School of Physics and Mathematics, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract Based on the theory of Fabry-Perot cavity, the resonant characteristics of microcavity structure are studied, which is formed by reflectors composed of two slabs of the same single-negative materials. If the reflectors are composed of ϵ -negative (ENG) material, the omnidirectional transmission of TM mode can be realized under certain conditions; for the case of μ -negative (MNG) material, the omnidirectional transmission of TE mode can be realized. The omnidirectional transmission spectrum narrows and quality factor increases with the increase of incident angle. The increase of the refractive index of material in cavity effectively reduces the size of microcavity structure for omnidirectional transmission of TM mode, but the modulation is less obvious for that of TE mode. The existence of single-negative material loss does not break the characteristics of omnidirectional resonance of two microcavity structures, but the transmissivity of resonant mode reduces with the incident angle. Through optimized processing, the conditions are found for these two types of microcavities to realize the omnidirectional transmission, which provides useful theoretical guidance to the design of omnidirectional filters.

Key words optical devices; omnidirectional filter; Fabry-Perot cavity; single-negative material; polarization

OCIS codes 120.2440; 350.2460; 120.2230; 160.3918

1 引 言

滤波器是光子技术的基本元件之一,在光通信和光学信息处理方面有着广泛的应用,光子晶体滤波器是其中的佼佼者。光子晶体是介电材料在空间呈周期性排列的人工微结构,由于周期结构的多重布拉格散射形成光子带隙。如果周期性被打破,就可以在带隙中出现离散的局域模^[1,2],这些局域模的频率会随着入射角和偏振态的变化产生漂移,因此传统的光子晶体滤波器只能用于正入射情形,其

应用受到一定的限制。

近年来利用单元结构的局域响应机制构造出了一种新型的材料——特异材料^[3,4],在特定的波段内,该材料的介电常数和磁导率这 2 个物理量中可以出现 1 个或 2 个为负值。其中 2 个均为负值的称为双负材料或左手材料,而 1 个为负值的称为单负材料(SNG),有负 ϵ 材料(ENG)和负 μ 材料(MNG)两种。利用特异材料构成的周期性结构具有一种新颖的带隙——零 n 带^[5]或零 ϕ_{eff} 带^[6],当在结构中引入缺陷

收稿日期: 2010-08-11; 收到修改稿日期: 2011-01-29

基金项目: 江苏工业学院科技计划项目(JS200802)资助课题。

作者简介: 陈宪锋(1970—),男,副教授,主要从事光学材料方面的研究。E-mail: cxf@jpu.edu.cn

时,在带隙中出现的局域模几乎不受入射角和偏振态的影响^[7~10],这为全向滤波器的设计提供了可能。

本文利用 2 块单负材料平行放置构成一个简单的微腔结构,基于法布里-珀罗(F-P)腔理论研究其共振模特性,在一定的条件下可以实现全向共振,通过优化处理给出了相应的结构参数关系。

2 模型与方法

对于两种单负材料 ENG 和 MNG,其物质参数形式为^[6]

$$\text{ENG: } \epsilon_A = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \mu_A = \alpha, \quad (1)$$

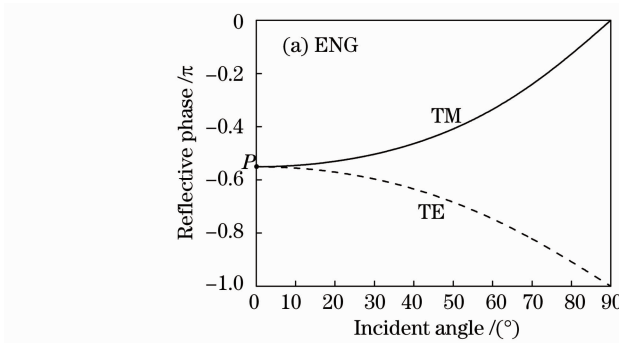
$$\text{MNG: } \epsilon_B = \beta, \mu_B = 1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega^2}. \quad (2)$$

