

## 载流子导引的折射率变化偏振相关性研究\*

缪庆元<sup>1)†</sup> 崔俊<sup>1)</sup> 胡蕾蕾<sup>2)</sup> 何健<sup>3)</sup> 何平安<sup>1)</sup> 黄德修<sup>3)</sup>

1) (武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

2) (武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

3) (华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2012年1月8日收到; 2012年5月2日收到修改稿)

分析了载流子浓度、张应变量大小、量子阱阱宽和量子阱垒区材料组分对量子阱结构 TE 模和 TM 模折射率变化的影响. 综合调配以上参数得到 1530—1570 nm 波长范围内同时具有大的折射率变化量 ( $10^{-2}$  量级) 和折射率变化低偏振相关 ( $10^{-4}$  量级) 的量子阱结构. 研究表明, 不同的调配参数组合可以得到同一波长范围内基本一致的折射率变化谱.

**关键词:** 折射率变化, 载流子导引, 偏振相关, 量子阱

**PACS:** 78.67.De, 78.20.Ci

## 1 引言

载流子导引的折射率变化是许多新型光纤通信器件的工作机理, 如: 实现光包交换功能的光交叉点开光<sup>[1,2]</sup>、波分复用系统中采用的微环谐振器<sup>[3]</sup>和波长转换器<sup>[4,5]</sup>等. 为保证上述器件在实际应用中有效工作, 要求器件在载流子注入时必须同时具有大的折射率变化量和折射率变化低的偏振相关性. 已有文献对体材料<sup>[6]</sup>、应变体材料<sup>[7]</sup>和量子阱结构<sup>[8]</sup>的载流子导引的折射率变化进行了分析, 但缺乏对载流子导引的折射率变化低的偏振相关性的研究.

本文首先对载流子浓度、张应变量大小、量子阱阱宽和量子阱垒区材料组分对 In-GaAs/InGaAsP 量子阱 TE 模和 TM 模折射率变化的影响进行分析. 然后, 综合调配以上参数, 设计和分析一定工作波长范围内同时具有大的折射率变化量和折射率变化低的偏振相关的张应变量量子阱结构.

## 2 理论模型

采用抛物带近似得到导带本征方程, 利用 Lowdin's 归一化理论得到考虑重空穴带 (HH)、轻空穴带 (LH) 和自旋-轨道分裂带 (SO) 之间互耦合作用的价带本征方程<sup>[9,10]</sup>, 通过有限差分法求解本征方程得到导带和价带的能带结构<sup>[11]</sup>. 在能带结构计算的基础上, 引入线宽增宽因子得到吸收系数的数学模型, 进而利用 Kramers-Kronig 变换得到折射率变化的数学表达式<sup>[11,12]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta n(\hbar\omega) = & -\frac{e^2}{2n_r\epsilon_0m_0^2\omega^2}L_z \\ & \times \sum_{\sigma=U,L} \sum_{n,m} \int_0^\infty \frac{k_t dk_t}{2\pi} |M_{n,m}^\sigma(k_t)|^2 \\ & \times \frac{(E_{cn,vm}^\sigma(k_t) - \hbar\omega)}{(E_{cn,vm}^\sigma(k_t) - \hbar\omega)^2 + \gamma^2} (f_c^{\sigma m} - f_v^n), \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $e$  为电子电量,  $n_r$  为阱层相对折射率,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $m_0$  是自由电子质量,  $\gamma$  为洛仑兹半线宽,  $L_z$  为量子阱阱宽,  $E_{cn,vm}^\sigma$  为导带到价带的跃迁能量,  $\sigma = U$  或  $\sigma = L$  分别表示能带计算中取上哈

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60877039) 和湖北省自然科学基金 (批准号: 2008CDB328) 资助的课题.

