

文章编号: 0253-2239(2007)07-1290-5

一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质*

孟庆生¹ 欧阳征标¹ 王仲淳² 吴志荣² 刘宗平² 罗贤达¹ 王 宏¹

(¹ 深圳大学电子科学与技术学院太赫兹技术研究中心, 深圳 518060)
(² 元智大学电机工程学系, 台湾 桃园 320)

摘要: 利用光学传输矩阵法研究了一维光子晶体谐振腔的谐振波长、品质因子和缺陷层厚度之间的变化关系, 发现谐振腔内存在不同级次的谐振模式; 对于同一级次的谐振模式, 品质因子在某一波长(λ_m)时达到极大值, 该波长恰为光子晶体反射率最高处所对应的波长, 也是该光子晶体的布拉格共振反射波长; 在 λ_m 处, 品质因子随级次的增加而线性增加; 品质因子随周期层数增加而指数增加, 但其增长因子与模式级次无关, 也与周期数无关, 只与谐振波长有关; 对于所有级次的谐振模式, 增长因子在 λ_m 处达到最大值。这对提高品质因子、减小谐振腔体积、优化谐振腔有重要意义。

关键词: 激光技术; 光子晶体谐振腔; 传输矩阵法; 模式类型; 品质因子

中图分类号: TB383 文献标识码: A

Mode Types and Their Related Properties of One-Dimensional Photonic Crystal Resonant Cavity

Meng Qingsheng¹ Ouyang Zhengbiao¹ Wang Jong C² Wu Chih Jung²

Liu Chung Ping² Luo Xianda¹ Wang Hong¹

(¹ Tera-Hertz Technical Center, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060)
(² Department of Electrical Engineering, Yuan Ze University, Taiwan)

Abstract: The influences of the thickness of defect layer on the resonant wavelength and its quality factor in one-dimensional photonic crystal cavity were studied with optical transmission matrix. Numerical simulations show that there exist different mode types and a maximal quality factor for each mode type. The maximum is found at the wavelength λ_m where there is a maximal reflection from the photonic crystal, corresponding to the condition for resonance Bragg reflection. The quality factor and thickness of the defect layer corresponding to λ_m are in linear relations with the mode order number. The quality factor increases exponentially with the number of the structural periods, and the increment number is only a function of the operating wavelength, and has no relation to mode types and periods of structure. For all mode types, the increment number reaches a maximum at the wavelength λ_m .

Key words: laser technology; photonic crystal cavity; transfer matrix method; mode type; quality factor

1 引 言

光子晶体^[1,2]是一种高低折射率介质呈周期性排列的材料。光子晶体的最大特点是具有光子禁带,落在禁带内的电磁波被禁止传播。如果在周期性结构中引入适当的缺陷,则会在光子禁带中产生

缺陷模,形成光子晶体谐振腔^[3~7]。光子晶体谐振腔在光子晶体激光器^[8~10]、光子晶体滤波器^[11,12]、光子晶体分插复用器^[13]、波导^[14]、天线^[15]、光开关^[16]、光学双稳态^[17]、光学限幅^[18]、二次谐波产生^[19]、传感器^[20]等器件中起着重要的作用。由于一

* 国家自然科学基金(60471047)和广东省自然科学基金(04011308)资助课题。

作者简介: 孟庆生(1980—),男,江苏高邮人,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。

导师简介: 欧阳征标(1963—),男,湖南洞口人,教授,博士生导师,主要从事光子晶体在光通信器件和太赫兹波器件方面的应用研究。E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-12; 收到修改稿日期: 2006-12-17

