

微波光子晶体的实验研究

秦 柏¹⁾ 金崇君²⁾ 秦汝虎¹⁾

1), 哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001
2), 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080

摘 要 制造了工作于微波波段的三角形光子晶体, 并测量了光子晶体的透射谱和存在缺陷时的光子晶体的透射谱。在此基础上, 研究了它的缺陷模, 并讨论了光子晶体的潜在应用。

关键词 光子晶体, 微波波段, 透射谱。

1 引 言

电磁波在光子晶体中的传播可用类似于电子在半导体中运动的能带结构来描述, 这种能带结构称为光子带结构。在光子带结构中可能存在类似于半导体能带结构中的禁带, 称为光子带隙。频率在光子带隙内的分子和原子的自发辐射将被抑制, 它修正了原子、分子和激子系统的基本特征, 从而揭开了凝聚态物理和量子电动力学的全新的研究领域^[1]。同时光子晶体中可能存在的光子带隙具有重要的应用, 比如可用于设计阈值接近于零的半导体激光器和高效率的太阳能电池^[2], 还可用于改善光电子仪器的工作效率。由于光子晶体的独特性质, 吸引了越来越多的研究者。

由于二维光子晶体的制造比较容易, 而且具有许多与三维光子晶体相似的性质, 所以二维光子晶体受到人们的普遍关注^[3]。本文利用熔融石英玻璃圆柱制作了带隙在电磁波区的二维三角形光子晶体, 研究了光子晶体的透射谱及它存在各种缺陷时的透射谱特征。

2 实验样品

所用的样品为熔融石英玻璃圆柱, 其相对介电常数为 3.72, 直径为 (8.1 ± 0.4) mm, 固定在相对介电常数为 1.04 的聚苯乙烯泡沫中, 组成了二维三角形光子晶体。光子晶体的大小为 $30 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 晶格常数为 1.8 cm, 其结构如图 1 所示。

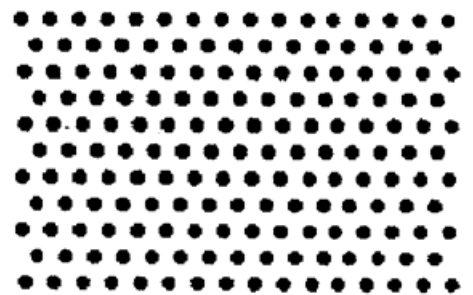


Fig. 1 The schematic of triangular photonic crystal

3 实验装置和实验结果

实验装置如图 2 所示, 由功率发生器 HP8360A、矢量网

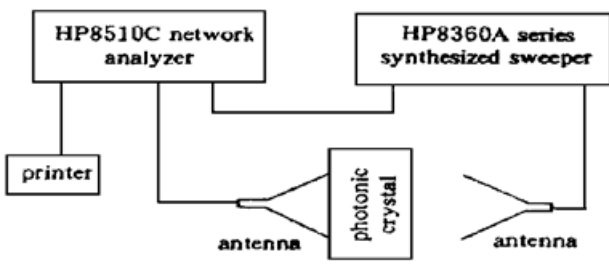


Fig. 2 The Schematic of system of measuring transmission spectra of photonic crystal

络分析仪 HP8510C、微波辐射源、微波接收器和实验平台组成。其中辐射源和接收器的通道边缘用吸波材料覆盖，以减少电磁波的边缘散射。辐射场到达光子晶体时可认为已满足远场条件，则电磁波是沿一定的晶向垂直入射于光子晶体表面。

图 3(a) 是沿三角形光子晶体的 $(0, \sqrt{3}/2)$ 方向的 TM 偏振的透射谱，在 6.8 GHz 和 8.8 GHz 之间存在一光子带隙，这和用 625 个平面波计算所得