† E-mail: miaoqy@whu.edu.cn

密顿算符或下哈密顿算符;  $f_c$  和  $f_v$  分别为导带电子和价带空穴的准费米分布:

$$f_c^n(k_t) = \frac{1}{1 + e^{(E_{cn}(k_t) - E_{Fc})/K_B T}},$$

$$f_v^m(k_t) = \frac{1}{1 + e^{(E_{vm}(k_t) - E_{Fv})/K_B T}}, \quad (2)$$

$E_{Fc}$  和  $E_{Fv}$  分别为导带和价带的准费米能级,  $E_{cn}$  和  $E_{vm}$  分别表示导带和价带的能量色散关系,  $K_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为热力学温度.  $M_{n,m}^\sigma(k_t)$  是跃

迁动量矩阵元, 对于 TE 模和 TM 模, 分别为

$$|M_{TE}^\sigma|^2 = \frac{M_b^2}{4} \left\{ 3 |\langle F_{\sigma m, HH} | \varphi_n \rangle|^2 + \left| \langle F_{\sigma m, LH} + \sqrt{2} F_{\sigma m, SO} | \varphi_n \rangle \right|^2 \right\},$$

$$|M_{TM}^\sigma|^2 = M_b^2 \left| \langle F_{\sigma m, LH} - \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\sigma m, SO} | \varphi_n \rangle \right|^2, \quad (3)$$

其中,  $M_b$  表示体材料的跃迁动量矩阵元,  $F_{\sigma m, HH}$ ,  $F_{\sigma m, LH}$  和  $F_{\sigma m, SO}$  分别为价带 HH 带、LH 带和 SO 带的包络函数,  $\varphi_n$  是导带的包络函数. 计算中用到的相关能带结构参数见表 1<sup>[13]</sup>.

表 1 相关能带结构参数

	晶格常数 $a_0/\text{\AA}$	带隙能量 $E_g/\text{eV}$	形变势能			晶体弹性模量		电子有效质量 $m_e/m_0$	Luttinger 常数		
			$a_c/\text{eV}$	$a_v/\text{eV}$	$b/\text{eV}$	$C_{11}$	$C_{12}$		$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
GaAs	5.6533	1.424	-7.17	1.16	-1.7	11.88	5.376	0.067	6.8	1.9	2.73
InAs	6.0584	0.354	-5.08	1.00	-1.8	8.329	4.526	0.023	20.4	8.3	9.1
InP	5.8688	1.344	-5.04	1.27	-1.7	10.11	5.61	0.077	4.95	1.65	2.35
GaP	5.4505	2.780	-7.14	1.70	-1.8	14.05	6.203	0.25	4.05	0.49	1.25

### 3 计算结果和分析

图 1 所示为不同载流子浓度对应的无应变量子阱 TE 模和 TM 模的折射率变化谱. 其中, 温度为 300 K, 阱区材料为  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , 阱宽为 8 nm, 垒区材料为  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}_{0.40}\text{P}_{0.60}$ . 由图 1 可见, 随着载流子浓度的增加, TE 模和 TM 模折射率变化量增加. 载流子浓度增加时, 主要是通过改变准费米能级来影响 TE 模和 TM 模的折射率变化量. 表 2 给出了计算过程中得到的不同载流子浓度对应的导带和价带的准费米能级. 从表 2 中可以看出, 随着载流子浓度的增加, 导带的准费米能级逐渐升高, 价带的准费米能级逐渐降低, 使得粒子数反转程度加深, 受激辐射得到加强, 导致更大的折射率变化量.

图 2 所示为不同张应变变量对应的 TE 模和 TM 模折射率变化谱. 其中, 张应变变量分别取 0, 0.2%, 0.4% 和 0.6% (对应阱区材料  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  中 Ga 组分  $x$  分别为 0.47, 0.50, 0.52 和 0.55), 载流子浓度恒定为  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 温度等其他参数同图 1. 表 3 列出了计算过程中得到的带边 ( $k_t = 0$ ) 跃迁能量和跃迁动量矩阵元. 从表 3 可以看出, 随着张应变变量的增加, 带边跃迁能量逐渐增大, 这是材料组分的变化引起的材料禁带宽度的展宽与张应变效应导

