

# 激活性杂质对光子晶体量子阱滤波器特性的调制

苏 安<sup>1</sup> 蒙成举<sup>1</sup> 高英俊<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河池学院物理与机电工程学院, 广西 宜州 546300 )  
(<sup>2</sup> 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004 )

**摘要** 通过数值计算模拟的方法,研究激活性杂质对双重势垒光子晶体量子阱滤波器特性的调制。结果表明:无论在外垒层、内垒层还是阱层介质中掺入激活性杂质,光子晶体量子阱滤波器各通道均出现光增益放大和带宽变窄现象,而且存在不同光增益极大值和恒定带宽极小值现象。增益倍数和带宽对内垒层掺杂的响应相对外垒层的灵敏,而对多层介质掺杂的响应则比单介质层掺杂的灵敏,但不同的通道对掺杂的响应灵敏度不同。阱层掺入激活杂质时,阱中心通道对各介质层掺杂的响应灵敏度一样,但短波通道对多层介质掺杂响应比单层介质掺杂灵敏,而长波通道则相反;无论是外垒层、内垒层或阱层,对激活掺杂响应均存在相等的极限值。双重势垒光子晶体量子阱滤波器对激活性杂质的响应特性为光子晶体设计窄带宽、高品质的光学滤波和高倍数的光学放大器件提供了指导。

**关键词** 光学器件; 滤波带宽; 激活性杂质; 光子晶体量子阱; 光放大

**中图分类号** O431; O484; O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0306001

## Modulation of Activated Impurity on Filter Property of Photonic Crystal Quantum Well

Su An<sup>1</sup> Meng Chengju<sup>1</sup> Gao Yingjun<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract** Modulation of activated impurity on filter property of double barrier photonic crystal quantum well is studied by computational simulation method. The results show that no matter which layer the activated impurity is doped in, there appears light gain amplification (with different maximum values) and bandwidth narrowing (with constant minimum values) in filter channels of quantum well. With different sensitive responses in different channels, response of magnification and bandwidth to impurity in inner-barrier layer is more sensitive than the one in outer-barrier layer; similarly, the response to single-layer medium is more sensitive than the one to multilayer. When there is activated impurity in well layer, sensitivities of channel in center well responding to impurity in single-layer and in multilayer medium are the same, but the response sensitivity of shortwave channel to impurity in multilayer is more sensitive than that in single-layer medium. Inversely in long wave channel, no matter which layer activated impurity is doped in, the response sensitivities remain an equivalent extreme value. These properties provide positive guidance for design of photonic crystals with narrow bandwidths, high-quality optical filtering and high-multiples optical amplifiers.

**Key words** optical devices; filter bandwidth; activated impurity; photonic crystal quantum well; light amplification

**OCIS codes** 140.4480; 250.4480; 160.5298; 260.1180

## 1 引 言

光子晶体<sup>[1-2]</sup>是一种由不同薄膜介质周期性排

列形成的人工光学材料,其最突出的光学特性是存在光子禁带和光子局域。光子禁带可抑制自发辐

**收稿日期**: 2013-08-05; **收到修改稿日期**: 2013-09-18

**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

射,即频率处于其中的光将被禁止在光子晶体中传播。当适当地在光子晶体中掺入缺陷时,可使入射到光子晶体中的光子产生局域化,被局域的光将高度集中于缺陷位置,特别是当介质中掺入激活性杂质(如铒等)时,可极大提高缺陷处的光子态密度,从而使得相应频率处的受激辐射得到显著增强,在宏观上表现为高倍放大和高品质的缺陷模<sup>[3-9]</sup>。利用光子晶体禁带和光子局域特性,可实现人为控制光的行为。因此,光子晶体研究及其成果,已经成为光子替代电子进行信息传输的热门研究课题。

