

文章编号:1004-4213(2010)11-1947-4

基于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱 光子晶体的窄带滤波器*

刘江涛¹, 谈振兴¹, 胡爱荣¹, 肖文波^{2,†}

(1 南昌大学 物理系, 南昌 330031)

(2 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘 要:讨论了利用 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱构成的一维光子晶体实现窄带滤波的原理. 研究了外加电场下 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱的激子吸收所导致的反常色散行为. 研究发现, 在反常色散材料的共振频率附近, 存在一个较强色散且吸收很小的区域, 该区域内的色散可以在 PCs 的带隙中产生一个窄的通频带, 其对应的最大透过率约为 0.73, 全固态滤光器的带宽约为 4.9 nm, 并可利用外加电场进行调谐, 这将为设计一种全新的固态滤波器提供指导.

关键词:多量子阱; 光子晶体; 窄带滤波器

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.1947

0 引言

自 1987 年 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 分别提出光子晶体(Photonic Crystals, PCs)概念以来, 人们对 PCs 进行了广泛而深入的研究. 与电子在半导体中的运动类似, 在某些频率范围内的电磁波被禁止在 PCs 中传播, 这就是光子带隙(Photonic Bandgap, PBG)^[3-6]. 若在周期性的 PCs 中引入缺陷, 则 PBG 中的光子将会局域在缺陷附近. 这种光子的局域化效应可以用来控制原子发光或是用来制作光波导或窄带滤波器^[7-10].

本文研究了由反常色散材料 Cs 原子蒸汽构成的 PCs^[11-13]. 研究发现, 在反常色散材料的共振频率附近, 存在一个较强色散而且吸收很小的区域, 在这个区域内的色散可以在 PCs 的通频带中产生一个极窄的 PBG, 或是在 PBG 产生一个极窄的通频带. 这种极窄的 PBG 或极窄的通频带也可以用来制作窄带滤波器或窄带选频反射镜. 这种滤波器具有透射率高、可成像、对加工准确度依赖小等特点. 此外, PCs 中 PBG 的宽度和位置强烈依赖于 PCs 中介质的介电常量. 这样就可以通过外加磁场、光场, 或是改变温度来改变反常色散介质的介电常量或极化方向, 从而实现对通频带的调控^[11-13].

但是, 由 Cs 原子蒸汽所构成的反常色散光子晶体(Anomalous Dispersion Material, Adm-PCs)需要较高的温度和中空 PCs 结构, 那么制作一种全固态的 adm-PCs 成为人们考虑的问题. 众所周知, 在半导体中由于电子-空穴间的库仑相互作用, 将形成类似氢原子的束缚态, 也就是激子. 低维结构半导体中的激子具有较大振子强度, 在吸收边附近同样表现出较强的反常色散特性^[14-15]. 而且, 由于低维半导体中的激子中心跃迁频率可以通过外加电场、磁场或是光场来调谐. 激子的这种反常色散特性也可以用来制作可调谐的 adm-PCs.

1 理论模型及计算方法

一维(One-Dimensional, 1D)PCs 的结构见图 1, 这种周期性 PCs 由低折射率的半导体材料(ZnSe)和高折射率的多量子阱(Multiple Quantum Wells, MQWs)所构成. 图中白色为 ZnSe 材料, 灰色和浅灰色的介质层为 GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 构成的 MQWs.

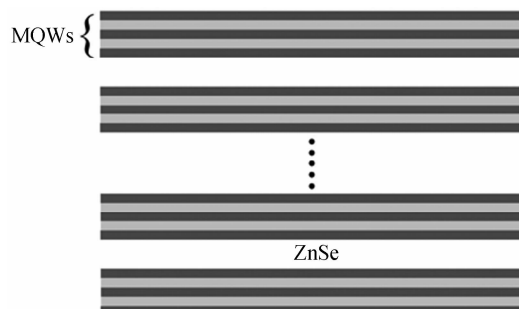


图 1 多量子阱光子晶体结构
Fig. 1 Sketch of MQWs PCs

*国家自然科学基金(10904059)、航空科学基金(2010ZB56004)、江西省自然科学基金(2009GQW0017)和南昌航空大学博士启动基金(EA200908017)资助

