

垒层周期不对称度对光量子阱透射谱的影响

潘继环¹ 苏安^{1*} 蒙成举¹ 高英俊²

¹河池学院物理与机电工程学院, 广西 宜州 546300

²广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004

摘要 利用传输矩阵法,研究了垒层周期不对称度对光量子阱透射谱的影响。结果表明:当垒层周期不对称度为零时,光量子阱透射峰随着垒层周期数的增大而变得精细,但其透射率均为100%不变;当垒层周期不对称度为不等于零的恒定值时,光量子阱透射峰的透射率低于100%,但随着垒层周期数的增大,透射峰仅变得精细而透射率不变;光量子阱透射峰的透射率随着不对称度增大而下降,而且不对称度越大,透射率下降越快,同时透射峰变窄的速度也越快。垒层周期不对称度对光量子阱透射谱的影响规律可为光子晶体模型的构造和设计制备等提供方法和依据。

关键词 量子光学; 光子晶体量子阱; 不对称度; 透射率

中图分类号 O431; O734 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.012701

Effect of Barrier Layer Periodicity Asymmetry on Photonic Crystal Quantum Well Transmission Spectrum

Pan Jihuan¹ Su An¹ Meng Chengju¹ Gao Yingjun²

¹School of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi 546300, China

²College of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

Abstract The effect of barrier layer periodicity asymmetry on photonic crystal quantum well transmission spectrum is studied by transfer matrix method. The results show that when the periodicity asymmetry is 0, transmission peaks become sharper as the barrier layer periodicity increases, but the transmittance is constantly equal to 100%. When the barrier layer periodicity asymmetry is any nonzero constant, the transmittance is below 100%; while with the increase of barrier layer periodicity, the transmission peaks sharpen with a constant transmittance. The transmittance of transmission peaks decreases with the barrier layer periodicity increasing, and the greater asymmetry is, the faster the transmittance decreases, and the faster the transmission peaks narrow. These properties can provide theoretical basis for construction, preparation and design of the photonic crystal model.

Key words quantum optics; photonic crystal quantum well; asymmetry; transmittance

OCIS codes 270.4180; 250.5590

1 引言

自从光子晶体^[1-2]的概念问世以来,一直是学者们关注和研究的热点,并且已经取得了一系列的研究成果。光子晶体最显著的特性是具有光子禁带,频率落在禁带中的光将被禁止传播,但如果在光子晶体中恰当地引入缺陷,又可选择性地让光通过光子晶体,即实现光的人为控制,这种特性为光子替代电子传输信息提供了理论支撑^[3-8]。为更加有效地控制光在光子晶体中的传播,类似于半导体量子阱,研究者们近几年开始设计和研究光子晶体量子阱结构(PQW)。由于光子晶体内部存在量子势阱,则对处于光子晶体中的光局域作用将更强,导致能隧穿通过光子晶体的光频率更窄,宏观上表现为更加精细的分立窄透射峰。光量子

收稿日期: 2013-08-25; 收到修改稿日期: 2013-09-06; 网络出版日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51161003)、广西自然科学基金重点项目(2012GXNSFDA053001)、广西高校科学技术研究重点项目(2013ZD058, 2013YB206)、河池学院重点科研基金(2013ZA-N003, 2013B-N005)

作者简介: 潘继环(1972—),男,硕士,副教授,主要从事光子晶体方面的研究。Email: panjihuan@163.com

*通信联系人。E-mail: suan3283395@163.com

阱的这种特性为用光子晶体设计高品质光学滤波器件提供可能^[3,8-14]。

光量子阱一般由两块不同带隙结构的光子晶体合理的组合而形成,当其中一块光子晶体的通带完全处于另一块光子晶体的禁带中时,即构成光量子阱结构,处于中间的光子晶体块相当于光量子阱结构的阱,而处于两侧的光子晶体块可看成光量子阱结构的垒。从光量子阱的结构可知,当两侧的垒层光子晶体周期数变化时,光量子阱的势垒将发生变化,光量子阱对处于其中的光场局域作用也一定会产生变化,最终将导致光量子阱的透射谱特性发生变化^[3,8-14]。在已有的文献中,基本上都是研究两侧垒层光子晶体周期数同时对称变化的情况,而对两侧垒层光子晶体周期数不对称变化的研究则未见报道。可以推测,当光量子阱的两边势垒不对称时,光量子阱对处于其中的光场局域作用肯定也会发生改变。基于这种考虑,本文在构造光量子阱结构 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_n(\text{NB})_{m_2}$ 的基础上,研究垒层光子晶体周期数不对称变化时光量子阱透射谱的变化规律,为光子晶体模型的构造和制备提供理论和方法参考。

