

等效折射率模型分析二维光子晶体微谐振腔模态

王丰,任常愚,任敦亮,刘炳胜,李海宝

黑龙江科技学院理学院,哈尔滨 150027

摘要 采用数值计算方法,利用等效折射率模型研究不同折射率材料制造的二维光子晶体微谐振腔的模式。发现可以通过增加薄膜厚度达到良好的光子局域化。讨论了薄膜层材料折射率分别为 $n=3.42, 2.50, 1.80, 1.60$, 薄膜层厚度分别对应为 $0.1529, 0.2182, 0.3341, 0.4003\mu\text{m}$, 其等效折射率分别对应于 $2.81, 2.23, 1.52, 1.38$ 时,达到良好光子局域,说明介质材料与空气折射率差值小的光子晶体微谐振腔结构若要有好的光子局限能力,除了需要靠介质材料本身的全反射效应外,还需有足够厚的膜层厚度。从而找到一个能控制光场分布同时维持单模振荡的机制,揭示微谐振腔体薄膜层厚度对模态影响,为实际研制具有高质量微谐振腔提供了一种较好的预估手段。

关键词 等效折射率;二维光子晶体;微谐振腔;光子局域化

中图分类号 O431

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)20-0070-03

Study of Two-dimensional Photonic Crystal Microcavities Based on the Effective-Index Model

WANG Feng, REN Changyu, REN Dunliang, LIU Bingsheng, LI Haibao

College of Science, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

Abstract The field-pattern of various resonant modes of two-dimensional photonic crystal microcavity structure is investigated using the effective-index model. Results show that increasing optical thickness can lead to good photon localization. The refractive index and optical thickness of materials are tested at various values of the refractive index, film thickness, and effective index to achieve good photon localization. The effect of optical thickness on the modal the resonance characters are analyzed. It is important to find a mechanism through which to control the optical-field distribution and maintain single-mode vibration on a large scale. A two-dimensional photonic crystal, which has periodically-distributed refraction coefficient, is proposed as a potential choice. This paper also indicates that for a photonic crystal structure with a small refractive index difference to acquire a good photon-restriction ability, it must not only rely on the total internal reflection generated in its own materials, but it also must employ an adequately thick layer of optically thick material. Through the above analysis, theoretical guidance has been provided for the design, preparation, and application of such photonic crystal micro-resonators.

Keywords effective index; two-dimensional photonic crystal; micro-cavity; photon localization

0 引言

1987年, E. Yablonovitch 研究抑制自发辐射时,提出了光子晶体的概念^[1-2]。几乎同时, S. John 在讨论光子局域时也独立地提出了这一概念^[3]。光子晶体的提出向人们展示了一种新的控制光子的机制,为通信技术、光电子技术等领域的发

展和应用带来新的生机和活力。利用高性能光子晶体微谐振腔,可以制造出低临界功率和高频宽及高效率的光子晶体微谐振腔半导体激光^[4-5]。Susumu Noda 表示,对于传统的半导体激光而言,修改光束场型(即在输出平面的远场分布)的代价,通常是光学模态被迫变成不稳定的多模态,因此找到一

收稿日期:2010-05-16;修回日期:2010-09-08

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(A200915)

作者简介:王丰,讲师,研究方向为光学器件,电子信箱:wangfeng5678@163.com



个能够控制光场分布,同时在大面积下维持单模振荡的机制是非常重要的。折射系数呈周期性分布的二维光子晶体是极具潜力的选择^[6]。文献[7]~[10]都是从二维光子晶体微谐振腔结构、晶格排列、晶胞结构、介质材料折射率及缺陷腔几何参量等方面进行分析。本文研究了微谐振腔体薄膜层厚度对模态的影响。