为实现更高品质的光学滤波效果,学者们又把目光投入到光子晶体量子阱(PQW)结构的研究。类似于半导体量子阱,光量子阱对光子具有局域作用和裁剪功能,而且光量子阱结构对光子的强局域作用更容易实现超窄带光学滤波效果<sup>[9-11]</sup>。不同于单势垒光量子阱结构,双重势垒光量子阱由于存在双重势垒结构,对处于势阱中的光的局域限制作用将更强,导致被强局域在双势垒势阱中的光发生更加明显的频率量子化效应,这种频率量子化产生的局域态,共振隧道贯穿通过光子晶体后形成的透射峰带宽将更窄,可实现更高品质的滤波功能<sup>[12-14]</sup>。根据文献报道,通过增大垒层光子晶体周期数或垒层高低折射率介质的折射率比值,可进一步提高双重势垒光量子阱滤波品质<sup>[12-14]</sup>。但众所周知,在光子晶体的实验中,周期数和介质折射率比值的增大是有限度的,而且光信息传输要求把吸收损耗降低到最小限度。

为克服自然介质折射率上限及光传输吸收损耗问题,本文在构造双重势垒光量子阱滤波器的基础上,在双重势垒光量子阱结构的阱层、内垒层和外垒层介质中引入激活性杂质,研究激活性杂质对双重势垒光量子阱滤波器带宽和光增益放大倍数的影响规律。寻找提高双重势垒光量子阱滤波器品质和光放大的方法,为光量子阱设计高品质光学滤波和高倍数光学放大器件提供依据。因此,研究激活性杂质对双重势垒光量子阱滤波特性的影响机制,具有

重要的理论和实际意义。

## 2 结构模型和计算方法

设计和研究模型为双重势垒一维光子晶体量子阱 $(GH)_3(AB)_3(DCD)_2(BA)_3(HG)_3$ 结构,其中 $(DCD)_2$ 是光量子阱的阱, $(AB)_3(BA)_3$ 是光量子阱的内垒, $(GH)_3(HG)_3$ 是光量子阱的外垒。各介质层对应的物质及其参数分别为A为硫化砷(AsS),B为二氧化硅( $SiO_2$ ),C为硫化砷(AsS),D为二氧化硅( $SiO_2$ ),G为碲化铅(PbTe),H为二氧化硅( $SiO_2$ ), $\epsilon_A = 6.760, d_A = 741.0 \text{ nm}, \epsilon_B = 2.1025, d_B = 1329.0 \text{ nm}, \epsilon_C = \epsilon_A, d_C = d_A, \epsilon_D = \epsilon_B, d_D = d_B, \epsilon_G = 16.810, d_G = 262.1 \text{ nm}, \epsilon_H = \epsilon_B, d_H = 1359.4 \text{ nm}$ 。当介质掺入激活杂质时,介质的介电常数可用带有负虚部的复数 $\epsilon_i = \epsilon_0 - k_i j$ 表示<sup>[6-9]</sup>, $\epsilon_0$ 为未掺激活杂质时介质的介电常数, $k_i$ 可反映介质掺入的杂质含量( $i=G, H, A, B, C, D$ ), $j$ 为复数单位。

采用的计算方法是传输矩阵法<sup>[8-10,12-16]</sup>,鉴于传输矩阵法理论已有很多文献报道,在此不再重述,详细可见文献[16]。

## 3 激活杂质对光量子阱滤波特性的影响

考虑光垂直入射情况(下同),利用传输矩阵法理论,数值计算模拟出双重势垒光量子阱 $(GH)_3(AB)_3(DCD)_2(BA)_3(HG)_3$ 在无激活杂质和有激活杂质( $\epsilon_D = 2.1025 - 0.0000111j$ )时的共振透射谱,如图1所示。从图1可见,无论D介质是实介电还是复介电常量情况,光量子阱禁带中的843.88、856.40、869.29 nm处均出现三条分立窄透射峰,透射峰条数与阱层周期数有关,并等于阱层周期数加1条。无激活时三者的透射率均为100%,当D层存在激活杂质时,三者的透射率则远远超过100%,放大倍数达20多倍。说明双势垒光量子阱内部出现了明显的量子化效应,因为光在阱层光子晶体中

