

doi: 10.3788/gzxb20124104.0442

基于宽度可调节的线缺陷平板型光子晶体的空气槽微腔

疏静

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘 要: 研究了一种空气槽光子晶体微腔, 这种腔是由在平板型光子晶体上引入一条宽度可以调节的线缺陷空气槽形成的. 腔模的电场被强烈局限在空气槽中, 由于介电常量的不连续性, 电场得到很大的提高, 同时模体积被大大地降低. 数值模拟与分析了微腔的能带结构和场分布, 考虑到腔模的谐振频率和对称性, 发现一阶偶模同时具有较高的品质因子和较小的模体积; 应用有限时域差分法, 得到腔模的品质因子可以高达 10^6 , 模体积仅为 $0.02(\lambda/n)^3$. 计算了一阶偶模谐振波长随空气槽宽度以及空气孔半径的变化, 发现随着宽度的增加, 波长越来越短. 而随着空气孔半径的增加, 波长近似线性地减小; 当空气孔半径为 170 nm 时, 可以获得最高的腔品质因子.

关键词: 光子晶体; 光学微腔; 有限时域差分法; 品质因子; 模体积

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0442-4

0 引言

1987 年, E. Yablonovitch^[1] 和 S. John^[2] 借鉴半导体晶体及其电子带隙的概念, 首次分别独立提出介电常量呈周期性分布的材料可以改变在其中传播光子的行为, 并称这种材料为光子晶体. 光子晶体具有重要的应用前景, 它可以制作全新原理的各种高性能光电子器件, 例如光子晶体激光器、光子晶体波导、光子晶体光纤等^[3-10]. 随着光子晶体制作技术的改进和对光子晶体引起的新现象的进一步研究, 光子晶体极有可能在不远的将来成为信息技术和工业的基本材料, 并在光学、光电子学、信息科学领域引发一场技术革命.

光学微腔是指具有高品质因子、小尺寸、可与谐振光波波长相比拟的光学微型谐振腔. 但由于其尺寸特别小, 用传统的谐振腔制作方法来制造微腔是相当困难的, 而且在光波波段的传统的金属谐振腔的损耗相当大, 品质因数数值很小. 而光子晶体微腔的品质因数可以做得很高, 是采用其它材料制作的谐振腔所无法达到的. 光子晶体最根本的特征是具有光子禁带(光子带隙). 落在禁带中的电磁波, 无论其传播方向如何, 都是禁止传播的. 光子带隙依赖于光子晶体的结构、介电常量的配比和结构对称性. 在光子

晶体中引入缺陷可能在光子带隙中出现缺陷态, 这种缺陷态具有很大的态密度和品质因子. 人们通过在完美光子晶体中引入缺陷来形成微腔, 以实现光限制, 它是靠光子晶体的带隙结构来实现光的反射, 如果腔的尺寸正适合容纳一个处在禁带内的模式, 就将这个模式钉在了缺陷处, 如果这个模式与传播模有非零耦合, 能量将会从谐振方向泄漏出去, 这一特性用微腔的品质因子 Q 来描述. 光子晶体微腔之所以受到广泛的关注是因为它对光集成有着重要的意义, 同时它还可应用在微腔激光器发光二极管等, 而且这样的微腔还可以作为载体用在实现各种量子信息的方案中. 因此设计高品质的微腔成为研究的热点. 平板型光子晶体最重要的应用就是光学微腔. 它是由在高折射率系数的薄板上做出二维光子晶体周期性结构所形成的, 由于可用传统的薄膜沉积和刻蚀的方法实现, 制作方法相对简单.

本文研究了一种基于平板型光子晶体的空气槽微谐振腔, 它是由一条空气槽加在宽度可以调节的线缺陷平板型光子晶体上形成的模体积很小的微谐振腔^[11-12]. 由于电场在电介质边界的连续性条件, 空气槽中的腔模电场分布得到了很大的提高. 同时, 这种腔模的集中还可以大大降低模体积. 另外, 以前的 L_3 型和一维光子晶体腔的品质因子 Q 之所以不算

基金项目: 中国博士后科学基金(No. 20080430171)和江苏省博士后科学资助计划(No. 0702024B)资助

第一作者: 疏静(1980—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光子晶体、量子光学等. Email: jingshu1012@gmail.com

收稿日期: 2011-10-18; **修回日期:** 2012-02-14

特别高主要是因为突然终止的空气槽造成了很大的垂直辐射损失,本文在二维平行板型光子晶体上引入一条非突然终止的空气槽,这样极大减少了垂直辐射损失,提高了品质因子 Q .