维光子晶体的制作成本较低,因此一维光子晶体^[21~23],特别是一维光子晶体谐振腔受到了人们的广泛关注^[5~7,18,21]。

对于光子晶体谐振腔,一般重点研究结构参量对其工作波长的影响,以及如何提高品质因子,减小谐振腔体积。一般认为增加谐振腔两边光子晶体周期层数可显著提高品质因子,但是这同时也增加了谐振腔体积。文献^[5~7]对一维光子晶体谐振腔的带宽与品质因子、模式特性、调谐特性等做了研究。文献^[5]的研究表明,对一维光子晶体谐振腔,当缺陷的光学厚度为某一值时,品质因子达到最大值;随着谐振腔两边周期层数的增加,谐振波长变化很小,而品质因子呈指数规律增加;文献^[6,7]中研究指出了缺陷模波长与缺陷层厚度之间存在一个线性变化关系;但是,还有很多问题需要做进一步的研究。本文研究发现谐振腔内存在不同级次的谐振模式;对于同一级次的谐振模式,品质因子在某一波长(λ_m)时达到极大值,该波长恰为光子晶体反射率最高处所对应的波长,也是该光子晶体的布拉格共振反射波长;在 λ_m 处,品质因子随级次的增加而线性增加;品质因子随周期层数增加而指数增加,但其增长因子与模式级次无关,也与周期数无关,只与谐振波长有关;对于所有级次的模式,增长因子均在 λ_m 处达到最大值。这对提高品质因子、减小谐振腔体积、优化谐振腔非常有效。

2 物理模型及计算方法

所模拟的一维光子晶体谐振腔模型如图 1 所示,黑色表示高折射率介质,白色表示低折射率介质,缺陷层采用高折射率介质,均设为无损、无色散、无磁性、线性介质。取高低折射率 n_1, n_2 分别为 3.2, 1, 对应厚度 h_1, h_2 分别为 $0.06 \mu\text{m}, 0.18 \mu\text{m}$; 取缺陷层折射率 n_d 为 3.2, 厚度为 D 。图 1 给出的谐振腔是一种镜像对称结构,并且在缺陷两边均各有三个周期层,即周期层数 N 取 3。将光子晶体置于空气中,即光子晶体背景折射率 n_0 取为 1。设一

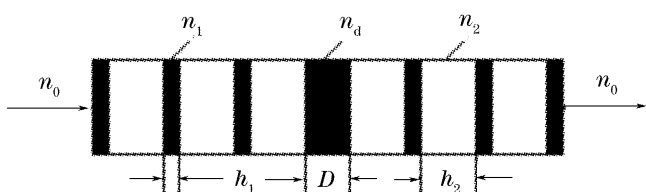


图 1 一维光子晶体谐振腔

Fig. 1 Structure of a one-dimensional photonic crystal resonant cavity

平面波垂直入射到光子晶体,这时只需要考虑 TE 入射波。

文中采用光学传输矩阵法^[24]进行了分析,品质因子的定义为 $Q = \lambda_c / \Delta\lambda = \lambda_c / |\lambda_1 - \lambda_2|$, 其中 λ_c 为缺陷模中心波长,对应透射率曲线上峰值处波长, $\Delta\lambda$ 为峰值两侧半功率点对应的两个波长的差。

3 数值模拟结果与分析

为了研究缺陷层厚度对谐振腔参量的影响,这里只改变缺陷层厚度 D ,使其从 $0.075 \mu\text{m}$ 到 $0.900 \mu\text{m}$ 变化,步长取 $0.005 \mu\text{m}$,而保持其它参量不变,计算了谐振波长及品质因子随缺陷层厚度变化的情况。

图 2 给出的是随着缺陷层厚度的增加,谐振波长的变化情况。由于缺陷模必定出现在禁带范围内,因此纵坐标取值范围是有限的,不失普遍性。这里只讨论一次禁带的缺陷模。可以明显看到图 2 中存在一条条的线,而每条线都代表一个变化规律,因此可以把一条线上的所有模划为一个类型,并称图 2 中从左往右的线依次为第 1、2、3、... 级次的模式类型。从图 2 可以看出,同一个级次的谐振模的波长随着缺陷层厚度的增加而基本呈线性增加,但其线性增加的速率(等于图中直线段的斜率)随级次的增加而减少。