式中 α, β 为正常数, ω_{pe} (ω_{pm}) 为电(磁)等离子体频率。这些色散特性利用周期性的 LC 传输线(L 为等效渗透率,C 为电容率)很容易实现^[4,11]。对于任意一种单负材料 ENG 或 MNG 来说,当一束频率为 ω 的单色光在介质中(折射率为 n)以入射角 θ 入射到其上时(另一侧为空气),单负材料层的传输矩阵可表示为^[9,10]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos k_{zj}d_j & -\frac{i}{q_j} \sin k_{zj}d_j \\ -iq_j \sin k_{zj}d_j & \cos k_{zj}d_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & I \\ J & K \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $k_{zj} = i \frac{\omega}{c} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - \epsilon_j \mu_j}$; 导纳 $q_j = \frac{ck_{zj}}{\omega \mu_j}$ (TE)

或 $q_j = \frac{\omega \epsilon_j}{ck_{zj}}$ (TM), 下标 $j = A, B$, 介质与空气的导纳分别为 q, q_0 。于是反射系数为



$$r = \frac{Hq + Iq_0 - J - Kq_0}{Hq + Iq_0 + J + Kq_0} = |r| \exp(i\varphi), \quad (4)$$

式中 φ 为单负材料层的反射相移。研究表明单负材料层具有很高的反射率 $R_0 = rr' \approx 1$, 在其中传播的电磁波是倏逝波。如果利用 2 块相同的单负材料作为反射镜构成 F-P 腔, 如图 1 所示, 其透射率为^[12]

$$T = \frac{1}{1 + F \sin^2 \delta}, \quad (5)$$

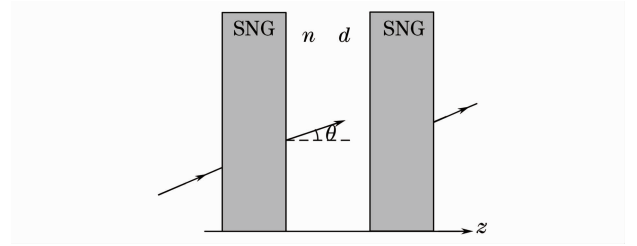


图 1 F-P 结构的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of F-P structure

式中 $F = \frac{4R_0}{(1-R_0)^2}$, $\delta = \varphi + \frac{\omega}{c}nd \cos \theta$, n, d, θ 分别为腔中介质折射率、厚度和折射角, c 为光速。腔共振模频率由 $\delta = m\pi$ 来决定。一般情况下, 腔模频率与入射角有关, 具有偏振特性, 但在一定的条件下可以实现与角度无关的全向共振。

3 结果与讨论

在本文的研究中, 对于 ENG 和 MNG 材料, 相关参数取为^[6] $\alpha = \beta = 3$, $\omega_{pe} = \omega_{pm} = 10$ GHz。

3.1 单负材料的反射相移 φ

对于单负材料 ENG、MNG, 其反射相移 φ 如图 2 所示。

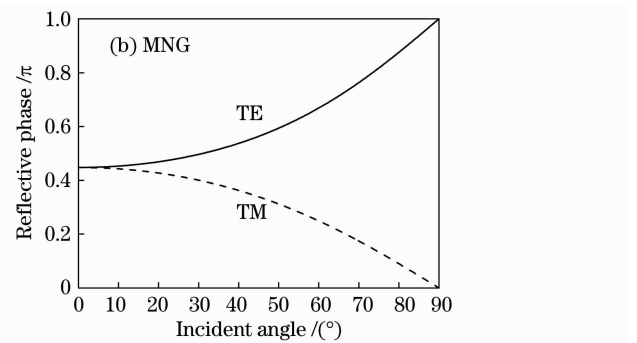


图 2 单负材料层的反射相移

Fig. 2 Reflective phases of a single-negative-material layer

图 2 中, 单负材料层的厚度均取为 $d_A = d_B = 50$ mm, 频率 $\omega = 5$ GHz, $n = 1$ 。从图 2(a) 可知对于 ENG 材料, TM 模的反射相移 φ 随入射角 θ 增大而增大, 而 TE 模则随角度增大而减小; 正入射时相交

