

基于宽度抛物线型和渐变孔径的超高 Q 低 V 一维光子晶体纳米梁腔的设计*

冯琛¹⁾ 冯国英^{1)†} 陈念江²⁾ 周寿桓¹⁾²⁾

1) (四川大学电子信息学院, 成都 610064)

2) (华北光电技术研究所, 北京 100015)

(2012年2月13日收到; 2012年4月6日收到修改稿)

设计了基于宽度抛物线型和孔径渐变的一维 (1-D) 光子晶体 (PhC) 纳米梁腔. 通过 FDTD 的计算模拟, 设计的这种纳米梁腔可以实现超高 Q 值 1.8×10^7 , 同时拥有超小模体积 $V \sim 0.04(\lambda/n)^3$, 在继承抛物线型和渐变孔径型纳米梁腔高 Q 的基础上, 进一步降低了模体积 V . 我们设计的这种腔具有紧凑, 低制造工艺要求以及高 Q/V 值等优点, 在未来应有广泛应用.

关键词: 抛物线型, 渐变孔径, 纳米梁腔, 低 V

PACS: 42.70.Qs, 42.60.Da, 85.30.De

1 引言

在光子晶体的研究中, 就如何有效控制光和有效地进行光与物质相互作用而设计制备出拥有超高品质因子 Q 和超小模式体积 V 的光学微腔是一大挑战. 在过去十几年里, 许多研究小组致力于利用标准的平面技术来制备光子晶体微腔^[1,2]. 这些微腔依靠全内反射和周期性布拉格反射以及引入缺陷来约束光场. 最近, 光子晶体纳米梁腔^[3] 因其结构简单, 制备较容易而受到研究人员的广泛关注. 研究人员陆续提出了渐变孔径型纳米梁^[4], 宽度抛物线型纳米梁^[5] 等腔型以进一步提高光子晶体纳米梁腔的 Q 值, 减小模体积 V 值. 这类纳米梁腔不再仅仅利用简单的点缺陷等来形成微腔, 它们还利用其高斯型光子阱同增益介质的完美匹配来实现高 Q 微腔. 并且纳米梁腔同二维光子晶体平板腔相比, 实现相同量级 Q 值的情况下, 尺寸更小, 功耗更低^[6,7]. 我们设计了一种新的抛物线型宽度和渐变型孔径光子晶体 (PT PhC) 纳米梁腔, 该腔型设计结合渐变孔径纳米梁腔和宽度抛物线型纳米梁腔的优势, 同目前已有的宽度抛物线型^[5] 和渐变孔

径^[8] 纳米梁腔相比, Q 值都在同一数量级 $\sim 10^7$, 而 V 值降低一个数量级, 降至 $\sim 0.04(\lambda/n)^3$, 从而将 Purcell 因子^[9] 增加一个数量级. 该设计可以应用于无阈值激光器^[10,11]、强耦合量子点腔系统^[8]、传感器^[12,13] 等.

2 计算原理

Q 因子反映的是腔存储能量的性能, 定义为光在腔内存储的能量与单位时间散射掉的能量之比, 用数学表达式表示为:

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega = \tau_{\text{photon}} \omega_0 = \omega_0 W / P, \quad (1)$$

其中, ω_0 为腔中心频率, $\Delta\omega$ 为 ω_0 对应的频谱宽, τ_{photon} 是腔内光子寿命, 定义为腔内电场能量降低至初始场的 $1/e$ 时所需时间, W 为腔总能量, P 为辐射功率. 通过傅里叶变化可将 τ_{photon} 同 $\Delta\omega$ 建立关系 $\tau_{\text{photon}} = 1/\Delta\omega$. 由此可以通过计算透过率谱线特性或者腔总能量同散射能量之比来计算 Q 因子.

另一个重要的腔参数为模体积 V , 可以通过将空间电场总的能量积分除以最大的电场能量, 进行

* 国家自然科学基金 (批准号: 60890200, 10976017) 和固体激光技术国家级重点实验室基金资助的课题.