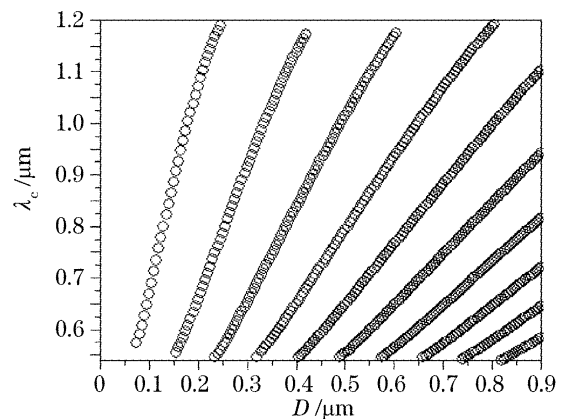


图 2 谐振波长随缺陷层厚度的变化关系

Fig. 2 Influence of the thickness of defect layer on the resonant wavelength

从图 2 可以看出,在模式级次较低时,曲线呈现出一定的非线性,而在级次较高时,曲线几乎成为直线。这是因为,缺陷层两侧的光子晶体可以看作是两个反射镜,谐振波长取决于缺陷层的厚度和波在这两个反射镜上反射时产生的相位差,而光子晶体对波的反射位相有一定的色散;因此,缺陷层较薄时,反射波相位及其色散对谐振模的波长影响较明显,表现在图 2 中就是低次模式类型曲线会出现一

定的非线性；而缺陷层较厚时谐振波长基本由缺陷层厚度决定，即反射波相位色散的影响可以忽略，从而使得谐振波长与缺陷层厚度之间呈现出很好的线性关系。

图 3 给出了随着缺陷层厚度增加时，品质因子的变化情况。图 3 是这样计算出来的：每给定一个缺陷层厚度，计算出其对应的所有缺陷模波长并计算出相应的品质因子，最后可以画出图 3 所示的曲线，下面给出的图 4 的计算过程也与此类似。从图 3 可以看到，对每个级次，谐振波长的品质因子随缺陷层厚度的增加先增大后减小，中间存在一个极大值。从图 3 还可看到，谐振模式的级次数随缺陷层厚度的增加而增加。每个级次的谐振模的极大品质因子与级次数成正比。

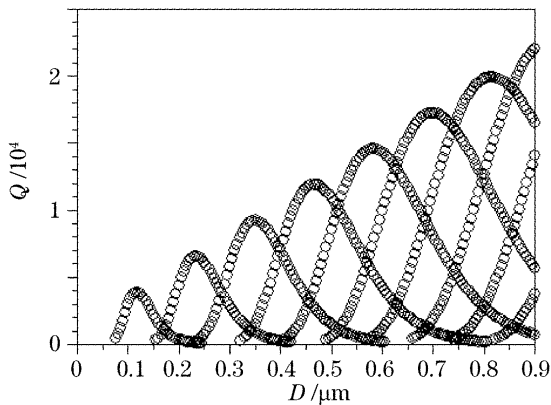


图 3 品质因子随缺陷层厚度的变化关系，计算参量同图 2
Fig. 3 Influence of the thickness of defect layer on the quality factor for parameters the same as in Fig. 2

图 4 中的圆圈构成的曲线给出了谐振模品质因子与谐振波长及模式级次的关系。从图 4 可以看出，每个级次谐振波长的品质因子都在同一个波长附近达到最大，在其两边的波长的品质因子相对较小。对于相同的谐振波长，较高级次有较高的品质

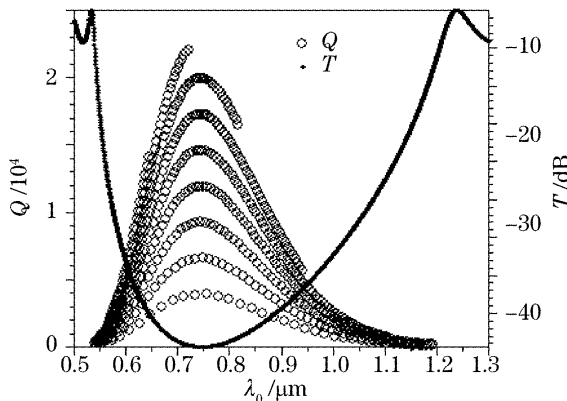


图 4 品质因子与谐振波长的关系，参量同图 2
Fig. 4 Relationship between the quality factor and the resonant wavelength for parameters the same as in Fig. 2

因子。这里需要说明的是，由于是按照线性增加缺陷层厚度来计算谐振腔模式，而不是按照级次计算的，因此图 2~图 4 中较高级次只给出了部分模式。

为了分析产生上述现象的原因，将对应 5 个周期的一维均匀光子晶体的透射谱叠加在图 4 中，如图 4 中实心圆点构成的曲线所示。图 4 右边纵坐标是对应的透射率坐标。