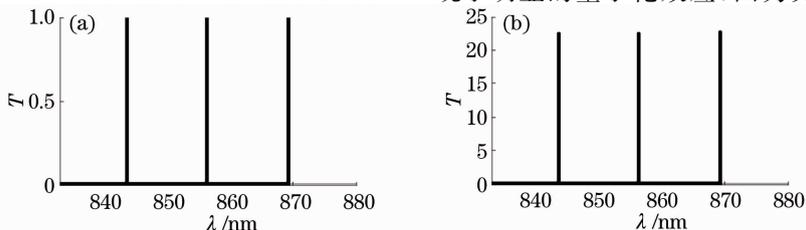


图1 光量子阱的透射谱。(a)  $k_i = 0$ ; (b)  $k_D = 0.0000111$

Fig. 1 Transmission spectra of photonic quantum well. (a)  $k_i = 0$ ; (b)  $k_D = 0.0000111$

受到双重势垒的强局域作用,这种强局域作用将导致光频率的量子化,频率量子化后的光通过共振隧穿的方式透过光子晶体,于是与这些量子化频率产生共振的光就可以透过光子晶体。而且,当光量子阱介质中掺入激活性杂质后,光量子阱内局域态的光子态密度大大增强,导致光共振隧穿透过光子晶体时出现明显的增益放大现象<sup>[6-14]</sup>。值得关注的是,光量子阱介质中掺入激活性杂质对光量子阱透射峰的波长位置并未产生影响。根据双重势垒光量子阱的透射谱特性,可设计固定频率多通道量子光学滤波器和高倍光学放大器。

而决定光学滤波器品质的高低及利用价值的重要指标之一是滤波的带宽,即透射峰的狭窄程度。以共振隧穿模的半峰全宽(FWHM)<sup>[13-15]</sup>表示光量子阱滤波器的带宽(BW),则图 1 中 843.88、856.40、869.29 nm 三处分立滤波通道的带宽,无激活时活分别为  $2.25 \times 10^{-3}$ 、 $1.25 \times 10^{-3}$  和  $2.50 \times 10^{-3}$  nm,有激活时分别为  $4.75 \times 10^{-4}$ 、 $2.25 \times 10^{-4}$ 、 $5.47 \times 10^{-4}$  nm。可见,激活性杂质对光量子阱各滤波通道的带宽和光放大倍数均有调制作用。

进一步计算还发现,滤波器各通道的透射放大倍数、带宽对掺杂量( $k_i$  的大小)响应灵敏度不一样,而且对阱层、内垒层或外垒层掺杂不同介质时,对掺杂量( $k_i$  的大小)响应灵敏度也不一样。找出光量子阱滤波器的光透射增益放大倍数和带宽对掺杂量的响应规律,可促进实际设计和应用。

### 3.1 阱层掺杂对光量子阱滤波特性的影响

固定其他参数不变,在阱层 D 介质或 D、C 介质中掺入激活杂质,分别计算出光量子阱滤波器(GH)<sub>3</sub>(AB)<sub>3</sub>(DCD)<sub>2</sub>(BA)<sub>3</sub>(HG)<sub>3</sub>各滤波通道的光

