

一维光子晶体微谐振腔的调谐特性与品质因子*

王媛媛,何晓东[†],胡贵军,全薇,吴冰冰

(吉林大学 通信工程学院,长春 130012)

摘 要:利用传输矩阵法研究了对称结构和非对称结构一维光子晶体微谐振腔的调谐特性和品质因子.研究发现:当缺陷层光学厚度增加时,缺陷模中心波长也会随着增加即向长波方向移动,微谐振腔的调谐特性与缺陷层两边介质的折射率有关;相比于对称结构,非对称结构能在较小的缺陷层光学厚度变化范围内实现较大波长范围的线性调谐;品质因子随缺陷层厚度的增加先增大后减小,在缺陷模中心波长为 λ_0 时可达最大值;高低折射率介质层的排布对微谐振腔品质因子有影响.

关键词:光子晶体;微谐振腔;缺陷模;调谐特性;品质因子

中图分类号: TN242

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-285-4

0 引言

近十年来,作为可以用于控制电磁波的新材料,光子晶体引起人们的高度兴趣.光子晶体^[1-3]是1987年由 Yablonovitch 和 John 分别提出来的,是一种周期性调整介电常量的结构.它可以产生命名为光子禁带(PBGs)的光谱区,在光子禁带中光不能传播,在某种意义上,这类类似于半导体中的电带隙.由于其独特的特性,光子晶体在光通信上有重要用途.例如可以用它制作光子晶体光纤,微谐振腔^[4-5],低阈值激光发射器,光子晶体激光二极管和无阈值激光器,光子晶体密集波分复用器,品质优良的滤波器,光子晶体全角度反射镜,光子晶体光开关等等,这些器件对光集成起到举足轻重的作用.

本文所研究的一维光子晶体微谐振腔相比与传统谐振腔有多方面的优点.传统谐振腔的制作方法用于制作微谐振腔是相当困难的.在光波段,传统金属谐振腔损耗相当大,具有许多光损耗机制,如衍射损耗,反射镜的透射,腔内介质的散射和非激活介质

的吸收等等,因此,品质因子 Q 值很低.而光子晶体微谐振腔是通过在光子晶体中引入缺陷^[6-11]形成的.由于缺陷的存在,光子带隙中就会出现一个频宽极窄的缺陷态,和缺陷态频率吻合的光子只能在缺陷处传播,这样就使腔内的光损耗大大降低,微谐振腔品质因子 Q 非常高.利用这种微谐振腔制作的激光器具有低阈值,高效率,体积小等特点,对光子集成,光通信有十分重要的意义.

本文利用传输矩阵法对对称结构和非对称结构两种一维光子晶体微谐振腔的调谐特性和品质因子做了详细研究.

1 物理模型

本文所讨论的光子晶体微谐振腔结构如图 1.其中,黑色介质为高折射率介质,白色介质为低折射率介质,灰色介质为缺陷介质.图 1(a)和(b)中,缺陷层两边均为同一种介质,为镜像对称结构;图 1(c)和(d)中,缺陷层两边分别为不同介质,为非对称结构.

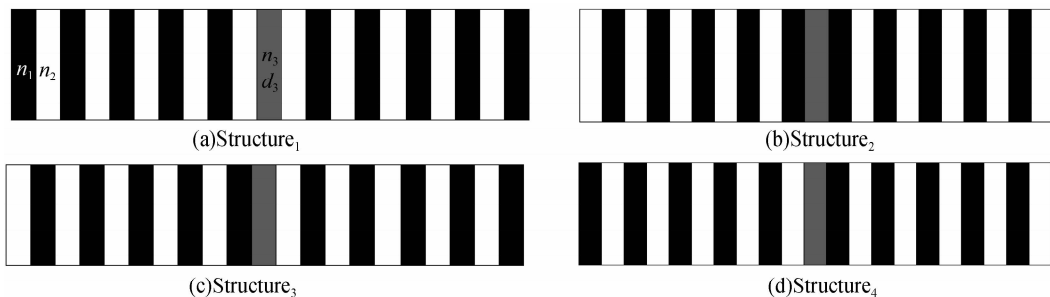


图 1 光子晶体微谐振腔结构
Fig. 1 The structures of photonic crystal micro-cavity

根据传输矩阵法,设介质为均匀介质.考虑一维光子晶体中的一个单层介质(折射率为 n ,厚度为 d)其特性矩阵 M_i 为

* 吉林省科技发展计划(20050524)和长春市国际合作科技计划(2007114)资助

[†] Tel:0431-85938666 Email:hexiaodong220@163.com

收稿日期:2007-09-18

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos \beta & -(i/p) \sin \beta \\ -i p \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 $\beta = k_0 n d \cos \theta$, $p = \sqrt{\epsilon/\mu} \cos \theta$ 为 TE 模的有效光导纳, ϵ 是介电常量, μ 是磁导率, θ 表示入射角, k_0 为真空中的波矢. 由 N 层单层介质构成的一维光子晶体结构, 其特征矩阵为