1 二维光子晶体等效折射率模型

本文采用二维圆柱三角晶格排列,如图1所示。其中, $\lambda=1.3\mu\text{m}$,结构周期 $a=1\mu\text{m}$,散射子半径 $r=0.35\mu\text{m}$,中心固定位置引入缺陷,在二维平面上仿真光子晶体结构,假设第3个维度为无穷延伸状况。实际上,材料的厚度是有限的,在此引用波导概念,利用波导厚度、有效折射率及可在波导内传播的模式关系,设计二维模拟中的折射率参数。除二维平面上有光子晶体作为微谐振腔,在垂直平面的方向上也设计了介质材料厚度,利用介质材料与空气折射率差别,作为光在空间中第3个维度上的局限^[11]。假设图2中,b层为二维光子晶体微谐振腔薄片(类似对称平板波导),那么电场在此层属于余弦波分布,薄片与导光层上下的包覆层(a、c层)皆为空气,因此电场是由中薄片与导光层以指数函数衰减形式向空气层延伸,则薄片与导光层中的电场分布形式为

$$E_z = E_b \cos(\gamma_2 z + \varphi) \quad (1)$$

空气层(a层)的电场分布为

$$E_z = E_a \exp \gamma_1 z \quad (2)$$

空气层(c层)的电场分布为

$$E_z = E_c \exp[-\gamma_3(z-\varphi)] \quad (3)$$

其中,假设 w 为薄片与导光层厚度, n_{eff} 为等效折射率。根据TE模 a、b、c 界面处的电场与其微分连续, a、b 界面处 ($z=0$) a 层和 b 层的电场关系式为

$$E_a = E_b \cos \varphi \quad (4)$$

$$\gamma_1 E_a = -\gamma_2 E_b \sin \varphi \quad (5)$$

在 b、c 界面处 ($z=w$) b 层和 c 层的电场关系式为

$$E_b \cos(\gamma_2 w + \varphi) = E_c \quad (6)$$

$$-\gamma_2 E_b \sin(\gamma_2 w + \varphi) = -\gamma_3 E_c \quad (7)$$

式(5)除以式(4)推知:

$$\gamma_1 = -\gamma_2 \tan \varphi \quad \varphi = -\arctan(\gamma_1/\gamma_2) \quad (8)$$

式(7)除以式(6)推知:

$$-\gamma_2 \tan(\gamma_2 w + \varphi) = -\gamma_3 \quad \varphi = -\gamma_2 w + \arctan(\gamma_3/\gamma_2) \quad (9)$$

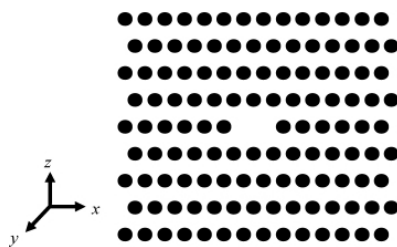


图1 二维光子晶体微谐振腔

Fig. 1 Two-dimensional photonic crystal Micro resonators

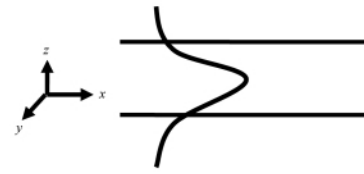


图2 3层结构(空气-介质材料-空气)中的电场分布示意图

Fig. 2 Electric field distribution in a the three-layer structure (air-dielectric-air)

合并式(8)和式(9),可以得出

$$\arctan(\gamma_1/\gamma_2) + \arctan(\gamma_3/\gamma_2) - \gamma_2 w + m\pi = 0 \quad (10)$$

其中, $\gamma_1 = k_0(n_{\text{eff}}^2 - n_a^2)^{1/2}$, $\gamma_2 = k_0(n_b - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}$, $\gamma_3 = k_0(n_c^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}$, m 为模式数, $m=0, 1, 2, \dots$ ^[12]。

2 数值结果和分析

2.1 微谐振腔导光层厚度与模态关系

二维光子晶体微谐振腔导光层厚度选择适当,光波在二维光子晶体微谐振腔体内部能量出现光子局域现象。若二维光子晶体导光层的厚度太厚,则难以获得基模态,能量无法与基模态一样集中;二维光子晶体导光层的厚度太薄,则有效折射率急剧下降,并趋近于周围环境的折射率,此时微谐

