

实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器

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, 研究单势垒、双重势垒一维光子晶体量子阱滤波器的滤波品质, 结果表明, 光子晶体量子阱滤波器的滤波品质对垒层介质折射率的响应灵敏: 垒层介质折射率越大或垒、阱层介质折射率之和的比值越大, 单势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质越高; 内垒层介质折射率之和, 或外垒层介质折射率之和与阱层介质折射率之和的比值越大, 特别是内、外垒层介质折射率之和与阱层介质折射率之和的比值越大, 双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质越高; 随着垒、阱层介质折射率之和的比值增大, 双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质提高的速度比单势垒光子晶体量子阱快。这些特性, 对光子晶体量子阱的理论研究和新型高品质量子光学滤波器件的实际设计等, 均具有一定的指导意义。

关键词 材料; 光子晶体量子阱; 折射率之和; 滤波器; 品质因子

中图分类号 O431; O484; O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1006001

Filter with One-Dimensional Photonic Crystal Quantum Well Possessing High-Quality Filtering Functions

Su An¹ Meng Chengju¹ Gao Yingjun²

(¹ Department of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi 546300, China)
(² Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract The qualities of the filters with one-dimensional photonic crystal quantum well of single and double barriers are studied by transmission matrix method. The results show that the quality of experimented filter has a delicate response to the refractive index of barrier layer medium. The larger the refractive index of barrier layer medium, or the larger the ratio between the refractive index sum of barrier layer medium and well layer medium, the higher the quality of the filter with photonic crystal quantum well of single barrier is. The quality of the filter with photonic crystal quantum well of double barrier is higher when the ratio between the refractive index sum of inner barrier medium and well layer medium, or the ratio between the refractive index sum of outer barrier medium and well layer medium, especially the ratio of the summed refractive index of inner and outer barrier mediums to the summed refractive index of well layer medium, become larger. As the ratio between the refractive index sum of barrier layer and well layer is increasing, the quality of filter with photonic crystal quantum well of double barrier improves more quickly than the one of single barrier. These characteristics provide definite reference to theoretical study of photonic crystal quantum well and the practical design of new quantum optical filter of high quality.

Key words materials; photonic crystal quantum well; refractive index sum; filters; quality factor

OCIS codes 160.5298; 160.4670; 160.4760; 160.2100

1 引言

自从光子晶体^[1-2]的概念被提出以来, 人们在理论和实验研究中取得了一系列的成果, 光子晶体展现出广阔的应用前景, 尤其是在光通信领域, 表现

出以光子替代电子传输信息的趋势^[3-16]。随着研究的深入, 人们发现了类似于半导体量子阱裁剪电子的特性, 开始构造光子晶体量子阱结构以更好地控制光子的行为, 从而获得更高性能的光学滤波效

收稿日期: 2013-01-08; 收到修改稿日期: 2013-04-09

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)

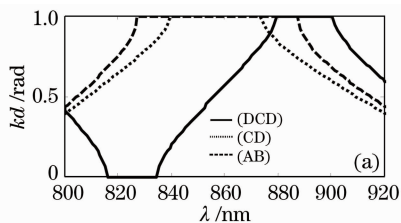
作者简介: 苏 安(1973—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: suan3283395@163.com

果。只要合理地匹配参数,使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,两块光子晶体即可组合成光子晶体量子阱结构。区别于普通结构光子晶体,光子晶体量子阱对处于其中的光产生更强的局域作用而禁止光的传播,被强局域限制在量子阱中的光,通常会发生频率的量子化现象,频率量子化后的光以共振隧穿的方式通过光子晶体。也正是由于光频率的量子化,使能共振隧穿通过光子晶体的光频率范围很窄,宏观上体现在透射谱中分立的窄透射峰。光子晶体量子阱对光的局域裁剪特性,对设计制作高品质的光学滤波器具有积极的指导价值^[13-16]。

当普通结构光子晶体基元介质的高低折射率比值增大时,光子晶体的禁带会加宽,而且禁带中的透射峰会变窄,即滤波品质提高^[14]。光子晶体量子阱结构由垒层和阱层组成,当垒层结构变化时,光子晶体量子阱的势垒会随之改变,光子晶体量子阱对处于其中的光子的限制作用也会变化。类似于普通结构光子晶体,当光子晶体量子阱垒层的折射率变化时,光子晶体量子阱的分立透射峰性能也一定会改变,即光子晶体量子阱的滤波品质会改变。此研究工作对光子晶体量子阱的理论研究和实际应用均具有指导作用。因此,本文构造单势垒、双重势垒一维(1D)光子晶体量子阱滤波器,并研究垒层介质折射率结构对滤波器品质的影响规律,为设计量子光学滤波器提供指导。

