

硅基二维平板光子晶体高 Q 微腔的制作和光谱测量*

周长柱 王晨 李志远†

(中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)

(2011 年 1 月 7 日收到; 2011 年 2 月 15 日收到修改稿)

利用微加工技术, 在 SOI 上制作出了高 Q 值的光子晶体微腔, Q 值可以达 7×10^4 以上, 为后续的光与物质相互作用和量子信息方面的实验奠定了基础. 实验结果与理论模拟符合得较好. 通过三维时域有限差分法模拟, 得到光子晶体微腔的 Q 值为 1.2×10^5 左右.

关键词: 光子晶体, 微腔, 微加工

PACS: 42.70.Qs, 42.82.Gw, 42.55.Sa

1 引言

自 1987 年光子晶体概念提出以来 [1,2], 光子晶体已被广泛地应用到很多方面. 利用光子晶体特有的带隙效应, 可以制作各种光子晶体器件, 包括光子晶体波导 [3,4]、光子晶体滤波器 [5-8] 等器件. 在光子晶体的应用中, 很多高性能的器件在实验室中已经被加工出来, 包括多通道的滤波器、高 Q 的光子晶体微腔 [9-15]、光子晶体光开关 [16]、光子晶体分束器 [17] 等等.

目前量子信息和量子调控成为各国科学家研究的热点课题, 就是因为量子信息的发展对将来的信息业会带来变革性的影响. 量子信息中一个很重要的器件就是光学腔, 光学腔可以用来做信息的载体, 在将来的量子信息器件中会起到重要作用. 为了提高光与物质相互作用, 实现量子态的制备与传递, 必须要有足够高的 Q/V, 有好的固定比特与飞行比特, 这里 V 是腔模的模体积. 高 Q 的光学腔是最有潜力的信息载体之一. 目前主要针对以下 3 个类型的光学腔进行研究: 传统的 Fabry-Perot (F-P) 腔、基于回音壁模式的微腔、光子晶体微腔. 传统的 F-P 腔有其自身难以克服的困难, 包括品质因子很难进一步提高, 光腔之间的可连接性也比较

差. 基于回音壁模式的微腔有很高的 Q 值, 是目前的一个研究热点, 在国内也有很多好的结果发表, 例如郭光灿院士研究组做出的微球的 Q 值可达 10^6 [18], 北京大学龚旗煌教授研究组发现了很多新奇现象 [19]. 但是利用回音壁模式原理的光学腔也有一定的局限性, 这些微腔模体积较大, 且不利于将来的集成工作, 如果要做量子信息的传输, 腔和腔需要集成到一起, 而集成这些微球腔的难度比较大. 为了同时得到超高的 Q 值和良好的集成性, 二维平板光子晶体微腔是一个很好的选择 [20-22]. 光子晶体高 Q 微腔能够提供足够高的 Q/V, 国外研究已经验证, 将量子点放入到高 Q 的微腔中可以观察到 Rabi 分裂 [20-22]. 更重要的是光子晶体二维平板器件制备技术已经比较成熟, 这种技术非常便于集成, 例如用电子束曝光 (EBL) 和电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 加工技术能够做出几百个微米大小的光子晶体, 可以在这样大小的光子晶体上面做出多个高 Q 的微腔, 将原子或者量子点放入微腔中, 有利于集成.

2 理论设计

为了得到高 Q 的光子晶体微腔, 需要先在理论

* 国家自然科学基金 (批准号: 10525419) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(2011CB922002) 资助的课题.

† E-mail: lizy@iphy.ac.cn

上进行模拟, 通过设计各种参数, 达到实现高 Q 的目的. 我们利用时域有限差分法 (FDTD) 计算光子晶体微腔 Q 值的大小, 研究的光子晶体微腔是 L3 型——在光子晶体结构中心的 3 个孔用介质材料填充起来, 或者说去除了 3 个空气孔. 图 1 所示是二维平板光子晶体 L3 微腔结构的截面图. 晶格常数为 430 nm, 空气孔的半径为 120 nm, SOI 硅板的厚度为 235 nm.

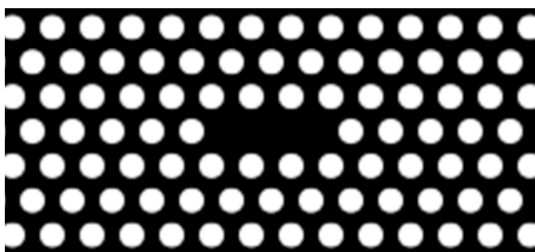


图 1 普通结构二维平板光子晶体微腔的俯视图 (L3 型)

利用 FDTD 方法计算出光子晶体微腔的光强分布, 记录下各时间点的光强, 然后利用 Pade 近似将光强信号转化成频谱信号, 在频谱上面计算出微腔的 Q 值 [23,24]. 按照此过程给出图 1 的计算结果. 经过模拟, 利用 Lorentz 拟合, 得出图 2 曲线. 该光子晶体微腔的 Q 值为 5375.