† E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn

归一化处理得到, V 的数学表达式^[10] 为:

$$V = \frac{\iiint \varepsilon(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d^3\mathbf{r}}{\max [\varepsilon(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2]}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{r} 为空间位置, $\varepsilon(\mathbf{r})$ 为介电函数, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 为电场强度. Purcell 效应影响自发辐射几率, Purcell 效应可以用 Purcell 因子来衡量, Purcell 因子 F 的数学表达式为^[14]:

$$F = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n} \right)^3 \frac{Q}{V}, \quad (3)$$

其中, (λ/n) 表示介质中的波长. 由此我们可知 $F \propto Q/V$, 增加品质因子 Q , 减小模体积 V 可以增加 Purcell 因子 F , 从而增强光与物质的相互作用. 增加 Q 可以延长光子存储时间, 降低 V 可以提高局域光子的能量密度, 从而改变 Purcell 因子 F , 改变自发辐射几率, 达到降低阈值, 减小功耗等目的.

我们采用 MIT 自主研发的基于 FDTD^[15] 的 Meep 软件^[16] 进行模拟计算. 先采用宽谱短脉冲来激发所有模式, 再针对得到的模式, 用相应的窄谱短脉冲激发模式, 更精确地得到相应的模式频率及强度分布, 记录脉冲源关掉一定时间后的能流值 P_1 . 再计算没有周期性孔和抛物线调制的单一波导在相同激发条件下的能流值 P_2 , P_1/P_2 即为透过率谱线. 这样就可以用 (1) 式计算出所需 Q 值. 模体积通过 (2) 式, 代入 FDTD 计算得到的 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 即可求出.

3 1-D PT PhC 纳米梁腔设计及分析

3.1 设计模型

我们设计的 PT PhC 纳米梁腔结构示意图如图 1 所示, 采用自由悬浮式的结构, 腔体采用硅材料, 相应折射率 $n_{\text{Si}} = 3.4$, 圆孔为空气孔, 背景为空气, 空气折射率 $n_{\text{air}} = 1$. 纳米梁腔的相应结构参数, 晶格常数 a 为 430 nm, 中心两个小孔圆心之间距离 s 为 430 nm, 渐变区小孔半径从 85 nm 线性变化至 110 nm, 渐变区域的小孔数量为 5, 反射镜区的小孔数量为 14, 半径为 110 nm. 整个纳米梁的宽度 w 为 540 nm, 纳米梁中心的宽度 w_0 为 322 nm, 以纳米梁的对称中心为原点, 沿圆孔周期的方向的对称轴为 x 轴, 垂直于圆孔周期方向的对称轴为 y 轴, 则宽度抛物线型可以表示为 $w = w_0/2 + 0.004x^2$. 纳米梁的厚度主要影响到

纳米梁中存在模式的数量及模式透过率, 这里我们采用 2D FDTD 方法进行计算, 只讨论存在基模的性质. 我们考虑类横电模 (TE), 其只存在 (E_x, E_y, H_z) 分量, 其中 E_y 占主导地位^[5,17], 在分析电场分布时我们也只考虑 E_y 分量. 同时整个计算过程中, 各个参数的变化会影响到中心工作波长, 我们将中心工作波长的范围控制在 1530—1580 nm 范围内.