于一点 P, 而在 θ 接近 90° 时它们分别趋近于 0 和 $-\pi$ 。改变 ENG 层的厚度 d_A , 或入射频率 ω , P 点也随之改变, 但 TE、TM 模随角度变化的趋势不变, 这说明反射相移 $\varphi = \varphi(d_A, \omega, \theta)$ 。

由 ENG 构成的 F-P 腔(简称 ENG F-P)的共振模频率表示为

$$\delta = \varphi(d_A, \omega, \theta) + \frac{\omega}{c} n d \cos \theta = m\pi. \quad (6)$$

可见对于 TM 模当角度增大时,前一项递增而后一项递减,作用相抵,当 $m=0$ 时有可能实现频率为 ω 的光全向透射。

同理,对于由 MNG 构成的 F-P 腔(MNG F-P),在一定条件下也可以实现 TE 腔模的全向透射。

3.2 全向共振参数

以 ENG F-P 腔为例进行说明:假定腔中介质为空气 $n=1$, (6) 式为 $\varphi(d_A, \omega, \theta) + \frac{\omega}{c} d \cos \theta = 0$, 即腔厚度为

$$d = -\frac{c\varphi(d_A, \omega, \theta)}{\omega \cos \theta} = f(d_A, \omega, \theta). \quad (7)$$

要实现 TM 模的全向共振则在某些特定的参数 d_A, ω 下, d 与 θ 的变化无关。可以采用下列方法探寻合适的全向共振参数。先给定 d_A 值, 当入射角 θ 分别为 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 时, 作出 5 条 $d = f(\omega)$ 曲线。若反射相移 $\varphi(\theta)$ 是严格的余弦函数, 这 5 条曲线会相交于同一点, 该点即为所求的合适参数。然而图 2(a) 中的 TM 模反射相移曲线并不是严格的余弦曲线, 这 5 条曲线会相交出共 10 个交点 (ω_i, d_i) , 这 10 个离散的交点都集中在一个很小的变化区域中。进行优化处理后, 选取期望值 $\omega = \sum_i \frac{\omega_i}{10}, d = \sum_i \frac{d_i}{10}$ 作为相应的合适参数 (ω, d) 。

利用这一方法, 探寻 TM 模得到了能实现全向共振的 ENG F-P 腔的有关参数, 如图 3 所示。图 3 绘出了能使频率为 ω 的 TM 腔模实现全向透射, 单负层厚度 d_A 和腔长 d 所必须满足的相应条件。

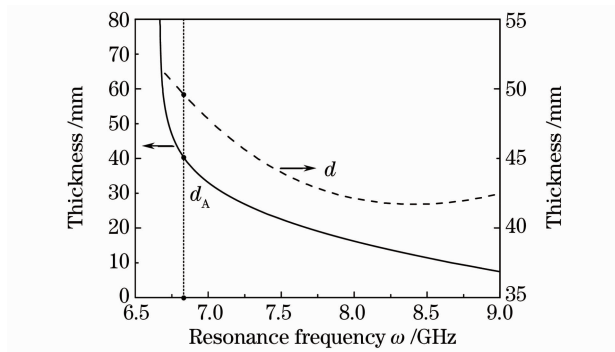


图 3 TM 模全向共振参数
Fig. 3 Omnidirectional resonance parameters of TM mode

为了检验图 3 的正确性, 选取以下参数: $d_A = 40 \text{ mm}, d = 49.6 \text{ mm}, \omega = 6.840 \text{ GHz}$ (见图 3 中的竖直虚线值) 进行数值模拟, 利用特征矩阵方法^[13], 研究了 ENG F-P 腔的透射特性, 其腔模的偏振特性曲线见图 4。

