

文章编号: 0258-7025(2007)05-0649-06

二维磁性光量子阱对共振隧穿光谱特性的影响

刘 靖^{1,2}, 孙军强¹, 黄德修¹, 黄重庆², 吴 铭¹

(¹ 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 湖南理工学院物理与电子信息系, 湖南 岳阳 414006)

摘要 基于非磁性材料开腔光量子阱结构设计了非磁性闭腔光量子阱和磁性材料光量子阱结构。用时域有限差分法(FDTD)计算了这三种量子阱结构的透射谱和光场分布,研究了各量子阱中的量子化能态,论证了完全依靠自身结构在很大程度上增强透射光谱强度的可行性。研究发现,光子隧穿磁性光量子阱结构时透射率接近 1,能量损失小;与非磁性闭腔光量子阱结构相比,能够减小器件体积,增加能带工程的自由调节度,获得更加丰富的光子束缚态,因而更具优越性。计算结果表明,开腔光量子阱为行波阱,这种阱俘获光子的能力较弱;闭腔光量子阱和磁性材料光量子阱均为驻波阱,局域光子的能力很强,且磁性材料光量子阱可以产生更大的光场梯度。

关键词 量子光学;磁性光量子阱;光谱特性;时域有限差分法;共振隧穿;透射率

中图分类号 TN 203 文献标识码 A

Influence on Resonant Tunneling Spectral Character of Two-Dimensional Magnetic Optical Quantum Wells

LIU Jing^{1,2}, SUN Jun-qiang¹, HUANG De-xiu¹, HUANG Chong-qing², WU Ming¹

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
²Department of Physics and Electronics Information, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang, Hunan 414006, China

Abstract The non-magnetic material closed optical quantum well structures and magnetic material optical quantum well structures are designed based on the non-magnetic material open optical quantum well structures. The transmission spectra and field distributions of these three kinds of wells are calculated by finite-difference time-domain method (FDTD), the quantized energy states are researched, and the feasibility of enhancing spectral intensity greatly by self-structure is disclosed. It is found that the optical transmittance of the magnetic quantum well is close to 1, and energy loss is less. Compared with the closed photonic quantum well structures, the device's volume can be reduced, the degree of free regulation of energy band project can be increased, and more photon bound states can be obtained. The results show that the open optical quantum well is traveling wave well, and its capability of capturing photons is weak. But the closed quantum well and the magnetic material optical quantum well are standing wave well, the capabilities for them to capture photons are strong, while the light field gradient of the magnetic material optical quantum well is bigger.

Key words quantum optics; magnetic optical quantum wells; spectral character; finite-difference time-domain method; resonant tunneling; transmittance

1 引 言

近年来人们十分关注半导体量子阱中共振隧穿

效应的研究。伴随光子晶体^[1,2]研究的热潮,类比其他与半导体众多的相似之处,激发了人们仿照半导

收稿日期:2006-10-19;收到修改稿日期:2007-01-08

基金项目:国家自然科学基金(60577006)及湖南省教育厅科研计划项目(02C515)资助课题。

作者简介:刘 靖(1969—),男,湖南岳阳人,副教授,博士研究生,主要从事光电子器件与集成研究。

E-mail:nameliujing@yahoo.com.cn

导师简介:孙军强(1965—),男,浙江湖州人,教授,博士生导师,主要从事光电子器件与集成研究。

E-mail:jqsun@mail.hust.edu.cn

体量子阱制备光子晶体量子阱的兴趣,对光子晶体量子阱中的共振隧穿现象也开展了积极探索,在实验和理论方面都取得了进展,在一维^[3,4]、二维^[5,6]和三维光子晶体^[7]隧穿光谱中观察到了类似半导体量子阱中的量子化能级,实现了光子晶体量子阱结构。

尽管人们对光子晶体的特性已有了较为深入的认识,制备方法也日趋完善,但目光主要聚焦在非磁性电介质材料上,应用范围也各有局限性,能带工程的自由调节度在很大程度上受到影响。虽然已发现磁性材料^[8,9]、液晶^[10]等也可用于制作光子晶体量子阱结构,但主要是在一些具体情况下的应用,没有形成系统的规律性认识。这种现状与磁性材料作为功能材料重要分支的情形极不相称。事实上,随着电子技术和市场需求的发展,新的磁性材料不断涌现,研究、生产、应用三方面的结合日趋紧密,在通信、磁记录和计算技术等国民经济的各个领域已得到广泛应用。