综合图 4 中品质因子、谐振波长关系图与均匀光子晶体透射谱可以很好解释图 4 所示的 Q 值与谐振波长之间的变化关系：在谐振波长对应透射率最低处时(设该波长为 λ_m)，反射率最高，波被最大限度地局域在缺陷处，从两边逃逸的能量达到极小，这样按照品质因子的定义可知，这时的品质因子值达到极大值；而当谐振频率远离 λ_m 时，两边光子晶体对波的反射率逐渐下降，被局域在缺陷处的波的能量逐渐下降，从两边逃逸出去的波的能量则逐渐增加，这样按照品质因子的定义可知，品质因子随谐振波长逐步远离 λ_m 而逐渐下降。

要说明的是，最大反射率对应于光子晶体的谐振布拉格反射的情况。在垂直入射情况下，光子晶体的谐振布拉格反射条件为 $\lambda_B = 2(n_1 h_1 + n_2 h_2)$ ，直接计算得到 $\lambda_B = 0.74 \mu\text{m}$ ，它与数值模拟得到的 $\lambda_m = 0.75 \mu\text{m}$ 相差约 0.27%，二者很吻合。

根据图 3、图 4，在谐振波长 λ_m 处，通过线性拟合，可得如下方程：

$$D_{km} = 0.0029 + 0.12k, \tag{1}$$

$$Q_{km} = 1210 + 2676k, \tag{2}$$

其中 D_{km} 为 k 级次模式的 λ_m 处对应的缺陷层厚度， Q_{km} 为 k 级次的 λ_m 处的品质因子。

(1)式和(2)式具有普适性。例如，取 $k=20$ 对上述方程进行验证，由(1)式和(2)式计算得到 $D_{20m} = 2.3 \mu\text{m}$ ， $Q_{20m} = 54731$ 。与实际模拟得到的相应级次的模式的品质因子值 54722 只有 0.016% 的误差。

另外，令(2)式中 $k=0$ ，可得 $Q_{0m} = 1210$ 。注意到， $k=0$ 相当于把中间的高折射率介质缺陷层去掉，使得原缺陷层两边的空气层靠在一起，此时结构转化为缺陷层为低折射率介质的谐振腔，厚度为 $0.36 \mu\text{m}$ ，两边仍为 3 个周期层。通过传输矩阵法计算得到品质因子为 1208，与(2)式的常数项相比仅差 0.2%。

对(1)式，注意到 k 为整数，当 $k \neq 0$ 时，其常数项很小可略去，则可得

$$D_{km} \approx 0.12k. \tag{3}$$

考虑腔长为 D 的标准法布里-珀罗 (F-P) 谐振腔的波长公式, 在垂直入射情况下为

$$2 \cdot n_d \cdot D = k\lambda_m. \quad (4)$$

由于缺陷层折射率 $n_d = 3.2$, 对应的谐振波长可以计算出为 $\lambda_m = 0.75$, 则可得

$$D = 0.12k. \quad (5)$$

比较(3)式与(5)式可以看到, 二者吻合得相当好, 其系数相差很小, 约为 0.42%。这说明, 当 $k \neq 0$ 时, 点缺陷腔确实可以近似看作一个法布里-珀罗腔。

由(1)式和(2)式可知, 在 λ_m 处, 品质因子 Q_{km} 随缺陷层厚度的增加而呈线性增加。这个现象的定性解释如下: 根据品质因子的定义 $Q = \omega_0 U / P$, U 与 P 分别表示谐振腔所存储的能量与能量衰减功率, ω_0 表示谐振圆频率。在谐振波长 λ_m 下, 当缺陷层厚度增加而缺陷层两边的光子晶体层数不变时, 腔中的储能 U 随缺陷体积的增加而线性增加, 但是谐振腔的辐射功率 P 基本由缺陷两边的光子晶体层数决定而保持不变, 因此品质因子随缺陷层厚度增加而线性增加。