2 研究理论与方法

采用传输矩阵法^[6-8,13-16],根据薄膜光学电磁理论,光在各分层介质中传播时,可分别用分层传输矩阵和总传输矩阵来描述光在各层介质和整体介质中



的传输行为,总传输矩阵等于各分层介质传输矩阵之积。由总传输矩阵即可算出光在光子晶体中传播的透射系数、反射系数、透射率、反射率及电场分布等。

滤波器的滤波品质普遍以品质因子 Q 来衡量,对于光子晶体滤波器,品质因子 Q 定义为共振透射模的中心波长与共振透射模的半峰全宽(FWHM)的比值,即 $Q = \lambda_c / \Delta\lambda$,其中 λ_c 是共振透射模(透射峰)的中心波长, $\Delta\lambda$ 是透射模的 FWHM^[9-13]。

3 光子晶体量子阱结构模型及其共振透射谱

3.1 光子晶体量子阱结构模型

研究的对象为一维光子晶体量子阱结构模型 $(AB)_k(CD)_m(DCD)_n(DC)_m(BA)_k$,各介质层对应的物质及其折射率、厚度分别是:A 为碲化铅(PbTe),B 为二氧化硅(SiO_2),C 为硫化砷(As_2S_3),D 为二氧化硅(SiO_2), $n_A = 4.10, d_A = 469.9 \text{ nm}, n_B = 1.45, d_B = 1328.7 \text{ nm}, n_C = 2.60, d_C = 741.0 \text{ nm}, n_D = 1.45, d_D = 1329.0 \text{ nm}$ 。 k, m 与 n 分别是介质的排列周期数,可取任意正整数。

从结构上看,光子晶体 $(DCD)_n$ 相当于双重势垒光子晶体量子阱结构的阱,光子晶体 $(CD)_m$ $(DC)_m$ 相当于双重势垒光子晶体量子阱结构的内垒,而 $(AB)_k$ $(BA)_k$ 则可看作是双重势垒光子晶体量子阱结构的外垒。此双重势垒光子晶体量子阱结构也可看成是两个单势垒光子晶体量子阱结构 $(CD)_m(DCD)_n(DC)_m$ 和 $(AB)_k(DCD)_n(BA)_k$ 内外嵌套而成。通过数值计算模拟一维光子晶体 $(DCD)_5$ 、 $(CD)_5$ $(DC)_5$ 和 $(AB)_5$ $(BA)_5$ 的能带结构,分别如图 1(a)、(b)中的实线、虚线和间断线所示。

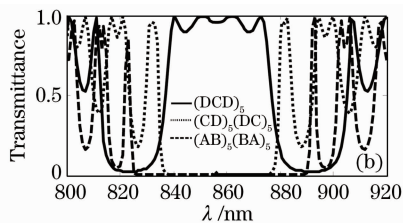


图 1 一维光子晶体带隙结构。(a) 色散关系; (b) 能带结构

Fig. 1 Band-gap structures of 1D photonic crystals. (a) Dispersion relationship; (b) band structure

由图 1 可见,在 834~879 nm 波长范围内,光子晶体 (DCD) 或 $(DCD)_5$ 的中心通带(能带)完全处于 (CD) 或 $(CD)_5$ $(DC)_5$ 和 (AB) 或 $(AB)_5$ $(BA)_5$ 的中心禁带之中,分别构成单势垒光子晶体量子阱结构 $(CD)_m(DCD)_n(DC)_m$ 和 $(AB)_k(DCD)_n(BA)_k$ 。同

时,在 824~891 nm 波长范围内, (CD) 或 $(CD)_5$ $(DC)_5$ 的中心禁带又完全处于 (AB) 或 $(AB)_5$ $(BA)_5$ 的中心禁带之中,即光子晶体量子阱 $(CD)_m(DCD)_n(DC)_m$ 又完全处于 $(AB)_k(BA)_k$ 的禁带之中,所以 $(DCD)_n$ 的中心能带和 $(CD)_m(DC)_m$ 及 $(AB)_k$

$(BA)_k$ 的中心禁带,三者共同联合构成一个双重势垒一维光子晶体量子阱结构 $(AB)_k(CD)_m(DCD)_n(DC)_m(BA)_k$ 。可见,上述参数所构成的光子晶体模型的带隙结构能合理地组成单势垒、双重势垒光子晶体量子阱结构。