光子带结构 3(c) 相吻合。在带缘处存在不少锯齿，这是由于测量系统的杂散散射、以及远场条件的近似满足、光子晶体的非严格周期性排列和“原子”大小的分散性引起的。文献[4~ 6]利用传输矩阵证明了一维多层周期性介质中，当各层的厚度有起伏时，并不影响整个带隙，只是引起带隙边缘的变化，文献[7]从实验上证实了这种现象，本文的实验表明了二维情况下也存在相似的现象。

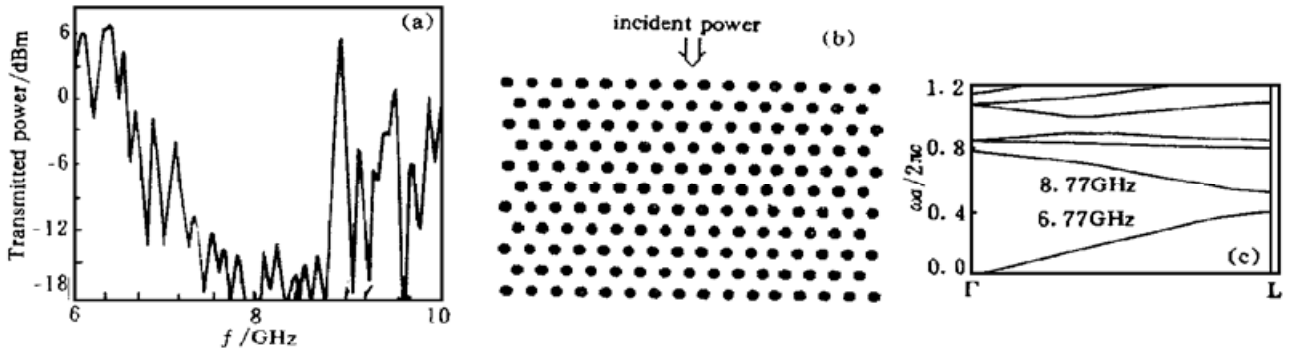


Fig. 3 (a) The transmitted power vs. frequency for a triangular photonic crystal composed of fused silica cylinders embedded in a styrofoam template. (b) Triangular photonic crystal (11×16). (c) Photonic band structure of TM polarization calculated by 625 plane waves

图 4 至图 8 是存在缺陷的光子晶体的透射谱。图 4 是在接近光子晶体中心抽掉一根圆柱后的光子晶体的透射谱，在带隙中心频率附近 7.74 GHz 处存在一个缺陷峰。图 5 是抽掉二根圆柱后的光子晶体的透射谱，在频率为 7.78 GHz 处存在一缺陷峰，它是二度简并的。图 6 是抽掉三根圆柱后的光子晶体的透射谱，在频率为 8.08 GHz 处存在一个缺陷峰，是三度简并的。图 7 是抽掉另外三根圆柱后的光子晶体的透射谱(见插图)，在频率为 7.70 GHz、8.08

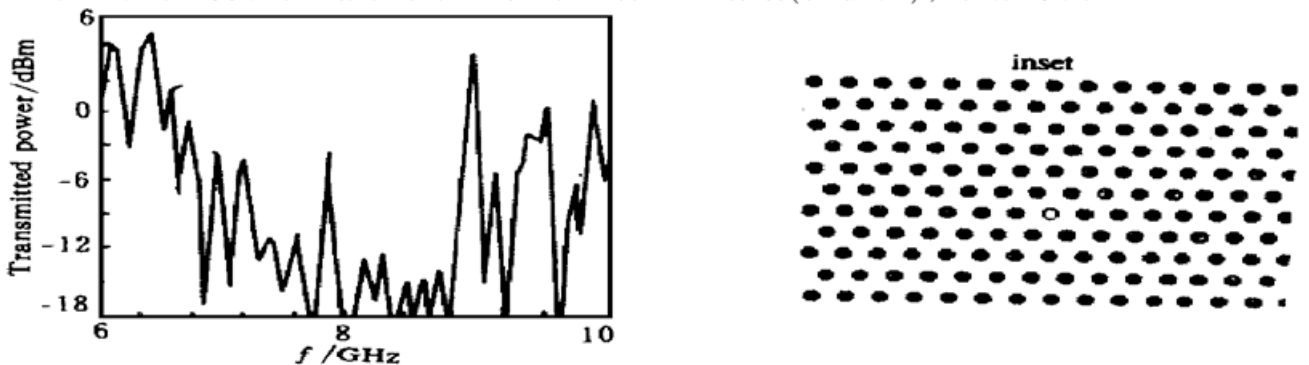


Fig. 4 The transmitted power vs. frequency for a triangular photonic crystal when one cylinder is removed (shown in the inset)

