

文章编号: 1001-3806(2009)02-0127-03

1 维光子晶体微腔的光子局域特性分析

钟远聪¹, 欧阳征标^{1*}, 王宏¹, 王仲淳², 刘宗平², 吴志荣²

(1. 深圳大学 电子科学与技术学院 太赫兹技术中心 深圳市微纳光子信息技术重点实验室 深圳 518060; 2. 元智大学 电机工程学系, 桃园 320)

摘要: 为了研究光子晶体的光局域特性, 采用传输矩阵法计算了1维缺陷光子晶体微腔中缺陷模的局域场强分布, 建立了相对局域化长度的概念, 它表征光子局域程度的强弱, 局域化长度越小, 光子局域程度越强, 反之亦然。结果表明, 缺陷层两侧排列为高折射率介质层的结构局域光的能力比两侧为低折射率介质层的强; 考察前一种结构, 且满足共振布喇格散射条件或共振米散射条件范围时, 相对局域化长度可获得较小值。

关键词: 集成光学; 光子晶体微腔; 光子局域; 相对局域化长度

中图分类号: O734 **文献标识码:** A

Analysis of photon localization property in 1-D photonic crystal micro-cavity

ZHONG Yuan-cong¹, OUYANG Zheng-biao¹, WANG Hong¹, WANG Zhong-chun², LIU Zong-ping², WU Zhi-rong²

(1. Shenzhen Key Laboratory of Photonic Information Technology, Research Center of THz Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Department of Electronic Engineering, YuanZe University, Taoyuan 320, China)

Abstract: In order to study the photon localization property of photonic crystal, the localized field distribution of defect modes was computed by means of the optical transmission matrix method. The concept of relative localization length was introduced, which represents the degree of the localization of photons. The shorter the length, the more stronger the degree, and vice versa. The results show that the localization of photons in the structure with a defect layer bordering on high refractive index layers is stronger than that bordering on low refractive index layers. For the former structure, if the condition of resonance Bragg scattering or Mie scattering was satisfied, the relative localization length become smaller.

Key words: integrated optics; photonic crystal micro-cavity; photon localization; relative localization length

引言

光子晶体是目前国际上非常热门的光学研究领域之一, 它是一种由高低折射率(或不同介电常数)介质在空间上按周期性排列的材料, 其显著的特点是具有光子带隙, 频率落在禁带内的电磁波是禁止在其中传播的。光子局域化一方面类似于电子波函数在无序介质中的安德森电子定域化, 发生在随机介质或随机光子晶体中^[1-2], 另一方面在缺陷态光子晶体中, 在光子禁带内出现的频率极窄的缺陷模同样具有强烈的光子局域化特征^[3-4]。与缺陷模频率对应的光子被局域在缺陷位置处, 在缺陷位置的两边, 光场强度按指数规律迅速衰减, 形成很强的光子局域化。对采用光子晶体

谐振腔的激光器, 腔内可以产生大幅度的共振场。其局域化长度表征光子局域化程度的强弱, 局域化长度越小, 缺陷模的光子数在缺陷层位置储存得越多, 局域化程度越强, 能量损耗越小, 微腔的品质因子 Q 值越高, 缺陷层为增益介质的光越容易被激发振荡, 使激射阈值越低^[5-6]。这种增强光波在微腔中的束缚, 提高微腔品质因子的方法被认为是局域场调节法^[7]。利用这种特性可以制成具有微米量级尺寸、高品质因子、低阈值等高性能的1维光子晶体激光器^[8-9]。可见, 缺陷模的光子局域化长度是光子晶体微腔激光器的一个重要参量指标。

为了更好地描述缺陷光子晶体微腔的光子局域化特性, 深入分析结构参量对光子局域程度的影响, 本文中建立了光子相对局域化长度的概念, 并定量研究了光子晶体的结构参量对相对局域化长度的影响, 得出一些新的结论。

1 理论方法

光垂直入射到由非磁性和各向同性的介质组成的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471047); 广东省自然科学基金资助项目(04011308)

作者简介: 钟远聪(1981-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光子晶体理论及其应用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