表 2 不同载流子浓度对应的准费米能级

载流子浓度 $/\text{cm}^{-3}$	导带准费米能级 $E_{Fc}/\text{eV}$	价带准费米能级 $E_{Fv}/\text{eV}$
$1 \times 10^{18}$	0.8186	-0.0430
$2 \times 10^{18}$	0.8679	-0.0856
$3 \times 10^{18}$	0.9137	-0.1238
$4 \times 10^{18}$	0.9590	-0.1612

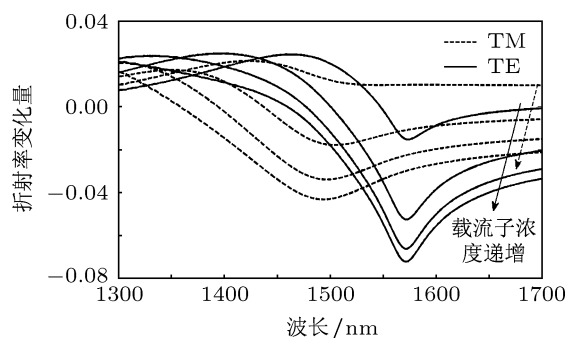


图 1 不同载流子浓度对应的 InGaAs/InGaAsP 量子阱结构折射率变化谱. 图中 TE (TM) 模曲线对应的载流子浓度由  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  增加到  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 间隔为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

致的带隙收缩竞争的结果. 由于材料组分变化导致的禁带展宽要强于张应变引起的带隙收缩, 所以总的跃迁能量增加. 跃迁能量的增加使得图 2 中折射

率变化的峰值往短波长方向移动. 从表 3 中还可以看出, 在张应变由 0.4% 增加到 0.6% 的过程中, 导带到重空穴带的带边跃迁能量变得高于导带到轻空穴带的带边跃迁能量, 表明此时轻空穴带越过了重空穴带成为价带第一子带, 这导致了图 2 中 TM 模峰值折射率变化量对应的波长变得比 TE 模大. 轻重空穴带位置关系的变化, 还使得原本主要发生在导带与重空穴带之间的跃迁变为主要发生在导带与轻空穴带之间, 由于导带到轻空穴带的跃迁对 TM 模有主要贡献, 所以带边 TM 模动量矩阵元陡然增大. 对于 TE 模, 虽然对其有主要影响的是导带到重空穴带的跃迁, 但导带到轻空穴带的跃迁对其也有少量的贡献, 所以此时带边 TE 模动量矩阵元仍具有一定的大小.

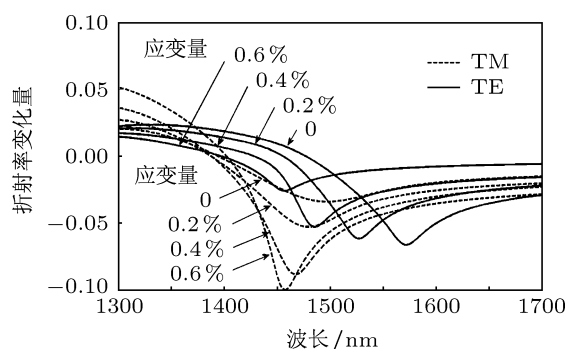


图 2 不同张应变量对应的 InGaAs/InGaAsP 量子阱结构的折射率变化谱

表 3 不同张应变量对应的量子阱带边跃迁能量和跃迁动量矩阵元

张应变 变量	导带到重空穴带的 带边跃迁能量/eV	导带到轻空穴带的 带边跃迁能量/eV	带边跃迁动量矩阵元 /10 <sup>-30</sup> kg·eV	
			TE 模	TM 模
0.0	0.7911	0.8269	2.3696	8.4357×10 <sup>-30</sup>
0.2%	0.8143	0.8364	2.4088	2.7523×10 <sup>-30</sup>
0.4%	0.8375	0.8454	2.4517	2.3722×10 <sup>-29</sup>
0.6%	0.8608	0.8539	0.8275	3.7915

图 3 所示为不同阱宽时 TE 模和 TM 模折射率变化谱. 此时阱区材料、垒区材料和载流子浓度等参数同图 2, 计算过程中得到的带边跃迁能量和跃迁动量矩阵元见表 4. 从图 3 可以看出, 随着阱宽的增加, 量子限制效应减弱, TM 模折射率变化增强, TE 模折射率变化受到抑制. 由表 4 可以看出, 随着阱宽的增加, 带边跃迁能量逐渐降低, 导致图 3 中 TE 模和 TM 模折射率变化的峰值往长波长方向

移动.