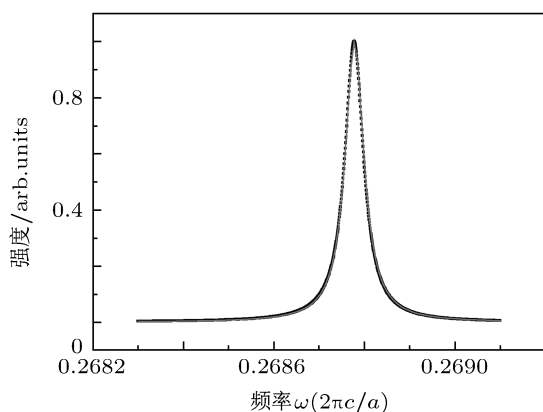


图 2 图 1 中光子晶体微腔的 Q 值模拟结果

根据 Noda 课题组 2003 年在 “Nature” 发表的一篇文章中的理论 [9], 要想提高 Q 值的大小, 需要将光子晶体微腔的形状进行优化, 以便使得光子晶体腔的光场强度分布呈现 Gauss 型, 这样可以得到更高的 Q 值. 按照此理论, 我们进行了大量的模拟计算, 将光子晶体微腔临近的孔往外移动以得到更平滑的光子晶体微腔边缘, 这样将使光子晶体微腔中的光场强度分布接近 Gauss 型. 大量计算之后,

我们得出了以下的理论模拟参数可以使得 L3 型的光子晶体微腔的 Q 值达到最大: 将在光子晶体微腔长向中轴线上 (ΓK 方向) 上的微腔最邻近的两个孔分别往外移动 73 nm, 次邻近的两个孔分别外移 10 nm, 第三邻近的两个孔分别外移 73 nm, 结构图见图 3 (a). 作为对比, Noda 等的设计方案只是移动了最邻近的两个空气孔的位置. 经过模拟计算之后可以得出此种光子晶体微腔的归一化共振频率在 0.27731 (a/λ), 晶格常数为 430 nm, 则共振的波长可以计算得出, 为 1550.6 nm. 此时光子晶体微腔的 Q 值可以达到 127, 323. 经过 FDTD 和 Pade 近似的计算结果如图 3 (b) 所示.

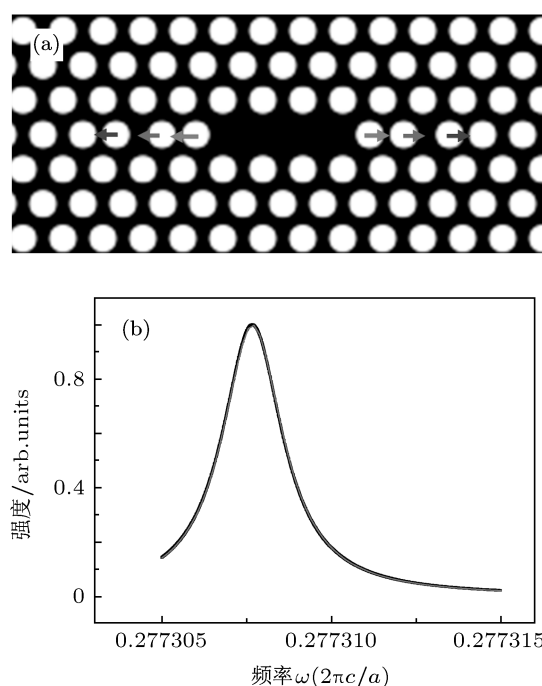


图 3 (a) ΓK 方向上光子晶体微腔临近三对孔移动之后二维平板光子晶体微腔的俯视图, 最临近三对孔的移动幅度分别为 73, 10, 73 nm; (b) (a) 中光子晶体微腔经过模拟计算出的 Q 值结果

3 样品制备

经过大量的模拟计算得出了高 Q 微腔的参数, 按照这个参数设计, 利用中国科学院物理研究所微加工实验室的设备进行了样品制备. 实验用材料是在上海新傲科技有限公司购买的 SOI 片, 样品制作的硅层厚度为 235 nm. 制作光子晶体样品的参数如下: 晶格常数为 430 nm, 空气孔的半径为 120 nm, 样品硅层的厚度为 235 nm. 制备样品用到的设备有电子束曝光系统 (EBL) 和感应耦合等离子体刻蚀

设备 (ICP). 样品制备过程可以分为三个过程: 曝光过程, 刻蚀过程, 抛光过程.