† Tel:0791-3953472

Email:wbxiao@semi.ac.cn

收稿日期:2010-05-04

修回日期:2010-07-29

研究采用转移矩阵法^[9-13],利用基于有效质量的多带模型来描述 MQWs 中的激子. 激子的哈密顿量可以写为^[14,16-18]

$$H = H_e + H_h - H_{\text{coul}} \quad (1)$$

式中

$$H_e = -\frac{\hbar^2 p^2}{2m_e^*} + V_e(z_e) - V_F(z_e),$$

$$H_h = \frac{\hbar^2}{2m_0} \begin{pmatrix} H_{hh} & L & M & 0 \\ L^* & H_{lh} & 0 & M \\ M^* & 0 & H_{lh} & -L \\ 0 & M^* & -L^* & H_{hh} \end{pmatrix} + V_h(z_h) +$$

$$V_F(z_h), H_{\text{coul}} = e_0^2 / \epsilon_b \sqrt{\rho^2 - (z_h - z_e)^2}$$

式中 H_e 是电子的哈密顿量, H_h 是 4×4 的 Luttinger 哈密顿量, H_{coul} 是电子和空穴间的库仑相互作用项, $V_e(z_e)$ 和 $V_h(z_h)$ 分别是量子阱中电子和空穴的限制势, $V_F(z_e) = -eFz$ 是外加电场势 $\rho = \rho_e - \rho_h = |\rho| e^{i\varphi}$ 是平面内电子-空穴的相对坐标, φ 是极角, ϵ_b 是量子阱的背景介电常量, e_0 是电子电量, m_e^* 是电子的有效质量, z_h 和 z_e 分别是空穴和电子在 z 方向上的坐标, H_{hh} 、 H_{lh} 、 L 、 M 是 Luttinger 微扰矩阵元^[14]. 这样激子的波函数可以写为^[14]

$$\Phi_{\mu\nu} = 2\pi \sum_k G_l(k) f_\mu(z_e) U_0 \times \begin{pmatrix} \alpha_\nu(k, z_h) U^j e^{i\langle l-1 \rangle \langle \varphi + \pi/2 \rangle} J_{l-1}(k\rho) \\ \beta_\nu(k, z_h) U^j e^{i\langle \varphi + \pi/2 \rangle} J_l(k\rho) \\ \gamma_\nu(k, z_h) U^j e^{i\langle l+1 \rangle \langle \varphi + \pi/2 \rangle} J_{l+1}(k\rho) \\ \delta_\nu(k, z_h) U^j e^{i\langle l+2 \rangle \langle \varphi + \pi/2 \rangle} J_{l+2}(k\rho) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 $f_\mu(z_e)$ 、 $(\alpha_\nu, \beta_\nu, \gamma_\nu, \delta_\nu)$ 、 $G_l(k)$ 分别是电子、空穴、和激子的包络函数; U_0 和 U_j 分别是导带和价带的 Bloch 态; $J_l(k\rho)$ 是 l 阶贝塞尔函数.

MQWs 带边附近的介电常量可以写为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_b + \sum_{\mu, \nu, k} \frac{e_0^2 P_{\mu\nu}^2}{\epsilon_0 m_0^2 \omega_{\mu\nu}^2} \frac{1}{VE_\omega - E_{\mu\nu} + i\Gamma} \quad (3)$$

式中 m_0 是自由电子质量, ϵ_b 是 MQWs 的背景介电常量, $P_{\mu\nu}^2 = |\langle \Phi_{\mu\nu} | e \cdot p | 0 \rangle|^2$, $|0\rangle$ 是基态, e 是光偏振方向, $E_{\mu\nu}$ 是激子跃迁能, E_ω 是光子能量, Γ 是线宽.

2 计算结果与讨论

2.1 激子的色散

GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱由 10 层 GaAs 层所构成,参量为: $x=0.45$ 是 Al 的组分比,带阶大小为 $\Delta E_c / \Delta E_v = 60/40$, GaAs 层和 Al_{0.4}Ga_{0.6}As 层的厚度为 10 nm,介质的背景介电常量 $\epsilon_b = 11.7$ ^[18], 计算结果如图 2. 在二维结构中,激子的振子强度较大,在带边附近出现了一个很强的吸收峰. 同时这个

强的吸收峰将会导致带边附近将出现强的反常色散,其介电常量最大相对改变量 $\text{Re}(\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_b) / \epsilon_b \approx 20\%$. 这种强的色散将会显著的改变 PCs 中的光输运行为.