2 研究模型及理论

研究模型为一维光子晶体量子阱 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_n(\text{NB})_{m_2}$ 结构。光量子阱的各层介质及其参数分别为:B为硫化砷(AsS),N为二氧化硅(SiO_2), $\epsilon_B=6.760$, $d_B=736.0\text{ nm}$, $\epsilon_N=2.1025$, $d_N=1327.0\text{ nm}$, n 、 m_1 与 m_2 分别是阱层和垒层光子晶体的排列周期数。从光子晶体结构看, $(\text{NBN})_n$ 相当于光量子阱结构的阱层, $(\text{BN})_{m_1}$ $(\text{NB})_{m_2}$ 相当于光量子阱结构的垒层。

利用传输矩阵法理论^[5,8,15-16],考虑光垂直入射到光子晶体表面,可数值计算模拟出光子晶体 (NBN) 和 (BN) 的色散曲线,以及 $(\text{NBN})_5$ 和 $(\text{BN})_5(\text{NB})_5$ 的能带结构,如图1所示。从图1中可见,在831.8~875.8 nm波长范围内,光子晶体 (NBN) 或 $(\text{NBN})_5$ 的能带完全处于光子晶体 (BN) 或 $(\text{BN})_5(\text{NB})_5$ 的禁带中,而且 (NBN) 或 $(\text{NBN})_5$ 的能带和光子晶体 (BN) 或 $(\text{BN})_5(\text{NB})_5$ 的禁带对称分布于853 nm波长处两侧,即光子晶体 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_n(\text{NB})_{m_2}$ 很好地构造了光子晶体量子阱结构,且光量子阱结构对称分布于853 nm波长处两侧。当光子晶体构成光量子阱结构时,入射到光子晶体中的光将被光量子阱局域限制在光量子阱中,形成强的局域光子态,在光量子阱的作用下,光一般通过共振隧穿的方式通过光子晶体,与局域光子态共振的光频率可以透过光子晶体,在宏观上表现为精细的共振透射峰^[3,8-12]。

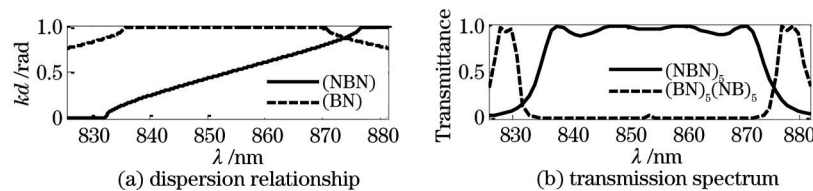


图1 一维光子晶体带隙结构

Fig.1 Band-gap structure of 1D photonic crystals

3 计算结果与分析

由光量子阱 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_n(\text{NB})_{m_2}$ 模型结构可知,当 $m_1=m_2$ 时,光子晶体构成镜像对称光量子阱结构,此时光量子阱左右垒层的物理厚度和光学厚度均相等。对称结构光量子阱具有透射谱对称分布于某个频率点两侧的简洁特性,而且对称结构光量子阱透射峰透射率都很高。同时,当对称结构光量子阱的垒层厚度增加时,光量子阱对其中的光场局域限制作用会增强,能隧穿通过光子晶体的光频率范围就越窄,即透射峰会越细窄^[3,8-9,11-14]。因此,可以推测,当 $m_1 \neq m_2$ 时,光量子阱的左右两侧垒层厚度将不再对称,此时由于光量子阱的对称结构已经改变,其透射谱也一定会随之变化。为研究方便,以光量子阱左右垒层周期数之差 $\Delta m = m_2 - m_1$ 表示光量子阱垒层周期的不对称度,并研究其对光量子阱透射谱的影响规律。