透射率  $T$  随掺杂量系数  $k_D$  或  $k_D$ 、 $k_C$  的变化曲线,如图 2 所示,图中实线表示  $T-k_D$  曲线,虚线表示  $T-k_D, k_C$  曲线。从图 2 可见,在阱层介质中掺入激活性杂质后,光量子阱滤波器 843.88、856.40、869.29 nm 波长处的三个滤波通道光透射率  $T$  对激活杂质质量  $k_D$  或  $k_D$ 、 $k_C$  响应相当灵敏,随着  $k_D$  或  $k_D$ 、 $k_C$  的增大,各滤波通道均出现了光增益放大现象,但各滤波通道的光透射率  $T$  对单层介质掺杂与多层介质掺杂的响应规律差别比较大。其中处于短波位置(843.88 nm)滤波通道的光透射率  $T$  对掺杂量的响应,是双层介质掺杂灵敏于单层介质掺杂,但两者透射放大最高倍数相等:单独 D 层介质掺激活杂质,随着掺杂量系数的增大,增益放大倍数增大,当  $k_D = 1.41 \times 10^{-5}$  时,增益放大倍数达到极值,  $T_{\max} = 5.76 \times 10^5$ ;当 D、C 层介质同时掺杂时,透射放大倍数对掺杂量系数  $k_D$ 、 $k_C$  响应更加灵敏,  $k_D$ 、 $k_C = 1.40 \times 10^{-5}$  时,增益放大倍数达到极值,  $T_{\max} = 5.76 \times 10^5$ ,如图 2(a)所示。而禁带中心位置(856.40 nm)滤波通道的光透射率  $T$ ,无论是对单层介质掺杂还是双层介质掺杂,响应灵敏度都是一样的,当  $k_D$  或  $k_D$ 、 $k_C = 9.21 \times 10^{-6}$  时,增益放大倍数达到极值,  $T_{\max} = 8.77 \times 10^3$ ,如图 2(b)所示。处于长波位置(869.29 nm)滤波通道的光透射率  $T$  对掺杂量的响应,却是单层掺杂灵敏于双层掺杂,但两者透射放大最高倍数相等:单独 D 层介质掺激活性杂质,当  $k_D = 1.41 \times 10^{-5}$  时,透射增益放大倍数达到极值,  $T_{\max} = 2.78 \times 10^5$ ; D、C 层介质同时掺杂,当  $k_D$ 、 $k_C = 1.42 \times 10^{-5}$  时,增益放大倍数达到极值,  $T_{\max} = 2.78 \times 10^5$ 。

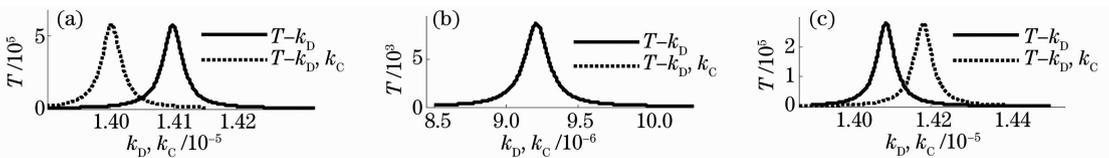


图 2  $k_D$ 、 $k_C$  对光量子阱透射谱的影响。(a)  $\lambda=843.88$  nm; (b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm

Fig.2 Transmission spectra of photonic quantum well versus  $k_D$  and  $k_C$ . (a)  $\lambda=843.88$  nm; (b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm

由光量子阱滤波器滤波带宽(透射峰半峰全宽)的定义,可进一步计算出阱层介质掺激活性杂质时,光量子阱滤波器带宽对激活杂质质量的响应情况,结果如图 3 所示。图中实线表示  $W-k_D$  曲线,虚线表示  $W-k_D, k_C$  曲线。从图 3(a)可见,短波通道(843.88 nm)的滤波带宽对掺杂量系数的响应是双层掺杂灵敏于单层掺杂,当  $k_D = 1.41 \times 10^{-5}$  或  $k_D$ 、

$k_C = 1.40 \times 10^{-5}$  时,带宽达到的极小值为  $1.50 \times 10^{-6}$  nm。禁带中心滤波通道(856.40 nm)的滤波带宽对掺杂量系数的响应灵敏度是双层掺杂等于单层掺杂,当  $k_D = 9.21 \times 10^{-6}$  或  $k_D$ 、 $k_C = 9.21 \times 10^{-6}$  时,带宽达到的极小值为  $1.50 \times 10^{-6}$  nm。而长波通道(869.29 nm)的滤波带宽对掺杂量系数的响应是单层掺杂灵敏于双层掺杂,当