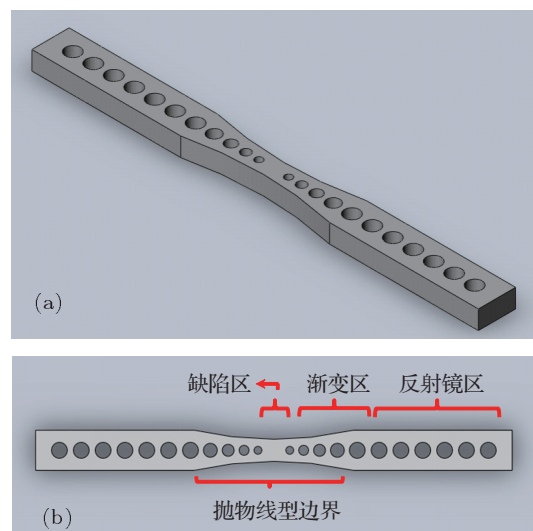


图 1 PT PhC 纳米梁腔结构示意图 (a) 3D 示意图;(b) 俯视图

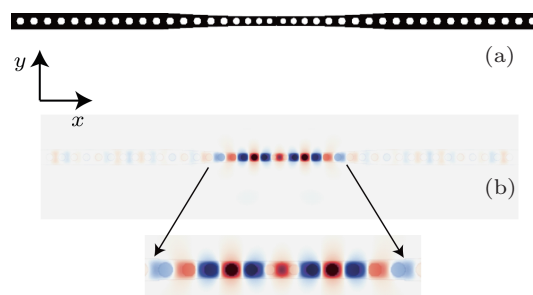


图 2 模拟结果 (a) Meep 软件生成纳米梁腔结构示意图;(b) 计算得到 E_y 的分布图

3.2 分析结果

图 2(a) 为 Meep 软件自动生成的纳米梁腔结构示意图, 从计算得到的 E_y 的能量分布 (图 2(b)) 可知, 电场很好的局域在腔抛物线型区域, 且最高电场值位于中心介质部位, 这样有利于在有源器件的应用中植入量子点等增益材料来制备实际的纳米梁腔, 实现腔与增益介质的匹配. 保持纳米梁腔的其他参数不变, 图 3 为纳米梁腔的 Q 和 V 值随纳米梁反射镜区空气孔对数数量的变化关系. 从图 3 中可知, 纳米梁反射镜区的空气孔数量越多,

则其 Q 值越大, 也就意味着布拉格反射镜提供的反馈越多, 而反射镜部分增长到一定程度则 Q 值不再继续增加, 说明由布拉格反射提供的反馈达到饱和, 对此类腔型, 14 对镜子孔足够提供有效的反馈. 而同时, 模体积 V 随着镜子孔对数的增加而减小, 这说明有效的布拉格反射有利于将模式限制在更小的体积内, 但同时我们也发现模体积减小的值并不明显, 也反应出此类腔型自身就拥有小模体积的优势.

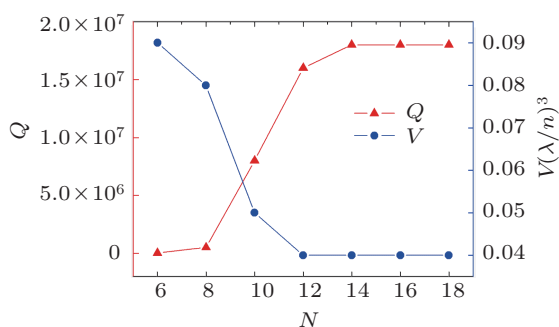


图3 纳米梁腔的 Q 和 V 值随纳米梁反射镜区空气孔对数的变化曲线

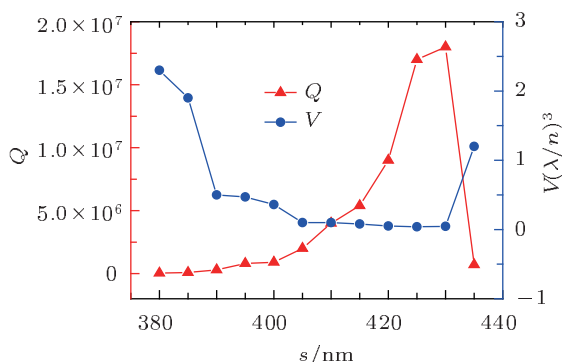


图4 纳米梁腔的 Q 和 V 随中心两孔距离的变化曲线

图4为纳米梁中心两个小孔圆心之间距离 s 的改变带来的腔 Q 值和 V 值的变化曲线. 由图4可知, 中心两孔的距离 s 对 Q 值的影响非常大, 当中心两孔之间的距离较短时, 品质因子 Q 值非常低, 同时模体积也较大, 此时的模式较难存在. 随着中心两孔之间的距离增大, 模式得以优化, Q 值迅速增大, V 值也趋于最小值 $0.04(\lambda/n)^3$. 并且当 Q 值处于较高值时, 模体积始终保持在较小水平, 说明模式得到了很好的控制. 同时 s 几个 nm 的变化对应 Q 值数个数量级的变化, 因而在实际制造过程中, 需要对纳米梁腔的关键部位进行高精度控制以保证其良好的光学特性.