光子晶体量子阱的很多光学特性可通过光谱结构来反映,因为光谱能够提供光子晶体量子阱能带结构的具体信息。光谱的可观测信息包括频率和强度。受光谱强度复杂性和数据处理精确度的限制,传统上,光谱研究的绝大部分集中于频率方面。随着实验条件的改进和算法的不断优化以及计算条件的进步,关于谱线强度的研究将占据越来越重要的地位。隧穿谱强度愈大,则发光效率愈高,能量愈集中,更适合制作光通信器件。为了获得高准确率的光谱强度绝对

值,人们一直在寻求既简单又能如实反映光谱结构的探测方法^[11,12],对影响谱线强度的各因素也进行了较深入的探讨^[13,14]。

本文在简单解释研究方法的基础上,主要研究了磁性材料光子晶体量子阱中光子的隧穿谱特性,对比分析了其与非磁性材料光子晶体量子阱隧穿谱线的差异,提出了提高隧穿谱强度的新方案,提供了增加光子束束缚态的新思路,并对其工作机制进行了分析。

2 物理模型及理论基础

图 1 给出了三种不同光子晶体量子阱的剖面结构,图中黑色部分为二氧化硅玻璃圆柱介质棒,其相对介电常数 $\epsilon_{r1} = 4.55$; 其余部分为空气,相对介电常数 $\epsilon_0 = 1.0$ 。与半导体量子阱结构类似,光子晶体量子阱结构也由势垒和势阱组成。在光子晶体中心对称地移走多行介质棒,然后按设计要求填充适当的其他介质,可构成势阱;势阱左右两侧的光子晶体相当于势垒。为了充分显示阱区结构对光子隧穿特性的影响,三种结构的基本组成单元(介质棒)均采用正方晶格排列方式,其晶格常数都为 a ,半径 $r = 0.25a$,介质棒沿 x 方向放置,± y 方向称为光子晶体侧向,光波沿 z 方向垂直入射到光子晶体量子阱结构上。在光子晶体量子阱的左右两侧各放置一个探测器 P_1 和 P_2 ,分别用来测量入射光和出射光能量,出射光能量和入射光能量的比值即为光谱透射率。

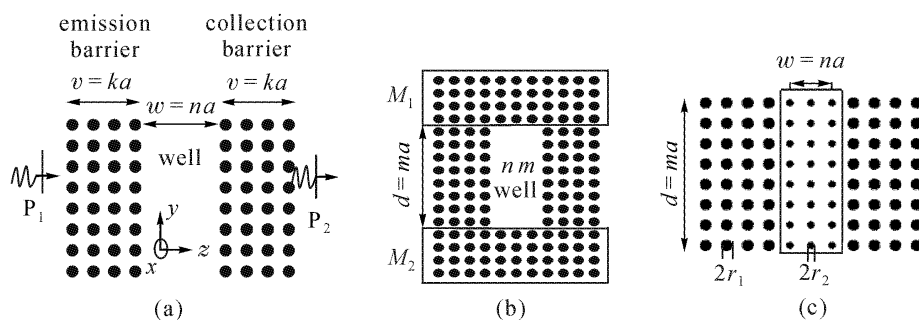


图 1 开腔光子晶体量子阱(a),闭腔光子晶体量子阱(b)和磁性材料光子晶体量子阱(c)的结构示意图

Fig. 1 Schematic structures of open photonic quantum-well (a), closed photonic quantum-well (b) and magnetic photonic quantum-well (c)

图 1(a)为非磁性介质(介质棒相对磁导率 $\mu_1 = \mu_0 = 1.0$, μ_0 为空气中的相对磁导率)开腔光子晶体量子阱结构,势阱层为空气,是目前文献报道较多的一种二维光子晶体量子阱结构^[5,6]。其阱宽 $w = na$,其中 n 为 z 方向移走的介质棒的行数;垒宽 $v = ka$, k 为垒区 z 方向介质棒的行数,固定 $k = 4$, k 取其他值时亦可得