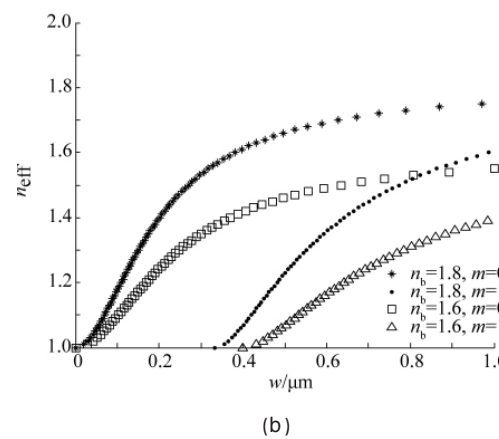
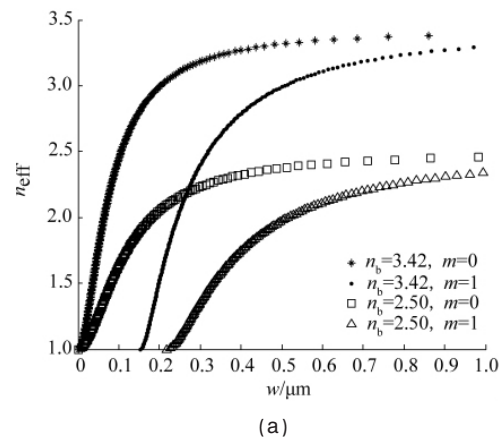


图3 不同 n_b 和模态时的有效折射率

Fig. 3 Effective index and modal for different film material n_b

表 1 不同材料的折射率和不同模式对应的薄膜厚度

Table 1 Thickness of thin films of different refractive index corresponding to the modal

名称	折射率	薄膜厚度/ μm	
		单模	高阶模
砷化镓	3.42	0~15.29	≥ 15.29
氮化镓	2.50	0~21.82	≥ 21.82
Si-rich SiO_x	1.80	0~33.41	≥ 33.41
重铬酸盐明胶	1.60	0~40.03	≥ 40.03

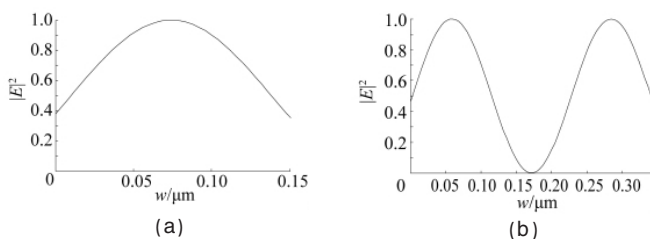
振腔体内能量局域能力严重不足^[13]。当选择 (n_a, n_b, n_c) 分别为 $(1, 3.42, 1)$, $(1, 2.50, 1)$, $(1, 1.80, 1)$, $(1, 1.60, 1)$ 4 组情况时(图 3), 等效折射率随导光层厚度变化见表 1。

当基模随着薄膜层折射率 n_b 下降时, 其薄膜层厚度逐渐增大。并且当薄膜厚度取得很小(或光波长很长), 也对应于一个有效折射率($n_{\text{eff}} > 1$)。这意味着, 对称平板波导的基模不会截止, 还说明了低折射率材料也可以产生基模。对于小折射率差(Δn 为 0.8, 0.6), 按照 Snell 定律证明, 若密介质与疏介质折射率的差值愈大, 光由密介质打入疏介质将愈容易发生全反射; 小折射率差必然不易发生良好的全内反射。

因此, 光子若存在这样的低折射率材料结构中, 光子局限必然不能仅依靠全内反射效应。由图 1 理想结构的探讨, 当折射率差值 Δn 较小时, 光场大部分能量将散发到空气中, 所以需要足够厚的薄膜层光子晶体结构限制能量发散, 用较厚的薄膜层包住大多数光子, 达到较好的光子局域^[13]。