(2)式表明, 似乎品质因子可以随模式级次的增加而无限增加, 但这只是对应光子晶体本身不存在损耗的理想情况。设光子晶体存在一定的损耗, 其对应的损耗品质因子为 Q_L , 当 $Q_{km} \gg Q_L$ 时, 则实际的品质因子为

$$Q'_{km} = Q_{km} Q_L / (Q_{km} + Q_L) \approx Q_L. \quad (6)$$

即实际上光子晶体谐振腔的品质因子存在一个上限值, 不会无限增长。

为了进一步分析模式级次对谐振腔的影响, 现在计算缺陷层两边的光子晶体周期数对品质因子的影响。文献[9]分析指出, 品质因子随两边光子晶体层数的增加而指数增加, 而波长变化很小, 即有

$$Q_N = Q_{N-1} \cdot A = Q_2 \cdot A^{N-2}, \quad N \geq 2 \quad (7)$$

其中下标表示缺陷两边的周期层数, 要形成有用的谐振腔, 其值必须不小于 2。可以称 A 为增长因子, 因为它反映了品质因子随周期数增加的快慢。

图 5 给出了增长因子随谐振波长的变化情况。与图 4 不同的是, 通过大量改变缺陷层厚度和光子晶体的周期数进行模拟, 始终只存在一条增长因子曲线, 即增长因子与模式级次无关, 也与光子晶体的周期数无关, 而只与谐振波长有关。

从图 5 可以看到, λ_m 处的增长因子达到最大值, 该波长也正好是光子晶体的共振布拉格反射波长。可以发现, 光子禁带效应强的地方, 增长因子就高; 反之, 光子禁带效应越弱的地方, 增长因子则

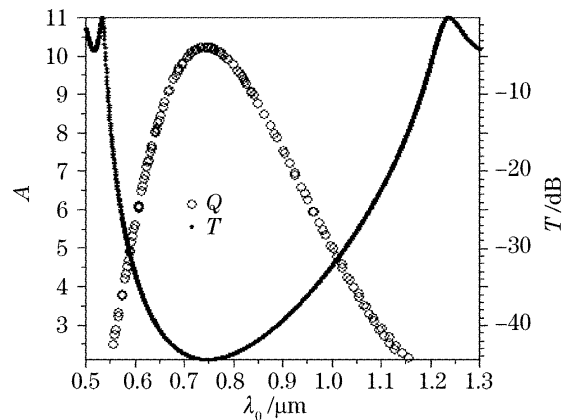


图 5 不同波长所对应的增长因子 A (空心圆圈), 其中的实心圆点构成的曲线为光子晶体的透射率曲线(周期数为 5), 其它参量同图 2

Fig. 5 Increment factor A (in circle) versus the resonant wavelength where the dotted line shows the transmissivity for a uniform photonic crystal of 5 periods. Other parameters are same as in Fig. 2

越低。

需要指出的是, 在研究过程中, 缺陷层的光学厚度从小于 $1/4$ 入射波长到数十个波长, 所得到的规律都成立, 即无论是点缺陷光子晶体谐振腔, 还是光子晶体法布里-珀罗腔, 所得到的规律都存在。而且, 所得到的结论不但对于图 1 所示的左右对称腔适用, 也适合于两边不对称的情况。但是, 在不对称的情况下, (7)式中的 N 应该为效周期数, 即缺陷层两边中, 层数较少的一边的光子晶体的周期数目。

本文模型中设介质为无损耗、无色散, 主要是为了突出问题的焦点, 并且使数学模型更加简单。在实际情况下, 虽然可以采用损耗和色散都很小的材料, 但损耗和色散总是难以避免的, (6)式给出了介质损耗影响的一个简单算法, 进一步深入研究介质损耗和色散等因素的影响将是一件有意义的事, 这将是今后要开展的工作。

4 结 论

一维光子晶体谐振腔存在不同级次的模式。对缺陷层厚度、谐振波长、品质因子三者之间的关系计算表明, 对每一级次, 随着缺陷层厚度的增加, 品质因子先增加后减小, 中间存在一个极大值, 其变化趋势决定于周期性结构的禁带情况。当谐振波长对于相应的均匀光子晶体结构满足共振布拉格条件时, 品质因子达到其所在级次的最大值; 品质因子与级次有良好的线性关系。品质因子随周期层数指数增加, 但其增长因子与模式级次无关, 也与周期数无