出类似结论。可以认为,俘获在势阱中的光子由于在侧向上没有受到任何限制,将从此方向辐射或泄漏,导致低的隧穿透射率。为此,提出图 1(b)所示的闭腔光子晶体量子阱结构,构造方法为:在图 1(a)的侧向添加 M_1, M_2 周期性光子晶体,使得空气势阱被 M_1, M_2 所包围, M_1 和 M_2 的几何结构和介质参量与

势垒光子晶体完全相同, 阱区大小为 nm , 其中 m 为 y 方向每行上移走的介质棒的根数, n 的几何意义与图 1(a) 相同。可以推测, 闭腔光子量子阱局域光子的能力应该远比开腔光子量子阱强, 一旦光子被俘获在闭腔光子量子阱中, 受带隙效应的控制, 光子从阱区侧向逃脱的概率减小, 容纳在阱区中的光子数目增多, 传输效率将有很大提高, 最终导致透射率的增加。但这种结构是以增大器件体积为代价的, 不适应器件小型化和轻型化的设计要求。

本文探索性地将图 1(a) 中的空气势阱用磁性材料介质棒光子晶体取代, 得到如图 1(c) 所示的量子阱结构, 阱区大小 (nm) 见图中矩形框。磁性介质棒几何参量与势垒区非磁性介质棒完全相同, 即 $r_2 = r_1 = 0.5a$; 介电常数相等, 即 $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r1} = 4.55$; 介

质棒相对磁导率 μ_2 按设计要求适当选取。

采用时域有限差分法 (FDTD)^[15] 作为理论研究的工具, 对上述三种结构的透射谱和光场分布进行数值计算, 以期待对上述结构设计的可行性从理论上得到论证。这种数值计算方法的优势是通过对麦克斯韦方程进行离散处理, 能够得出任何结构和形状光子晶体的传输特性, 通过傅里叶变换可一次计算出包含很大频率范围的透射谱计算结果, 可以得到任意时刻的场分布情况, 而并不需要其他特殊的数学知识。由于相关文献已有详细讨论, 这里不再对其进行介绍。为讨论问题方便, 以 TM 模为研究对象, 只讨论垂直入射情况。编程过程中采用的时域有限差分法表达式为

$$E_z^{n+1}(i, j) = E_z^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon(i, j)\Delta x} [H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j) - H_y^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j)] - \frac{\Delta t}{\epsilon(i, j)\Delta y} [H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}) - H_x^{n+1/2}(i, j - \frac{1}{2})], \quad (1)$$

$$H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j) = H_y^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j) + \frac{\Delta t}{\mu(i, j)\Delta x} [E_z^n(i + 1, j) - E_z^n(i, j)], \quad (2)$$

$$H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}) = H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j)\Delta x} [E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)], \quad (3)$$

式中 $E_z^{n+1}(i, j)$, $H_x^{n+1}(i, j)$ 和 $H_y^{n+1}(i, j)$ 分别表示网格标号为 (i, j) 处第 $n+1$ 个时间步的电场分量 E_z 和磁场分量 H_x, H_y , 其他场分量类推。 $\epsilon(i, j)$ 是网格标号为 (i, j) 处的有效介电常量, $\mu(i, j)$ 是网格标号为 (i, j) 处的磁导率, 空间步长 $\Delta x = \Delta y = \Delta s$ 和时间步长 Δt 的选取满足数值稳定性条件 $\Delta t \leq \Delta s / (c\sqrt{2})$, c 为光在真空中的传播速度。在光子晶体器件中, 正是由于 $\epsilon(i, j)$ 和 $\mu(i, j)$ 的周期性变化, 导致了光子晶体的非凡本领。

为了用时域有限差分法研究光在光子晶体中的传输行为, 还需要有激励源。在计算透射谱时, 选择调制高斯脉冲源

$$E_z(t) = \cos(2\pi f_0 t) \exp\left[-4\pi \frac{(t-t_0)^2}{T^2}\right], \quad (4)$$