1 平板型光子晶体空气槽微谐振腔的结构和基本理论

近年来,制备品质因子 Q 高和模体积 V 小的光学腔一直是研究的热点,这种光学腔包括法布里-罗波腔^[13],微球腔^[14],基于硅和二氧化硅的回音壁模式腔^[15-16],以及光子晶体腔^[17-19]等.其中光子晶体腔由于拥有极高的 Q/V ,且可以与其他光子晶体器件集成获得了极大地关注.对于光子晶体腔,品质因子 Q 已经可以达到 10^6 .归一化的无量纲的有效模体积定义为

$$V_{\text{eff}} = \frac{\int \epsilon(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d^3r}{\epsilon(\mathbf{r}_{\text{max}}) \max[|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2]} \left[\frac{2n(\mathbf{r}_{\text{max}})}{\lambda} \right]^3,$$

(其中 \mathbf{r}_{max} 是最大平方电场处的位置),因此模体积的减小可以通过增大最大平方电场和使最大平方电场处于低指数区域来实现.腔模体积的减小可以用来控制光物质相互作用过程,如非线性光学和腔量子电动力学(Quantum Electrodynamics, QED)等.

本文研究一种基于平板型光子晶体的空气槽微谐振腔,其中一条空气槽加在宽度可以调节的线缺陷光子晶体上,微谐振腔是由远离波导中心方向移动空气孔形成的,如图 1.其中光子晶体晶格常量 $a=490$ nm,空气孔半径 $r=170$ nm,光子晶体平板厚度 $t=220$ nm,硅材料折射率 $n_{\text{si}}=3.48$,移动空气孔位移大小分别是 $d_A=14$ nm, $d_B=9.3$ nm 和 $d_C=4.7$ nm.

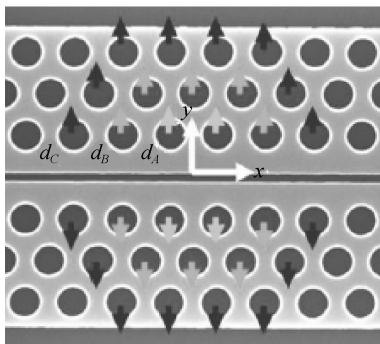


图 1 空气槽微谐振腔的结构

Fig. 1 Illustration of the air-slot photonic crystal cavity

空气槽在这里起了自由空间场局域化的重要作用,其物理机制可以理解为电介质边界的局域场提高.一般的,光子晶体腔中电场的 TE 模是 x 偏振的,因此空气槽表面附近电场的边界条件是 $\epsilon_{\text{si}} E_x(r_{\text{in}}) = \epsilon_0 E_x(r_{\text{out}})$,其中 ϵ_{si} 和 ϵ_0 分别是光子晶体材料和空气的介电常量, r_{in} 和 r_{out} 分别是光子晶体材

料边界里面和外面的位置.这样空气槽中的电场 $E_x(r_{\text{out}})$ 相对于光子晶体材料中的电场 $E_x(r_{\text{in}})$ 提高了 $\epsilon_{\text{si}}/\epsilon_0$ 倍,即空气槽中的最大平方电场 $\max[|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2]$ 提高了 $(\epsilon_{\text{si}}/\epsilon_0)^2$ 倍,且 $n(\mathbf{r}_{\text{max}})=1$,因此很大程度上降低了有效模体积.

2 数值模拟与分析

2.1 平板型光子晶体空气槽微谐振腔的能带结构与电场分布

为了更好地理解空气槽微谐振腔,进一步计算了能带结构,如图 2,其中空气槽宽度 $s=70$ nm.可以看到带隙中有四个腔场模式存在,分别是一阶偶模,一阶奇模,二阶偶模和二阶奇模.还计算了磁场 H_z 分布,如图 3,可以看到磁场分布的奇对称和偶对称.得到四个局域化的场模式:一阶偶模,一阶奇模,二阶偶模和二阶奇模.