3.1 不对称度 $\Delta m=0$ 时光量子阱的透射谱

固定光量子阱阱层光子晶体周期数 $n=2$,取两侧垒层周期数 $m_1=m_2=3, 4, 5, 6$,或 $m_1=m_2=3.3, 4.4, 5.5, 6.6$,通过计算机编程数值计算模拟,可分别绘制出各周期数对应的光量子阱 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_2(\text{NB})_{m_2}$ 的透射谱,分别如图2(a)~(h)所示。

图2显示,当 $m_1=m_2$,即不对称度 $\Delta m=0$ 时,随着光量子阱垒层周期数整数或非整数增大,光量子阱在

831.8~875.8 nm 波长范围内形成一个宽禁带,禁带中的 841、853 和 866 nm 波长位置恒定出现 3 条透射率为 100% 的共振透射峰,而且 3 条共振透射峰随垒层周期数增大而变得越来越窄。可见,只要光量子阱垒层周期不对称度 $\Delta m=0$,即垒层完全对称,则增大垒层周期只会改变光量子阱透射峰的带宽,而对量子阱透射峰的透射率不产生影响,而且光量子阱透射峰会一直保持比较高的透射率。

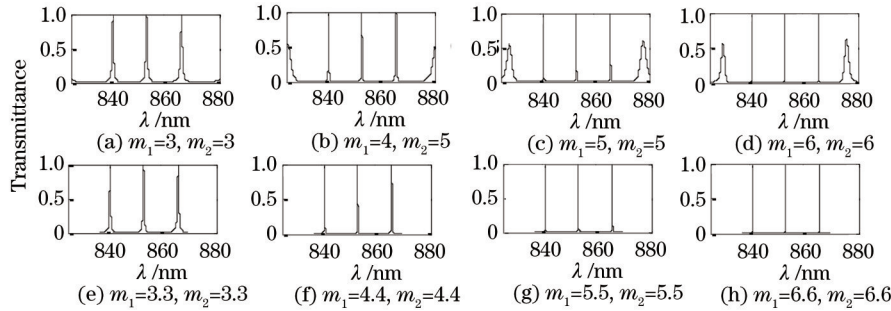


图2 $\Delta m=0$ 时光量子阱的透射谱

Fig.2 Transmission spectra of PQW with $\Delta m=0$

3.2 相等不对称度光量子阱的透射谱

仍然取光量子阱垒层光子晶体周期数 $n=2$,而取光量子阱垒层周期数 $m_1=3, 4, 5, 6, m_2=5, 6, 7, 8$,对应的光量子阱 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_2(\text{NB})_{m_2}$ 的透射谱分别如图 3(a)~(d) 所示。

从图 3 可知,当光量子阱垒层周期不对称度不等于 0 而等于固定值,即 $\Delta m=m_2-m_1=2$ 时,光量子阱透射谱中仍然恒定出现 3 条共振透射峰,但透射峰的透射率却明显低于 100%,而且禁带中心 853 nm 波长的透射峰透射率最低;保持不对称度 $\Delta m=2$ 恒定,增大垒层周期数时,3 条共振透射峰会越来越窄,但它们的透射率却保持不变。如, $m_1=3, m_2=5$ 时,或 $m_1=6, m_2=8$ 时,841、853 和 866 nm 波长位置 3 条透射峰的透射率均分别等于 0.5096、0.3227 和 0.5916。