3.2 光子晶体量子阱结构的共振透射谱

进一步计算模拟光子晶体量子阱 $(CD)_3(DCD)_2(DC)_3$ 、 $(AB)_3(DCD)_2(BA)_3$ 和 $(AB)_3(CD)_3(DCD)_2(DC)_3(BA)_3$ 的透射谱,如图 2 所示。当光在光子晶体量子阱内传播时,出现了明显的频率量子化现象,这是因为光通过光子晶体量子阱时,处于阱层频率范围的光将受到量子阱的限制作用而被禁止传播,并被局限于阱层中。这种情况下,光只能以共振隧穿的方式通过光子晶体,产生频率量子化共振隧穿的光频带都很窄,因而出现的共振透射峰往往都是分立且细窄的^[13-16]。

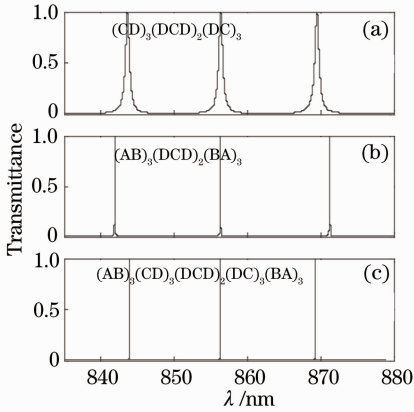


图 2 一维光子晶体量子阱的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of 1D photonic quantum wells

而且,量子化的局域光子态产生的分立共振透射峰的带宽明显不同,其中以双重势垒光子晶体量子阱 $(AB)_3(CD)_3(DCD)_2(DC)_3(BA)_3$ 的透射峰最精细,单势垒量子阱 $(AB)_3(DCD)_2(BA)_3$ 次之, $(CD)_3(DCD)_2(DC)_3$ 较宽;分立透射峰的数目均与阱层周期数 n 有关,为 $(n+1)$ 条,且每条的透射率均为 100%,即透射峰的数目和频率位置可以通过 n 调制,此特性可实现多通道光学滤波功能; $(n+1)$ 条透射峰对称分布于中心波长 ($\lambda_c = 856.4$ nm) 两侧,即 n 为偶数时中心波长(频率)处恒定出现透射峰。所以,在讨论单势垒、双重势垒光子晶体量子阱的滤波品质时,尽量取同一频率处透射峰进行比较,比如取 n 为偶数时各光子晶体量子阱中心波长处的透射峰为研究对象,可提高可比性。

4 垒层介质折射率对单势垒光子晶体量子阱滤波品质的影响

根据品质因子公式 $Q = \lambda_c / \Delta\lambda$ 和图 2(a)、(b) 中心波长处透射峰的 FWHM,可计算出光子晶体量子阱 $(CD)_3(DCD)_2(DC)_3$ 和 $(AB)_3(DCD)_2(BA)_3$ 的滤波品质因子,分别为 $Q_1 = 1.3769 \times 10^3$, $Q_2 = 1.7840 \times 10^4$ 。显然,单势垒光子晶体量子阱 $(AB)_3(DCD)_2(BA)_3$ 的滤波品质比 $(CD)_3(DCD)_2(DC)_3$ 的滤波品质高。从结构上看,两量子阱的阱层结构相同,垒层中低折射率介质的折射率也相同,但 $(AB)_3(DCD)_2(BA)_3$ 垒层中介质 A 的折射率 ($n_A = 4.10$) 大于 $(CD)_3(DCD)_2(DC)_3$ 垒层中介质 C 的折射率 ($n_C = 2.60$),表明其他参数相同的情况下,光子晶体量子阱垒层高折射率介质的折射率越大,则共振隧穿产生的分立透射峰就越精细,即光子晶体量子阱的滤波品质越高。因为垒层高折射率介质的折射率越大,光子晶体量子阱的势垒越高,则对处于阱中的光场局域限制作用就越强,导致能共振隧穿透过光子晶体的光频率范围就越窄^[14]。但现实中介质折射率的增大是有限度的,即不能无限制地通过增大垒层某介质层的折射率来提高光子晶体量子阱的滤波品质,要想获得更大的调节空间,必须寻求其他方法。