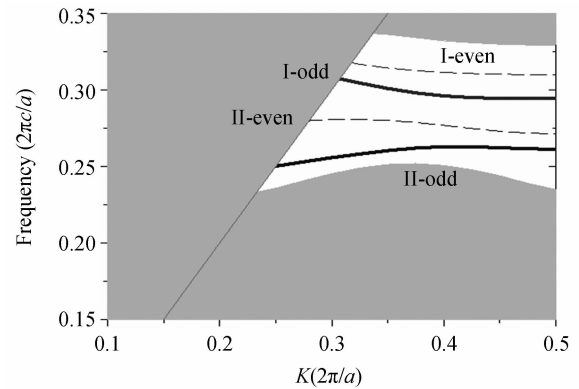


图 2 空气槽光子晶体微谐振腔的能带结构

Fig. 2 Band structure of the air-slot photonic crystal cavity

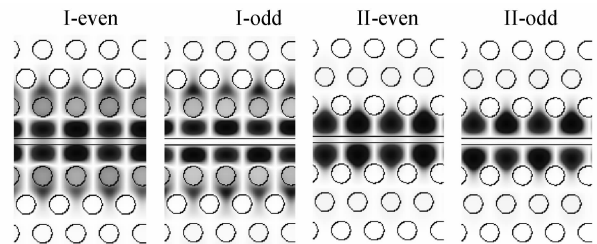


图 3 四个模式的磁场 H_z 分布

Fig. 3 Field distributions H_z of these four modes

2.2 平板型光子晶体空气槽微谐振腔中一阶偶模分析

考虑到腔模的谐振频率和对称性,发现一阶偶模同时具有较高的品质因子 Q 和较小的模体积 V ,因此本文主要分析微谐振腔中的一阶偶模.运用有限时域差分(Finite-difference time-domain, FDTD)法计算得到,当空气槽宽度 $s=70$ nm,空气槽微谐振腔中一阶偶模的品质因子高达 $Q=10^6$,模体积仅为 $V=0.02(\lambda/n)^3$.另外,如图 4,电场的二维傅里叶变换也显示了光锥中只有很少的泄露发生,因此可以获得很高的品质因子 Q .

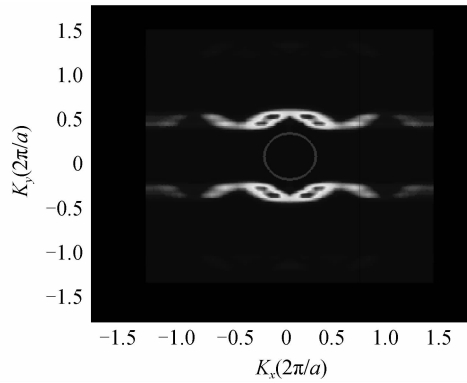


图 4 有限时域差分法计算的一阶偶模的电场空间傅里叶变换

Fig. 4 FDTD simulation and Fourier transform of the electric field for the first order even cavity mode

图 5 给出了一阶偶模的电场 E_x 分布随空气槽宽度的变化,空气槽宽度分别是 0、40 nm、70 nm 和 140 nm.可以看出,当空气槽宽度为 0 或者 140 nm 时,电场 E_x 的分布比较分散,而宽度为 40 nm 或 70 nm 时,电场 E_x 的分布集中在空气槽中.