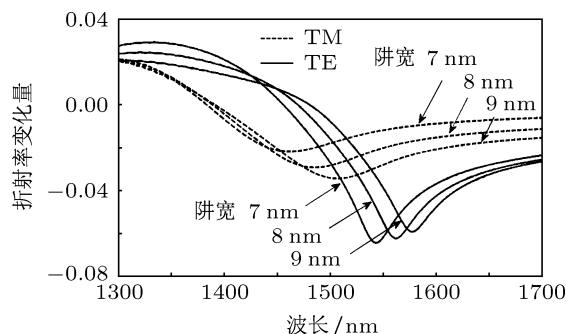


图 3 不同阱宽对应的 InGaAs/InGaAsP 量子阱结构的折射率变化谱

表 4 不同阱宽对应的量子阱带边跃迁能量和跃迁动量矩阵元

阱宽 /nm	导带到重空穴带的 带边跃迁能量/eV	导带到轻空穴带的 带边跃迁能量/eV	带边跃迁动量矩阵元 /10 <sup>-30</sup> kg·eV	
			TE 模	TM 模
7	0.7997	0.8403	2.3118	1.3499×10 <sup>-29</sup>
8	0.7911	0.8269	2.3696	8.4357×10 <sup>-30</sup>
9	0.7842	0.8159	2.4151	9.4331×10 <sup>-29</sup>

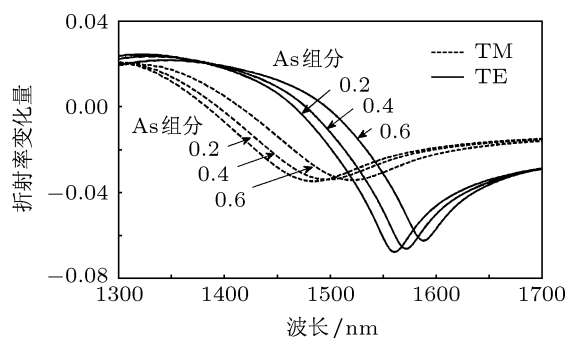


图 4 不同垒区材料组分对应的 InGaAs/InGaAsP 量子阱结构的折射率变化谱

表 5 不同垒区材料组分对应的量子阱带边跃迁能量和跃迁动量矩阵元

垒区 组分 y	导带到重空穴带的 带边跃迁能量/eV	导带到轻空穴带的 带边跃迁能量/eV	带边跃迁动量矩阵元 /10 <sup>-30</sup> kg·eV	
			TE 模	TM 模
0.2	0.7966	0.8341	2.4476	1.2481×10 <sup>-31</sup>
0.4	0.7911	0.8269	2.3696	8.4357×10 <sup>-30</sup>
0.6	0.7830	0.8135	2.2311	4.5003×10 <sup>-30</sup>

图 4 为量子阱阱区和垒区保持晶格匹配条件下, 垒区材料 In<sub>1-x'</sub>Ga<sub>x'</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> 中 As 组分 y 的改变对 TE 模和 TM 模折射率变化谱的影

响, 此时 Ga 组分  $x'$  和 As 组分  $y$  满足关系式为  $x' = 0.1894y / (0.4184 - 0.013y)$ , 其他参数同图 2, 计算过程中得到的带边跃迁能量和跃迁动量矩阵元见表 5. 从图 4 可以看出, 垒区材料组分的变化引起了阱区折射率变化量的改变, 这是因为量子阱阱区导带和价带中的子带分布受到了垒区材料组分变化的影响. 由表 5 可以看出, 随着组分  $y$  的增加, 导带到价带的带边跃迁能量逐渐减小, 导致

TE 模和 TM 模折射率变化的峰值向长波长方向移动.