收稿日期: 2008-01-17; 收到修改稿日期: 2008-02-19

光子晶体中,根据光学传输矩阵法,单层介质的特性矩阵为:

$$M_1(z_1) = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & -\frac{i}{p_1}\sin\phi_1 \\ -ip_1\sin\phi_1 & \cos\phi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, z_1 为单层介质的厚度, $\phi = k_0 n z_1 \cos\theta$, $p = \sqrt{\epsilon/\mu} \times \cos\theta$, k_0 为真空中的波数, θ 为入射角(本文中 $\theta = 0$, 垂直入射)。推广到多层的特性矩阵为:

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

则光在入射界面 1 处的电场场强 E_1 和磁场场强 H_1 由传输矩阵法有:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^N M_j \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, M_j 为光子晶体第 j 层的特性矩阵, E_{N+1} 和 H_{N+1} 分别为光在透射界面 $N+1$ 处的电场和磁场的强度。设初始入射光波的场强为 $E_0 = 1$, 根据(3)式就可以算出每个人射光波在光子晶体内部空间的场分布。局域化长度 d 可定义为从场强的最大值衰减到其 $1/e$ 倍处的距离^[10], 这样可以有效地表达光子晶体局域化的特征。为了使局域化程度和光的波长进行比较, 这里引入相对局域化长度参量 \bar{d} , 而 d 也称为绝对局域化长度:

$$d = |x_{\max} - x_c|, \bar{d} = d/\lambda_c \quad (6)$$

式中, λ_c 为缺陷模中心波长, x_{\max} 和 x_c 分别表示最大值和其衰减到 $1/e$ 倍时对应的位置。

2 结果与讨论

2.1 1 维缺陷光子晶体构造对局域化强度的影响

两种常见的高低折射率介质层排列分别是 $(AB)_3ACA(BA)_3$ 和 $(BA)_3BCB(AB)_3$, 1 维缺陷光子晶体结构如图 1 所示, 其中 $n_A = 3.23$, $n_B = 1.35$,

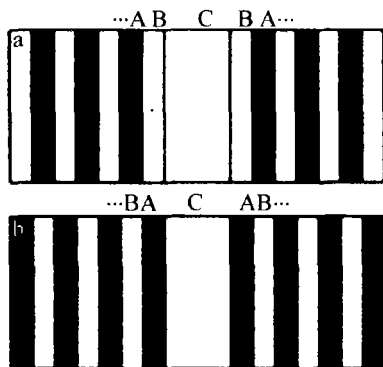


Fig. 1 The two familiar micro-cavities of 1-D photonic crystal with a defect
a—structure I b—structure II

$n_A h_A = n_B h_B = \lambda_0/4$ (λ_0 是光子晶体第 1 禁带的中心频率, 即基频 ω_0 所对应的波长, 这里设为 $1.48\mu\text{m}$); 缺