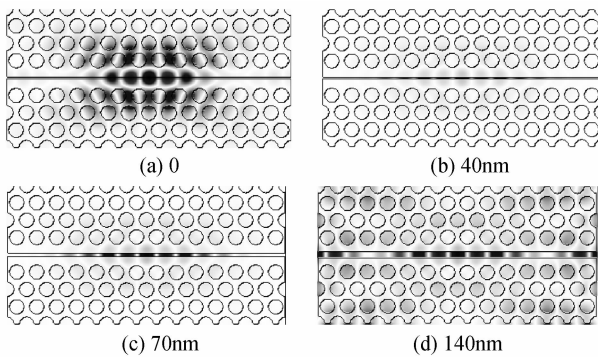


图 5 一阶偶模电场 E_x 分布随空气槽宽度的变化

Fig. 5 Variation of first order electric field distribution E_x with air slot widths

图 6 给出了一阶偶模谐振波长随空气槽宽度的变化,其中 $r=170$ nm.可以看出随着宽度的增加,波长越来越短.这是因为线缺陷区域的有效折射系数随着空气槽的变宽单调地减小,因此谐振腔的有效腔长减小,谐振波长变短.图 7 给出了一阶偶模谐

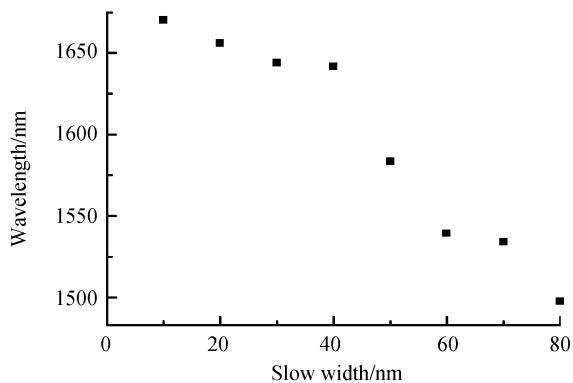


图 6 一阶偶模谐振波长随空气槽宽度的变化

Fig. 6 Variation of calculated resonant wavelength of the first order even mode with the air slot width

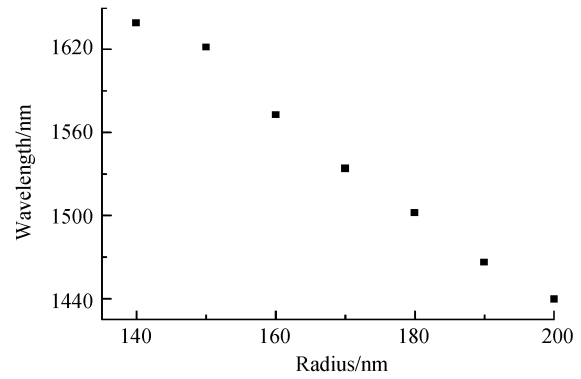


图 7 一阶偶模谐振波长随空气孔半径的变化

Fig. 7 Variation of calculated resonant wavelength of the first order even mode with the radius of the air holes

振波长随空气孔半径的变化,其中 $s=70$ nm.谐振波长随着空气孔半径的增加而近似线性地减小.但是当 $r=170$ nm 时,可获得最高的腔品质因子,因此选择这个半径作为本文分析的对象.

3 结论

本文研究了一种平板型光子晶体微谐振腔,通过引入一条宽度是波长量级的空气槽,使腔模的电场被强烈局限在空气槽中,由于介电常量的不连续性,电场得到很大的提高,同时模体积被大大地降低.考虑到腔模的谐振频率和对称性,发现一阶偶模同时具有较高的品质因子和较小的模体积,应用有限时域差分法,得到腔模的品质因子可以高达 10^6 ,模体积仅为 $0.02(\lambda/n)^3$,且电场主要分布在空气槽中.研究了一阶偶模谐振波长随空气槽宽度以及空气孔半径的变化规律,发现谐振波长随着空气槽宽度和空气孔半径增加而减小.这种高 Q/V 腔可以用在研究中性气体原子的腔量子电动力学(Cavity Quantum Electrodynamics)、自由空间的物质场相互作用、非线性光学以及量子信息过程等.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] SUGIMOTO Y, TANAKA Y, IKEDA N, *et al.* Low propagation loss of 0.76 dB/mm in GaAs-based single-line-defect two-dimensional photonic crystal slab waveguides up to 1 cm in length[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(6): 1090-1096.
- [4] LIN S Y, CHOW E, BUR J, *et al.* Low-loss, wide-angle Y splitter at approximately $\sim 1.6\text{-}\mu\text{m}$ wavelengths built with a two-dimensional photonic crystal[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(16): 1400-1402.
- [5] NODA S, CHUTLNAN A, IMADA M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure[J]. *Nature*, 2000, **407**(6804): 608-610.
- [6] CAI M, PAINTER O, VAHALA K J, *et al.* Fiber-coupled