为在一定波长范围内同时具有大的折射率变化量和折射率变化低偏振相关, 综合调配载流子浓度、应变量、阱宽和垒区材料组分等参数. 通过优化设计, 得到两个在 1550 nm 波长附近的张应变单量子阱结构, 其设计参数见表 6, 相应的折射率变化谱如图 5 所示.

表 6 1550 nm 张应变单量子阱结构设计参数

	阱区材料	垒区材料	张应变量/%	阱宽/nm	载流子浓度/cm <sup>3</sup>
第一组	In <sub>0.48</sub> Ga <sub>0.52</sub> As (λ <sub>g</sub> = 1.57 μm)	In <sub>0.87</sub> Ga <sub>0.13</sub> As <sub>0.28</sub> P <sub>0.72</sub> (λ <sub>g</sub> = 1.08 μm)	0.33	10	1.03 × 10 <sup>18</sup>
第二组	In <sub>0.49</sub> Ga <sub>0.51</sub> As (λ <sub>g</sub> = 1.58 μm)	In <sub>0.70</sub> Ga <sub>0.30</sub> As <sub>0.65</sub> P <sub>0.35</sub> (λ <sub>g</sub> = 1.36 μm)	0.31	8	1.24 × 10 <sup>18</sup>

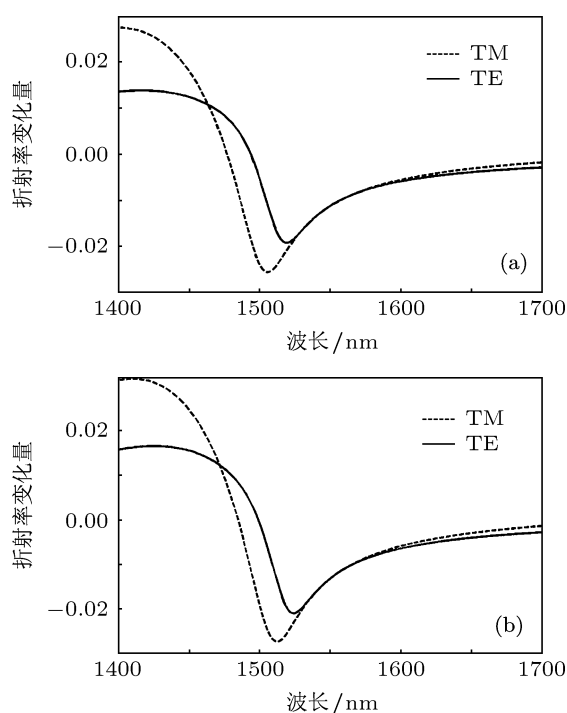


图 5 两组不同参数对应的 InGaAs/InGaAsP 量子阱结构折射率变化谱 (a) 第一组参数; (b) 第二组参数

从图 5(a) 和 (b) 可见, 在 1530—1570 nm 波长范围内, TE 模和 TM 模都具有大的折射率变化量, 在  $1 \times 10^{-2}$  左右; 同时, TE 模和 TM 模的折射率变化谱线基本重合. 以图 5(a) 为例, 做出 TE 模和 TM 模折射率变化量之差在 1530—1570 nm 范围的波长响应谱, 如图 6 所示. 由图 6 可见, TE 模和 TM 模折射率变化量之差在  $1.15 \times 10^{-4}$  内, 具有很低的偏振相关性. 以上分析表明, 综合调配载流子浓度、

应变量、阱宽和垒区材料组分等参数不仅可以同时得到大的折射率变化量和折射率变化低偏振相关, 而且采用不同的调配参数组合可以得到基本一致的折射率变化谱.