式中右边第一项为基波表达式, f_0 为中心频率; 第二项为高斯函数形式, 其中 t_0 为高斯脉冲的中心位置, T 为常数, 决定了输入高斯脉冲的宽度。这种源具有很宽的谱, T 愈小, 脉冲宽度愈窄, 谱宽愈宽, 能够方便地用于分析光子晶体的禁带特性和局域特征。计算中取 $t_0 = 20\Delta t$, $T = 2\Delta t$ 。为便于观察, 计算所得频谱图中, 横轴采用归一化频率, 以 $(\omega a / 2\pi c)$

为单位, ω 为角频率, 纵轴各值由透射波的功率谱 $P_t(\omega)$ 用入射波功率谱 $P_i(\omega)$ 归一化得到。

在计算光场分布时, 入射光源选用简谐平面波

$$E_z(t) = \cos(2\pi f_m t), \quad (5)$$

式中 f_m 为场源频率。计算过程中, 随着时间步的增加, 内部的电磁场逐渐达到稳态。

3 数值模拟结果与分析

为验证时域有限差分算法和程序的正确性, 首先选取一些不同算法的相关文献^[16, 17] 对比分析, 发现在相同参数设置下所得结果与报道完全相同, 这就保证了本文计算结果的可靠性。具体计算时使用总场、散射场技术, 由连接边界引入宽频调制高斯脉冲或单频激励源, 并选用二维介质柱光子晶体波导吸收边界条件^[18]。图 2(a) 为原理想光子晶体对应的透射谱, 可以看出在归一化频率 (0.32~0.45) 范围内光波透射率几乎为 0, 此频率区间即为禁带区域; 在通带高频区域, 透射率略小于 1, 这说明二维光子晶体即使在通带区域也存在一定的反射, 这是由于光在光子晶体中传输时, 不可避免地遭受泄漏、

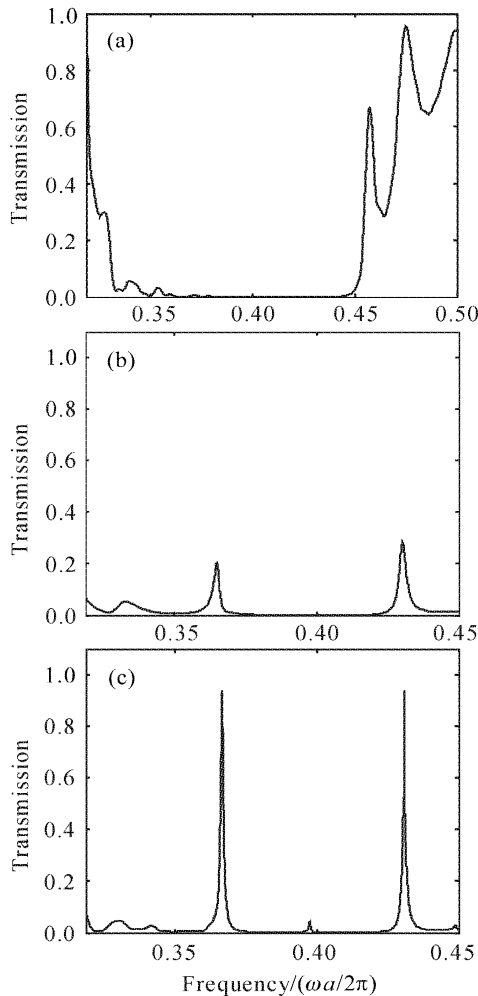


图 2 光子晶体透射谱

(a) 势垒; (b) 开腔光子量子阱; (c) 闭腔光子量子阱

Fig. 2 Transmission spectra of photonic crystal

(a) potential barrier; (b) open photonic quantum-well;

(c) closed photonic quantum-well

反射和散射等损耗的缘故。图 2(b), (c) 分别为阱宽 $\omega = 5a$ 时开腔和闭腔光子量子阱透射谱。显然, 量子阱结构形成后, 原来不可能出现透射峰的光子晶体禁带中出现了透射峰。为了更清楚地显示阱区对束缚态能级的影响, 图中只选取了束缚态能级所对应的归一化频率范围(0.32~0.45)。比较两透射谱发现, 两者透射峰的个数相等, 位置几乎相同, 但闭腔光子量子阱光子透射率接近 1, 出射光强明显增强, 透射峰更尖锐, 频率选择性更好, 品质因子 Q 值更大, 验证了闭腔光子量子阱对光的约束能力远比开腔光子量子阱强的设想。