陷层 $n_c = 1, h_c = 0.7\mu\text{m}$ 时, 它们的透射谱见图 2, 缺陷模在各自光子晶体内的场强分布如图 3 所示。

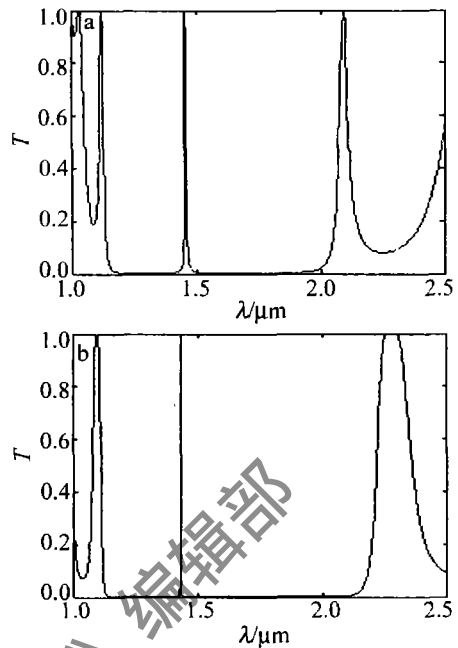


Fig. 2 Transmittance spectrum
a—structure I b—structure II

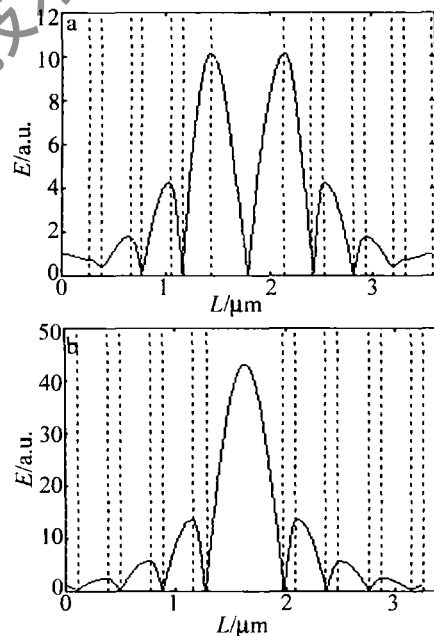


Fig. 3 The field distribution of the defect mode
a—structure I b—structure II

从图 3 可以看出, 在结构 I 中由于靠近缺陷层 C 两侧的介质是低折射率 B 层, 它们的折射率相差不大, 反射回缺陷层的光很少, 大部分光穿透到 B 层中, 直到缺陷两侧出现高折射率 A 层时, 缺陷模的光才强烈地被反射回来, 结果光被局域在 C 层和 B 层的界面处, 出现两个场强峰值, 局域能力降低。而在结构 II 中正好相反, 靠近 C 层左右两边的介质是 A 层, 能把大部分光局域在 C 层中谐振, 相当于把结构 I 中进入 B 层的光反射回缺陷中, 从它们场分布的峰值来看, 结构

II 的峰值达到 40, 也比结构 I 的大很多。在这种条件下, 缺陷层两侧排列为高折射率介质层的光子晶体微腔局域光的能力比低折射率的强。因此, 从提高品质因子和降低起振阈值的角度出发, 采用结构 II 所示的微谐振腔是有利的。以下主要讨论结构 II 中的缺陷模的局域特性。

2.2 相对局域化长度与缺陷层光学厚度的关系

由图 3b 结构 II 可知, 缺陷模被局域在缺陷层中, 并且场强向缺陷层两边作指数衰减。计算结构 II 的缺陷模的光子相对局域化长度, 其它结构参量不变, 并保持 $n_c = 1$, 改变缺陷层的物理厚度 h_c , 在带隙中会出现一个或若干个缺陷模^[11], 为了使分析结果有意义, 始终跟踪计算第 1 禁带(基频所在范围)内第 1 个出现的缺陷模的相对局域化长度。缺陷厚度变化范围是 $0.5\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$, 见图 4, 相应的相对局域化长度变化

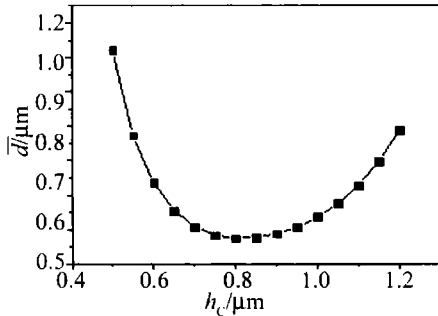


Fig. 4 The relative localization length for different defect layer thickness

曲线在 1.1226 和 0.8878 两个值之间呈 U 字型分布。在 U 字型底部, 当 h_c 接近 $0.75\mu\text{m}$ 时, 缺陷模的波长接近第 1 禁带的中心波长 λ_0 , 相对局域化长度 \bar{d} 较小。当偏离此值越大时, \bar{d} 也开始变得越大。

从物理上可以这样来理解上述现象: 由于缺陷层两边的每个周期的光学厚度为 $\lambda_0/2 \approx 0.75$, 当缺陷层的厚度在 $n_c h_c = 0.75\mu\text{m} \approx \lambda_0/2$ 范围时, 该结构整体上看正好符合产生共振布喇格散射的条件, 光子晶体的禁带效应达到最强状态, 即光子晶体对缺陷模式有最强的限制效果, 从而在此条件范围时使局域化长度达到较小值。注意, 在缺陷层厚度取其它厚度的情况下, 左右两个光子晶体各介质层的空间分布有错位, 不满足共振布喇格散射条件。

2.3 相对局域化长度与介质层光学厚度比的关系

考察结构 II, 保持和 $n_c = 1$ 和 $h_c = 0.7\mu\text{m}$ 不变, 且满足 $n_A h_A + n_B h_B = \lambda_0/2$ 的条件下, 计算高低折射率层的光学厚度不同比值对相对局域化长度的影响, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, $n_A h_A / n_B h_B$ 的取值在 1 ~ 2 之间时, 相对局域化长度 \bar{d} 较小。通过计算可以发现, 相对局域化长度在 $n_A h_A / n_B h_B = 1.3$ 时取最小值。理论上, $n_A h_A / n_B h_B = 1$ 对应的是米散射共振条