$k_D = 1.41 \times 10^{-5}$  或  $k_D, k_C = 1.42 \times 10^{-5}$  时, 带宽达到的极小值为  $1.50 \times 10^{-6}$  nm。

可见, 对于双重势垒光子量子阱光学滤波器、光学

放大器, 可通过调节控制阱层介质中的激活杂质含量, 实现减小带宽提高滤波品质和高倍光学放大的功能。

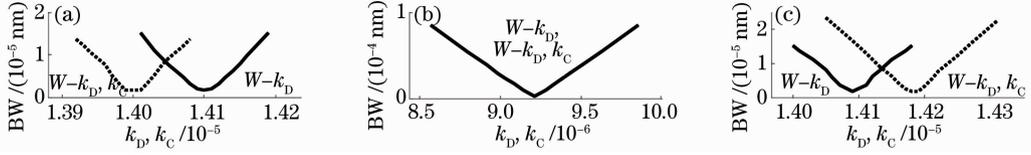


图 3  $k_D, k_C$  对光子量子阱滤波器带宽的影响。(a)  $\lambda=843.88$  nm; (b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm  
Fig. 3 Bandwidths of photonic quantum well versus  $k_D$  and  $k_C$ . (a)  $\lambda=843.88$  nm;  
(b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm

### 3.2 内垒层掺杂对光子量子阱滤波特性的影响

仍然保持其他参数不变, 在内垒层 A 介质或 A、B 介质中掺入激活性杂质, 分别计算光子量子阱滤波器 (GH)<sub>3</sub>(AB)<sub>3</sub>(DCD)<sub>2</sub>(BA)<sub>3</sub>(HG)<sub>3</sub> 各滤波通道光透射率对激活杂质质量的响应, 分别如图 4(a)~(c) 中的  $T-k_A$  和  $T-k_A, k_B$  曲线所示。从图 4 可见, 当内垒层介质掺激活杂质时, 光子量子阱滤波器各滤波通道的光透射率对掺杂量系数  $k_A$  或  $k_A, k_B$  的响应也相当灵敏, 透射增益倍数在  $k_A$  或  $k_A, k_B$  为  $10^{-5}$  数量级时就达到极值, 而且透射增益对多层掺杂响应比单层掺杂灵敏; 无论内垒层单层 A 介质还是双层 A、B 介质掺杂, 光子量子阱滤波各滤波通道的光透射均出现了很强

的光增益放大现象, 放大倍数高达  $10^5$  数量级; 在一定的掺杂量范围内, 843.88、856.40、869.29 nm 波长处三个滤波通道的光透射对掺杂量  $k_A, k_B$  响应也存在极值现象, 并且单层掺杂和多层掺杂时滤波带宽的极值也相同。当单层 A 介质掺杂  $k_A = 5.84 \times 10^{-5}$ 、 $2.89 \times 10^{-5}$  和  $5.93 \times 10^{-5}$  时, 各滤波通道光透射率达到最大值, 分别为  $T_{\max} = 4.69 \times 10^5$ 、 $8.78 \times 10^3$  和  $3.44 \times 10^5$ , 当 A、B 介质同时掺杂时, 当  $k_A, k_B = 1.62 \times 10^{-5}$ 、 $6.62 \times 10^{-6}$  和  $1.82 \times 10^{-5}$  时, 各滤波通道的光透射率达到最大值, 分别为  $T_{\max} = 4.67 \times 10^5$ 、 $8.75 \times 10^3$  和  $3.25 \times 10^5$ 。

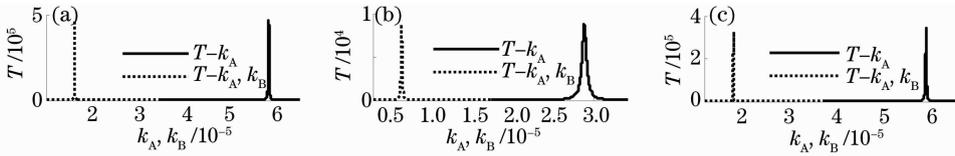


图 4  $k_A, k_B$  对光子量子阱透射谱的影响。(a)  $\lambda=843.88$  nm; (b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm  
Fig. 4 Transmission spectra of photonic quantum well versus  $k_A$  and  $k_B$ . (a)  $\lambda=843.88$  nm;  
(b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm

再进一步计算出内垒层介质掺激活杂质时, 光子量子阱滤波器带宽对激活杂质质量的响应情况, 如图 5(a)~(c) 中的  $W-k_A$  和  $W-k_A, k_B$  曲线所示。从图 5 可知, 内垒层介质掺激活杂质时, 光子量子阱滤波器带宽对激活杂质质量系数  $k_A$  或  $k_A, k_B$  的响应非常灵敏, 而且对多层掺杂响应也比单层掺杂灵敏, 并在一定范围内存在响应极值。单层 A 介质掺激活杂质时, 随着  $k_A$  增大, 843.88、856.40、869.29 nm 波

长处三个滤波通道的带宽快速变窄, 当  $k_A = 5.84 \times 10^{-5}$ 、 $2.89 \times 10^{-5}$  和  $5.93 \times 10^{-5}$  时, 带宽达到最小值, 均为  $1.50 \times 10^{-6}$  nm; A、B 层介质同时掺杂时, 随着  $k_A, k_B$  增大, 各个滤波通道的带宽对掺杂量  $k_A, k_B$  响应更加灵敏, 即带宽迅速变窄并很快达到极值, 当  $k_A, k_B = 1.62 \times 10^{-5}$ 、 $6.62 \times 10^{-6}$  和  $1.82 \times 10^{-5}$  时, 三滤波通道的带宽即达到最小值, 且均等于  $1.50 \times 10^{-6}$  nm。因此, 可通过调节控制内垒层介质

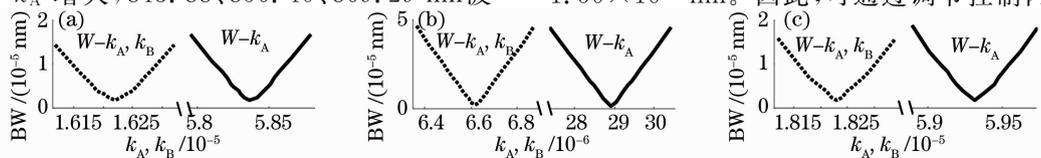


图 5  $k_A, k_B$  对光子量子阱滤波器带宽的影响。(a)  $\lambda=843.88$  nm; (b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm  
Fig. 5 Bandwidths of photonic quantum well versus  $k_A$  and  $k_B$ . (a)  $\lambda=843.88$  nm;  
(b)  $\lambda=856.40$  nm; (c)  $\lambda=869.29$  nm

中的激活杂质含量,提高双重势垒光子量子滤波器的滤波品质和高倍光学放大功能。

### 3.3 外垒层掺杂对光子量子阱滤波特性的影响

仍然固定其他参数不变,在外垒层 G 介质或 G、H 介质中掺入激活杂质,分别计算出光子量子阱滤波器  $(GH)_3(AB)_3(DCD)_2(BA)_3(HG)_3$  各滤波通道的光透射率  $T$  随杂质质量系数  $k_G$  或  $k_G, k_H$  的变化曲线,如图 6(a)~(c) 的  $T-k_G$  和  $T-k_G, k_H$  曲线所示。从图 6 可见,当外垒层介质掺入激活性杂质时,光子量子阱滤波器 843.88、856.40、869.29 nm 波长处三个滤波通道的光透射率  $T$  对激活杂质质量  $k_G$  或  $k_G, k_H$  响应也相当灵敏,而且对 G、H 同时掺杂响应比 G 单层掺杂灵敏。在一定范围内,光子量子阱滤波器随着激活杂质质量系数  $k_G$  或  $k_G, k_H$  的增加,各滤波通