对普通结构的光子晶体,当基元介质折射率的差异(比值)越大,其透射峰就越窄,即滤波品质越好。类似地,对于光子晶体量子阱,以 $\Sigma n_b = (n_A + n_B) \times k$ 或 $(n_C + n_D) \times m$, $(n_A + n_B) \times k + (n_C + n_D) \times m$ 分别表示单势垒、双重势垒光子晶体量子阱结构垒层的折射率和(垒层左侧或右侧各介质层的折射率之和),以 $\Sigma n_t = (n_D + n_C + n_B) \times n$ 表示光子晶体量子阱结构阱层的折射率, $R = \Sigma n_b / \Sigma n_t$ 表示垒

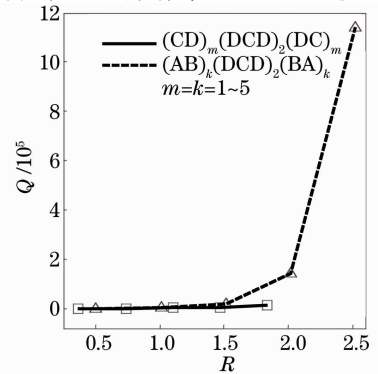


图 3 单势垒一维光子晶体量子阱滤波品质因子随 R 变化的曲线

Fig. 3 Curves of filter quality factor of 1D photonic crystal of single-barrier quantum well versus R

层、阱层折射率之和的比值。则单势垒光子晶体量子阱 $(CD)_3(DCD)_2(DC)_3$ 和 $(AB)_3(DCD)_2(BA)_3$ 的 R 值分别为 $R_1=1.1045, R_2=1.5136$ 。结合图3可见,单势垒光子晶体量子阱的垒、阱层介质折射率之和的比值越大,滤波品质也越高。因此,通过增加垒层光子晶体的周期数以增大 R ,即可提高光子晶体量子阱滤波器的品质^[13-14]。

进一步取 $k=m=1\sim 5$,分别算出光子晶体量子阱 $(CD)_m(DCD)_2(DC)_m$ 和 $(AB)_k(DCD)_2(BA)_k$ 的 R 值和对应中心波长处透射峰的 Q 值,并作 $Q-R$ 曲线,如图3所示。随着垒、阱层介质折射率之和的比值 R 增大,单势垒光子晶体量子阱的滤波品质 Q 值迅速提高,而且垒层高折射率介质的折射率越大,滤波品质提高得越快。如 $k=m=1$ 时,光子晶体量子阱 $(CD)_1(DCD)_2(DC)_1$ 和 $(AB)_1(DCD)_2(BA)_1$ 的 R 值分别为0.3682与0.5045,对应的 Q 值分别等于 0.0083×10^4 与 0.0003×10^6 ;当 $k=m=5$ 时,光子晶体量子阱 $(CD)_5(DCD)_2(DC)_5$ 和 $(AB)_5(DCD)_2(BA)_5$ 的 R 值分别为1.8409与2.5227,对应的 Q 值快速提高到 1.4515×10^4 与 1.1388×10^6 ,如图3中的实线和间断线所示。

5 垒层介质折射率和对双重势垒光子晶体量子阱滤波品质的影响

为找出垒层介质折射率和对双重势垒光子晶体量子阱滤波品质的影响规律,可取光子晶体量子阱内、外垒层周期数 $m=1\sim 5$,或 $k=1\sim 5$,或 $k, m=1\sim 5$ 时,分别计算出对应的 R 值和 Q 值,并作 $Q-R$

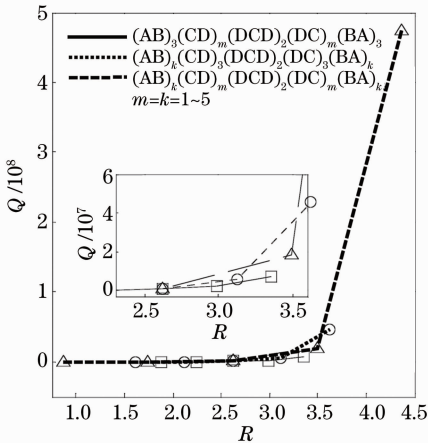


图4 双重势垒一维光子晶体量子阱滤波品质因子随 R 变化的曲线

Fig. 4 Curves of filter quality factor of 1D photonic crystal of double-barrier quantum well versus R

曲线进行比较。如图4所示分别是双重势垒光子晶体量子阱 $(AB)_3(CD)_m(DCD)_2(DC)_m(BA)_3$ 、 $(AB)_k(CD)_3(DCD)_2(DC)_3(BA)_k$ 和 $(AB)_k(CD)_m(DCD)_2(DC)_m(BA)_k$ 的滤波品质因子 Q 随 R 值的变化曲线,图中的插图为曲线局部放大效果图。