GHz 和 8.20 GHz 处存在三个缺陷峰, 表明这三个峰不存在简并且不存在相互作用。图 8 是抽掉四根圆柱后的光子晶体的透射谱, 在频率为 7.74 和 8.08 GHz 处存在二个缺陷峰。

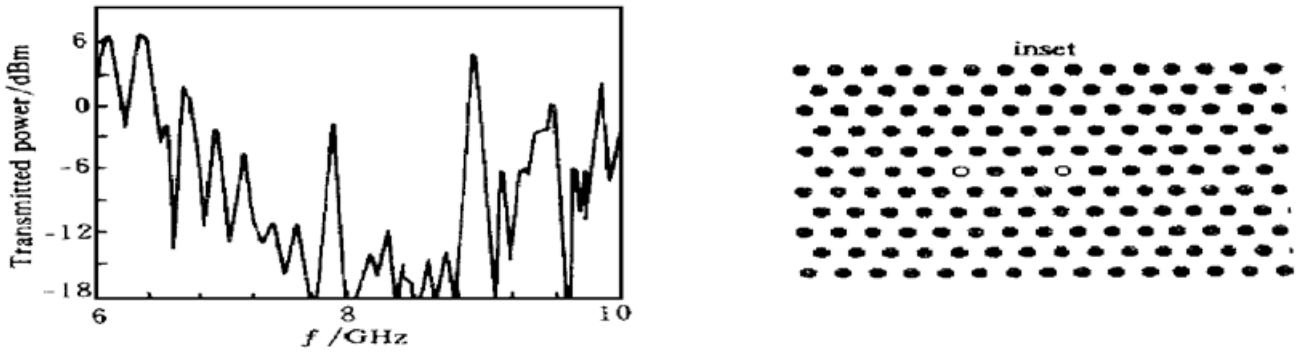


Fig. 5 The transmitted power vs. frequency for a triangular photonic crystal when two cylinders are removed (shown in the inset)

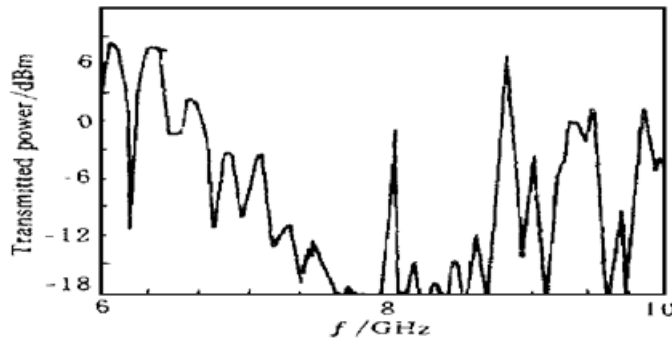


Fig. 6 The transmitted power vs. frequency for a triangular photonic crystal when three cylinders are removed (shown in the inset)

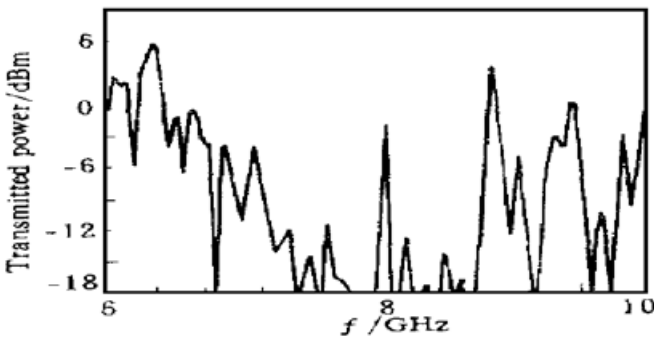


Fig. 7 The transmitted power vs. frequency for a triangular photonic crystal when three cylinders are removed (shown in the inset)

