实现多通道光滤波与放大功能的光子晶体量子阱

苏安

(河池学院 物理与电子工程系,广西 宜州 546300)

摘 要:为设计高效光滤波、光放大、光衰减和光开关等新型量子光学器件,用传输矩阵法理论研究 了一维光子晶体(AB)_m(AABAABAABAA)_n(BA)_m的光传输特性,结果发现:在实介电常量或复介电常 量情况下,光子晶体均构成光量子阱结构,并呈现明显的量子化效应,实介电和复介电常量量子阱的 透射谱结构与特点相同,透射峰数目和频率位置均与周期数 n 密切相关;当折射率 n_B 为含负虚部的 复介电常量时,光量子阱的共振透射峰出现不同程度的透射增益、放大现象,增益倍数最高达 10³ 数 量级,同时共振透射峰频率处出现很强的受激辐射,辐射极强达到 10⁴ 数量级;当 n≥3 时,随 n 的增加量 子阱透射增益倍数呈现下降趋势,共振透射峰频率处的受激辐射也随之下降;当 n_B 为含正虚部的复介 电常量时,共振透射峰则出现明显地透射衰减现象。这些特性为实验制备工作提供理论依据和指导。 关键词:光放大; 光滤波; 光子晶体; 光量子阱; 复介电常量 中图分类号: O431;TN244 文献标志码:A 文章编号: 1007-2276(2013)03-0727-06

Photonic crystal quantum well with function of multi-channel photonic filtering and amplifying

Su An

(Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China)

Abstract: To design new-style effectively optical devices such as filters, amplifiers, attenuators and switches, the transmission characteristics of one-dimension photonic crystal(AB)_m(AABAABAABAA)_n(BA)_m were studied by the transfer matrix method theory. The results show that with the real or complex dielectric constant, $(AB)_m(AABAABAABAA)_n(BA)_m$ will be formed into quantum-well structure photonic crystal which presents an apparent quantized effect. The number and frequency location of the transmission peaks of the thus-formed photonic crystal are closely related to the value of **n**. When n_B is a complex dielectric constant with a negative imaginary part, the transmission peaks in the well present transmission gains and amplification at various levels. The transmission gains even reach as high as 10^3 , and at some transmission peaks, strong stimulated radiation up to 10^4 orders of magnitude are found. When $n \ge 3$, both the multiple of the transmission gain and the maximum of stimulated radiation decrease with increasing **n**. And when n_B is of a complex dielectric constant, peaks obviously show attenuated in

收稿日期:2012-07-18; 修订日期:2012-08-23

基金项目:国家自然科学基金(51161003);广西自然科学基金(2011GXNSFA018145,2012GXNSFDA053001); 广西高校优秀人才资助计划(桂教人[2011]40 号)

作者简介:苏安(1973-),男,副教授,硕士,主要从事光子晶体方面的研究。Email:suan3283395@163.com

第42卷

the transmission. These characteristics offer theoretical guidance for preparation photonic crystals. Key words: optical amplification; optical filters; photonic crystal; photonic quantum well; complex dielectric constant

0 引 言

光子晶体¹¹是介电常量周期性排列的人工微结 构光学材料,其最根本的特征是存在光子禁带和局 域态,处在禁带频率范围内的光在光子晶体中将被 禁止传播,利用这个特性可以实现人为控制光的行 为。因此,自光子晶体概念提出后,人们对其进行了 大量而广泛的研究,研究成果为信息技术的发展提 供了新的发展方向和动力。例如制作全新的光全反 射镜,光子晶体激光二级管,光子晶体宽带滤或超窄 带滤波器,光子晶体光纤,光子开关器件等^[2-11]。最近 几年,为设计高品质和高性能的光子开关和光子超 窄带滤波器,对光子晶体超晶格材料和结构提出了 更高的要求,需要深入研究光在光子晶体超晶格材 料构成的光量子阱中的传输特性。目前这一研究领 域已成为设计新型光子器件的关键和研究热点^[7-11]。

把具有不同光子禁带的光子晶体合理组合在一起时,可形成光子晶体量子阱,简称光量子阱(POW) 结构。在光子晶体量子阱结构中,当中间阱层光子晶 体的能带完全处于两侧垒层光子晶体的禁带中时, 在光子晶体中传播的光将被局域在阱层光子晶体 中,形成局域光子态,这些被束缚的光子态,将导致 光频率的量子化^[7-14]。利用光子晶体量子阱结构的这 种光传输特性,可以设计高品质的量子光学器件。若 在光子晶体介质层中掺入增益杂质,可增大相应频 率光子的态密度,增强此频率处的受激辐射,使光子 晶体出现高效的光放大、滤波、激光等功能^[2,6-7]。国 内外学者对光量子阱和复介电常量光子晶体领域开 展了积极研究,提出了许多光子晶体结构模型,并发 现了一些新规律。但对于复介电常量的光子晶体量 子阱结构的研究报道还未多见。

基于此,构造(AB)_m(AABAABAABAA)_n(BA)_m一 维(1D)光子晶体模型,并在 A、B 层为实介电常量和 B 层为复介电常量两种情况下,对其所构成光量子 阱结构透射谱进行研究,发现两种情况下均呈现明 显的量子化效应,尤其在 B 为复介电常量时,透射峰 表现出不同程度的增益放大与衰减现象,这些传输 特性能为光子晶体设计新型高效多通道光学滤波 器、光放大器、衰减器和光开关等量子光学器件提供 指导。

1 结构模型与研究理论

研究对象为(AB)_m(AABAABAABAA)_n(BA)_m 一 维光子晶体结构模型,A、B介质层分别碲化铅(PbTe) 和硫化锌(ZnS),对应的折射率和厚度分别为n_A=4.1, d_A=750 nm;n_B=2.35,d_B=1 329 nm。当 B 层介质中掺入 增益(激活)杂质后,n_B=2.35+ki;k 为增益系数,k<0时 表现为增益放大,k>0 时表现为吸收衰减。m 和 n 为 重复周期数,可为任意正整数。

研究理论和方法采用传输矩阵法^[2-9,11]。详见作 者的相关论文^[2,6-9]介绍,在此不再重述。

2 光量子阱结构的形成

利用传输矩阵法理论,通过 MATLAB 科学计算软件编程数值计算和模拟,可直观得出在实介电常量和复介电常量情况下(AABAABAABAA)n和(AB)m(BA)m一维光子晶体的能带结构,如图 1 和图 2 所示,图中频率用归一化单位 ω/ω,表示。

的限制作用而被局域在阱层中,此时光要通过光子 晶体,一般通过共振隧穿的方式^[7-11]。

图 1(b)和图 2(b)中光子晶体(AB)_m(BA)_m的禁带 中心 1.0 ω/ω₀处出现一窄完全透射峰,是镜像对称 结构光子晶体的透射谱特征^[2,6-7]。



图 1 n_B=2.35 时,一维光子晶体的光子透射能带谱





图 2 n_B=2.35-0.000 85 i 时, 一维光子晶体的光子透射能带谱 Fig.2 Transmission spectrum for 1D photonic crytals with n_B=2.35-0.000 85 i

3 光量子阱的光传输特性

3.1 实介电常量光量子阱的透射谱

当 n₈=2.35, m=5, n=1~5 时, 实介电常量一维光 子晶体量子阱(AB)₅(AABAABAABAA)_n(BA)₅ 随 n变 化的光子透射能带谱如图 3 所示。从图中可知:光子 晶体所构成的光量子阱结构均出现明显的量子化效 应,表现在 0.77~1.24 ω/ω 禁带范围内,对称分布着 三组透射率为 100%的分立透射峰,各组透射峰数目 与阱层光子晶体(AABAABAABAA)_n周期数 n密切相 关,其中中间组透射峰数目为 n+1,对称分布在两侧的 两组透射峰数目均为 n,即透射谱透射峰总数为 3n+ 1。同时,靠近禁带中心频率的透射峰比两侧的精细,频 带更加窄。因此,由阱层光子晶体(AABAABAABAA)_n 的重复周期数n,即可调节控制透过峰的数目及其 频率位置。实介电常量光量子阱结构的这种光传输 特性,可用于设计高效的可调性多通道量子光学滤 波器件。透射谱形成的原因分析如下。



- 图 3 n_B=2.35 时, 光量子阱(AB)₅(AABAABAABAA)_n(BA)₅的 透射能带谱
- Fig.3 Transmission spectrum for (AB) $_5$ (AABAABAABAA) $_n$ (BA) $_5$ PQW with n_B =2.35

从图 1 可知,在 0.77~1.24 ω/ω 频率区域内,阱层 光子晶体 (AABAABAABAA)。的中心能带完全处于 垒层光子晶体(AB)_m(BA)_m的禁带之中,且从图 1(a) 还可以看到,中心能带是由三个分能带组成的,所以 构成的光子晶体量子阱结构可认为是由势垒相同的 三个分量子阱组成,于是在光子晶体中传播的光频 率落在各分量子阱频率范围内时,将因量子阱的垒 层所限制而无法传播,并被局域在阱层中,且越靠近 阱中心局域作用越强,此时光子的行为类似于半导 体量子阱中的电子,量子阱的这种限制效应将导致 频率的量子化,于是光通过共振隧穿的方式通过光 子晶体[7-11].形成如图 3 所示的三组分立的共振透射 峰。应该注意到,在这些量子局域光子态上,光几乎 是可以完全通过的,体现为透射率为100%的各分立 透射峰,但由于靠近量子阱中心受限制作用很强,所 以此处透射峰更精细,且出现透射率近100%的透射 峰,如图 3(e)1.0 ω/ω 频率处右侧的透射峰。

若从缺陷的角度上看,可把(AABAABAABAA)n看 成是光子晶体(AB)₅(BA)₅中的另一块光子晶体,当 n=1 时,光量子阱(AB)₅(AABAABAABAA)₁(BA)₅可表示成 (AB)₅A B ABA B ABA B ABA B A(BA)₅, "B"处即 为因缺少介质层 B 而产生的 4 个空位缺陷,所以禁带 中出现 4 条透射率为 100%的缺陷模 (完全透射峰),如 图 3(a)所示。当 n=2 时,(AB)₅(AABAABAABAA)₂(BA)₅ 可表示成 (AB)₅A B ABA B ABA B ABA A ABA B ABA B ABA B A (BA)₅,显然存在 7 处缺陷(其中 "AA" 相当于 B 层介质被两层 A 介质替代而形成缺 陷),所以出现如图 3(b)所示的透射峰。n=3,4,…可依 次类推^[26-7]。

3.2 负虚部复介电常量光量子阱的透射谱

当 n_B=2.35-0.000 85 i,即在 B 层介质中掺入增 益杂质后,B 层介质的折射率为含负虚部的复介电常 量,此时光量子阱结构(AB)₅(AABAABAABAA)_n(BA)₅ 的光子透射能带谱如图 4 所示。



图 4 n_B=2.35-0.000 85 i 时, 光量子阱(AB)₅(AABAABAABAA)_n (BA)₅的透射能带谱

Fig.4 Transmission spectrum for PQW with $n_B=2.35-0.00085i$

从图 4 可见,复介电常量和实介电常量光量子 阱的光子透射谱结构相同,共振透射峰的位置、数目 仍与 n 相关,总数亦为 3n+1条,但复介电常量情况 下量子阱结构的透射峰却出现了不同程度的透射增 益现象,当 n=2 时增益达到最强,表现为0.999 7 ω/ω₀ 频率处的透射峰透射率达 3 525,增益倍数达 10³数 量级。然而,当 n≥3 时,随 n 的增加透射峰的增益倍 数呈现下降趋势,而且越靠近阱中间透射增益倍数 下降越快,计算发现,当 n≥9 后,1.0 ω/ω₀ 频率左右 两侧的透射峰透率趋近于 0。图 4 中的大部分透射

峰之所以没显示出来,是因为这部分透射峰相对显 示出来的透射峰的增益幅度小得多,只要进行局部放 大即可显现。例如 n=4 时,对图 4(c)放大后,从左至右 13 条透射峰透射率依次为 1.841、1.721、3.402、221.2、 1.918,1.886,0.8585,0.9559,0.4638,2.985,44.9,7.256, 343.1,分别对应 0.8107 ω/ω, 0.8292 ω/ω, 0.8554 ω/ω, 0.886 2 ω/ω_0 0.931 7 ω/ω_0 0.962 9 ω/ω_0 0.999 7 ω/ω_0 $1.037 \ \omega/\omega_0$, $1.068 \ \omega/\omega_0$, $1.113 \ \omega/\omega_0$, $1.144 \ \omega/\omega_0$, $1.17 \ \omega/\omega_0$ 和 1.189 ω/ ω, 频率处; n=5 时, 从左至右 16 条透射峰 透射率依次为 2.55、1.822、2.523、9.157、5.721、0.7126、 0.966 4 0.447 4 0.361 4 0.465 0.210 4 0.609 7 12.61 54.67、24.07、2.491, 分别对应 0.8086 alwo, 0.8222 alwo, $0.841\ 7\ \omega/\omega_0$ 0.865 4 ω/ω_0 0.891 3 ω/ω_0 0.930 6 ω/ω_0 $0.954 \ 9 \ \omega/\omega_0 \ 0.984 \ 6 \ \omega/\omega_0 \ 1.015 \ \omega/\omega_0 \ 1.044 \ \omega/\omega_0 \$ $1.069 \ \omega / \omega_0$, $1.108 \ \omega / \omega_0$, $1.134 \ \omega / \omega_0$, $1.158 \ \omega / \omega_0$, $1.177 \ \omega / \omega_0$ 和 1.191 ω/ω,频率处。造成这种透射峰增益强度不同 的原因从图 2(a)可知, B 层为复介电常量时构成光 子晶体量子阱结构的能带增益并不对称,禁带和能 带的边缘增益较大,而禁带和能带中间增益较弱。透 射增益现象可分析为:当B介质层为复有效折射率 的虚部为负值时, 共振透射峰频所在频率处的群速 度大大降低,与实有效折射率(未掺入激活杂质)的光 子晶体相比,处于共振透射峰频率周围的光脉冲群速 度会变慢很多,所以相应频率的光子态密度将大大增 强,即光被强烈局域,光增益显著增强。这意味着当光 通过激活介质时必定从抽运源中吸收能量,光不仅不 被吸收且还得到放大,这种放大效果与光子晶体的周 期数有关。进一步计算还发现,这种放大效果还与掺 入的杂质量即吸收系数存在一定的关系[2.6-7]。

对于实介电常量光子晶体或光子晶体量子阱, 它们的透射率与反射率之和等于1,当介质中掺入 激活杂质后,某些频率上会出现受激辐射增强现象, 此时透射率与反射率之和将大于甚至远远大于1。 普遍以反射率与透射率之和表示受激辐射放大的强 弱^[6-7]。从图5可知,当B层介质中掺入激活杂质后, 光量子阱透射峰对应频率出现很强的受激辐射,特 别是 n=2时,0.9997ω/ω,频率处的受激辐射增强到 6939倍,此时,该频率处的光脉冲的群速度达到最 低,此处光被局域也最强,其光子态密度达到极大 值,在透射谱中表现为极强的光增益现象,其透射率 增大达3525倍,如图4(b)所示。



图 5 n_B=2.35-0.000 85 i 时,光量子阱(AB)₅(AABAABAABAA)_n (BA)₅的受激辐射

Fig.5 Sum of reflectance and transmittance spectrum for PQW with $n_{\rm B}$ =2.35-0.000 85 i

可见,当组成光子晶体量子阱的介质中掺入增 益性杂质后,光子晶体量子阱结构的透射能带谱具 有多通道光滤波功能的同时,还具有光放大的效果, 但当 n≥3 后,部分透射峰则实现光放大倍数下降的 效果。

3.3 正虚部复介电常量光量子阱的透射谱

保持光子晶体量子阱结构的其他结构参数不变,当B层介质中掺入负增益(吸收)杂质时,其折射率为含正虚部的复介电常量(n_B=2.35+0.000 85 i),则 计算得光量子阱结构(AB)₅(AABAABAABAA)_n(BA)₅ 的透射能带谱如图 6 所示。

由图 6 可知,当 B 为含正虚部复介电常量时,光 子晶体量子阱结构(AB)₅(AABAABAABAA)_n(BA)₅的 透射谱与实介电常量、负虚部复介电常量情况下的 透射谱结构相同,共振透射峰的数目和位置仍与n有 关,但透射谱中所有的透射峰却都出现了不同程度 的透射衰减,即出现光通过光子晶体量子阱时被吸收 的现象,而且随着 n 的增大,衰减效果越明显。当n=1 时,透射率最高为 0.807 1,对应 0.839 3 ω/ω₀ 频率处, 透射率最低达 0.438,对应 1.055 ω/ω₀ 频率处;其中当 n=6 时,透射率最高为 0.630 4,对应 0.822 2 ω/ω₀频率 处,透射率最低达 0.057 2,对应 1.069 ω/ω₀ 频率处。 同时,越靠近阱中心的透射峰衰减速度越快,如n=3时,1.066 ω/ω。频率处的透射峰透射率仅为 0.1287,



图 6 n_B=2.35+0.000 85 i 时, 光量子阱(AB)₅(AABAABAABAA)_n (BA)₅的透射能带谱

Fig.6 Transmission spectrum for PQW with $n_B=2.35+0.00085$ i

n=4 时,在 1.068ω/ω0 频率处的透射峰透射率仅为 0.083 14,如 n=5 时,在 1.069 ω/ω₀ 频率处的透射峰 透射率仅为 0.057 22,当 n=8 时,透射峰极高值和极 低值仅为 0.521 8 和 0.023 5,分别处在 0.822 5 ω/ω₀ 和 1.070 ω/ω₀频率处,出现很强的衰减现象。可推 测,随着 n 的继续增大,部分透射峰透射率将逐渐趋 于 0,呈现全反射现象。

4 结 论

(1)在实介电常量或复介电常量情况下构成光 子晶体量子阱结构均出现明显的量子化效应,且透 射谱结构相同,实介电常量情况下,光量子阱结构所 有透射峰透射率为100%,透射峰数目及其频率位置 可由n调节,实现多可调性多通道滤波功能。

(2)负虚部复介电常量情况下,光量子阱透射峰 对应频率处出现极强的透射增益和受激辐射现象, 透射增益倍数最高达 10³数量级,受激辐射增强倍数 最高达 10³数量级,当周期数 n 的增大到一定数值后 透射峰透射增益倍数反而下降,出现衰减现象。

(3) 正虚部复介电常量情况下,光量子阱的透射 峰透射率均小于 100%,即出现不同程度的透射衰减 现象,当n增大到一定数值,将出现透射衰减到0的 全反射效果。 此光子晶体量子阱的光学传输特性,对设计新 型量子光学放大器、激光器、衰减器和光开关等器件, 或是光子晶体理论研究,都具有一定的参考价值。

参考文献:

- Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1535-1538. (in Chinese) 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): 1535-1538.
- [3] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al. Properties of one-dimensional photonic crystal tunneling mode containing single-negative materials with symmetrical structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 69-72. (in Chinese) 李文胜, 黄海铭, 付艳华, 等. 含单负材料对称型一维光子晶 体隧穿模的特性[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 69-72.
- [4] Tang Jun, Yang Huajun, Xu Quan, et al. Analysis of the transfer characteristics of one-dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 76-80. (in Chinese) 唐军, 杨华军, 徐权, 等. 传输矩阵法分析一维光子晶体传 输特性及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 76-80.
- [5] Wu Rina, Yan Bin, Wang Yanhua. et al. Photonic band gap in one-dimensional SiO₂/TiO₂ multilayer photonic crystal [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (5): 872–875. (in Chinese)

乌日娜, 闫彬, 王彦华, 等. SiO₂/TiO₂ 多层膜结构一维光子晶体光子禁带研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 872-875.

[6] 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. (in Chinese)

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.

- [7] Su An, Gao Yingjun. One dimensional photonic crystal quantum well structure containing complex dielectric constant [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 842-846. (in Chinese) 苏安, 高英俊. 含复介电常量一维光子晶体量子阱结构研 究[J]. 光子学报, 2010, 39 (5): 842-846.
- [8] Su An. The effect of lattice constants on transmission spectra of photonic crystal quantum well [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 200-206. (in Chinese) 苏安. 晶格常数对光子晶体量子阱透射谱的影响[J]. 红外 与激光工程, 2013, 42(1): 200-206.
- [9] Su An, Gao Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 4208-4217. (in Chinese) 苏安, 高英俊. 双重势全一维光子晶体量子阱的光传输特 性研[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 4208-4217.
- [10] Fei Hongming, Zhou Fei, Yang Yibiao, et al. Resonance tunneling through photonic double quantum well system [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 74225-74230. (in Chinese) 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): 74225-74230.
- Qiao Feng, Zhang Chun, Wan Jun, et al. Photonic quantumwell structures: multiple channeled filtering phenomena [J].
 Appl Phys Lett, 2000, 77(23): 3698-3700.
- [12] Esaki L, Tus R. Superlattiee and negative differential conductivity semiconductors [J]. IBMJ Res Dev, 1970, 14: 61-65.
- [13] Mendez E E, VonKlitzing K. Physies and applications of quantum wells and spuerlatitiess[M]. NewYork: Natoasl, 1987.
- [14] Moussa R, Foteinopoulou S, Zhang Lei, et al. Negative refraction and uperlensing in a 2D photonic crystal structure [J]. Phys Rev B, 2005, 71(8): 1-5.