

近红外波段二维环形光子晶体*

许兴胜^{1,2} 张晓帆¹ 孙增辉¹ 陈弘达¹ 张道中²

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2 中国科学院物理研究所 光物理实验室, 北京 100080)

摘要: 提出了带隙在近红外波段的环形光子晶体, 主要有一系列环形的孔在背景材料为 GaAs 上构成. 发现带隙不依赖于入射方向, 很少的几排即可在透过谱上产生带隙. 六角形构成的环形光子晶体的 S 波和 P 波的透过谱显示有一个完全带隙存在, 带宽-带隙中心比率高达 11%.

关键词: 环形光子晶体; 无方向依赖性; 完全带隙

PACC: 4270Q; 4280S; 4283

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0087-04

1 前言

电磁波谱上光谱带隙的存在带来了很广泛的应用, 如波导^[1,2]、量电器件^[3]、高 Q 值微腔^[4]、激光二极管^[5]、光学滤波器^[6]、光开关^[7]及波分复用器^[8,9]等. 所有这些在光通信上或其他光电领域中有着重要的应用. 在过去的十几年中, 周期性光子晶体^[10]和准周期性光子晶体^[11~14]都有了广泛的研究. Chan 和 Jin 等人分析了二维准周期光子晶体^[15,16]. 他们发现准晶光子晶体可以有不依赖于入射光方向的光子带隙, 然而在这些系统中没有 S 波和 P 波共同拥有的完全带隙. 事实上, 空气孔在高介电常数介质中构成的光子晶体更适合制作器件. Zhang 证明了, 对于一种打孔形式的光子 12 重对称准晶二维光子晶体拥有完全带隙^[13], 当带宽-带隙中心比率较小, 仅为 $\omega_{\text{gap}}/\omega_{\text{midgap}} = 3\%$ 时, 其中介电常数为 11.4^[13]. 这里提出的环形光子晶体的带隙同样不依赖于入射光的方向, 但它产生的完全带隙的带宽-带隙中心比率可达到 11%.

2 二维环形光子晶体设计与讨论

二维环形光子晶体由圆空气孔在背景介质中构

成. 空气孔在一系列的半径不同的同心圆上均匀排列构成, 如图 1 所示. 假设第一环的半径为 R , 则第 n 环的半径为 nR , 设第一环上孔的个数为 m , 则第 n 环上的孔个数为 mn , 其中 m 和 n 是正实数. 图 1 中所示环形光子晶体由 331 个孔共 10 个圆环组成. 相邻环的间隔也即是第一环的半径 $R = 0.4\mu\text{m}$, 空气孔的半径为 $0.18\mu\text{m}$. 在我们的模拟设计中, GaAs 材料被选为背景介质, 它的介电常数为 11.4.

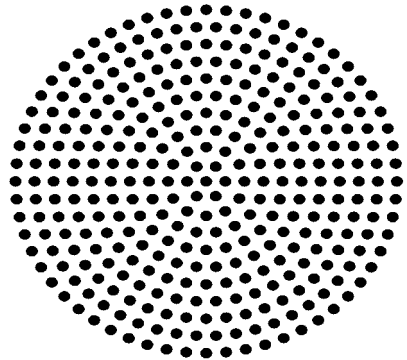


图 1 六角形环形光子晶体结构图

Fig. 1 Schematic figure showing the ring arrangement of holes

我们首先考虑横电模(P 波), 它的电场极化方向在二维周期性平面内. 环形光子晶体的透过谱可以由多重散射方法计算^[17,18]. 在我们的计算中, 假

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA311020), 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2001CB6104), 及国家自然科学基金(批准号: 60377011, 60345008)资助项目

设入射光束通过宽度为 $4R$ ，位于光子晶体前约 $9R$ 处的狭缝。图 2 显示了该光子晶体的 P 波透过谱。在光谱上有一很低的透过区平均透过率达 -49dB ，带隙位于 $1300\sim 1570\text{nm}$ ，带宽-带中心比率达 19% 。从图 2 可以发现带边不平滑，特别是在 1700nm 附近虽然透过率较低，但仍然有些小的峰存在，这主要是无序引起的。这意味着，该环形光子晶体拥有一个带隙因为没有很好的周期性，也就是说在带隙里，态密度很小而不是零。