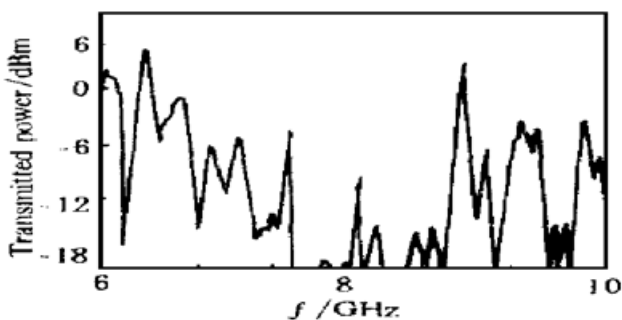


Fig. 8 The transmitted power vs. frequency for a triangular photonic crystal when four cylinders are removed (shown in the inset)

4 实验结果讨论

本文的实验结果和光子带结构的数值计算结果吻合,而且光子晶体的原子直径和格点位置有一定的偏差时,光子带隙仍然是存在的,只是在带缘处有些模糊,因而从实验上证实了在二维情况下,光子晶体的原子直径和格点位置的细微偏差仅影响光子在带缘处的定域化。实验中发现,只要设计出适当的缺陷,可以得到窄的缺陷峰,而且,即使去掉数个原子,也能得到这一结果,表明它可以用于设计振荡器件。同时,可通过对缺陷位置的设计,得到多个缺陷模,这表明光子晶体也可应用于特征谱识别和滤波器等。

小 结 利用熔融石英玻璃棒制作了微波波段的三角形光子晶体,利用 HP 网络分析仪研究了三角形光子晶体的透射谱,同时研究了光子晶体的缺陷模,讨论了光子晶体的可能应用,如谐振腔和滤波器等。

参 考 文 献

- [1] E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20) : 2059~ 2062
- [2] E. Yablonovitch. Photonic band structure, edited by C. M. Soukoulis, *Photonic Band Gaps and Localization*, New York, Plenum Press, 1993 : 207~ 234
- [3] 金崇君, 秦 柏, 杨 淼等. 三角形复式晶格的光子带结构研究. *光学学报*, 1997, **17**(4) : 409~ 413
- [4] C. M. Soukoulis, M. J. Velgakis, E. N. Economou. One-dimensional localization with correlated disorder. *Phys. Rev. (B)*, 1994, **50**(8) : 5110~ 5118
- [5] A. R. McGurn, K. T. Christensen, F. M. Mueller *et al.*. Anderson localization in one-dimensional randomly disordered optical systems that are periodic on average. *Phys. Rev. (B)*, 1993, **47**(20) : 13120~ 13125
- [6] A. Kondilis, P. Tzanetakis. Numerical calculations on optical localization in multilayers structures with random-thickness layers. *Phys. Rev. (B)*, 1992, **46**(23) : 15426~ 15431
- [7] Zhang Daozhong, Hu Wei, Zhang Youlong *et al.*. Experimental verification of light localization for disordered multilayers in the visible-infrared spectrum. *Phys. Rev. (B)*, 1994, **50**(14) : 9810~ 9814

Experimental Study of Photonic Crystal — Triangular Lattices

Qin Bai¹⁾ Jin Chongjun²⁾ Qin Ruhu¹⁾

1), Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
2), Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

(Received 23 October 1997)

Abstract Triangular lattice photonic crystal behaving in the electromagnetic zones constructed from fused silicon cylinders in styrofoam is fabricated. The transmission spectra of the photonic crystal with and without defects were measured. On this basis, the defect modes of photonic crystal were studied, and the potential applications of the photonic crystal were discussed.

Key words photonic crystal, electromagnetic zones, transmission spectrum.