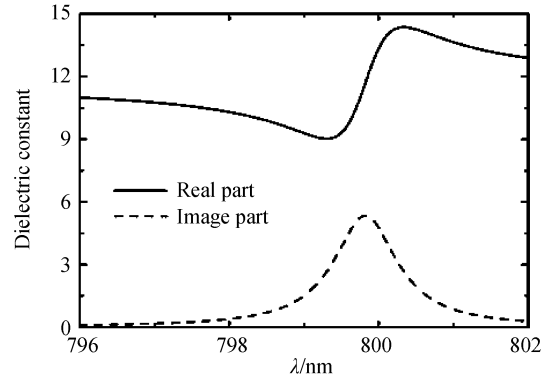


图 2 带边附近激子的反常色散曲线
Fig. 2 Anomalous dispersion curves of excitons in MQWs near band-edge

为了实现可调谐的滤波器,研究了激子的束缚能和振子强度随外加电场时的变化情况,计算结果如图 3. 从图中可以看出,随着电场的增加,电子和空穴在电场的作用下向不同的方向运动,距离增加,库仑相互作用减弱,束缚能减小. 电子和空穴的距离增大同样将使得电子-空穴的波函数交叠积分减小,振子强度减弱.

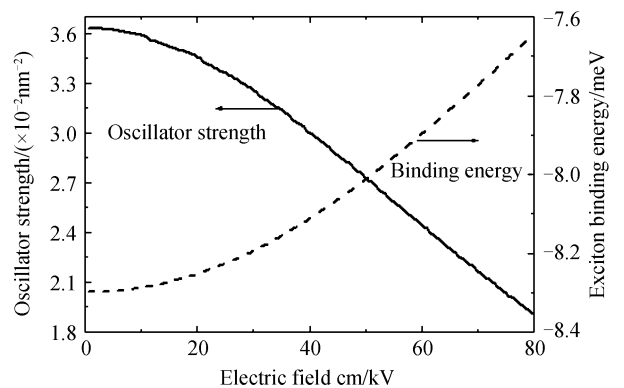


图 3 激子的振子强度和束缚能随外加电场的变化情况
Fig. 3 The oscillator strength and binding energy of excitons as a function of external electric field

2.2 由 MQWs 构成的一维光子晶体的透射谱

MQWs 构成的 1D PCs 是由较高介电常量的 GaAs/Al_xGa_{1-x}As MQWs 和一层较厚的低介电常量半导体材料构成的周期性材料. GaAs 和 Al_xGa_{1-x}As 的厚度为 10 nm. 低介电常量半导体材料选择 ZnSe 材料,其厚度为 180 nm. ZnSe 的带隙约为 2.82 eV,在 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 激子跃迁频率附近的介电常量约为 6.2 左右,而且吸收和色散都较小. 此外, ZnSe 的晶格约为 0.566 8 nm, 和 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 的晶格匹配较好,生长缺陷较少,制作更为容易.

计算结果如图 4. 由于激子色散的存在,在低于激子共振频率处, GaAs/Al_xGa_{1-x}As MQWs 的介电常量减小, MQWs 的光程减小, 1D PCs 的带隙向短波长移动. 这样就在原本的带隙内出现了一个通频带, 其波长范围约为 791~797 nm, 最大透射率约为 0.72, 半高宽约为 4.9 nm. 对比图 4 和图 2 可以发现, 此透射峰的和激子共振吸收波长并不一致. 其主要原因是在激子共振吸收波长附近, 介电常量的虚部很大, 对光的吸收强烈, 透射率减小. 而在远离激子共振吸收处, 激子的介电常量很小, 吸收较小. 吸收率如图 4 中虚线所示, 对于左侧波长较短、透射较大的透射峰(主峰)其相应的吸收率约为 0.25, 吸收率约为透射率的 35%. 而对于右侧波长较长的透射峰其相应的吸收率约为 0.54. 这样主峰的应用价值更大.

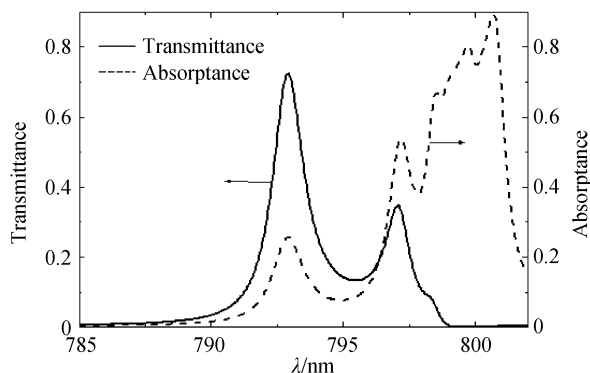


图 4 激子跃迁频率附近 MQWs PCs 的透光率和吸收率
Fig. 4 The transmittance and the absorptance of the 1D PCs near the the exciton transition frequency