对于图 1(c) 所示的磁性光子量子阱结构, 不难想象: 若阱区的磁性介质棒不影响光子的流动, 计算所得频谱图应与图 2(a) 相同; 若磁性材料的引入对光子的传播有影响, 则在原光子晶体禁带频率范围内会出现频谱结构的变化。图 3(a)~(d) 分别给出了

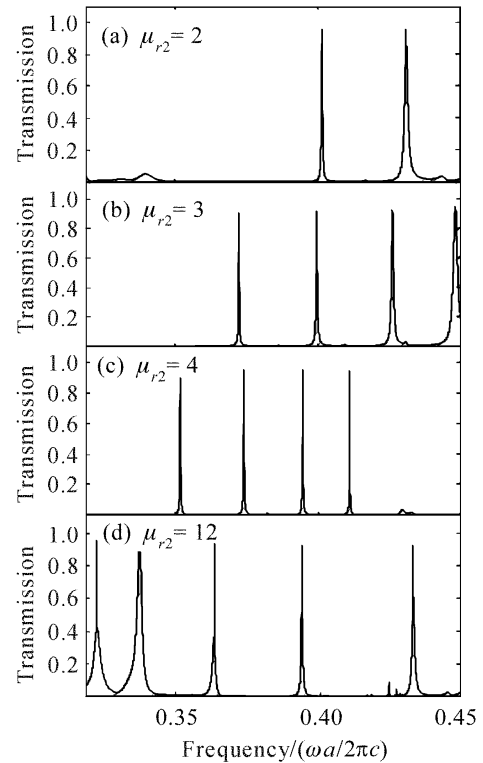


图 3 不同磁导率光子量子阱透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of photonic quantum-well for different permeabilities

磁性材料介质棒磁导率分别为 2, 3, 4, 12 时所对应的频谱图。

仔细分析图 3(a)~(d) 各透射谱, 可以得出如下结论:

1) 磁性材料光子量子阱的能带结构不再是图 2(a) 势垒光子晶体那样的能带, 量子阱中的光子受到磁性势阱的限制, 态密度分布被量子化了; 在光子势垒的禁带中能带发生了分裂, 出现了透射率接近 1 的透射峰, 这些透射峰的出现体现了磁导率周期变化所导致的新色散关系。该现象可用共振隧穿效应来解释: 由于阱宽很窄, 阱中能量发生量子化, 形成分立能级; 当入射光子的能量与中间势阱中的束缚态能量一致时将形成共振, 隧穿概率接近 1, 能量不一致时隧穿概率几乎为 0, 致使势阱中的能量分布为非连续的, 光子的运动被冻结在少数几个分立的能级上(称量子阱态), 透射谱也就被量子化了。

2) 磁性阱区光子量子阱结构对光子的限制作用大为增强。对比图 3 和图 2(b) 各透射峰, 可以看出, 开腔光子量子阱的光子透过率很低, 能量损失很大; 当势阱中周期排列的介质棒为磁性材料时, 光子透射率接近 1, 与闭腔光子量子阱类似。物理机制为: 对于开腔空气势阱, 阱区侧向($\pm y$ 方向)既没有受到折射率限制作用, 也没有受到带隙效应抑制, 所以

光子可以向外辐射和泄漏。对双复型磁性材料,在其中传播的光波同时受到磁性散射和介质散射的影响,带隙的形成是这两种散射共同作用的结果;磁性势阱侧向上带隙的形成将光子束缚在阱区,抑制了光子辐射和泄漏的途径,致使各量子态透射率接近 1。

3) 随着磁导率的增加,共振透射峰的个数逐渐增加,但增加方式是非连续的。共振态之间的间距随共振峰个数的增加自然变窄,每个共振峰逐渐向能量低的方向移动。这样可以有效地改变量子阱中隧穿光子的能量,获得频谱丰富的隧穿光子态,达到波长调谐的目的。其主要物理原因是:磁导率越大,系统的不均匀性越强,晶体的光散射作用越强,这为新的量子态的产生创造了条件。由此结论可得,调节光子量子阱电磁参量能够对共振透射光子频率进行选择,导致多通道滤波现象。