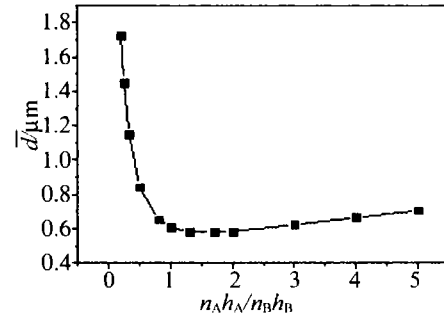


Fig. 5 The relative localization length for different medium optical thickness 件, 此时, 光子晶体的禁带效应也处于相对最强的状态, 因此能够相对最有效地将缺陷模禁锢在缺陷中, 但由于 $n_A h_A / n_B h_B$ 变大时缺陷模波长有所增大, 同时结构两边周期有限以及计算误差, 导致其对应的相对局域化长度未能取最小值, 而是偏移到比值 1.3 对应的相对局域化长度最小。从整体上看, 在 $n_A h_A / n_B h_B = 1$ 的条件范围对应的相对局域化长度都比较小。

3 结论

通过数值模拟研究了 1 维缺陷光子晶体微腔的缺陷模的光子局域特性。发现介质参量相同时, 缺陷层两侧排列为高折射率介质层的结构局域光的能力比两侧为低折射率介质层的强, 即前一种结构有利于提高谐振腔的品质因子和降低激光器的起振阈值。又通过计算光子相对局域化长度与缺陷层光学厚度、介质层光学厚度比值的变化关系, 发现在满足共振布喇格散射条件或共振米散射条件范围的情况下, 相对局域化长度可获得较小值。按照这些结果调节局域场, 可使 1 维光子晶体微腔中的光子局域化程度增强, 提高微腔的品质因子, 从而降低 1 维光子晶体激光器的起振阈值, 产生更高能量的激光, 这对于优化激光器的性能指标有指导意义。

参 考 文 献

- [1] MAYSTRE D, SAILLARD M. Localization of light by randomly rough surfaces; concept of localization [J]. J O S A, 1994, A11(2): 680-690.
- [2] FANG Y T, YU S L, SHEN T G. One dimension random photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(2): 136-137 (in Chinese).
- [3] WANG W J, ZHOU J Y, XIAO W N. Light distribution and localization in one-dimensional periodic structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 24(7): 1086-1089 (in Chinese).
- [4] XIE Y M, LIU Z D, WANG H Q. Local defect modes in photonic crystals with negative refractive index structural defects [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 195-197 (in Chinese).
- [5] CHABANOV A A, GENACK A Z. Photon localization in resonant media [J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(15): 153901-153904.
- [6] BLOKH K Y, BLOKH Y P, FREILIKHER V D. Resonances in one-dimensional disordered systems; localization of energy and resonant transmission [J]. J O S A, 2004, B21(1): 113-120.