曝光过程: 首先利用 EBL 在 SOI 片上写出要加工的光子晶体图形, 该过程包括涂胶, 即在切好的 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的 SOI 表面涂一层约 250 nm 厚的 PMMA495 胶, 作为掩模; 曝光, 利用微加工曝光系统, 参数为电压 10 keV , 光阑 $20\text{ }\mu\text{m}$ 等.

刻蚀过程: 利用 ICP 刻蚀设备进行干法刻蚀. 这种设备具有很多优点, 包括很好的垂直度、刻蚀时间快、条件稳定, 等等. 经过大量摸索实验, 在我们的实验中, 最佳刻蚀时间为 73 s .

抛光过程: 经过刻蚀的样品还在 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的大片子上面, 为最终的测量做准备, 必须将样品切成 $500\text{ }\mu\text{m}$ 宽的长条形, 并且将端面抛光, 这样才有利于光纤的耦合接入. 利用沈阳麦科材料加工设备有限公司的抛光机对样品进行抛光, 经过抛光的样品就可以进入到最终的样品测试环节.

最终的样品扫描电子显微镜 (SEM) 图像见图 4. 在一根光子晶体波导旁边有一个 L3 型光子晶体微腔, 通过脊形波导 (长度约 $200\text{ }\mu\text{m}$) 将光从光纤中耦合到光子晶体波导中, 当光从光子晶体波导中传输时, 如果光的频率正好与光子晶体微腔的共振频率一致时, 该频率的光将耦合进光子晶体微腔中, 在光子晶体波导中通过的光能量将会大幅下降. 通过在光子晶体波导的另一端接收光学信号的能量, 可以在透过谱上得出一个在光子晶体微腔共振频率处凹陷的曲线. 通过测量和分析透过谱的形态, 可以得到光子晶体微腔的 Q 值. 该样品的晶格

常数为 430 nm , 空气孔的半径为 120 nm , 样品厚度为 235 nm . 光子晶体微腔的结构是经过优化以后的, 见图 4 中的放大图光子晶体微腔最临近的 3 对孔 (如图中箭头所示) 分别外移 $80, 20, 80\text{ nm}$. 图 4 样品即是图 3 中理论模拟结构对应的实验样品图, 实验参数都是参考理论计算得出的. 由于加工精度很难达到 10 nm , 所以我们在移动腔周围孔的时候选取了 $80, 20, 80\text{ nm}$ 的数值, 没有完全按照理论计算的 $73, 10, 73\text{ nm}$ 来选取.

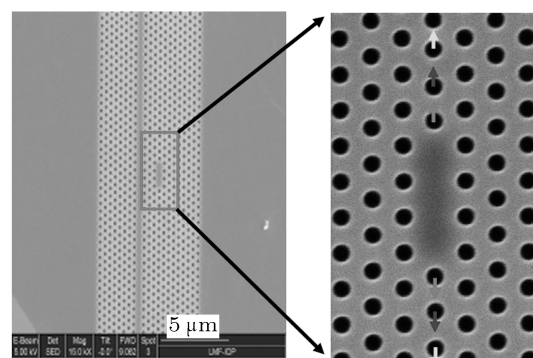


图 4 利用微加工技术加工的光子晶体微腔 SEM 图
光子晶体微腔周围的三个空分别外移 80 nm , 20 nm , 80 nm

4 光谱测量

样品制备完之后, 利用实验室的光谱测量系统进行光谱测量. 测量系统主要由可调谐半导体激光器 (T-LD)、磨锥光纤、精密调节架、红外电耦合器件 (CCD)、功率计 (PM) 组成.