4) 磁性光子量子阱的发光频率可以低于势垒光子晶体带隙,从而增大波长调谐范围。

5) 与空气势阱相比,磁性光子量子阱共振透射峰变得更尖锐,品质因子 Q 值更大,半峰全宽更小,选择性更好。

6) 选取不同阱宽的磁性光子量子阱结构,可以得到一系列隧穿频率不同的共振透射峰。一般地,阱宽越小,隧穿相同磁导率量子阱的光子频率越高,限于篇幅,没有给出对应的频谱图。该现象说明,调整光子量子阱结构,可改变量子阱的发光波长,这一特性有可能为光电器件的波长调谐提供一种新思路,不仅可以增加能带工程的调节自由度,还将改善器件的电学和光学性质。

值得说明的是,磁性材料属电磁双复型材料,同时具有介电常数、介电损耗以及磁导率和磁损耗。

为计算方便,没有考虑介电损耗和磁损耗。

光子量子阱中共振隧穿现象的发生是光子的一种集体输运行为,驻留在阱区中的光子数目增多时,光波更能够积累足够的能量透过量子阱结构,光子隧穿能量增大,透射率增加。为了更深入探讨引起磁性材料光子量子阱隧穿谱强度增强的物理原因,分别以归一化共振频率为 0.406, 0.406, 0.430 的单频源(由式(5)确定)入射阱宽 $w = 3a$ 的开腔、闭腔和磁性材料光子量子阱,稳态时周期平面内的光场三维分布图分别如图 4(a)~(c)所示, y, z 各轴均以晶格常数 a 为单位,竖轴(x 轴)各值代表各网格标号处的光场矢量,单位 V/m 。图 4(a)显示,开腔光子量子阱为行波阱,阱内光强呈高斯型分布,势场梯度较小,所以这种阱的俘获作用较小,光子沿着阱区侧向向自由空间辐射或泄漏,这是开腔光子量子阱透射率很低的主要原因。图 4(b), (c)表明,闭腔和磁性材料光子量子阱均为驻波阱,阱中高频波包在波长尺度上发生周期性变化,阱区形成较稳定的驻波场。由于阱区空间体积较小,光场梯度较大,加之带隙效应的限制作用,导致阱区局域光子的能力很强,一个势阱中的高频波包不能迁移到另一个势阱中,光子逃逸的途径受到很大抑制,能量很难从阱区辐射出去,好像量子隧穿被冻结一样。正因为如此,每个能级上可以积累更多数目的光子,光子隧穿量子阱的能力得到增强。仔细分析图 4(c)可以发现,磁性材料的电磁场主要集中在磁性介质棒内,与闭腔光子量子阱阱区电磁场分布图 4(b)相比,波包密度更大,单一波包的体积更小,可以产生更大的光场梯度,这种增强的隧穿谱线强度来自于阱中光子模式密度的再分布,改变了光与物质相互作用的特性和效率,对光子应用具有重要意义。

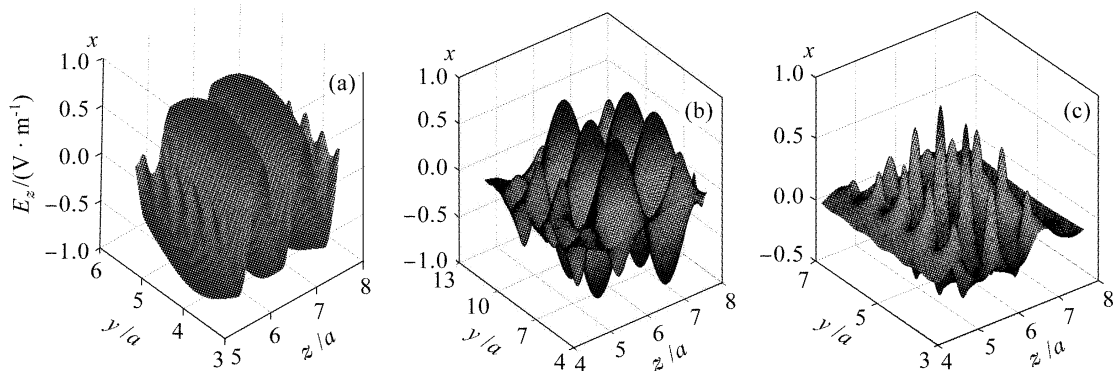


图 4 光子量子阱阱区光场分布

(a) 开腔; (b) 闭腔; (c) 磁性材料介质棒

Fig. 4 Optical field distributions in the photonic quantum-well

(a) open photonic quantum-well; (b) closed photonic quantum-well; (c) dielectric rod of magnetic material