道均出现光透射增益放大现象,放大倍数最高达  $10^5$  数量级。各滤波通道光透射率对单层、多层介质的掺杂响应灵敏度不一样,而且对掺杂量系数  $k_G$  或  $k_G, k_H$  响应也存在极值现象。当单层 G 介质掺杂量系数  $k_G = 1.04 \times 10^{-2}, 7.96 \times 10^{-3}$  和  $1.02 \times 10^{-2}$  时,各滤波通道的透射放大倍数达到最大值,分别为  $T_{\max} = 1.38 \times 10^4, 1.09 \times 10^4$  和  $1.61 \times 10^4$ ; 当 G、H 介质同时掺杂,掺杂量系数  $k_G, k_H = 4.54 \times 10^{-4}, 3.37 \times 10^{-4}$  和  $5.01 \times 10^{-4}$  时,各滤波通道的透射放大倍数达到最大值,分别为  $T_{\max} = 2.97 \times 10^4, 8.24 \times 10^3$  和  $2.87 \times 10^5$ ,说明 G、H 介质同时掺杂时,响应极值对应的  $k_G, k_H$  值明显小于单层 G 掺杂的情况,即双层掺杂时需要的杂质质量明显减少。

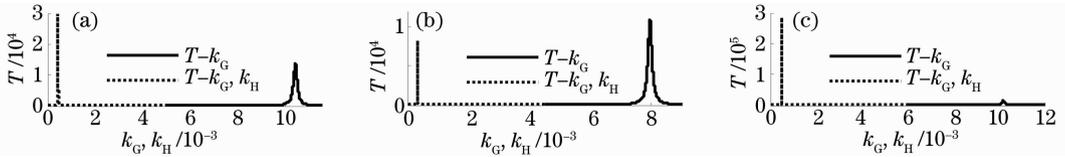


图 6  $k_G, k_H$  对光子量子阱透射谱的影响。(a)  $\lambda = 843.88$  nm; (b)  $\lambda = 856.40$  nm; (c)  $\lambda = 869.29$  nm

Fig. 6 Transmission spectra of photonic quantum well versus  $k_G$  and  $k_H$ . (a)  $\lambda = 843.88$  nm; (b)  $\lambda = 856.40$  nm; (c)  $\lambda = 869.29$  nm

进一步研究外垒层介质激活杂质质量对光子量子阱滤波器带宽的调制效果,结果如图 7 中的  $W-k_G$  和  $W-k_G, k_H$  曲线所示。从图 7 可见,光子量子阱滤波器各滤波通道的带宽对激活杂质质量系数  $k_G$  或  $k_G, k_H$  响应也很灵敏,而且对多层掺杂响应比单层掺杂灵敏,同时,在一定范围内,对  $k_G$  或  $k_G, k_H$  的响应同样存在极值现象,并且单层掺杂和多层掺杂的滤波带宽极值相同。单层 G 介质掺激活性杂质时,随着  $k_G$

增大,各滤波通道的带宽快速变窄,当  $k_G = 1.04 \times 10^{-2}, 7.96 \times 10^{-3}$  和  $1.02 \times 10^{-2}$  时,各滤波通道的带宽达到最小值,而且均等于  $1.50 \times 10^{-6}$  nm; G、H 层介质同时掺杂时,随着  $k_G, k_H$  增大,各滤波通道的带宽对掺杂量  $k_G, k_H$  反应更加灵敏,即迅速变窄并很快达到极值,当  $k_G, k_H = 4.54 \times 10^{-4}, 3.37 \times 10^{-4}$  和  $5.02 \times 10^{-4}$  时,各滤波通道的带宽即达到最小值,而且也均等于  $1.50 \times 10^{-6}$  nm。