接下来我们比较 PT PhC 纳米梁腔中心宽度 w_0 的变化带来的 Q 值、 V 值以及中心工作波长的变化. 图5为 Q 和 V 随 w_0/a 的变化关系, 我们从中可以看出 w_0 从小变大时, Q 的变化趋势是从小至大再到小, 并且 w_0 低于 $0.7a$ 时 Q 值极低, 此时模式很难存在, 换言之, w_0 过小不足以存在一个可靠模式. 随着 w_0 增大, 出现稳定高 Q 的模式, 这是逐渐优化的过程. 而当 w_0 增大至一定程度后, 抛物线型宽度对纳米梁的影响减弱使得 Q 值也随之降低, 但并没有数量级的变化, Q 值在此时仍然保持 $\sim 10^7$ 数量级. 而中心宽度从 $0.65a$ 至 $0.7a$ 变化时, 相应的 V 值从 $3.4(\lambda/n)^3$ 降至 $0.09(\lambda/n)^3$, 发生数量级的改变, 最小 V 值对应 w_0 为 $0.75a$, V 为 $0.04(\lambda/n)^3$, 与类似的渐变型腔和抛物线型腔相比, Q 值仍在 10^7 量级, 但是模体积小了一个数量级, 从而进一步提高了 Purcell 因子 F .

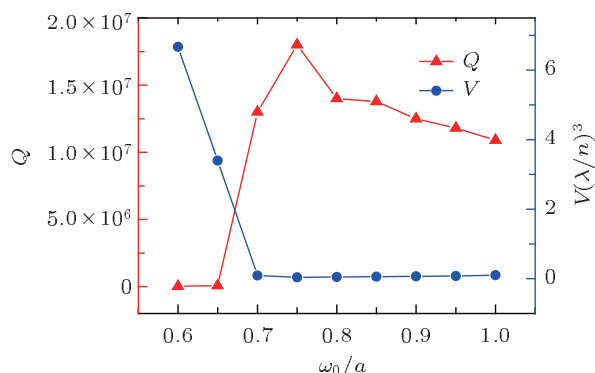


图5 纳米梁 Q 和 V 值随中心宽度 w_0/a 的变化关系

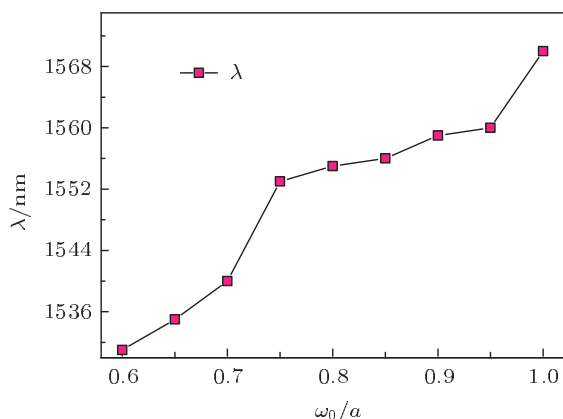


图6 纳米梁中心工作波长随中心宽度 w_0/a 的变化关系

图6为纳米梁中心工作波长随中心宽度 w_0 的变化曲线. 整体上中心工作波长随着 w_0 的增加而增加, 这是由于当 w_0 较小时不足以容纳波长较长

的模式, 所以此时的中心工作波长较小. 随着中心宽度的增加, 可以容纳更多的模式且通过模式竞争模式得到优化, 因此图 5 中对应的 Q 值较高, V 值较低. w_0 从 $0.75a \sim 0.95a$ 时, 波长变化速度较慢, 维持在一个稳定水平, 对应图 5 的结果, 此时的 V 值也维持在一个稳定值. 因此结合图 5 和图 6 的结果我们可以得出在 PT PhC 纳米梁腔中, 抛物线型宽度在达到超高 Q 值区域时, 主要作用不在于调制带隙, 而在于优化 V 值, 使 V 值变得更小, 提供更小的光与物质相互作用的空间.