4 结 论

光谱信息是由物质的内在性质决定的,所以通过对物体光谱信息的分析,就能探索出其他方法所不能测定的物质的内在属性。以时域有限差分法应用于光子晶体量子阱的理论研究,得出了开腔、闭腔和磁性材料光量子阱的透射谱和阱区光场分布。计算结果表明,磁性材料光量子阱为驻波阱,能够得到量子化的光子能级,光子能量损失小,透射率接近1;与闭腔光量子阱相比,能够减小器件体积,增加能带工程的自由调节度,获得更加丰富的量子束缚态。所得结论对超窄带激光光源、微弱信号光电探测器、光开关等光通信器件的设计和制作及元件的集成化和微型化具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2498
- 3 Feng Qiao, Chun Zhang, Jun Wan. Photonic quantum-well structures; multiple channeled filtering phenomena [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23):3698~3700
- 4 Zhanshan Wang, Li Wang, Yonggang Wu *et al.*. Multiple channeled phenomena in heterostructures with defects mode [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **84**(10):1629~1631
- 5 Y. Jiang, C. Niu, D. Liu. Resonance tunneling through photonic quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **59**(15): 9981~9986
- 6 Pan Yu, Li Zhifeng, Chen Xiaoshuang. Resonant transmission properties of photonic quantum-well structures studied by multiple-scattering theory [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(1):17~21
潘 瑜,李志锋,陈效双. 多重散射理论对光子晶体量子阱结构光子共振透射的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(1):17~21
- 7 S. Yano, Y. Segawa, J. S. Bae *et al.*. Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**(15):153316-1~153316-4
- 8 Naoya Kono, Masanori Koshiba. General finite-element modeling of 2-D magnetophotonic crystal waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7):1432~1434
- 9 Miguel Levy. Normal modes and birefringent magnetophotonic crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(7): 073104-1 ~ 073104-5
- 10 Y. Matsuhisa, R. Ozakia, K. Yoshino *et al.*. High Q defect mode and laser action in one-dimensional hybrid photonic crystal containing cholesteric liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(10):101109-1~101109-3
- 11 Zhang Lingqing, Han Shensheng, Xu Zhizhan *et al.*. Research of spectrum lineshape and precise measurements of line intensity in laser plasmas [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(3):339~344
张令清,韩申生,徐至展 等. 激光等离子体谱线线型研究与谱线强度测量[J]. *强激光与粒子束*, 1995, **7**(3):339~344
- 12 G. L. Li, P. K. L. Yu. Optical intensity modulators for digital and analog applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9):2010~2030
- 13 Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechun *et al.*. Experimental study of smoothing by spectral dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):321~325
周申蕾,朱 俭,李学春 等. 光谱色散平滑的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3):321~325
- 14 June-O. Song, Dong-Seok Leem, Joon Seop Kwak *et al.*. Improvement of the luminous intensity of light-emitting diodes by using highly transparent Ag-indium tin oxide p-type ohmic contacts [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2):291~293
- 15 K. S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1966, **14**(3):302~307
- 16 Lu Xiaodong, Han Peide, Quan Yujun *et al.*. Influences of wave vector direction on energy bands and applications of two-dimensional photonic crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):770~774
陆晓东,韩培德,全宇军 等. 波矢方向对二维光子晶体能带及应用的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):770~774
- 17 Lin Xubin, Chen Yujie, Li Baojun. Photonic crystal with absolute band gap in a two-dimensional quasi-honeycomb structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):126~130
林旭彬,陈钰杰,李宝军. 类蜂窝状结构完全带隙二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):126~130
- 18 Zhang Bo. Absorbing boundary conditions for two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(12):5677~5682
张 波. 二维介质柱光子晶体波导吸收边界条件[J]. *物理学报*, 2005, **54**(12):5677~5682