关,只与谐振波长有关,实质上是由禁带效应的强弱来决定的。这些结论对于各种一维光子晶体谐振腔都是成立的。

参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Hatice Altug, Jelena Vuckovic. Two-dimensional coupled photonic crystal resonator arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(2): 161~163
- 4 Rafael Herrmann, Thomas Sünner, Tobias Hein *et al.*. Ultrahigh-quality photonic crystal cavity in GaAs [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1229~1231
- 5 Xu Guiwen, Ouyang Zhengbiao, An He'nan *et al.*. Investigation on the bandwidth and quality factor of the defect mode in a photonic crystal with a defect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1079~1082 (in Chinese)
许桂雯,欧阳征标,安鹤男等. 光子晶体缺陷模的带宽与品质因子研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1079~1082
- 6 Ouyang Zhengbiao, Yang Linling, Xu Guiwen *et al.*. Mode properties of one-dimensional photonic crystals with defect[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(1): 63~66 (in Chinese)
欧阳征标,杨琳玲,许桂雯等. 一维缺陷光子晶体的模式特性研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(1): 63~66
- 7 Ouyang Zhengbiao, Xu Guiwen, Sun Yiling *et al.*. Tuning characteristics of photonic crystal micro-resonators [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 399~401 (in Chinese)
欧阳征标,许桂雯,孙一翎等. 光子晶体微谐振腔的调谐特性[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 399~401
- 8 O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer *et al.*. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, **284**(11): 1819~1821
- 9 Se-Heon Kim, Han-Youl Ryu, Hong-Gyu Park *et al.*. Two-dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(14): 2499~2501
- 10 Aaron J. Danner, James J. Raftery, Paul O. Leisher *et al.*. Single mode photonic crystal vertical cavity lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(9): 091114-1~091114-3
- 11 Siou Teck Chew, Tatsuo Itoh. PBG-excited split-mode resonator bandpass filter [J]. *IEEE Microw. Wirel. Commun.*, 2001, **11**(9): 364~366
- 12 A. S. Jugessur, P. Pottier, R. M. De La Rue. Engineering the filter response of photonic crystal microcavity filters[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(7): 1304~1312
- 13 Ziyang Zhang, Min Qiu. Compact in-plane channel drop filter design using a single cavity with two degenerate modes in 2D photonic crystal slabs[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7): 2596~2604
- 14 Amir Boag, Ben Zion Steinberg. Narrow-band microcavity waveguides in photonic crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(11): 2799~2805
- 15 T. Akalin, J. Danglot, O. Vanbesien *et al.*. A highly directive dipole antenna embedded in a Fabry-Perot type cavity[J]. *IEEE Microw. Wirel. Commun.*, 2002, **12**(2): 48~50
- 16 Pierre R. Villeneuve, Daniel S. Abrams, Shanhui Fan *et al.*. Single-mode waveguide microcavity for fast optical switching[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 2017~2019
- 17 E. Centeno, D. Felbacq. Optical bistability in finite-size nonlinear bidimensional photonic crystals doped by a microcavity [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(12): 7683~7686
- 18 Ding Weiqiang, Chen Lixue, Liu Shutian. Large bandwidth optical limiting by Kerr medium doped one-dimensional coupled cavity optical waveguides[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(8): 1539~1541
- 19 T. V. Dolgova, A. I. Mailykovski, M. G. Martemyanov *et al.*. Giant microcavity enhancement of second-harmonic generation in all-silicon photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(15): 2725~2727
- 20 E. Chow, A. Grot, L. W. Mirkarimi *et al.*. Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1093~1095
- 21 An Liping, Liu Nianhua. Ultraslow group velocity in photonic crystal with a dispersive defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1287~1290 (in Chinese)
安丽萍,刘念华. 光子晶体中缺陷的色散导致的群速度降低[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1287~1290
- 22 Huang Biqin, Gu Peifu. Extension of one-dimensional photonic crystal's band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1497~1501 (in Chinese)
黄弼勤,顾培夫. 一维光子晶体禁带的展宽[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1497~1501
- 23 Wang Hao, Liao Changjun, Fan Guanghan. The fabrication of narrow spectrum LED by employing asymmetry one-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 408~411 (in Chinese)
王浩,廖长俊,范广涵等. 应用不对称一维光子晶体结构制备窄光谱LED[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 408~411
- 24 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 6th ed., Oxford: Pergamon Press, 1980. 67~90