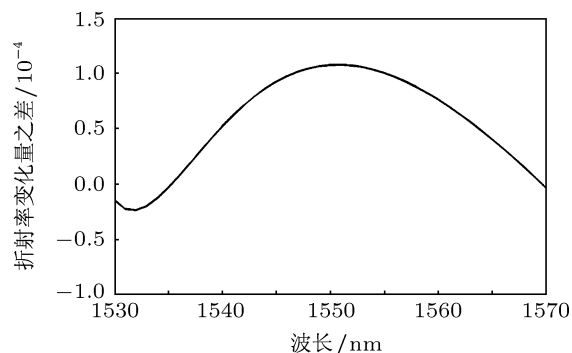


图 6 TE 模和 TM 模折射率变化量之差的波长响应谱

## 4 结论

本文对载流子浓度、张应变量的大小、量子阱宽度和垒区材料组分对 InGaAs/InGaAsP 量子阱结构 TE 模和 TM 模折射率变化的影响进行了分析. 在此基础上, 通过综合调配以上参数, 设计出在 1550 nm 工作波长附近 40 nm 波长范围内同时具有大的折射率变化量和折射率变化低偏振相关的量子阱结构; 分析结果表明, 采用不同的调配参数组合, 可以得到基本一致的折射率变化谱.

- [1] Huang B, Liu H X, Wang X, Liang Y X, He Z, Yu S, Chi N 2009 *OFC/NFOEC* San Diego, USA, March 22–26, 2009 p1
- [2] Geldenhuys R, Merwe J S, Thakulsukanant K, Wang Z, Chi N, Yu S 2011 *Opt. Switch. Netw.* **8** 86
- [3] Sadagopan T, Choi S J, Choi S J, Djordjev K, Dapkus P D 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 414
- [4] Majumder S P, Sarker B C, Yoshino T 2003 *Opt. Laser Technol.* **35** 261
- [5] Kang J M, Lee S H, Kim J Y, Kwon H C, Kim T Y, Han S K 2009 *Opt. Quant. Electron.* **41** 349
- [6] Bennett B R, Soref R A, Del Alamo J A 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 113
- [7] Connelly M J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 181111
- [8] Wenzel H, Erbert G, Enders P M 1999 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **5** 637
- [9] Xu G Y, Li A Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 218 (in Chinese) [徐刚毅, 李爱珍 2004 物理学报 **53** 218]
- [10] Ahn D, Yoon S J, Chuang S L, Chang C S 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 2489
- [11] Hua L L, Song Y R, Zhang P, Zhang X, Guo K 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1703 (in Chinese) [华玲玲, 宋晏蓉, 张鹏, 张晓, 郭凯 2010 光学学报 **30** 1703]
- [12] Li X 2009 *Optoelectronic Devices* (New York: Cambridge University Press) p203
- [13] Chuang S L 2008 *Physics of Photonic Devices* (2nd Ed.) (Hoboken: John Wiley and Sons) p803

## Polarization dependence of carrier-induced refractive index change\*

Miao Qing-Yuan<sup>1)†</sup> Cui Jun<sup>1)</sup> Hu Lei-Lei<sup>2)</sup> He Jian<sup>3)</sup>  
He Ping-An<sup>1)</sup> Huang De-Xiu<sup>3)</sup>

1) (School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

2) (Accelink Technologies Co., Ltd, Wuhan 430205, China)

3) (College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 8 January 2012; revised manuscript received 2 May 2012)

### Abstract

The influences of carrier density, tensile strain, well width and barrier material component on the refractive index changes of TE mode and TM mode in quantum well are analyzed. Then the quantum wells having characteristics of both large refractive index change (on the order of  $10^{-2}$ ) and low polarization dependence (on the order of  $10^{-4}$ ) in a wavelength range from 1530 nm to 1570 nm are designed by comprehensively integrating the parameters above. The result shows that almost the same spectra of refractive index change can be acquired by integrating different groups of parameters.

**Keywords:** refractive index change, carrier-induced, polarization dependence, quantum well

**PACS:** 78.67.De, 78.20.Ci

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60877039) and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2008CDB328).

† E-mail: miaoqy@whu.edu.cn