$$M_N = \prod_{i=1}^N M_i = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

由此可得反射率和透射率分别为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{m_{11} p_l + m_{12} p_l p_l - m_{21} - m_{22} p_l}{m_{11} p_l + m_{12} p_l p_l + m_{21} + m_{22} p_l} \right|^2$$

$$T = \frac{p_l}{p_1} |t|^2 = \frac{p_l}{p_1} \left| \frac{2 p_l}{m_{11} p_l + m_{12} p_l p_l + m_{21} + m_{22} p_l} \right|^2 \quad (3)$$

式中 $p_1 = \sqrt{\epsilon_1/\mu_1} \cos \theta_1$, $p_l = \sqrt{\epsilon_l/\mu_l} \cos \theta_l$, 表示光子晶体左右两侧的有效光学导纳; ϵ_1, μ_1 和 ϵ_l, μ_l 表示光子晶体左右两侧介质的介电常量和磁导率; θ_1, θ_l 为光子晶体的入射角和透射角.

假设组成光子晶体的各介质均为各向同性的非磁性介质, 光子晶体置于空气中. 入射波为 TE 波并且垂直入射到光子晶体表面, 入射波长 $\lambda_0 = 780$ nm. 高折射率介质为 TiO_2 ($n_1 = 2.35$), 低折射率介质为 MgF_2 ($n_2 = 1.35$), 缺陷介质为空气 ($n_3 = 1$). 高低折射率介质层的光学厚度均为 $\lambda_0/4$, 缺陷层的光学厚度为 d_3 .

2 数值模拟分析

通过数值模拟发现, 当缺陷层光学厚度增加时, 缺陷模中心波长也会跟着增加即向长波方向移动. 图 1 中四种结构的缺陷模中心波长与缺陷层光学厚度的关系如图 2.

对称结构中, 当微谐振腔为结构 1 时, 缺陷模中心波长随缺陷层光学厚度线性增加, 曲线斜率约为 0.46; 当微谐振腔为结构 2 时, 缺陷模中心波长随缺陷层光学厚度非线性增加, 曲线斜率约为 0.86. 非对称结构中, 当微谐振腔为结构 3 和结构 4 时, 缺陷模中心波长都随缺陷层光学厚度线性增加, 曲线斜率约为 0.72, 并且两条线基本重合, 这是因为缺陷层两边介质的折射率并没有改变只是位置发生变化. 由此可见, 微谐振腔的调谐特性与缺陷层两边介质的折射率有关. 缺陷介质的折射率与缺陷层两边介质的折射率相差越大, 缺陷模中心波长与缺陷层光学厚度关系曲线的斜率越大, 并且由线性关系转变为非线性关系, 这是因为当缺陷层两边为高折射率介质时会使整个微谐振腔表现出强烈的色散.

当微谐振腔为结构 1 时, 缺陷层光学厚度为 130 nm 左右时就出现了中心波长为 660.3 nm 的缺

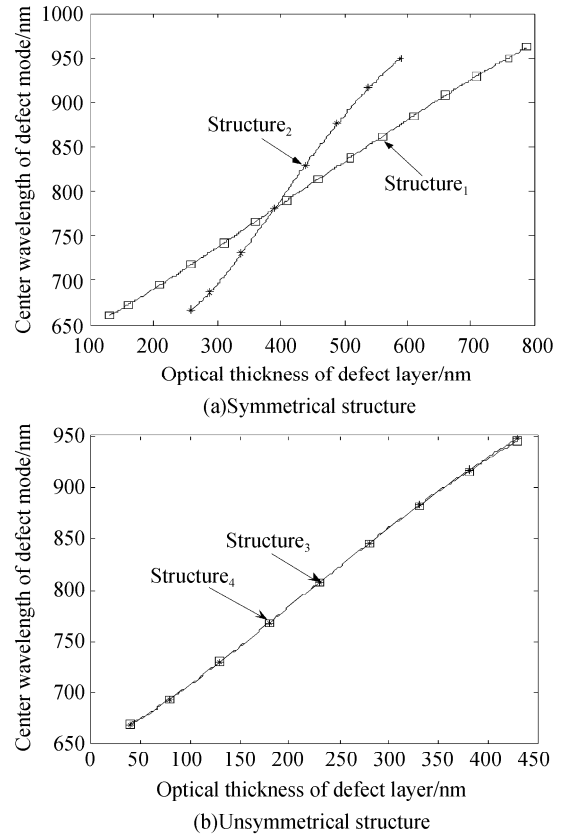


图 2 缺陷层光学厚度对缺陷模中心波长的影响
Fig. 2 Effects of the optical thickness of the defect layer on the center wavelength of the defect mode