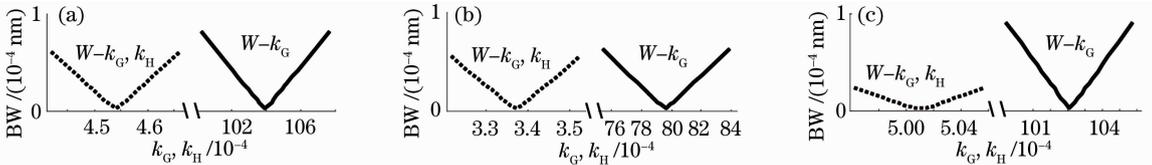


图 7  $k_G, k_H$  对光子量子阱滤波带宽的影响。(a)  $\lambda = 843.88$  nm; (b)  $\lambda = 856.40$  nm; (c)  $\lambda = 869.29$  nm

Fig. 7 Bandwidths of photonic quantum well versus  $k_G$  and  $k_H$ . (a)  $\lambda = 843.88$  nm; (b)  $\lambda = 856.40$  nm; (c)  $\lambda = 869.29$  nm

可见,外垒层介质的激活杂质质量,对双重势垒光子量子阱滤波器的带宽和光放大倍数同样具有调制的作用。但比较图 7 和图 5 可知,双重势垒光子量子阱滤波器带宽对内垒层掺激活杂质的响应比外垒层掺激活杂质更加灵敏,而且对多层掺杂响应也比单层掺杂灵敏,并在一定范围内存在响应极值。

综合以上可知,无论是在阱层、内垒层还是外垒

层介质掺入激活性杂质,均可对双重势垒光子量子阱滤波器的光透射放大倍数和带宽进行调制,而对于光子量子阱不同部位或不同方式掺杂,调制的响应灵敏度不同,即透射放大倍数响应极值不同,但滤波带宽对掺杂量的响应极值却相等。实际设计中,可根据光学滤波器、光学放大器的具体功能、用途等,选择适当的部位、介质层、单层或多层等进行适量的掺杂即可。

## 4 结 论

通过传输矩阵法数值计算模拟,研究激活性杂质对双重势垒光量子阱(GH)<sub>3</sub>(AB)<sub>3</sub>(DCD)<sub>2</sub>(BA)<sub>3</sub>(HG)<sub>3</sub>滤波特性的调制,得出如下结论:

1) 无论在阱层、内垒层还是外垒层介质中掺入激活性杂质,均可对双重势垒光量子阱滤波器各通道的光增益放大倍数和带宽进行调制,而且对不同介质对象掺杂,激活杂质量调制极限值不同,调制后可实现高达  $10^5$  数量级的光放大倍数和  $1.50 \times 10^{-6}$  nm的恒定窄带宽极小值;

2) 对光量子阱滤波器内垒层或外垒层介质掺入激活性杂质,各滤波通道光放大倍数和带宽对掺杂调制响应为:内垒层比外垒层灵敏,多层介质掺杂比单层掺杂灵敏,而且不同的滤波通道响应灵敏度不同;

3) 对光量子阱滤波器阱层介质掺入激活性杂质,各滤波通道光放大倍数和带宽对掺杂调制响应为:短波通道对多层介质掺杂响应比单层介质掺杂灵敏,而长波通道对单层介质掺杂响应比多层掺杂灵敏,但阱中心通道对单层介质和多介质层掺杂的响应灵敏度一样。

激活性杂质对双重势垒光量子阱滤波器特性的调制效果,可为光子晶体设计可调性窄带宽、高品质的光学滤波和高倍数的光学放大器件提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 E Yablonoitch. 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 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Liu Lisong, Ren Wenhua, Chen Weiguo, *et al.*. Research on fabrication and characteristic of twin-core erbium-doped fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805001.  
刘利松, 任文华, 陈卫国, 等. 双芯掺铒光纤的研制及其增益均衡特性的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805001.
- 7 Wu Xu, Ruan Shuangchen, Liu Chengxiang, *et al.*. Experimental investigation on superfluorescent sources based on erbium-doped photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306005.  
吴旭, 阮双琛, 刘承香, 等. 基于掺铒光子晶体光纤超荧光光源的实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306005.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 Qiao F, Zhang C, Wang J, *et al.*. Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena [J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(23): 3698-3702.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 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.

栏目编辑: 韩峰