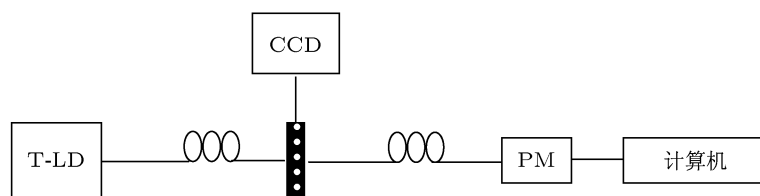


图 5 光谱测量系统示意图

图 5 给出了光谱测量的示意图. 连续可调谐的半导体激光器的波长范围为 $1500\text{—}1640\text{ nm}$, 激光器发出的准单色激光通过光纤耦合到脊形波导中, 然后进入光子晶体区域. 光纤是经过特殊处理的磨锥光纤, 在光纤头处, 光纤被磨成锥形, 具有透镜的作用, 这种形状有利于光的耦合. 光耦合到光子晶体中之后, 经过光子晶体波导传输到达光子晶体另一端, 再通过脊形波导耦合到出射光纤中, 出射光

纤在与光子晶体耦合的地方也是被磨成锥形, 以便于收集到更多的光信号. 出射光纤的另一端直接连到功率计上进行测量, 整套测量设备是通过电脑控制扫描的速率和精度. 如图 5 所示, 激光器发出的光落在光子晶体波导的通带中时, 光可以通过光子晶体到达出射光纤, 如果光的频率正好和光子晶体微腔的频率一致时, 光信号将有大部分被耦合到光子晶体微腔中, 形成共振, 该频率的光通过光子晶

体波导到达出射光纤的能量将会被大大降低, 在透过谱上会形成一个凹陷, 通过测量此凹陷可以得到光子晶体微腔的 Q 值.

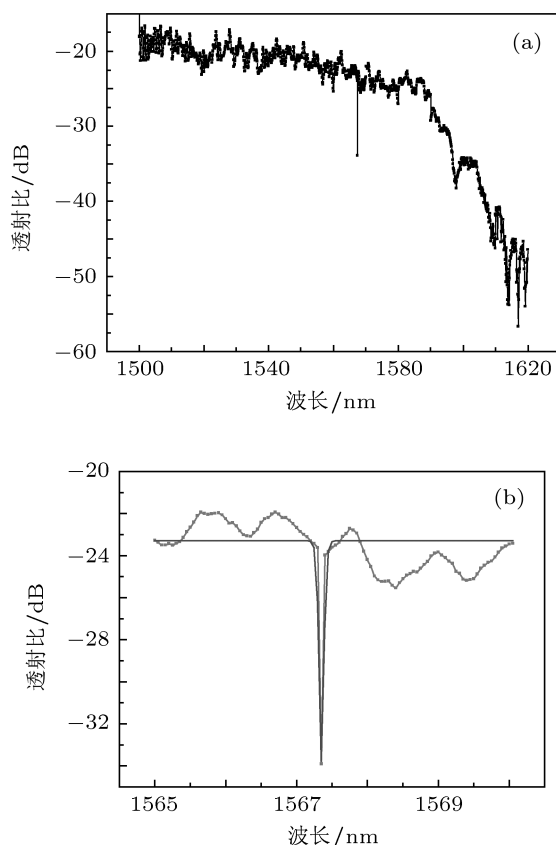


图 6 (a) 对于图 4 样品, 激光器的波长在 1500—1620 nm 范围的透过谱; (b) 图 4 中光子晶体微腔 Q 值得实验测量结果, 经过拟合该 Q 值为 71243

图 6(a) 给出了测量图 4 中的样品得到的 1500—1620 nm 范围的一个透过谱线. 该谱线是一个宽波长范围的透过谱, 我们在 1567.35 nm 处

得到微腔的共振频率, 在透过谱上显示为一个大幅度的凹陷. 为了更好地得到光子晶体的 Q 值, 将测量范围缩小到 1565—1570 nm, 测出的透过谱在图 6(b) 中所示, 通过测量透过谱我们可以清楚地看到一个高 Q 腔模的存在. 经过 Lorentz 拟合, 得出该凹陷处的 Q 值为 71243. 我们发现实验测量得到的光子晶体微腔的共振频率比理论模拟的共振频率红移了 16.75 nm, 而且微腔的实验测量 Q 值 71243 比模拟的结果 127, 323 小. 这是因为在加工过程中一些不可避免的因素造成的, 比如加工的空气孔并非理想的圆柱形状, 内表面会有一些倾斜角度; 还有样品的表面以及空气孔的内侧面并不是理想光滑的; 同时由于加工精度的原因, 实验加工出来的空气孔半径的大小可能会有几个纳米的偏差, 并不是理想的 120 nm 等因素.

5 总结

我们利用微加工手段, 包括电子束曝光系统和感应耦合等离子体刻蚀设备加工出了精细的光子晶体高 Q 微腔结构, 利用实验室搭建的光纤耦合光谱测量系统测出光子晶体微腔的 Q 值为 73721, 与理论模拟的结果符合得比较好. 光子晶体高 Q 微腔的成功制作与测量为后续的实验工作开展提供了良好的条件. 我们可以利用光子晶体微腔作为载体, 进行下一步的实验研究, 包括将量子点、金属纳米颗粒等放入到光子晶体微腔中观察它们之间的相互作用. 此外光子晶体微腔还可以在量子信息中有广泛的应用前景, 作为信息的载体, 为量子信息的发展提供了更多的选择.