对比由饱和金属蒸汽所构成的反常色散 PCs^[11-13], 这种由 MQWs 构成的 PCs 制作更为简单. 但是, 在 GaAs 量子阱中, 激子的束缚能较小, 线宽较宽, 因而透射峰的半高宽更高. 而且由于激子的束缚能较小, 线宽较宽, 离激子共振吸收波长较远处的吸收也比较大, 以至于 GaAs 量子阱的吸收也比较大. 但是, 在宽禁带半导体中的激子通常具有较大的激子束缚能和较小的线宽. 例如, 在 ZnO 中, 激子的束缚能可以达到 60 meV 左右^[19-21]. 那么在这类半导体材料所构成的 PCs 中将有希望获得更窄的带宽和更小的吸收.

此外, 由于半导体 MQWs 中的激子跃迁很容易通过外加电场、磁场或是改变温度、压强等来调谐^[14], 那么由 MQWs 中的激子色散所导致的通频带也可以通过这些方法来调谐, 从而可以获得可以调谐的窄带滤波器. 作为一个例子, 本文将考虑外加电场对 MQWs 所构成的 PCs 透射谱的影响.

在外加电场时, 电子和空穴间距离增大, 激子的束缚能减小, 振子强度减弱(见图 3). 但对于 MQWs

这种量子限制体系, 在外加电场时, 由于量子约束斯塔克效应, 激子的跃迁能的变化主要是由于电子和空穴的带边移动所导致的. 具体的计算结果如图 5. 外加电场时, 空穴的带边向高能移动, 而电子的带边能量降低, 带隙减小, 激子红移, 相应的透射峰向长波长方向移动. 此外, 外加电场时, 激子的跃迁频率更接近 PCs 的禁带边, 色散的影响更大, 透射增强.

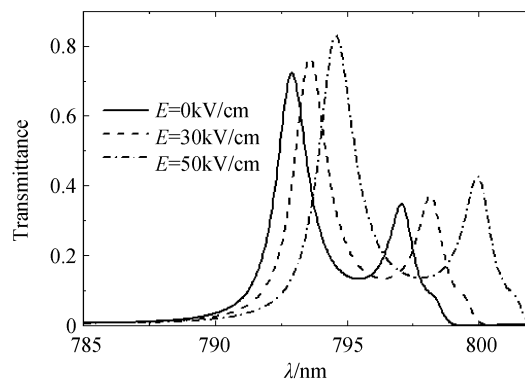


图 5 外加电场对 MQWs PCs 透光率的影响

Fig. 5 The transmittance of the 1D PCs as a function of wavelength under different external electric field

3 结论

本文研究了由 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱构成的 1D PCs 中的光输运性质. 研究发现, 由于激子的色散, 在 PCs 的带隙中出现了一个窄的通频带, 其对应的最大透射率约为 0.73, 半高宽约为 4.9 nm. 通过外加电场可以对这种通频带进行调谐. 这将为设计一种全新的固态滤波器提供指导.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phy Rev Lett*, 1987, **58** (20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58** (23): 2486-2489.
- [3] LI Z Y, GU B Y, YANG G Z. Large absolute band gap in 2d anisotropic photonic crystals[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **81** (12): 2574-2577.
- [4] de DIOS-LEYVA M, DRAKE-PEREZ J C. Zero-width band gap associated with the $n=0$ condition in photonic crystals containing left-handed materials[J]. *Phys Rev E*, 2009, **79** (3): 036608-1-036608-7.
- [5] CHEN Qiu-ling, XU Jiang-feng. One-dimensional photonic crystal with large band gaps designed by annealing-genetic algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37** (7): 1396-1400.
陈秋灵, 徐江峰. 基于像素法用模拟退火-遗传算法搜索一维宽禁带光子晶体[J]. *光子学报*, 2008, **37** (7): 1396-1400.
- [6] CHEN Hai-bo, GAO Ying-jun, HAN Jun-ting. Effect of optical thickness on characteristics of photonic forbidden band of 1D three element photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37** (11): 2210-2212.
陈海波, 高英俊, 韩军婷. 光学厚度对一维三元光子晶体禁带特性的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37** (11): 2210-2212.