很好地反映机动车排放颗粒物的浓度,车流量大时,颗粒物浓度高,后向散射变强。

图7是实验中测量的激光雷达后向散射强度和车流量的时间序列图。框图表示后向散射强度的时空分

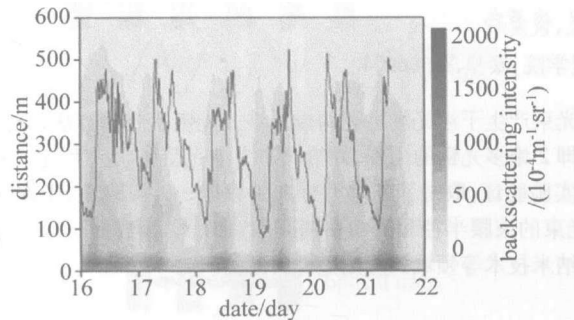


Fig.7 Series of backscattering intensity and traffic flow

布,横坐标表示时间,纵坐标表示距离,曲线表示车流量的变化情况。从图中可以看出:激光雷达测量的气溶胶颗粒物浓度与车流量的变化呈现一定的周期性,具有双峰结构,上午9点左右和下午6点左右达到峰值,与人们的工作时段和边界层变化密切相关。在交通点颗粒物主要是由机动车产生的,颗粒物浓度和车流量变化趋势具有很好的一致性,车流量大的时候,颗粒物浓度大;反之,浓度就小,用激光雷达能够很好地监测机动车颗粒物浓度的变化。另外,由于激光雷达距离道路大约有60m,道路上机动车排放的颗粒物浓度会比较高,会向单方向扩散(另外一侧是高楼),与图中气溶胶浓度从道路中央向单方向递减一致,体现出了气溶胶粒子的动态扩散过程。尽管车流量与颗粒物浓度之间的总体变化趋势很一致,但也存在一定的差异,这可能与气溶胶粒子的扩散和累积有关。因为激光雷达摆放在3楼,探测的是路面上方的气溶胶后向散射信号,而汽车排放的细粒子向上扩散需要一段时间,在大气对流不是很强烈的时候,扩散时间会比较慢,会产生一定的滞后效应。总体来说,用半导体激光雷达能够有效地对机动车排放的颗粒物进行监测,研究其变化分布特性。

3 结论

激光雷达作为一种新型的大气气溶胶遥测手段,

提供了一种强有力的工具。作者利用激光雷达的实验数据反演大气气溶胶后向散射系数,与气溶胶质量浓度建立了线性关系,并结合车流量数据进行了分析。实验结果表明:大气后向散射系数与车流量具有很好的变化趋势,可以很好地反映机动车排放颗粒物的信息。机动车对大气颗粒物污染影响很大,利用激光雷达开展这方面的研究,能够对城市机动车辆的有效管理控制以及环境大气质量的治理提供重要的科学依据。由于不同型号的车排放颗粒物的程度不同以及气溶胶的复杂性,还需要做进一步的研究对这种方法进行改进。

参考文献

- [1] YANG H, LIU W Q, LIU J C, *et al.* Monitoring and study of city tropospheric aerosol [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (2): 174-176 (in Chinese).
- [2] WANG G Ch, XIE H, WAN X W, *et al.* Variation of aerosol mass concentration and element composition with height in Beijing area [J]. *Research of Environmental Science*, 2004, 17 (1): 37-40 (in Chinese).
- [3] ZHAO M, MIAO M Q. The planet boundary layer [M]. Beijing: Meteorological Press, 1992: 3-18 (in Chinese).
- [4] DING G A, MENG Zh Y, YU H Q, *et al.* Measurement and research on ABL air pollution in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13 (s1): 82-91 (in Chinese).
- [5] SPINHRNE J D. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31 (1): 48-54.
- [6] SHIMIZU H, SASANO Y, NAKANE H, *et al.* Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area [J]. *Appl Opt*, 1985, 24 (5): 617-626.
- [7] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation [M]. New York: Academic Press, 1969: 1-3.
- [8] MÜNKEL C, EMEIS S, MÜLLER W J, *et al.* Aerosol concentration measurements with a lidar ceilometer; results of a one year measuring campaign [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5235: 486-496.
- [9] HU B, ZHANG W, ZHANG L, *et al.* A study on scattering properties of aerosol particle over Xigu district of Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22 (4): 354-360 (in Chinese).
- [10] SUN J Q, ZHANG H F. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using lidar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2 (1): 36-43 (in Chinese).
- [11] MÜNKEL C, ERESMAA N, RÄSÄNEN J, *et al.* Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124 (1): 117-128.

(上接第129页)

- [7] LI Y H, JIANG H T, LI H Q, *et al.* New progress in research of photonic crystal cavities [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33 (7): 864-868 (in Chinese).
- [8] BORODITSKY M, KRAUSS T F, COCCIOLI R, *et al.* Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals [J]. *A P L*, 1999, 75 (8): 1036-1038
- [9] WANG H, OUYANG Zh B, HAN Y L, *et al.* Amplification of one-dimensional photonic crystals defect-mode laser [J]. *Acta Optica Sini-*

ca, 2006, 26 (11): 1691-1697 (in Chinese).

- [10] HARALD P, KAPON E. Photon localization in lattices of coupled vertical-cavity surface-emitting lasers with dimensionalities between one and two [J]. *Opt Lett*, 1997, 22 (8): 546-548.
- [11] OUYANG Zh B, XU G W, SUN Y L, *et al.* Tuning characteristics of photonic crystal micro-resonators [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16 (4): 399-401 (in Chinese).