- [1] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [2] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [3] Chutinan A, Noda S 2000 *Phys. Rev. B* **62** 4488
- [4] Zhou C Z, Liu Y Z, Li Z Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 084203
- [5] Takano H, Song B S, Asano T, Noda S 2006 *Opt. Express* **14** 3491
- [6] Ren C, Tian J, Feng S, Tao H H, Liu Y Z, Ren K, Li Z Y, Cheng B Y, Zhang D Z 2006 *Opt. Express* **14** 10014
- [7] Liu Y Z, Liu R J, Feng S, Ren C, Yang H F, Zhang D Z, Li Z Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 241107
- [8] Shinya A, Mitsugi S, Kuramochi E, Notomi M 2006 *Opt. Express* **14** 12394
- [9] Akahane Y, Asano T, Song B S, Noda S 2003 *Nature* **425** 944
- [10] Takahashi Y, Hagino H, Tanaka Y, Song B S, Asano T, Noda S 2007 *Opt. Express* **15** 17206
- [11] Kwon S H, Sünnner T, Kamp M, Forchel A 2008 *Opt. Express* **16** 4605
- [12] Peng Y S, Ye X L, Xu B, Niu J B, Jia R, Wang Z G, Liang S, Yang X H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7073 (in Chinese) [彭银生, 叶小玲, 徐波, 牛洁斌, 贾锐, 王占国, 梁松, 杨晓红 2010 物理学报 **59** 7073]
- [13] Chen W, Xing M X, Ren G, Wang K, Du X Y, Zhang Y J, Zheng W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3955 (in Chinese) [陈微, 邢名欣, 任刚, 王科, 杜晓宇, 张冶金, 郑婉华 2009 物理学报 **58** 3955]
- [14] Jiang B, Zhang Y J, Zhou W J, Chen W, Liu A J, Zheng W H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 024208
- [15] 江斌, 刘安金, 陈微, 邢名欣, 周文君, 郑婉华 2010 物理学报 **59**

- 8548
- [16] Liu Y, Qin F, Wei Z Y, Meng Q B, Zhang D Z, Li Z Y 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 131116
- [17] Frandsen L H, Borel P I, Zhuang Y X, Harpøth A, Thorhauge M, Kristensen M 2004 *Opt. Lett.* **29** 1623
- [18] Xiao Y F, Dong C H, Zou C L, Han Z F, Yang L, Guo G C 2007 *Opt. Lett.* **34** 509
- [19] Xiao Y F, Zou C L, Li B B, Li Y, Dong C H, Han Z F, Gong Q H 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 153902
- [20] Hennessy K, Badolato A, Winger M, Gerace D, Atature M, Gulde S, Falt S, Hu E L, Imamoglu A 2007 *Nature* **445** 896
- [21] Yoshie T, Scherer A, Hendrickson J, Khitrova G, Gibbs H M, Rupper G, Ell C, Shchekin O B, Deppe D G 2004 *Nature* **432** 200
- [22] Englund D, Faraon A, Fushman I, Stoltz N, Petroff P, Vuckovic J 2007 *Nature* **450** 857
- [23] Zhou C Z, Xiong Z G, Li Z Y 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 094201
- [24] Guo W H, Li W J, Huang Y Z 2001 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **11** 223

Fabrication and spectra-measurement of high Q photonic crystal cavity on silicon slabs*

Zhou Chang-Zhu Wang Chen Li Zhi-Yuan[†]

(Laboratory of Optical Physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 7 January 2011; revised manuscript received 15 February 2011)

Abstract

We fabricate a high Q photonic crystal cavity on the top of SOI (silicon on insulator) with EBL (electron beam lithography) and ICP (inductively coupled plasma). The value of Q can reach 7×10^4 . It provides basic condition for the following experiments, for example for the study of interaction between light and substance. The high Q cavity also provides good circumstance for the quantum information. The theoretical result of the value of Q is 1.2×10^5 from FDTD (finite difference time domain) simulation.

Keywords: photonic crystal, cavity, micro-fabrication

PACS: 42.70.Qs, 42.82.Gw, 42.55.Sa

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10525419) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB922002)

[†] E-mail: lizy@aphy.iphy.ac.cn