由图4可见,随着内垒层介质折射率之和,或外垒层介质折射率之和与阱层介质折射率之和的比值 R 增大,双重势垒光子晶体量子阱的滤波品质因子 Q 迅速提高,特别是内、外垒层介质折射率之和与阱层介质折射率之和的比值增大时,双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质因子提高得更快。如,当 $m=1, 5, k=1, 5, m=k=1, 5$ 时,各双重势垒光子晶体量子阱的 R 值分别为 $R_{m1}=1.8818, R_{m5}=3.3545, R_{k1}=1.6091, R_{k5}=3.6273, R_{mk1}=0.8727, R_{mk5}=4.3636$,对应中心波长处透射峰的滤波品质因子分别等于 $Q_{m1}=0.0656\times 10^6, Q_{m5}=7.4470\times 10^6, Q_{k1}=0.0011\times 10^7, Q_{k5}=4.5675\times 10^7, Q_{mk1}=1.0016\times 10^3, Q_{mk5}=4.7315\times 10^8$,如图4中的实线、虚线和间断线所示。进一步可计算出各光子晶体量子阱的 R 和 Q 的增大倍数分别为: $R_{m5}/R_{m1}=1.7826$ 倍, $Q_{m5}/Q_{m1}=1.1352\times 10^2$ 倍, $R_{k5}/R_{k1}=2.2542$ 倍, $Q_{k5}/Q_{k1}=1.4152\times 10^4$ 倍, $R_{mk5}/R_{mk1}=5.0001$ 倍, $Q_{mk5}/Q_{mk1}=4.7239\times 10^5$ 倍。双重势垒光子晶体量子阱的内、外垒层介质折射率之和与阱层介质的折射率之和的比值 R_{mk} 增大的速度最快,对应的滤波品质因子 Q_{mk} 提高的速度也最快,外垒层介质折射率之和与阱层介质折射率之和的比值 R_k 及 Q_k 增大速度次之,内垒层介质折射率之和与阱层介质折射率之和的比值 R_m 及 Q_m 增大速度相对较慢。

可见,当垒层介质折射率之和与阱层介质的折射率之和的比值越大,则双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质就越高。据此,也可推断双重势垒光子晶体量子阱的滤波品质一定高于单势垒光子晶体量子阱,验证如下。

取 $m=1\sim 5, k=1\sim 5$ 时,分别作单势垒光子晶体量子阱 $(CD)_m(DCD)_2(DC)_m$ 和 $(AB)_k(DCD)_2(BA)_k$,双重势垒光子晶体量子阱 $(AB)_3(CD)_m(DCD)_2(DC)_m(BA)_3$ 和 $(AB)_k(CD)_3(DCD)_2(DC)_3(BA)_k$ 的 $Q-R$ 曲线,如图5所示,图中的插图为曲线局部放大效果图。由图5可见,在阱层介质折射率相等的情况下,当垒层介质的折射率之和越大,则垒、阱层介质折射率之和的比值 R 就越大,那么光子晶体量子阱滤波器的滤波品质 Q 就越高。由于双重势垒光子晶体量子阱具有双重势垒结构,则它的

垒层介质折射率和比单势垒光子晶体量子阱的折射率和大得多,对应的 R 值也比单势垒光子晶体量子阱大得多,因此双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质远高于单势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质,如图 5 中的实线、虚线、点划线和间断线所示。对比图 4 和图 5 可知,双重势垒光子晶体量子阱 $(AB)_k(CD)_m(DCD)_2(DC)_m(BA)_k$ 的滤波品质比单势垒光子晶体量子阱的滤波品质高,其 $Q-R$ 曲线比图 5 中的任何一条曲线都陡峭。

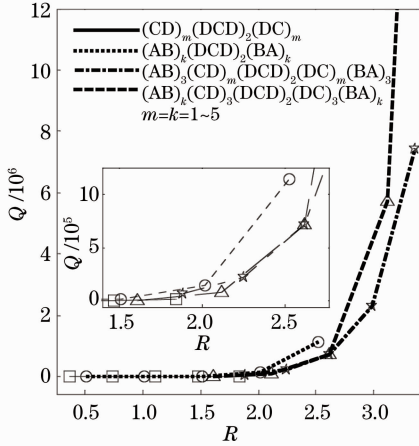


图 5 单势垒、双重势垒一维光子晶体量子阱滤波品质因子随 R 变化的曲线

Fig. 5 Curves of filter quality factor with 1D photonic crystal of single-barrier and double-barrier quantum well versus R