- [7] ZHOU Yun-song, WANG Xue-hua, GU Ben-Yuan, *et al.* Switching control of spontaneous emission by polarized atoms in two-dimensional photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(10): 103601-103604.
- [8] LIN Lan-lan, LI Zhi-yuan. Interface states in photonic crystal heterostructures[J]. *Phys Rev B*, 2001, **63**(3): 0333101-0333104.
- [9] AN Li-ping, LIU Nian-hua. Impurity band in one-dimensional photonic crystal containing defect layers with negative refractive index[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 289-2922.
安丽萍, 刘念华. 含负折射率缺陷的一维光子晶体的杂质带[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 289-2922.
- [10] DONG Li-juan, JIANG Hai-tao, YANG Cheng-quan, *et al.* Impurity modes of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2248-2251.
董丽娟, 江海涛, 杨成全等. 含单负材料的一维光子晶体的杂质模[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2248-2251.
- [11] LIU Jiang-Tao, ZHOU Yun-Song, WANG Fu-He, *et al.* Ultra-narrow bandwidth optical filters consisting of one-dimensional photonic crystals with anomalous dispersion materials[J]. *Chinese Physics*, 2005, **14**(12): 2474-2477.
- [12] LIU Jiang-Tao, ZHOU Yun-Song, CHEN Dong-Feng, *et al.* Tunable ultra-narrow band-gap of anomalous dispersion photonic crystals [J]. *Europhysics Letters*, 2007, **78**(4): 54001-P1-54001-P4.
- [13] LIU Jiang-Tao, XIAO Wen-Bo, HUANG Jie-Hui, *et al.* Tunable pass band of anomalous dispersion photonic crystals [J]. *Acta Phys Sin*, 2010, **59**(3): 1665-1670.
刘江涛, 肖文波, 黄接辉等. 反常色散材料光子晶体中光输运的光学控制[J]. 物理学报, 2010, **59**(3): 1665-1670.
- [14] 夏建白, 朱邦芬. 半导体超晶格物理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995: 83-107.
- [15] LI Pei-xian, Hao Yue. Temperature dependence in preparation of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQWs by MOCVD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 34-38.
李培咸, 郝跃. MOCVD 制备 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQWs 的温度依赖性[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 34-38.
- [16] ZHU Bang-fen, HUANG Kun. Effect of valence-band hybridization on the exciton spectra in $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ quantum wells[J]. *Phys Rev B*, 1987, **36**(15): 8102 - 8108.
- [17] ZHU Bang-fen. Exciton spectra in $\text{GaAs/Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ quantum wells in an externally applied electric field[J]. *Phys Rev B*, 1988, **38**(18): 13316 - 13322.
- [18] LIU Jiang-tao, CHANG Kai. Tunable giant Faraday rotation of exciton in semiconductor quantum wells embedded in a microcavity[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(6): 061114-1-061114-3.
- [19] SU F H, LIU Y F, CHEN W, *et al.* Temperature and pressure dependences of the copper-related green emission in ZnO microrods[J]. *J Appl Phys*, 2006, **100**(1): 013107-1-013107-6.
- [20] SU Xue-qiong, WANG Li, CHEN Jiang-bo, *et al.* Properties of ZnO thin films with effect of substrate temperature by PLD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 296-300.
苏雪琼, 王丽, 陈江博, 等. 不同衬底温度下 PLD 法制备的氧化锌薄膜的特性[J]. 光子学报, 2010, **39**(2): 296-300.
- [21] YANG Xiao-dong, ZHANG Jing-wen, WANG Dong, *et al.* Annealing effect on ZnO thin films grown by laser-MBE[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 996-1000.
杨晓东, 张景文, 王东, 等. L-MBE 法生长 ZnO 薄膜的退火研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(5) 996-1000.

Photonic Crystal Optical Filter Based on $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Multiple Quantum Wells

LIU Jiang-tao¹, TAN Zhen-xing¹, HU Ai-rong¹, XIAO Wen-bo²

(1 Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(2 Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: A new theory of narrow bandwidth photonic crystal optical filter, which consists of $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ multiple quantum wells, is proposed. The anomalous dispersion behavior caused by excitons absorption in $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ MQW under an external electric field is investigated. The results show that there is a strong dispersion and small absorption region in the near resonant frequency of the anomalous dispersion material. Thus, a narrow transmission band will appear in the photonic band gap due to the dispersion in that region, of which corresponding maximum transmission value is about 0.73 and the bandwidth of the all solid-state filter is about 4.9 nm. This filter can be tuned by an external electric field. It provides guidance for the design of the new solid-state filter.

Key words: Multiple quantum wells; Photonic crystal; Narrow band filter



LIU Jiang-tao was born in 1979. He received the Ph. D. degree from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences in 2008. Now he works at Department of Physics, Nanchang University. His research interests focus on photonic crystal and optical properties of semiconductors.