陷模, 并且缺陷层光学厚度逐渐增加到 790 nm 左右时这个缺陷模中心波长逐渐移动到 962.2 nm 处, 最大可调谐波长范围约为 301.9 nm. 而当微谐振腔为结构 2 时, 缺陷层光学厚度为 260 nm 左右时才出现中心波长为 666.4 nm 的缺陷模, 并且最大可调谐波长范围约为 284.3 nm. 另外当缺陷层光学厚度为 390 nm 即 $\lambda_0/2$ 时, 结构 1 和结构 2 的缺陷模中心波长均为 780 nm 即 λ_0 . 当微谐振腔为结构 3 和结构 4 时, 缺陷层光学厚度为 40 nm 左右时出现中心波长约为 668.1 nm 的缺陷模, 最大可调谐波长范围约为 279.3 nm. 结构 1, 结构 3, 结构 4 都可用于制作具有线性调谐作用的微谐振腔, 并且最大可调谐波长范围相差不多, 但相比之下, 非对称结构的缺陷层光学厚度变化范围约为对称结构的一半, 更利于器件的微型化.

为了进一步比较这几种微谐振腔的性能, 本文还将对微谐振腔的品质因子进行研究. 品质因子是衡量缺陷模式好坏的重要因素, 定义为 $Q = \lambda_c / BW$, 其中 $BW = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{2}$ 为缺陷模带宽, λ_1, λ_2 为缺陷模反射率曲线上反射率为 0.5 处对应的两个波长, λ_c 为缺陷模中心波长^[5]. 图 3 给出了四种微谐振腔的品质因子与缺陷层光学厚度的关系. 通过分析发现,

品质因子随缺陷层厚度的增加先增大后减小存在最大值。

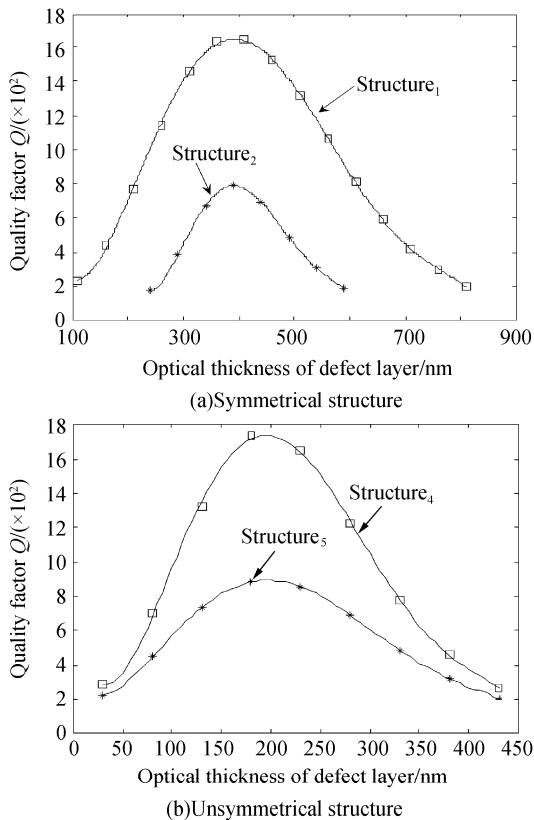


图3 缺陷层光学厚度对品质因子的影响
Fig.3 Effects of the optical thickness of the defect layer on quality factor

在对称结构中,结构1与结构2的品质因子曲线变化大致相同,先增大后减小,在缺陷层光学厚度为 $\lambda_0/2$ 左右达到最大值,此时缺陷模中心波长为 λ_0 。在非对称结构中,结构3与结构4的品质因子曲线变化有所区别,结构4的品质因子曲线比结构3的品质因子曲线变化剧烈;相同的是,两条曲线先增大后减小,在缺陷层光学厚度 $\lambda_0/4$ 左右达到最大值,此时缺陷模中心波长为 λ_0 。从以上规律可以总结出,品质因子在缺陷模中心波长为 λ_0 时可达最大值。

从图3(a)中可以很明显地看出,结构1的最大品质因子较大,约为1652,而结构2的最大品质因子仅为788.3。图3(b)中,结构4的最大品质因子较大,约为1740,而结构3的最大品质因子约为892.5。由此看出,微谐振腔高低折射率介质层的排布对微谐振腔品质因子有影响。对称结构时,当微谐振腔两边为高折射率介质时,品质因子相对较大。非对称结构时,当微谐振腔第一层为高折射率介质时,品质因子相对较大。在设计一维高品质微谐振腔时,应当令第一层介质为高折射率介质。