4 结论

我们设计的新型 PT PhC 纳米梁腔同以前的宽度抛物线型和孔径渐变型纳米梁腔相比具有同样数量级的 Q 值, 达到了 1.8×10^7 , 但拥有更小的 V 值, 约为 $0.04(\lambda/n)^3$, 因而得到了更高的 Purcell 因子. PT PhC 纳米梁腔中间两孔距离 s 对 Q 值影响巨大. PT PhC 纳米梁腔对抛物线型的中心宽度 w_0 亦十分敏感. 抛物线型宽度在这种腔型中起到了有效降低 V 值的作用. 我们期望这种小尺寸超高 Q 低 V 的纳米梁腔能在未来有广泛应用.

-
- [1] Akahane Y, Asano T, Song B S, Noda S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1512
 - [2] Nomura M, Iwamoto S, Watanabe K, Kumagai N, Nakata Y, Ishida S, Arakawa Y 2006 *Opt. Express* **14** 6308
 - [3] Foresi J, Villeneuve P R, Ferrera J, Thoen E R, Steinmeyer G, Fan S, Joannopoulos J D, Kimerling L C, Smith H, Ippen E P 1997 *Nature* **390** 143
 - [4] Peyrade D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 829
 - [5] Ahn B H, Kang J H, Kim M K, Song J H, Min B, Kim K S, Lee Y H 2010 *Opt. Express* **18** 5654
 - [6] Deotare P B, McCutcheon M W, Frank I W, Khan M, Loncar M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 121106
 - [7] Zhang Y, Khan M, Huang Y, Ryou J, Deotare P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 051104
 - [8] Ohta R, Ota Y, Nomura M, Kumagai N, Ishida S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 173104
 - [9] Purcell E M 1946 *Phys. Rev.* **69** 681
 - [10] Painter O, Lee R K, Scherer A, Yariv A, O'Brien J D, Dapkus P D, Kim I 1999 *Science* **284** 1819
 - [11] Seo M K, Kang J H, Kim M K, Ahn B H, Kim J Y, Jeong K Y, Park H G, Lee Y H 2009 *Opt. Express* **17** 6790
 - [12] Foubert K, Lalouat L, Cluzel B, Picard E, Peyrade D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 251111
 - [13] Wang B, Dundar M A, Notzel R, Karouta F, He S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 151105
 - [14] Baba T 2003 *IEEE J. Sel. Top.* **9** 1340
 - [15] Yang H, Feng G Y, Zhu Q H, Zhang D Y, Zhou S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5506 (in Chinese) [杨浩, 冯国英, 朱启华, 张大勇, 周寿桓 2008 物理学报 **57** 5506]
 - [16] Oskooi A F, Roundy D, Ibanescu M, Bermel P, Joannopoulos J D, Johnson S G 2010 *Comput. Phys. Commun.* **181** 687
 - [17] Sauvan C, Lecamp G, Lalanne P, Hugonin J P 2005 *Opt. Express* **13** 245

Ultrahigh-Q small-V photonic crystal nanobeam cavities based on parabolic-shaped width and taper holes*

Feng Chen¹⁾ Feng Guo-Ying^{1)†} Chen Nian-Jiang²⁾ Zhou Shou-Huan¹⁾²⁾

1) (College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

2) (North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

(Received 13 February 2012; revised manuscript received 6 April 2012)

Abstract

One-dimensional (1-D) photonic crystal (PhC) nanobeam cavity based on parabolic-shaped width and tapered holes was proposed and analyzed. Finite-difference time-domain simulations show that both an ultrasmall modal volume ($V \sim 0.04(\lambda/n)^3$) and ultrahigh quality factor ($Q \sim 1.8 \times 10^7$) can be obtained in PT PhC nanobeam cavity. In addition, the PT PhC nanobeam have one order lower V comparing to parabolic and tapered nanobeam. With compactness, lower fabrication requirements to achieve ultrahigh Q/V , the proposed nanobeam could be versatile platforms of interest for optical communications, optomechanics, cavity QED, etc.

Keywords: Parabolic-shaped width, Taper hole, Nanobeam cavity, Small- V

PACS: 42.70.Qs, 42.60.Da, 85.30.De

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60890200, 10976017) and the Key State Laboratory of Solid State Laser Engineering, China.

† E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn