

基于对称嵌套式光子晶体量子阱的多通道滤波器

熊翠秀 邓杨保 邓曙光

湖南城市学院通信与电子工程学院, 湖南 益阳 413000

摘要 为实现多通道光滤波功能,设计对称嵌套式一维光子晶体量子阱 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$,采用传输矩阵法计算透射谱,分析了阱的周期数及折射率对透射峰的影响。结果表明,量子阱主禁带内出现三组透射峰,由于外阱 $(AB)_m$ 和 $(BA)_m$ 之间的相互耦合,使第2组和第3组透射峰具有双线结构,透射峰的数目、位置及双线之间的间隔受阱的周期数和折射率调控。禁带内总计有 $2m+n+3$ (m 取奇数)或 $2m+n+1$ (m 取偶数)条窄透射峰。无论是内阱还是外阱的周期数增大,双线间距都会减小,且透射峰都向中心频率靠近。随着高折射率介质的折射率增大,双线间距减小,透射峰远离中心频率;随着低折射率介质的折射率增大,双线间距增大,双线透射峰向中心频率靠近。这些特性对多通道光滤波器的设计具有一定的指导意义。

关键词 材料; 对称嵌套式光子晶体量子阱; 传输矩阵法; 多通道滤波器; 透射谱

中图分类号 O734

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041601

Multi-Channel Filter Based on Symmetric Nested Photonic Crystals Quantum Well

Xiong Cuixiu Deng Yangbao Deng Shuguang

College of Communication and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China

Abstract In order to achieve the function of multi-channel photonic filtering, the symmetric nested photonic crystals quantum well $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ is designed. The transmission spectra of photonic quantum well are calculated based on transmission matrix method. The effect of periods number of the well photonic crystals and refractive index on transmission spectral peak is analyzed. The results show that three groups of transmission peaks appear in the main forbidden band of photonic quantum well. Due to the coupling between the outer wells $(AB)_m$ and $(BA)_m$, the second and the third groups of transmission peaks have dual-line structures. The numbers, location of transmission peaks and internal between the dual-line structures are related to the periods number of the well photonic crystals and refractive index. In the main forbidden band, there are $2m+n+3$ (with odd number m) or $2m+n+1$ (with even number m) narrow transmission peaks. With the increasing of the periods number of the inner or outer wells, the frequency interval of the double lines becomes narrower, and the dual transmission peaks move closer to the center frequency. With the increasing of refractive index of high-refractive medium, the frequency interval between the double lines narrows down and the dual transmission peaks move away from center frequency. However, when the refractive index of low refractive index medium is increased, the frequency interval between the double lines will be broadened and the dual transmission peaks move closer to the center frequency. The results have a certain reference value for design of multi-channel photonic filter.

Key words materials; symmetric nested photonic crystals quantum wells; transmission matrix method; multi-channel filter; transmission spectra

OCIS codes 160.5298; 120.2440; 120.7000

1 引言

光滤波是光子晶体在光通信中的重要应用,包括带阻滤波和窄带信道分出滤波。窄带信道分出滤波的

收稿日期: 2015-10-16; 收到修改稿日期: 2015-10-28; 网络出版日期: 2016-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(11447120)、湖南省自然科学基金(14JJ6043)、湖南省教育厅优秀青年项目(15B042)、湖南省益阳市科技计划(2014JZ39)

作者简介: 熊翠秀(1980—),女,硕士,讲师,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: xiongcuixiu@163.com

机理有多种,如在周期性结构中引入缺陷产生缺陷模^[1-4]、环形线缺陷光子晶体产生传输模^[5]、异质结产生透射峰^[6]、二维方格子介质柱光子晶体结构形成微型谐振器产生传输模^[7]及光子晶体量子阱的共振隧穿产生隧穿模^[8-19]等。光量子阱的透射峰数和品质因数具有很好的可调性,因此成为光子晶体领域的研究热点^[8-19]。

研究报道,单或双势垒、单势阱光量子阱隧穿模的数量与势阱的周期数和晶格常数有关^[8-12],其品质因数与势垒、势阱的周期数及势垒与势阱的折射率之和之比有关^[8-10,13],可以通过调整光量子阱的周期数和折射率来有效调控共振峰的数目和品质因数。随着研究的深入,研究人员陆续提出并研究了双或多势阱光子晶体量子阱^[14-16],由于不同量子阱之间相互耦合导致谱线分裂,使得透射峰数不仅与阱层的周期数有关,还与量子阱的数量有关^[14]。文献[17-18]中为了克服光子晶体单量子阱结构的隧穿峰数目不易通过结构参数来调节的困难,提出并研究了由负介电常数材料和负磁导率材料组成的光子晶体双及多光量子阱结构,该结构量子阱能够在全方位实现多通道滤波功能。以上文献对双或多势阱光子晶体量子阱的研究主要集中在含双负或单负介质的结构上。文献[19]设计并研究了能实现多通道滤波功能的一维光子晶体三量子阱结构 $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n$,在一定参数下 $(CD)_n$ 的2个通带正好落在 $(AB)_m(AB)_m$ 的2个禁带里,构成双量子阱光子晶体 $(AB)_m(CD)_n(AB)_m$,而 $(AB)_m$ 的1个通带正好处于 $(CD)_n(CD)_n$ 的禁带,构成单势阱光子晶体量子阱 $(CD)_n(AB)_m(CD)_n$,把它们合在一起构成3个量子阱,这3个量子阱对应的禁带相连得到了1个宽禁带,禁带内实现了以三组形式存在的 $2n+m$ 条单线共振透射峰^[19]。从产生更多信道的角度出发,设计了一种由两种正折射率介质组成,并且其中任何一块光子晶体同时是另一块光子晶体的势阱和势垒的对称嵌套式光子晶体量子阱 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 。对这种结构的研究目前还没有报道。本文采用传输矩阵法^[20],重点研究了阱的周期数和介质的折射率对共振透射峰数及位置的调控规律。研究发现该结构光量子阱的共振隧穿模既具有单量子阱的特征,也具有双量子阱的特性,这与以往研究的光量子阱的滤波特性有所不同。

2 结构模型和计算方法

结构模型为镜像对称一维光子晶体 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$,其中A和B都是折射率为正的基元介质,不考虑色散和吸收。各介质层折射率和几何厚度分别用 n_a 、 n_b 、 l_a 和 l_b 表示, k 、 m 和 n 表示排列周期数,可以取任意正整数。根据薄膜光学理论,光线以任意入射角入射到一维光子晶体时,光在任意一层介质中的传输行为可以用一个矩阵表示,所有介质层的矩阵连乘得到总矩阵,根据总矩阵可以求出反射率和透射率,这便是传输矩阵法^[20]。后面的具体研究中采用传输矩阵法计算透射率,进一步得到透射谱。

3 结果与分析

3.1 对称嵌套式一维光子晶体量子阱的形成机理

取 $n_a = 3.37$, $n_b = 1.544$, $n_a l_a = n_b l_b = \lambda_0/4$ (λ_0 是中心波长)。采用传输矩阵法数值计算一维光子晶体 $(BAB)_8$ 、 $(AB)_6(BA)_6$ 、 $(AB)_6(BAB)_8(BA)_6$ 和 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$ 的透射谱如图1所示。

图1(a)中 $(BAB)_8$ 的中心能带在 $(0.818 \sim 1.182) \omega/\omega_0$ 之间,该通带完全处于 $(AB)_6(BA)_6$ 的主禁带,构成单势垒光子晶体量子阱 $(AB)_6(BAB)_8(BA)_6$, $(BAB)_8$ 是势阱, $(AB)_6(BA)_6$ 为势垒^[8-10];而图1(b)中 $(AB)_6(BA)_6$ 主禁带两侧的通带又处于图1(a)中 $(BAB)_8$ 中心能带两侧的禁带,故光子晶体 $(AB)_6(BA)_6$ 两侧排列光子晶体 $(BAB)_8$,构成双势阱光子晶体量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BA)_6(BAB)_8$,光子晶体 $(BAB)_8$ 和 $(AB)_6(BA)_6$ 分别是势垒和势阱。把 $(BAB)_8$ 插入到光量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BA)_6(BAB)_8$ 的中心,得到双重光量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$,该系统中 $(BAB)_8$ 和 $(AB)_6(BA)_6$ 都为对方的势垒及势阱,从能带结构上看该光量子阱构成镜像对称嵌套式光量子阱。从物质结构上看,光量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8$ 和 $(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$ 的势阱分别为互相独立的光子晶体 $(AB)_6$ 和 $(BA)_6$,它们共用势垒 $(BAB)_8$ 构成对称嵌套式光子晶体量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$,其中 $(BAB)_8$ 充当内阱和外垒,而 $(AB)_6(BA)_6$ 充当内垒和外阱,从而形成镜像对称嵌套式双单量子阱系统。一般地,排列周期数分别用 k 、 m 和 n 表示,用 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 表示研究的镜像对称嵌套式光量子阱,并把 $(BAB)_n$ 和 $(AB)_m(BA)_m$ 分别记为内阱和外阱,它们又分别是外垒和内垒,互为对方的势阱和势垒。

图1(c)和(d)中,光量子阱 $(AB)_6(BAB)_8(BA)_6$ 和 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$ 透射谱的主禁带基本一致,不同的是前者主禁带内只有9个透射峰,与文献[8-10]结果一致,后者的主禁带内除了与图1(c)对应的9个

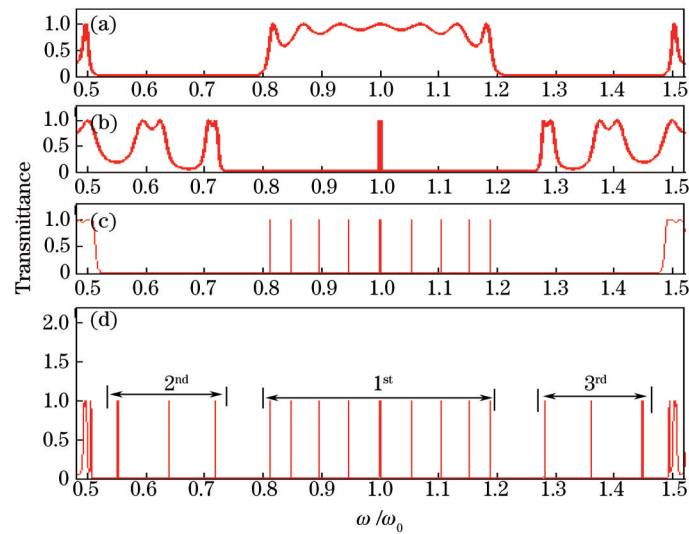


图1 对称嵌套式光子晶体量子阱的形成机理。(a) $(BAB)_s$; (b) $(AB)_6(BA)_6$; (c) $(AB)_6(BAB)_8(BA)_6$; (d) $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$

Fig.1 Formation mechanism of symmetric nested photonic crystal quantum wells. (a) $(BAB)_s$; (b) $(AB)_6(BA)_6$; (c) $(AB)_6(BAB)_8(BA)_6$; (d) $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$

透射峰外,禁带的左、右两侧各出现了3个透射峰,总计15个透射峰,禁带内的透射峰按3组形式出现。中间9个记为第1组,左、右两侧的透射峰分别记为第2、3组,第2组与第3组透射峰关于中心频率对称。处于内阱通带内的光波受到内垒的局域作用,以共振隧穿的方式通过光子晶体产生第1组透射峰;处于外阱通带内的光子,受到外垒的强烈局域作用,共振隧穿产生了第2、3组透射峰,由于外阱的2个通带关于中心频率对称,故这两组透射峰关于中心频率对称。

综上所述,对称嵌套式光子晶体量子阱 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 能够实现多通道滤波功能,其通道数比相同结构单势垒 $(AB)_m(BAB)_n(BA)_m$ 及双重势垒光子晶体量子阱 $(AB)_k(CD)_m(DCD)_n(DC)_m(BA)_k$ [8]多。

3.2 内阱 $(BAB)_n$ 的周期数 n 对透射谱的影响

介质A、B的折射率和光学厚度保持不变。固定 $k=8$, $m=6$, n 取2、4、6、8和10,正入射时光子晶体量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_n(BA)_6(BAB)_8$ 的透射谱如图2所示。

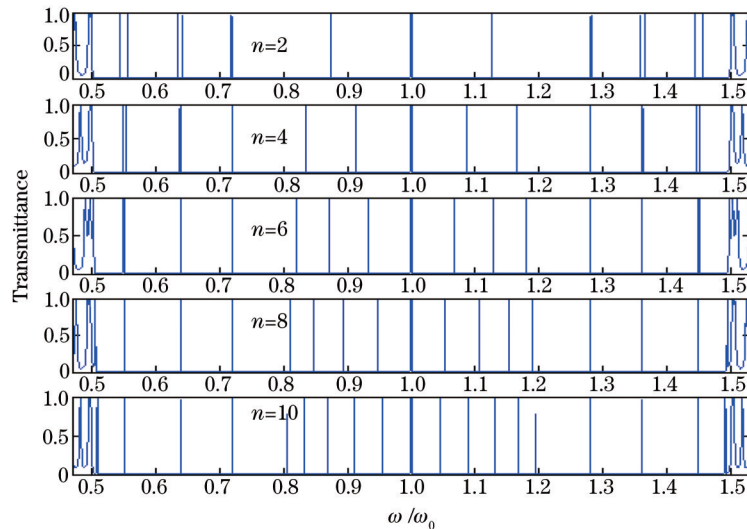


图2 内阱的周期数 n 不同时嵌套式光子晶体量子阱的透射谱

Fig.2 Transmission spectra of symmetric nested photonic crystal quantum wells with different n

由图2可知:1)内阱周期数的变化不影响第2、3组透射峰的数目。解释如下:内阱 $(BAB)_n$ 是光子晶体量子阱 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n$ 和 $(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 的公共势垒,而透射峰由处于阱内的光波受到势垒的强局域作用,光子以共振隧穿的方式透过光子晶体[9],故透射峰的数目由对应势阱的周期数决定,因此第2、3组透射峰数与

内阱的周期数无关;2) 外阱 $(AB)_m(BA)_m$ 无论从能带结构,还是从实物结构看都构成双势阱系统,实物结构双势阱之间相互耦合,导致谱线分裂,故第2、3组透射峰具有双线结构。而与第1组透射峰对应的是单势阱,故其透射峰是单线结构。因此光量子阱 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 既具有单量子阱的滤波特性,还具有双量子阱的滤波特性,是一种新型的双重多通道滤波器;3) 随着内阱周期数的增大,分势阱之间的距离增大,耦合减弱,最后趋于各势阱具有相同的简并能级^[14],双线结构慢慢趋于单线,导致第2、3组透射峰的双线间距随 n 的增大慢慢减小,最后趋于单线。

3.3 外阱 $(AB)_m(BA)_m$ 的周期数 m 对透射谱的影响

固定 $k=8$, $n=8$, m 取 1、2、3、4、5、6 和 7,其他参数不变。考虑光波垂直入射,光量子阱 $(BAB)_8(AB)_m(BAB)_8(BA)_m(BAB)_8$ 的透射谱如图3所示。由图3可知,外阱的周期数对第1组透射峰有一定的影响,文献[10]对此进行了研究。接下来分析 m 对第2、3组透射峰的影响。

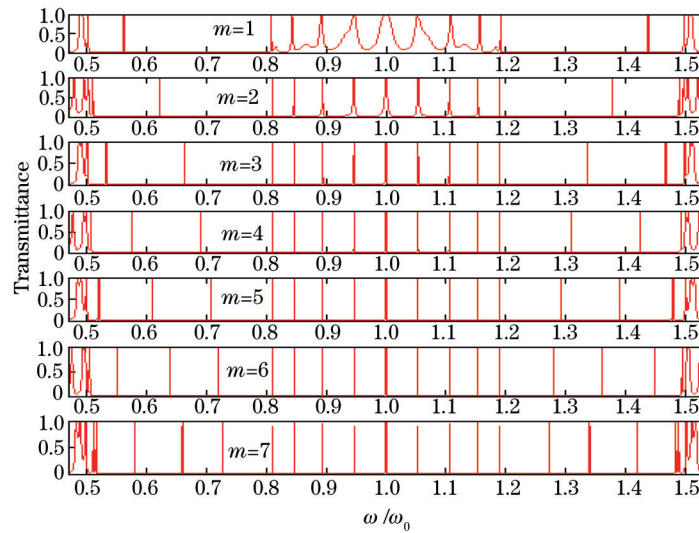


图3 外阱的周期数 m 不同时对称嵌套式光子晶体量子阱的透射谱

Fig.3 Transmission spectra of symmetric nested photonic crystal quantum wells with different m

由图3可知以下结论:

1) 第2、3组透射峰数与 m 的关系: m 为奇数时,每组各有 $(m+1)/2$ 个透射峰; m 为偶数时,每组各有 $m/2$ 个透射峰。对此从缺陷的角度解释:当 m 取偶数 2、4、6、8 时,光量子阱 $(BAB)_8(AB)_m(BAB)_8(BA)_m(BAB)_8$ 可以分别表示成 $(BAB)_8A(BAB)(BAB)_8(BAB)A(BAB)_8$ 、 $(BAB)_8A(BAB)A(BAB)(BAB)_8(BAB)A(BAB)A(BAB)_8$ 、 $(BAB)_8A(BAB)A(BAB)A(BAB)(BAB)_8$ 、 $(BAB)_8A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)_8$ 、 $(BAB)_8A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)_8$ 、 $(BAB)_8A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)_8$ 、 $(BAB)_8A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)A(BAB)_8$, 相当于在基本单元 (BAB) 的周期性排列中分别插入了 2、4、6、8 个缺陷 A, 缺陷个数正好等于 m , 分别与光子晶体 $(BAB)_8(AB)_m(BAB)_8$ 和 $(BAB)_8(BA)_m(BAB)_8$ 对应 $m/2$ 个缺陷 A。而当缺陷的光学厚度等于 $\lambda_0/4$ 时,每个缺陷在对应的禁带内产生 1 个缺陷模,于是第2、3组透射峰各有 $m/2$ 个透射峰, m 取其他偶数时上述关系仍然成立,正好与计算结果一致;当 m 取奇数 1 时,光量子阱 $(BAB)_8(AB)_1(BAB)_8(BA)_1(BAB)_8$ 可以看成在基本单元 (BAB) 的周期性排列中形成 2 个空位缺陷 \overline{B} , 表示为 $(BAB)_8(\overline{B}AB)(BAB)_8(BA\overline{B})(BAB)_8$, m 取奇数 3 时,光量子阱 $(BAB)_8(AB)_3(BAB)_8(BA)_3(BAB)_8$ 相当于在基本单元 (BAB) 的周期性排列中插入 2 个缺陷 A, 且形成 2 个空位缺陷 \overline{B} , 总计 4 个缺陷, 表示成 $(BAB)_8A(BAB)(\overline{B}AB)(BAB)_8(BA\overline{B})(BAB)A(BAB)_8$, 依此类推可知, m 等于任意正奇数时,光量子阱 $(BAB)_8(AB)_m(BAB)_8(BA)_m(BAB)_8$ 相当于在 (BAB) 的周期性排列中插入 $m-1$ 个缺陷 A, 且形成 2 个空位缺陷 \overline{B} , 总计 $m+1$ 个缺陷, 分别与光子晶体 $(BAB)_8(AB)_m(BAB)_8$ 和 $(BAB)_8(BA)_m(BAB)_8$ 对应 $(m+1)/2$ 个缺陷。空缺缺陷与实物缺陷一样,同样会产生缺陷模^[1],故光学厚度为 $\lambda_0/4$ 时,第2、3组透射峰各有 $(m+1)/2$ 个透射峰。又因为这两组透射峰具有双线结构,所以每组透射峰有 $m+1$ (m 取奇数)或 m (m 取偶数)条透射峰。当内阱的周期数取某一正整数 n 时,光量子阱禁带内有 $2m+n+3$ (m 取奇数)或 $2m+n+1$ (m 取偶数)条透射峰。

2) 随着外阱周期数 m 的增大,第2组和第3组透射峰的位置也随之变化。具体表现为 m 增大时,透射

峰都向中心频率靠近,即低频端的透射峰随 m 的增大发生蓝移,而高频端的透射峰随 m 的增大发生红移。但 m 对这两组透射峰的透射率影响不大。

3) 为了体现周期数 m 对第2、3组透射峰双线间距的调控特性,在 m 取某一值的情况下给第2组透射峰从右向左编号,右起的第1、2个透射峰的序号分别记为1、2,其他几个透射峰的编号依此类推, m 分别取6、7和8时序号为1和2的透射峰局部放大如图4所示。图中的数字1和2表示透射峰的序号。 m 增大时,外阱 $(AB)_m(BA)_m$ 的厚度增大,分势阱 $(AB)_m$ 和 $(BA)_m$ 对应部分的间距增大,分势阱间的耦合作用减弱,故双线结构慢慢趋于简并。这与图4所示的结果一致。

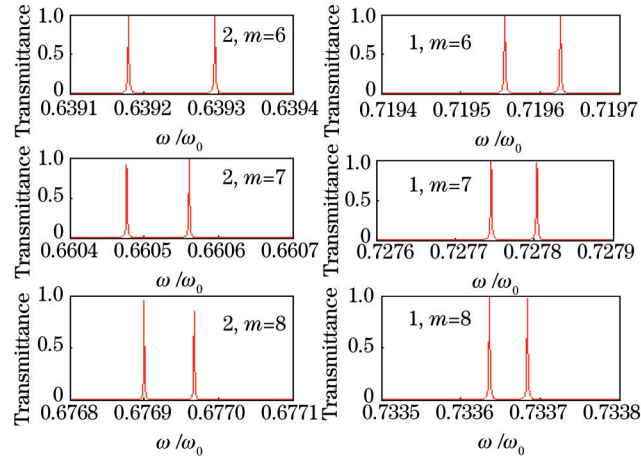


图4 外阱的周期数 m 不同时对称嵌套式光子晶体量子阱的透射谱的局部放大图

Fig.4 Local enlarged views of transmission spectra of symmetric nested photonic crystal quantum wells with different m

3.4 折射率对透射谱的影响

其他参数保持不变,令光波垂直入射,折射率 n_a 和 n_b 取一系列不同值,图5给出了对应光量子阱 $(BAB)_8(AB)_6(BAB)_8(BA)_6(BAB)_8$ 的透射谱。

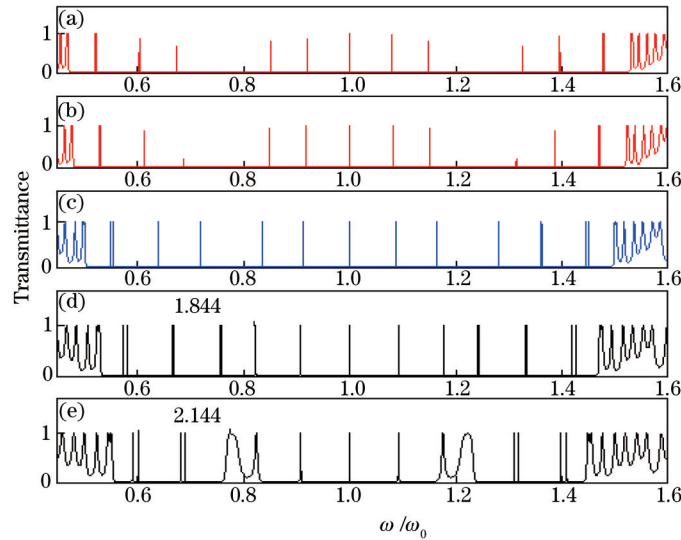


图5 折射率不同时对称嵌套式光子晶体量子阱的透射谱。(a) $n_a=4.07$, $n_b=1.544$; (b) $n_a=3.87$, $n_b=1.544$;

(c) $n_a=3.37$, $n_b=1.544$; (d) $n_a=3.37$, $n_b=1.844$; (e) $n_a=3.37$, $n_b=2.144$

Fig.5 Transmission spectra of symmetric nested photonic crystal quantum wells with different refractive indexes.

(a) $n_a=4.07$, $n_b=1.544$; (b) $n_a=3.87$, $n_b=1.544$; (c) $n_a=3.37$, $n_b=1.544$; (d) $n_a=3.37$, $n_b=1.844$; (e) $n_a=3.37$, $n_b=2.144$

由图5可知,随着低折射率介质B折射率 n_b 的增大,第2、3组透射峰分别发生蓝移和红移,且透射峰的双线结构越来越明显,当 n_b 稍大时两组透射峰内侧的透射峰出现了不规则的现象,而禁带内第1组透射峰随 n_b 的增大向两侧对称展宽,透射峰之间的频率间隔增大;随着高折射率介质A折射率 n_a 的增大,第2、3组透射峰分别发生红移和蓝移,且透射峰的双线间距慢慢变小,当 n_a 较大时两组透射峰都趋于单线,而禁带内

第1组透射峰随 n_a 的增大向中心频率靠拢,透射峰之间的频率间隔减小。

为了进一步分析出现上述现象的原因,给出与图5对应参数下光子晶体 $(BAB)_8$ 和 $(AB)_6(BA)_6$ 的透射谱如图6所示。由图6可知,随着 n_b 的增大:1) 外阱 $(AB)_6(BA)_6$ 的2个通带分别发生蓝移和红移,光子局域态发生相应的变化,故这两组透射峰随 n_b 的增大分别发生蓝移和红移现象;2) 由于 $(AB)_6(BA)_6$ 的2个通带向中心频率靠拢,从能级的角度讲2个分势阱之间的等效距离减小,分势阱的耦合强度增大,导致透射峰的双线结构现象更加明显;3) 外阱 $(AB)_6(BA)_6$ 的通带向中心频率靠拢的同时,内阱 $(BAB)_8$ 的中心通带向两侧对称扩展,当内阱通带的低频端与外阱左侧通带的高频端或内阱通带的高频端与外阱右侧通带的低频端重叠时,通带重叠部分表现为通带,相应的透射峰消失[如图5(e)中 $n_b=2.144$ 情况]。由于内阱 $(BAB)_8$ 的中心通带向两侧对称扩展,第1组透射峰向两侧扩展。结合图6(a)、(b)和(c)也可分析 n_a 对透射峰的影响。

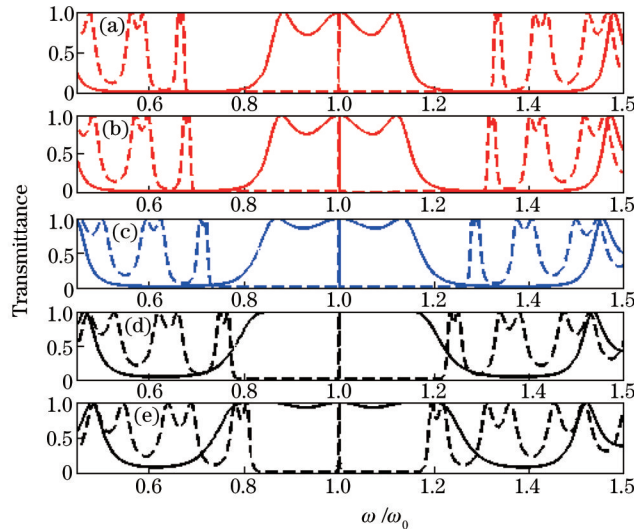


图6 介质的折射率不同时 $(BAB)_8$ 和 $(AB)_6(BA)_6$ 的透射谱。(a) $n_a=4.07, n_b=1.544$; (b) $n_a=3.87, n_b=1.544$;

(c) $n_a=3.37, n_b=1.544$; (d) $n_a=3.37, n_b=1.844$; (e) $n_a=3.37, n_b=2.144$ [实线表示 $(BAB)_8$; 虚线表示 $(AB)_6(BA)_6$]

Fig.6 Transmission spectra of $(BAB)_8$ and $(AB)_6(BA)_6$ with different indexes. (a) $n_a=4.07, n_b=1.544$; (b) $n_a=3.87, n_b=1.544$; (c) $n_a=3.37, n_b=1.544$; (d) $n_a=3.37, n_b=1.844$; (e) $n_a=3.37, n_b=2.144$ [solid line represents $(BAB)_8$; dotted line represents $(AB)_6(BA)_6$]

4 结 论

镜像对称嵌套式光子晶体 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 透射谱的主禁带内出现三组透射峰,第1组与内阱 $(BAB)_n$ 对应,有 $n+1$ 条单线结构的透射峰;而禁带两侧的两组透射峰都具有双线结构,各有 $m+1$ (m 是奇数)或 m (m 是偶数)个共振峰,禁带内总计有 $2m+n+3$ (m 是奇数)或 $2m+n+1$ (m 是偶数)条窄透射峰。势阱的周期数和介质的折射率对对称嵌套式光子晶体量子阱的调制规律如下:

1) $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 的透射峰数比相同结构下单势阱光子晶体量子阱的透射峰数多 $(2m+2)$ (m 取奇数)或 $2m$ (m 取偶数)条;

2) 随着内阱 $(BAB)_n$ 周期数 n 的增大,第2、3组透射峰的双线结构慢慢趋于简并,但透射峰的位置变化不明显;而随着外阱 $(AB)_m(BA)_m$ 周期数 m 的增大,第2、3组透射峰逐渐增多,且透射峰向中心频率靠近,谱线的双线现象减弱;

3) 折射率对透射峰数没有影响,但对透射峰的位置和双线的简并程度有调制作用。当高折射率介质A的折射率增大时,第2、3组透射峰远离中心频率,且双线趋于简并,而禁带内第1组透射峰向中心频率靠近;随着低折射率介质B的折射率增大,第2、3组透射峰都向中心频率靠近,且谱线的双线分裂程度增大,而第1组透射峰慢慢远离中心频率。

光子晶体 $(BAB)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(BAB)_k$ 既具有单量子阱的滤波特性,又具有双量子阱的滤波特性。与相同结构下单或双势垒、单势阱光子晶体量子阱相比,信道的频率使用范围得到了一定程度的扩展,信道数目也得到了增多;与以往报道的双或多势阱光子晶体量子阱相比,增加了一组具有单线结构的信道,在某些区域能分辨出频率相

差很小的信道,而有些区域又能产生分散的信道;可通过阱的周期数及折射率方便调整透射峰数及双线间距,表现出丰富的滤波特性,这些特性对光子晶体量子阱多通道滤波器及光开关的设计具有一定的指导意义。

参考文献

- 1 Jiang Shaoji, Li Jianrong, Tang Jijia, *et al.*. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(10): 605-607.
- 2 Chen Yihang. Merging of omnidirectional defect modes in one-dimensional photonic crystals with a single-negative material defect[J]. *J Opt Soc Am B*, 2008, 25(6): 972-975.
- 3 Su An, Li Xianji. Defect modes of one-dimensional photonic crystal for realizable multiple channeled filter[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(5): 532-536.
苏安, 李现基. 实现多种通道滤波功能的一维光子晶体缺陷模[J]. *激光与红外*, 2010, 40(5): 532-536.
- 4 Chen Ying, Shi Jia, Lu Bo, *et al.*. Study on double defect mode sensing mechanism of air gate photonic crystal based on tight-binding method[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0514001.
陈颖, 石佳, 卢波, 等. 基于紧束缚法的空气栅光子晶体双缺陷模传感机理研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0514001.
- 5 Fan Qingbin, Li Chuanqi, Zhang Xiurong, *et al.*. Design and numerical studies of annular line defect photonic crystal filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 012301.
范庆斌, 李传起, 张秀容, 等. 环形线缺陷光子晶体滤波器的设计与数值研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 012301.
- 6 Chen Ying, Wang Wenyue, Fan Huiqing, *et al.*. Achievement of multi-channel simultaneous adjustable filtering using hetero-structure photonic crystal cavities[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3399-3403.
陈颖, 王文跃, 范卉青, 等. 异质结构光子晶体微腔实现多通道可调谐滤波[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3399-3403.
- 7 Wu Liheng, Wang Minghong. Investigation on the characteristics of photonic crystal channel drop filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0505003.
吴立恒, 王明红. 光子晶体信道分路滤波器特性的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0505003.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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. 结构周期数对光子晶体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.
- 11 Su An. Effect of lattice constants on transmission spectra of photonic crystal quantum well[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 200-205.
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): 200-205.
- 12 Liu Mi, Ouyang Zhengbiao, Xu Jun, *et al.*. Omnidirectional and multi-channel filtering by photonic quantum wells with negative-index materials[J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5861-5866.
- 13 Pan Jihuan, Su An, Meng Chengju. Modulation of medium refractive index on filter performance of photonic crystal quantum well[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 833-837.
潘继环, 苏安, 蒙成举. 介质折射率对光子晶体量子阱滤波性能的调制[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 833-837.
- 14 Liu Jing, Huang Chongqing, Sun Junqiang, *et al.*. Spectral splitting in multiple quantum well structures composed of photonic crystals[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, 25(2): 203-207.
刘靖, 黄重庆, 孙军强, 等. 光子晶体多量子阱中的谱线分裂[J]. *量子电子学报*, 2008, 25(2): 203-207.
- 15 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.
- 16 Fei Hongming, Jiang Yuankai, Liang Jiuqing, *et al.*. Transmission spectra through a photonic double quantum well system [J]. *Chin Phys B*, 2009, 18(6): 2377-2382.
- 17 Kang Yongqiang, Gao Peng, Liu Hongmei, *et al.*. Resonant modes in photonic double quantum well structures with single-

- negative materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(6): 064207.
康永强, 高 鹏, 刘红梅, 等. 单负材料组成一维光子晶体双量子阱结构的透射峰[J]. *物理学报*, 2015, 64(6): 064207.
- 18 Kang Yongqiang, Yang Chunhua, Yang Chengquan, *et al.*. Photonic crystal multiple quantum well structure with single negative materials[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(12): 1495–1499.
康永强, 杨春花, 杨成全, 等. 单负材料组成光子晶体的多量子阱结构[J]. *发光学报*, 2014, 35(12): 1495–1499.
- 19 Su An, Gao Yingjun. The multi-channel filtering for three-quantum well structure of the one-dimensional photonic crystal [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2011, 57(3): 191–195.
苏 安, 高英俊. 实现多通道滤波功能的一维光子晶体三量子阱结构[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2011, 57(3): 191–195.
- 20 Born M, Wolf E. *Principles of optics*[M]. Yang Jiasun, Transl. 7th Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 59–61.
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃尔夫. *光学原理*[M]. 杨葭荪, 译. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 59–61.

栏目编辑: 张 雁