3 结论

本文利用传输法对对称结构和非对称结构的两种一维光子晶体的调谐特性和品质因子特性做了详细研究。通过数值模拟发现,当缺陷层光学厚度增加时,缺陷模中心波长也会跟着增加即向长波方向移动。调谐特性与缺陷层两边介质的折射率有关,缺陷介质的折射率与缺陷层两边介质的折射率相差越大,缺陷模中心波长与缺陷层光学厚度关系曲线的斜率越大,并且由线性关系转变为非线性关系。非对称结构能在较小的缺陷层光学厚度变化范围内实现较大波长范围的线性调谐,更利于器件的微型化。品质因子随缺陷层厚度的增加先增大后减小存在最大值,在缺陷模中心波长为 λ_0 时可达最大值。微谐振腔高低折射率介质层的排布对微谐振腔品质因子有影响。对称结构时,当微谐振腔两边为高折射率介质时,品质因子相对较大;非对称结构时,当微谐振腔第一层为高折射率介质时,品质因子相对较大。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattice[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] CHEN Wei-zong, SHEN Ying, LIU Jun, *et al.* One-dimensional photonic crystal and optical multilayer dielectric film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1081-1084.
陈慰宗, 申影, 刘军, 等. 一维光子晶体与光学多层介质膜[J]. *光子学报*, 2001, **30**(9): 1081-1084.
- [4] OU-YANG Zheng-biao, XU Gui-wen, SUN Yi-ling, *et al.* Tuning characteristics of photonic crystal micro-resonators[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(4): 399-408.
欧阳征标, 许桂雯, 孙一翎, 等. 光子晶体微谐振腔的调谐特性[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 399-408.
- [5] XU Gui-wen, OU-YANG Zheng-biao. A new double-wavelength photonic crystal resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 429-433.
许桂雯, 欧阳征标. 一种新型光子晶体双色谐振腔[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 429-433.
- [6] OU-YANG Zheng-biao, YANG Lin-ling, XU Gui-wen, *et al.* Mode properties of one-dimensional photonic crystals with defect[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(1): 63-66.
欧阳征标, 杨琳玲, 许桂雯, 等. 一维缺陷光子晶体的模式特性研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(1): 63-66.
- [7] XU Gui-wen, OU-YANG Zheng-biao, AN He-nan, *et al.* Investigation on the bandwidth and quality factor of the defect mode in a photonic crystal with a defect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1079-1081.
许桂雯, 欧阳征标, 安鹤男, 等. 光子晶体缺陷模的带宽与品质

- 因子研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(9):1079-1081.
- [8] DU Gui-qiang, LIU Nian-hua. Complete transmission and application of one-dimensional photonic crystal with multiple defects[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(3):98-101. 杜桂强, 刘念华. 含有多缺陷的一维光子晶体的完全透射及应用[J]. 量子光学学报, 2004, **10**(3):98-101.
- [9] CHEN Xian-feng, SHEN Xiao-ming, JIANG Mei-ping, *et al.* Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1876-1880. 陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 一维光子晶体的缺陷模特性研究 [J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1876-1880.
- [10] SHANG Ting-yi, ZHENG Yi, ZHANG Hui-yun, *et al.* Omnidirectional gap defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4):663-666. 尚廷义, 郑义, 张会云, 等. 含全负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. 光子学报, 2007, **36**(4):663-666.
- [11] LIU Dan-dong, CHEN Guang-de, LI Pu-quan, *et al.* Tunable transmittance of defect modes in one-dimension photonic crystal with 3 defects [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2):286-289. 刘丹东, 陈光德, 李普选, 等. 缺陷态透射率可调的三缺陷层的一维光子晶体[J]. 光子学报, 2006, **35**(2):286-289.

Tuning Characteristics and Quality Factor of One-dimension Photonic Crystal Micro-cavity

WANG Yuan-yuan, HE Xiao-dong, HU Gui-jun, QUAN Wei, WU Bing-bing
(Department of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Received date: 2007-09-18

Abstract: The tuning characteristics and quality factor of one-dimension photonic crystal micro-cavity with symmetrical structure and unsymmetrical structure with transfer matrix method were researched. Results show that with the increase of optical thickness of defect layer, the center wavelength of defect mode will increase and tuning characteristics of micro-cavity relate to the refractive index of medium which surround the defect layer. Compared with symmetrical structure, unsymmetrical structure can achieve linear tuning with wide wavelength range but smaller variation of the optical thickness of defect layer. Quality factor will increase first and then reduce with increase the thickness of the defect layer and it has maximum when the center wavelength of defect mode is λ_0 . The array of medium with high or low refractive index affects the quality factor of micro-cavity.

Key words: Photonic crystal; Micro-cavity; Defect mode; Tuning characteristics; Quality factor



WANG Yuan-yuan was born in 1984. She is pursuing for her M. S. degree at Department of Communication Engineering, Jilin University at present, and her research interests focus on the theory and application of photonic crystal micro-cavity in optical communication devices.