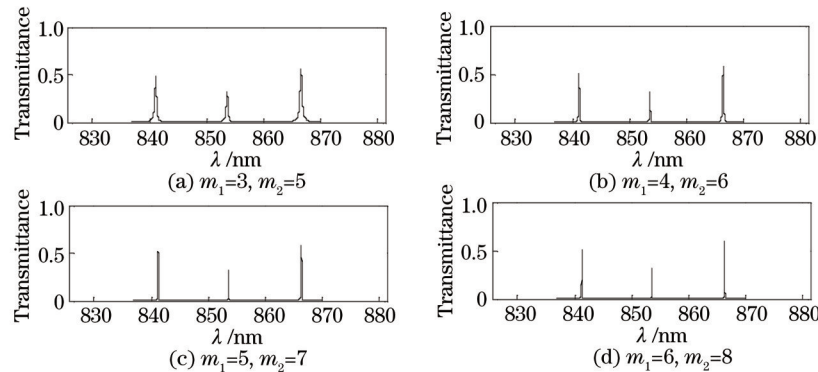


图3 相等不对称度时光量子阱的透射谱

Fig.3 Transmission spectra of PQW with constant nonzero Δm

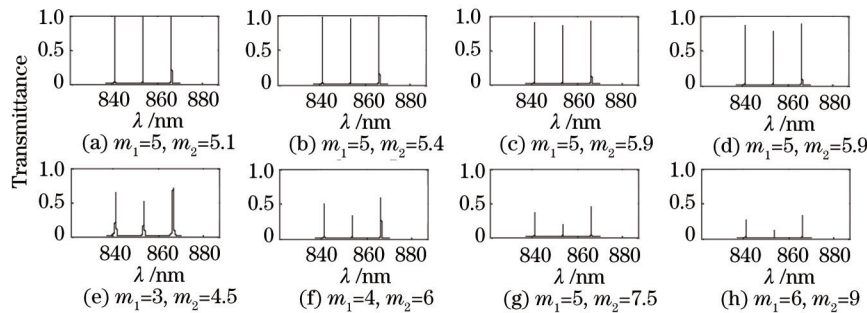
可见,当光量子阱垒层周期不对称度不为 0 时,光量子阱透射峰的透射率会下降;在垒层周期不对称度固定的情况下增大光量子阱垒层周期数,只能改变透射峰的带宽,但对透射峰的透射率不产生影响。

3.3 不对称度增大时光量子阱的透射谱

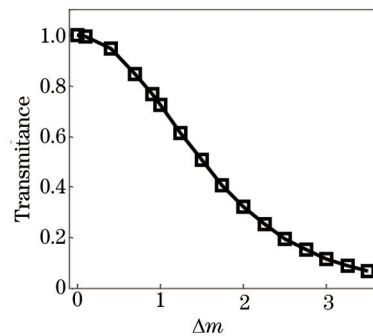
当垒层光子晶体周期数 $n=2$,垒层周期数 $m_1=5, m_2=5.1, 5.4, 5.7, 5.9$,以及 $m_1=3, 4, 5, 6, m_2=4.5, 6, 7.5, 9$ 时,各周期数对应的光量子阱 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_2(\text{NB})_{m_2}$ 的透射谱分别如图 4(a)~(h) 所示。

图 4 结果显示,随着垒层周期不对称度 Δm 的增大,光量子阱透射峰的透射率会下降,而且 Δm 越大,透射峰的透射率下降越明显。例如,当 $\Delta m=0.4, 0.9, 1.5, 2.0, 2.5$ 和 3.0 时,853 nm 波长处透射峰的透射率分别为 0.9469、0.7679、0.5050、0.3226、0.1950、0.1140,分别如图 4(b)和(d)~(h)所示。另外,随着垒层周期及其不对称度的增大,光量子阱透射峰也会越来越窄。

可见,光量子阱垒层周期不对称度的改变,不仅会影响透射峰的带宽,而且还会直接影响到透射峰的透射率。

图4 Δm 增大时光量子阱的透射谱Fig.4 Transmission spectrum of PQW with increasing Δm

根据图2~4的计算结果,进一步绘制了光量子阱853 nm波长处透射峰的透射率随垒层周期不对称度的变化曲线,如图5所示。从图5可见,当光量子阱垒层不对称度为0,即光量子阱镜像对称时,透射峰的透射率为1;随着不对称度的增加,透射峰透射率会快速下降,如当 $\Delta m=3.5$ 时,透射率仅为0.0654。进一步计算还发现,当不对称度 $\Delta m \geq 6.0$ 时,光量子阱853 nm波长处透射峰的透射率将趋于0,出现全反射现象。