- microsphere laser[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(19): 1430-1432.
- [7] NOMURA M, IWAMOTO S, WATANABE K, *et al.* Room temperature continuous-wave lasing in photonic crystal nanocavity[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(13): 6308-6315.
- [8] ASANO T, KUNISHI W, SONG B S, *et al.* Time-domain response of point-defect cavities in two-dimensional photonic crystal slabs using picosecond light pulse[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(15): 151102-1-151102-3.
- [9] JI Ling-ling, CHEN Wei, CAO Ying-chun, *et al.* Supercontinuum generation based on fission of higher-order solitons in bi-refringent photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5462-5466.
季玲玲, 陈伟, 曹迎春, 等. 双折射光子晶体光纤中基于孤子分裂的超连续光谱产生[J]. *物理学报*, 2009, **58**(8): 5462-5466.
- [10] LIU Hai-ying, MENG Zi-ming, DAI Qiao-feng, *et al.* Experimental investigation of the slow light and superluminal effects in high-quality three-dimensional colloidal photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(7): 4702-4707.
刘海英, 蒙自明, 戴峭峰, 等. 高质量三维胶体光子晶体中慢光速与超光速的实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(7): 4702-4707.
- [11] YAMAMOTO T, NOTOMI M, TANIYAMA H, *et al.* Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(18): 13809-13817.
- [12] GAO Jie, Mc MILLAN F J, WU Ming-Chung, *et al.* Demonstration of an air-slot mode-gap confined photonic crystal slab nanocavity with ultrasmall mode volumes[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(5): 051123-1-051123-3.
- [13] VAHALA K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 839-846.
- [14] GRUDININ I S, MATSKO A B, MALEKI L. On the fundamental limits of Q factor of crystalline dielectric resonators[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6): 3390-3395.
- [15] SOLTANI M, YEGNANARAYANAN S, ADIBI A. Ultra-high Q planar silicon microdisk resonators for chip-scale silicon photonics[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 4694-4704.
- [16] ARMANI D K, KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, *et al.* Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip[J]. *Nature*, 2003, **421**(6926): 925-928.
- [17] NODA S, FUJITA M, ASANO T. Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(8): 449-458.
- [18] TANABE T, NOTOMI M, KURAMOCHI E, *et al.* Trapping and delaying photons for one nanosecond in an ultrasmall high-Q photonic-crystal nanocavity [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(1): 49-52.
- [19] XIE Dong-hua, HE Xiao-dong, TONG Chuan-ping, *et al.* Parameter analysis of planer photonic crystal microcavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 434-438.
谢东华, 何晓东, 佟传平, 等. 平板型光子晶体谐振腔性能分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 434-438.

An Air-slot Cavity Based on Width-modulated Line Defect Photonic Crystal Slab

SHU Jing

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An air-slot photonic crystal cavity is studied based on the design of an air-slot in a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab. The electric field of the cavity mode is strongly localized in free space. Owing to the discontinuity of the dielectric constant, the electric field of the cavity mode is strongly enhanced inside the slot and the mode volume is strongly compressed. The cavity band structure and cavity modes of this air-slot photonic crystal cavity are numerical simulated and analyzed. According to the resonant frequency and the symmetry of the cavity modes, the first order even mode has both high quality factor and small cavity volume. Using finite-difference time-domain method, the calculated quality factor is as high as 10^6 and the mode volume is as small as 0.02 of a cubic wavelength in a vacuum. Additionally, the properties of the first order even cavity mode as a function of the slot width and the radius of the holes are calculated. The resonant frequency of the first order even mode is decreased with the slot width and radius of the holes. But when the radius of the holes are 170 nm, the highest quality factor of the air-slot photonic crystal cavity is obtained.

Key words: Photonic crystal cavity; Optical microcavity; Finite-difference time-domain method; Quality factor; Mode volume