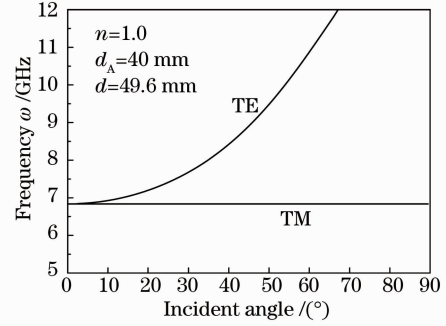


图 4 腔模的偏振特性曲线

Fig. 4 Polarizing properties of resonant modes

由图 4 可以看出随着入射角的增大, TE 腔模向高频方向移动, 而 TM 腔模却始终位于 $\omega = 6.840 \text{ GHz}$ 处, 即该结构可以实现 TM 模的全向透射。

若腔中介质的折射率 n 取其他值, 则 ENG F-P 腔能实现 TM 模全向透射的微腔相关参数如图 5 所示。根据图 5, 随着腔中介质折射率的提高, 能实现 TM 模全向透射的微腔结构尺寸减小。譬如要使频率 $\omega = 6.840 \text{ GHz}$ 的 TM 模全向透射, 整个 ENG F-P 腔的长度应为 $L = 2d_A + d$, 当 $n=1$ 时为 129.6 mm , $n=1.5$ 时为 73.3 mm , $n=2$ 时则为 60.6 mm 。此外由图 5 还可以发现, 通过对腔中介质的调节, 可以实现更低频率的 TM 模全向共振。

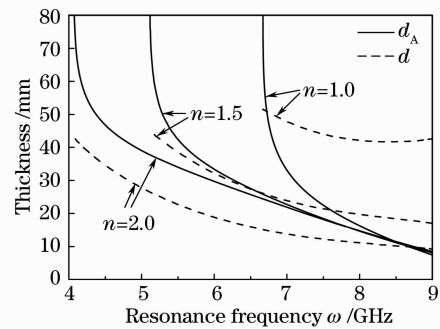


图 5 腔中介质不同时 TM 模的全向共振参数
Fig. 5 Omnidirectional resonance parameters of TM modes

3.3 损耗影响

上述研究中没有计及损耗, 若计及损耗, ENG 的参数选为 $\epsilon_A = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$, 则损耗对 ENG F-P 腔 TM 模的影响如图 6 所示。在图 6 的数值模拟

中, 阻尼频率 $\gamma = 2\pi \times 10^6$ Hz, 其他参数见图 4。可见结构存在损耗时, TM 模的透射率随角度的增大有一定程度地减小, 但不会影响腔模频率, 即不会破坏微腔 TM 模的全向共振特性。

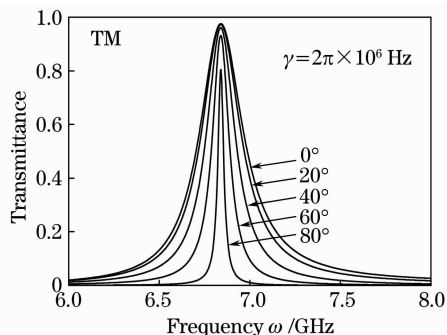


图 6 损耗对 TM 全向共振模的影响

Fig. 6 Effects of loss on the TM resonant mode

3.4 MNG F-P 结构

对于由 2 块相同 MNG 材料构成的 F-P 结构, 也可以利用相同的方法进行研究。由于 MNG 层的相移规律异于 ENG 层(见图 2), 因此对于 MNG F-P 结构可以实现 TE 模的全向透射。图 7 绘出了腔中介质 n 取不同值时, 能使频率为 ω 的 TE 腔模实现全向透射, MNG 层的厚度 d_B 、腔厚度 d 所必须满足的条件。

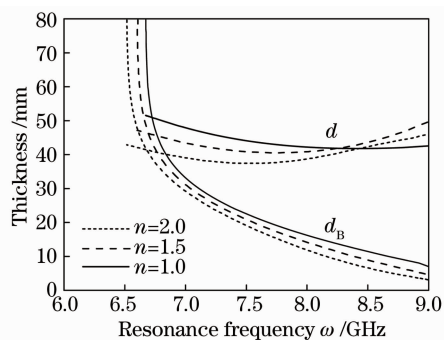


图 7 MNG F-P 腔 TE 模的全向共振参数

Fig. 7 Omnidirectional resonance parameters of TE modes

根据图 7 的全向共振参数, 利用特征矩阵法^[13]进行数值模拟证实了这一结论。图 8 给出了损耗对 MNG F-P 腔 TE 模的影响(相关参数见图 8), 同样可以看出损耗不会破坏微腔 TE 模的全向共振特性。