综合研究结果可知,所设计的光子晶体量子阱滤波器具有如下优势:1) 滤波品质高,对于双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质更高,当 $m = k = 5$ 时,中心波长处透射峰的品质因子 Q 高达 4.7315×10^8 ,FWHM 仅为 $\Delta\lambda = 1.8100 \times 10^{-6}$ nm,即共振透射峰出现在很窄的波长范围内(856.40031819~856.40031638 nm),透射峰变得超精细(极窄),光子晶体量子阱滤波器几乎能实现某一个频率点的超窄带滤波效果;2) 滤波器品质调节控制的可操作性强,可完全避开普通结构光子晶体滤波器提高滤波品质遇到的介质折射率值上限问题。光子晶体量子阱滤波器通过改变垒层光子晶体周期数提高垒层、阱层介质折射率的比值,即可实现提高滤波器滤波品质的目的,特别是双重势垒光子晶体量子阱滤波器,可以通过调节内垒层或外垒层或内、外垒层光子晶体周期数来增大垒层、阱层介质折射率的比值,以提高滤波品质,灵活性、可操作性更强,且不受介质折射率值上限问题的影响。因此,如果要获得更高品质和更具可调性的光学滤

波器件,光子晶体量子阱特别是双重势垒光子晶体量子阱滤波器应该是最佳的设计选择之一。

6 结 论

利用传输矩阵法理论,构造并研究了单势垒、双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质对垒层介质折射率的响应规律,得出如下结论:

1) 垒层介质折射率越大或垒、阱层介质折射率的比值越大,单势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质越高。

2) 内垒层介质折射率和,或外垒层介质折射率与阱层介质折射率的比值越大,双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质越高,特别是内、外垒层介质折射率与阱层介质折射率的比值越大,双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质会更高。

3) 双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质高于单势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质,且随着垒、阱层介质折射率的比值增大,双重势垒光子晶体量子阱滤波器的滤波品质提高的速度比单势垒光子晶体量子阱滤波器快。

利用光子晶体量子阱滤波器的特性,通过提高垒、阱层介质折射率的比值来快速提高光子晶体量子阱滤波器的滤波品质,对研究光子晶体量子阱及其量子光学滤波器件具有指导意义。

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 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002. 黎磊,刘桂强,陈元浩.光子晶体异质结构耦合波导光开关[J].光学学报,2013,33(1):0123002.
- 4 Chen Heming, Wang Guodong. Design of new photonic crystal all-optical switching based on dynamical shift of defect mode[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0323006. 陈鹤鸣,王国栋.一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计[J].光学学报,2011,31(3):0323006.
- 5 Li Xin, Yang Ming, Guo Shiliang, et al.. Characteristics of photonic-crystal waveguides with random media [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1006001. 李欣,杨明,郭士亮,等.含随机介质的光子晶体波导特性[J].中国激光,2012,39(10):1006001.
- 6 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.
- 7 Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1535-1538.
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.
- 8 Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2041-2044.
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2041-2044.
- 9 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with one-dimensional photonic bandgap[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802009.
冯 琛, 冯国英, 周 昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802009.
- 10 Jiang Junzhen, Qiang Zexuan, Xu Xiaofu, *et al.*. Air-hole type photonic crystal add-drop filters based on total-internal-reflection ring resonators[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0505001.
蒋俊贞, 强则焯, 许晓赋, 等. 基于内全反射微环空气孔型光子晶体光分插滤波器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0505001.
- 11 Deng Xinhua, Liu Nianhua, An Liping. Tunable multiple-channel filters based on photonic heterostructures using single-negative materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(10): 1405-1409.
邓新华, 刘念华, 安丽萍. 基于单负材料光子晶体异质结构的可调多通道滤波器[J]. 科学通报, 2009, 54(10): 1405-1409.
- 12 Yu Jianli, Shen Hongjun, Ye Song, *et al.*. Design of novel highly efficient photonic crystal multi-channel drop filter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106003.
余建立, 沈宏君, 叶 松, 等. 一种新型高效光子晶体多信道下载滤波器的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106003.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 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.
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.
- 16 Su An, Gao Yingjun. One-dimensional photonic crystal quantum-well structure containing complex dielectric constant [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 842-846.
苏 安, 高英俊. 含复介电常数一维光子晶体量子阱结构研究[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 842-846.

栏目编辑: 韩 峰