图5 Δm 对透射峰透射率的影响曲线Fig.5 Transmittance of PQW versus Δm

综合对比以上的计算结果有,垒层周期不对称度为0时光量子阱构成镜像对称结构,即光量子阱的两侧势垒镜像对称,此时随着光量子阱垒层周期数的增大,将导致光量子阱垒层厚度增加即量子势垒对称增高,于是对处于其中的光子局域限制作用增强,光量子阱内形成很强的局域电场,当这种局域限制作用越强时,能共振隧穿通过光子晶体的光频率范围就越窄。量子势垒的这种内在限制效应在宏观上表现为更宽的光子晶体禁带以及更加精细且透射率很高的共振透射峰。当垒层周期不对称度大于0时,将导致量子阱两侧势垒的不对称,不对称势垒对光子的局域限制作用将有所减弱,即光子阱中的光场有所减弱,而且势垒的不对称将导致共振隧穿通过光子晶体的光强减弱,宏观上表现为透射率相对较低的共振透射峰^[3,8-9,11-14]。

因此,在匹配参数构造和设计光子晶体量子结构模型时,除满足阱层光子晶体的能带完全处于垒层光子晶体禁带中这一前提外,要想获得较高的透射峰透射率及对称简洁的透射谱特点,应该尽量减少光量子阱垒层周期的不对称度;如想获得相对固定的透射峰透射率,则应该尽量保持垒层周期不对称度的相对稳定;而如果想减少透射峰透射率获得更佳反射效果,则应该从提高垒层周期不对称度方面考虑。

4 结 论

通过数值计算模拟的方法,研究了垒层周期不对称度对光量子阱 $(\text{BN})_{m_1}(\text{NBN})_n(\text{NB})_{m_2}$ 透射谱的影响规律,结论如下:

- 1) 当垒层周期不对称度为0时,随着周期数的增大,光量子阱的透射峰会越来越窄,但透射率不变,而且均等于100%。
- 2) 当垒层周期不对称度不为0但等于恒定值时,随着周期数的增大,光量子阱的透射峰会越来越窄,但透射率不变,而且均低于100%。
- 3) 随着垒层周期不对称度的增大,光量子阱透射峰的透射率会下降,而且不对称度越大,透射率下降越

快,同时透射峰变窄的速度也越快。

光量子阱垒层周期不对称度对透射谱的影响规律,对光子晶体的模型构造、实际设计以及理论研究等具有积极的指导意义。

参考文献

- 1 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2061.
- 2 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high-quality filtering functions[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1006001.
苏安, 蒙成举, 高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1006001.
- 4 Dong Haixia, Dong Lijuan, Yang Chengquan, *et al.*. Optical properties of one-dimensional photonic crystal containing a single defect layer with negative refractive index[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1006002.
董海霞, 董丽娟, 杨成全, 等. 含单层负折射率缺陷的光子晶体的光学特性[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1006002.
- 5 Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1535.
苏安, 高英俊. 含复介电常数一维光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1535.
- 6 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062304.
周飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062304.
- 7 Liu Qineng. Analytical study on total reflection tunnel effect of 1-D photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0219002.
刘启能. 一维光子晶体的全反射隧穿效应的解析研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0219002.
- 8 Qiao Feng, Zhang Chun, Wang Jun, *et al.*. Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena [J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(23): 3698.
- 9 Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Effect of structure period number on the transmission quality of photonic quantum well[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 012302.
苏安, 蒙成举, 高英俊. 结构周期数对光量子阱透射品质的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 012302.
- 10 Fei Hongming, Zhou Fei, Yang Yibiao, *et al.*. Resonance tunneling through photonic double quantum well system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074225.
费宏明, 周飞, 杨毅彪, 等. 光子晶体双量子阱的共振隧穿[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074225.
- 11 Su An, Gao Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 234208.
苏安, 高英俊. 双重势垒一维光子晶体量子阱的光传输特性研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 234208.
- 12 Su An, Liang Yujuan. Transmission properties of the symmetrical structure of one-dimensional photonic crystal quantum well[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 217-218: 1696-1701.
- 13 S Kalchmair, H Detz, G D Cole, *et al.*. Photonic crystal slab quantum well infrared photodetector[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(1): 011105.
- 14 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(1): 153316.
- 15 Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(11): 2172-2178.
王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. *物理学报*, 2001, 50(11): 2172-2178.
- 16 Su An. Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal for realizing high-performance optical transmission function[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1101-1106.
苏安. 实现高效光传输功能的一维光子晶体透射谱[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1101-1106.