对比图 5, 7 发现, 腔中介质不同对 ENG F-P 结构的 TM 模全向共振参数影响较大, 提高折射率可有效减小实现全向透射的微腔结构尺寸; 相对而言, 腔中介质不同对 MNG F-P 结构 TE 全向透射模的调制就不太明显。而金属的介电常数可由德鲁特

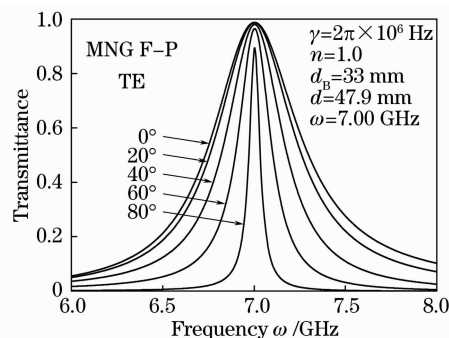


图 8 损耗对 TE 全向共振模的影响

Fig. 8 Effects of loss on the TE resonant mode

(Drude)模型来描述, 其本身就是一种 ENG 材料, 因此可以利用金属薄膜来制作全向滤波器。

衡量滤波器频率选择性的重要参数——品质因子 Q 值, 一方面可以通过大角度入射来得以提高(见图 6, 8), 另一方面也是最主要最有效的方面是通过增加单负材料层的厚度, 提高单负材料反射镜的反射率 R_0 来实现。此外在实际应用中, 还应该选用低损耗的单负材料。

4 结 论

基于 F-P 腔理论, 研究了由 2 块相同单负材料作为反射镜构成的微腔结构的共振特性。若反射镜是 ENG 材料, 在一定条件下可实现 TM 腔模的全向透射; 若是 MNG 材料, 则可实现 TE 腔模的全向透射。通过优化处理给出了这两种微腔结构能实现全向透射时所需满足的各种条件, 为全向滤波器的设计提供理论指导。

参 考 文 献

- 1 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2041~2044
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2041~2044
- 3 Wu Lihua, Wang Zhengping, Zhang Xiangli. Theoretical research on epsilon's nonlinearity of a metamaterial's permittivity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1038~1042
武立华, 王政平, 张祥丽. 一种异质材料介电常数的非线性理论研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1038~1042
- 4 G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, P. C. Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded Transmission lines [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2002, **50**(12): 2702~2712
- 5 J. Li, L. Zhou, C. T. Chan et al.. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(8): 083901
- 6 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li et al.. Properties of one-dimensional photonic crystals containing sing-negative materials

- [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(6): 066607
- 7 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5386~5388
- 8 Zhang Yanan, Deng Lingling, Xu Fei. Study on defect modes in one-dimensional photonic crystals with periodic double defect layers of single-negative-materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 148~152
张雅男, 邓玲玲, 徐飞. 具有周期性双单负材料缺陷的一维光子晶体缺陷模的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 148~152
- 9 L. G. Wang, H. Chen, S. Y. Zhu. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**(24): 245102
- 10 Y. H. Chen. Omnidirectional and independently tunable defect modes in fractal photonic crystals containing single-negatives materials[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(4): 757~761
- 11 H. Y. Li, Y. W. Zhang, L. W. Zhang *et al.*. Experimental investigation of mu negative of Bragg gap in one-dimensional composite right/left-handed transmission line [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(3): 033711
- 12 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light[M]. 7th ed. Yang Xiasun *et al.* transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 299~304
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 第七版. 杨霞荪等译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 299~304
- 13 Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(11): 2172~2178
王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. *物理学报*, 2001, **50**(11): 2172~2178