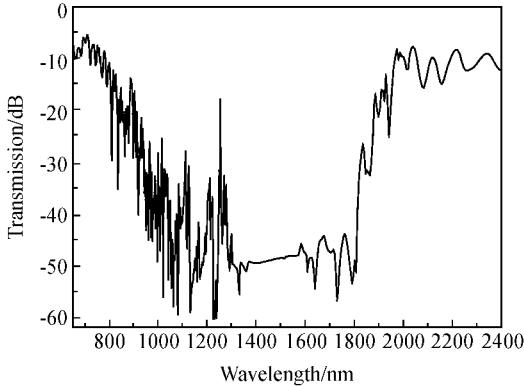


图 2 环形光子晶体的 P 波透过谱

Fig. 2 P polarization transmission spectra for ring photonic crystal

图 3 显示我们进一步计算的不同入射角情况下的环形光子晶体透过谱。需要强调的是该结构具有六角对称性，在每 60° 分布内具有 30° 的线对称性。因而，对于环形光子晶体，考察透过谱与入射角度的关系时，只需要计算 $0^\circ\sim 30^\circ$ 的入射角。从图 3 可以发现带隙的位置和宽度都不随入射角度的改变而变化，下带边和上带边分别为 1300 和 1570nm 保持不动。由此可以得出这样的结论，对于二维环形光子晶体，P 波的带隙不依赖于入射光的入射角。这是一个有趣的现象，可能会在光电子器件中有一些重要应用。

已经证明了二维周期性和二维准晶光子晶体只要在入射光方向有几排的柱子或空气孔就能产生光子带隙。我们由外向内逐渐减少光子晶体排数，并计算它的透过谱，结果显示在图 4 中。当空气孔从 12 排减少到 7 排的时候，我们发现带隙的下带边 (1570nm) 和上带边仍然保持不变，同时，带隙内的透过率由 -58dB 减小到 -31dB 。在最后一种情况下，7 排的空气，光子晶体很小，整个尺寸仅为 $5.6\mu\text{m}$ ，但带隙仍然保持。通过以上计算我们发现这

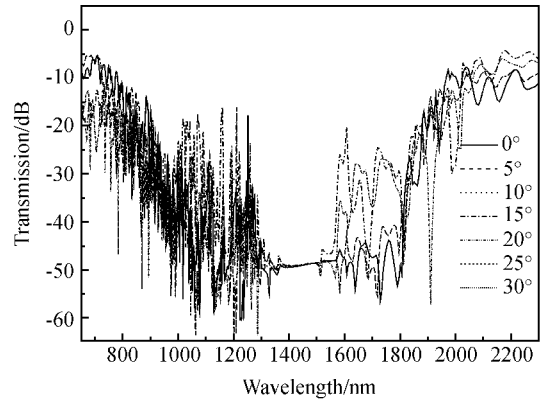


图 3 不同入射角 P 波透过谱

Fig. 3 P polarization transmission spectra with various incident angles for ring photonic crystal

种结构的光子晶体对于 P 波有一个不依赖于入射方向的光子带隙。然后我们考虑 S 波的透过谱以判断是否与 P 波有一个重叠的光子带隙，也即判断它是否有一个完全带隙的存在。所用的光子晶体只有 7 排，背景的介电常数和第一环的半径如前面提到的一样。当占空比较小时(空气相对于介质)，我们没有发现 S 波和 P 波的重叠情况。而当 r/R 达到 0.4 时，出现了两个带隙的重叠。当 $r/R=0.475$ 时 P 波和 S 波的透过谱示于图 5 中。可以发现 $1450\sim 1620\text{nm}$ 范围有重叠的带隙，正好覆盖了光通信波长 1550nm 。最大的带宽-带中心比率达 $\omega_{\text{gap}}/\omega_{\text{midgap}}=11\%$ 。虽然该完全带隙不是很宽，但比准晶中的完全带隙要大。利用电子束制板设备和反应离子束设备可以研制这种环形光子晶体。

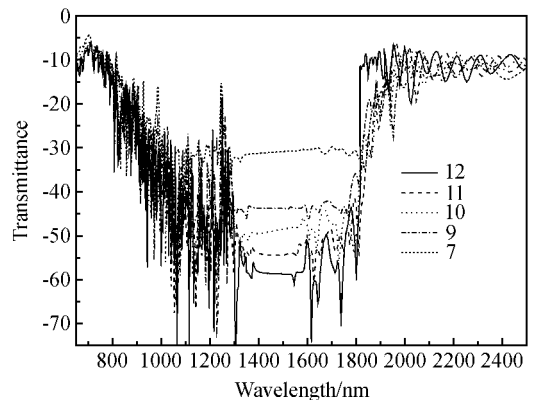


图 4 不同排数光子晶体的透过谱 图中显示排数分别为 11, 10, 9 和 7 排。

Fig. 4 Transmission spectra for ring crystals with different numbers of holes row for hexagonal ring crystal, namely, 11, 10, 9, and 7 rows

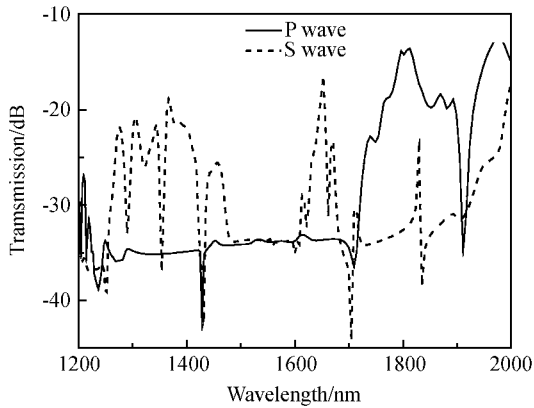


图5 环形光子晶体对于不同偏振态的光子晶体 实线代表P波,虚线代表S波,第一环的半径 $R=0.4\mu\text{m}$,占空比为 $r/R=0.475$.