2.2 微谐振腔导光层厚度与基模的光场分布关系

当二维光子晶体微谐振腔导光层厚度 $w = 15.29 \mu\text{m}$ 时, 其等效折射率如图 3(a) 所示, $n_{\text{eff}} = 2.81$ 时, 基模的光场分布如图 4(a) 所示, 光场的大部分能量集中到微谐振腔导光层。如果 $w = 34.31 \mu\text{m}$, 其等效折射率由图 3(a) 所示, 当 $n_{\text{eff}} = 2.60$ 时, 光场分布就会由基模变为高阶模, 如图 4(b) 所示。产生原因由式(2)、式(3)可知, 光场在 $n_a = 1$ (覆盖层 $0 < z < +\infty$) 和 $n_b = 1$ (衬底 $-\infty < z < w$) 中是按指数函数衰减的, 衰减的快慢分别由 γ_1 和 γ_3 确定。 γ_1, γ_3 越大, 光场衰减得越快, 穿透深度 $1/\gamma_1$ 和 $1/\gamma_3$ 越浅, 说明光场主要束缚在 $n_b = 3.42$ (导光层) 中。反之, γ_1, γ_3 越小, 光场衰减得越慢, 说明在 $n_b = 3.42$ (波导) 束缚场的能力

图 4 $n_b = 3.42$ 时的光场分布Fig. 4 Distribution of mode in $n_b = 3.42$

差。如果要增大 γ_1, γ_3 , 必须在 $n_a = n_c$ 不变(类似对称平板波导)的情况下, 选择较大的有效折射率。如果选择 $(1, 3.42, 1)$ 组, 那么最佳微谐振腔体导光层厚度为 $w = 15.29 \mu\text{m}$, 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 2.81$ 时, 可以得到一个较高质量的微谐振腔。

3 结论

本文采用等效折射率法, 得出等效折射率随导光层厚度变化曲线, 进而讨论了二维光子晶体微谐振腔基模存在厚度和光场分布及其对应的等效折射率。对于折射率差值小的光子晶体结构, 若要有好的光子局限能力, 除需依赖于材料本身的全反射效应, 还需要足够的膜层厚度。上述分析将为光子晶体微谐振腔制备设计及其应用提供一定的理论参考。

参考文献 (References)

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58: 2059-2062.
- [2] Yablonovitch E. Photonic crystals: Semiconductor of light [J]. *Scientific American Magazine*, 2001: 47-54.
- [3] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58: 2486-2489.
- [4] Park H G, Kim S H, Seo M K, et al. Characteristics of electrically driven two-dimensional photonic crystal lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2005, 41(9): 1131-1141.
- [5] Seo M K, Jeong K Y, Yang J K, et al. Low threshold current single-cell hexapole mode photonic crystal laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90: 171122.
- [6] Akahane Y, Asano T, Song B S, et al. High-Q photonic nanocavity in a two dimensional photonic crystal[J]. *Nature*, 2003, 425: 944-947.
- [7] 王媛媛. 光子晶体微谐振腔的特性研究 [D]. 吉林: 吉林大学通信工程学院, 2009.
Wang Yuanyuan. Performance research of photonic crystal micro-cavity [D]. Jilin: School of Communication Engineering, Jilin University, 2009.
- [8] 谢东华. 光子晶体微谐振腔的理论研究与性能分析 [D]. 吉林: 吉林大学通信工程学院, 2006.
Xie Donghua. Fundamental research and performance analysis of photonic crystal micro-cavity [D]. Jilin: School of Communication Engineering, Jilin University, 2006.
- [9] 娄卫华, 王勇, 王树忠. 2 维光子晶体谐振腔的分析与模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(3): 451-454.
Lou Weihua, Wang Yong, Wang Shuzhong. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(3): 451-454.
- [10] 余建立, 沈虹君. 二维正方晶格各向异性光子晶体缺陷模[J]. *发光学报*, 2009, 30(2): 25-30.
Yu Jianli, Shen Hongjun. *Chinese Journal of Luminescence*, 2009, 30(2): 25-30.
- [11] Birks T A, Robert P J, St Russell P. Full 2-D photonic band gaps in silica/air structure[J]. *Electronics Letters*, 1995, 12: 12-16.
- [12] Tseng Y C. Design and fabrication of high quality factor and low mode-volume photonic crystal micro-cavities [D]. Jhongli: National Central University, 2007.
- [13] Lin S. Study of Si-rich SiO_x photonic crystal structure [D]. Jhongli: National Central University, 2009.

(责任编辑 朱宇)