Fig. 5 Transmission spectra for ring crystal with different air hole radius r Solid line is P wave; the dotted lines is S wave; the radius of the first ring $R=0.4\mu\text{m}$, and $r/R=0.475$.

3 结论

利用多重散射方法研究了二维空气孔的环形光子晶体. 我们发现, 这些光子晶体具有没有方向依赖性的光子带隙, 当参数选择合适, 占空比较大时, 出现了较宽的包含了光通信波段的完全带隙. 这种光子晶体在光电子器件中有潜在的重要应用.

参考文献

[1] Mekis A, Chen J C, Kurland I, et al. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Phys Rev Lett*, 1996, 77: 3787

[2] Baba T, Motegi A, Iwai T, et al. Light propagation characteristics of straight single-line-defect waveguides in photonic crystal slabs fabricated into a silicon-on-insulator substrate. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38: 743

[3] Liu X D, Xu X S, Wang Y Q, et al. Theoretical study of the enhancement and suppression of the fluorescent spectra of dye molecules in a photonic crystal with a pseudogap. *Chinese Physics*, 2003, 12: 992

[4] Yosgue T, Vuckovic J, Schere A, et al. High quality two-dimensional photonic crystal slab cavities. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 4289

[5] Song D S, Kim S H, Park H G, et al. Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 3901

[6] Nakagawa W, Sun P C, Chen C H, et al. Wide-field-of-view narrow-band spectral filters based on photonic crystal nanocavities. *Opt Lett*, 2002, 27: 191

[7] Johnson P M, Koenderink A F, Vos W L. Ultrafast switching of photonic density of states in photonic crystals. *Phys Rev B*, 2002, 66: 081102

[8] Noda S, Chutinan A K, Imada M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure. *Nature*, 2000, 407: 608

[9] Jin C J, Han S Z, Meng X D, et al. Demultiplexer using directly resonant tunneling between point defects and waveguides in a photonic crystal. *J Appl Phys*, 2002, 91: 4771

[10] Soukoulis C M. Photonic band gaps and localization. New York: Plenum Press, 1993

[11] Zoorob M E, Charton M D B, Parker G J, et al. Complete photonic bandgaps in 12-folds symmetric quasicrystals. *Nature*, 2000, 404: 740

[12] Cheng S S, Li L, Chan C T, et al. Defect and transmission properties of two-dimensional quasiperiodic photonic band-gap systems. *Phys Rev B*, 1999, 59: 4091

[13] Zhang X D, Zhang Z Q, Chan C T. Absolute photonic band gaps in 12-fold symmetric photonic quasicrystals. *Phys Rev B*, 2001, 63: 081105

[14] Jin C J, Cheng B Y, Man B, et al. Two-dimensional dodecagonal and decagonal quasiperiodic photonic crystals in the microwave region. *Phys Rev B*, 2000, 61: 10762

[15] Chan Y S, Chan C T, Liu Z Y. Photonic band gaps in two dimensional photonic quasicrystals. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 956

[16] Jin C J, Cheng B Y, Man B, et al. Band gap and wave guiding effect in a quasiperiodic photonic crystal. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 1848

[17] Tayeb G, Maystre D. Rigorous theoretical study of finite-size two-dimensional photonic crystals doped by microcavities. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14: 3323

[18] Li L M, Zhang Z Q. Multiple-scattering approach to finite-sized photonic band-gap materials. *Phys Rev B*, 1998, 58: 9587

Two-Dimensional Ring-Type Photonic Crystals in Near Infrared Region *

Xu Xingsheng^{1,2}, Zhang Xiaofan¹, Sun Zenghui¹, Chen Hongda¹, and Zhang Daozhong²

(1 *Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Optical Physics Laboratory, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: A ring photonic crystal working in the near infrared region is proposed, where the air holes in the background material GaAs are arranged to form a series of rings. It is found that the band gaps do not depend on the incident direction, and only a small number of rows are needed to create a frequency gap in the transmission spectrum. The transmission spectra of both P and S polarizations show that there is a complete bandgap in the hexagonal ring photonic crystals and the ratio of gap width to mid-gap frequency is as high as 11%.

Key words: ring photonic crystals; direction-independent; complete band gap

PACC: 4270Q; 4280S; 4283

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0087-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA311020), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2001CB6104), and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60377011, 60345008)