

# 1.31 $\mu\text{m}$ InGaAsP/InGaAlAs TM 偏振高速激光器的优化设计

曾徐路<sup>1,2</sup> 于淑珍<sup>1</sup> 李奎龙<sup>1</sup> 孙玉润<sup>1</sup> 赵勇明<sup>1</sup> 赵春雨<sup>1</sup> 董建荣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 报道了一种以 InGaAsP(阱)/InGaAlAs(垒) 量子阱为有源区的 1.31  $\mu\text{m}$  TM 偏振高速激光器。以 1% 张应变的  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{As}_{0.79}\text{P}_{0.21}$  作为阱层, 0.5% 压应变的 InGaAlAs 作为垒层, 计算了由不同势垒带隙 (1.309、1.232、1.177、1.136、1.040 eV) 构成的五种多量子阱的发光特性, 和由其构成的激光器的器件特性。数值模拟分析表明, 采用适度小的势垒带隙, 既能将载流子有效限制在有源区, 又可以得到载流子在量子阱间的均匀分布, 从而改善量子阱的发光特性和激光器的性能参数。该仿真对研制低阈值电流、高特征温度和大调制带宽的 InGaAsP/InGaAlAs 应变补偿量子阱激光器具有指导意义。

**关键词** 激光器; TM 偏振; 数值模拟; InGaAsP; InGaAlAs

中图分类号 O472<sup>\*</sup>.3; O472<sup>\*</sup>.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.021401

## Design Optimization of 1.31 $\mu\text{m}$ InGaAsP/InGaAlAs TM Mode High Speed Lasers

Zeng Xulu<sup>1,2</sup> Yu Shuzhen<sup>1</sup> Li Kuilong<sup>1</sup> Sun Yurun<sup>1</sup> Zhao Yongming<sup>1</sup>

Zhao Chunyu<sup>1</sup> Dong Jianrong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A novel design scheme for high speed 1.31  $\mu\text{m}$  TM mode lasers based on InGaAsP (well)/InGaAlAs (barrier) strain-compensated multiple quantum wells (MQWs) is proposed. Calculation on luminescence property with five different MQWs (10 nm, 1% tensile-strained  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{As}_{0.79}\text{P}_{0.21}$  well with 12 nm, 0.5% compress-strained InGaAlAs barriers of  $E_g = 1.309, 1.232, 1.177, 1.136, 1.040$  eV, respectively) and simulation on laser diodes based on these MQWs are presented. The results of these studies indicate that moderately small barrier height can not only provide effective confinement for charge carriers, but also make carrier distribution in the MQWs more uniform, thus acquiring advantageous luminescence property and device performance. Our investigation gives guidance to the design and fabrication of 1.31  $\mu\text{m}$  TM mode lasers of low threshold current, high characteristic temperature, and wide modulation bandwidth.

**Key words** lasers; TM polarization; numerical simulation; InGaAsP; InGaAlAs

**OCIS codes** 140.3510; 060.2380; 310.4165; 250.5590; 250.5960

## 1 引言

在光纤通信领域, 1.31  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 量子阱激光器已得到深入的研究和广泛的应用。目前, 商用的

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-10-25; 网络出版日期: 2014-01-20

作者简介: 曾徐路 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事 MOCVD 生长 InP 和 GaAs 基激光器的研究。

E-mail: xlzeng2012@sinano.ac.cn

导师简介: 董建荣 (1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事 MOCVD 生长 InP 和 GaAs 基 III-V 族光电材料及器件方面的研究。E-mail: jrdong2007@sinano.ac.cn (通信联系人)

长波长(1.31  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$ )光纤通信激光器采用 InGaAsP/InP 量子阱作为有源区,其主要瓶颈是特征温度低(一般只有 50 K~60 K),难以高温无制冷工作。究其原因,是该材料体系导带带阶比( $\Delta E_c \approx 0.4\Delta E_g$ )小,不能有效抑制电子溢流。小的导带带阶比也不利于空穴在各量子阱间均匀分布,从而限制了激光器的动态特性。若以 InGaAsP 作为阱层,InGaAlAs 作为垒层,可以得到较大的导带带阶比( $\Delta E_c \approx 0.72\Delta E_g$ ),同时减小空穴在各量子阱间的传输效应,从而提高激光器的性能。

另外,理论预测,同匹配和压应变量子阱激光器相比,张应变量子阱激光器的某些性能更优越,如更低的阈值电流、更大的微分增益系数和更大的辐射复合系数等<sup>[1-3]</sup>;另一方面,张应变量子阱的激射模式为横磁波(TM)偏振,作为一个独特的方法,张应变被用于实现 1.31  $\mu\text{m}$  半导体光放大器(SOA)增益的偏振不灵敏性和 1.55  $\mu\text{m}$  双偏振量子阱激光器。

目前,已有报道通过金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术获得高质量的 InGaAsP/InGaAlAs 应变补偿量子阱<sup>[4-6]</sup>,并应用于 1.55  $\mu\text{m}$  直接调制激光器。然而,尚未见 InGaAsP/InGaAlAs 张应变量子阱在 1.31  $\mu\text{m}$  波段的应用。本文将通过对不同势垒带隙的量子阱发光特性和激光器性能的计算分析,寻找一个优化的势垒带隙,为该型激光器的设计和研制奠定基础。

## 2 设计内容和计算方法

由于量子限制效应造成的轻、重空穴能级移动方向与张应变引起的移动方向相反,为了实现高性能的 TM 偏振输出,应采取尽可能大的张应变量和阱宽<sup>[6]</sup>。此外,实验发现,以 MOCVD 技术生长 InGaAsP/InGaAlAs 应变补偿量子阱结构时,取得高质量多量子阱(MQW)的应变量上限是  $\pm 1\%$ 。当应变量大于  $\pm 1\%$  时,出现了三维(3D)生长、应变弛豫等状况<sup>[4]</sup>。因此,以 10 nm、1%张应变的  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{As}_{0.79}\text{P}_{0.21}$  阱层,和 12 nm、0.5%压应变的 InGaAlAs 势垒,构成 6 个周期的应变补偿量子阱有源区。为了研究不同势垒带隙对量子阱发光特性和激光器性能参数的影响,固定阱层材料,分别选取带隙为 1.309、1.232、1.177、1.136、1.040 eV 的势垒构成五种不同的多量子阱。有源区外由 InGaAlAs 折射率渐变分别限制异质结构(SCH),InAlAs 上、下限制层以及衬底与下限制层之间、欧姆接触层与上限制层之间的 InGaAlAs 过渡层等构成。采用深脊形波导的二维(2D)激光器结构如图 1 所示,相关参数的设定值与参考文献如表 1 所示。

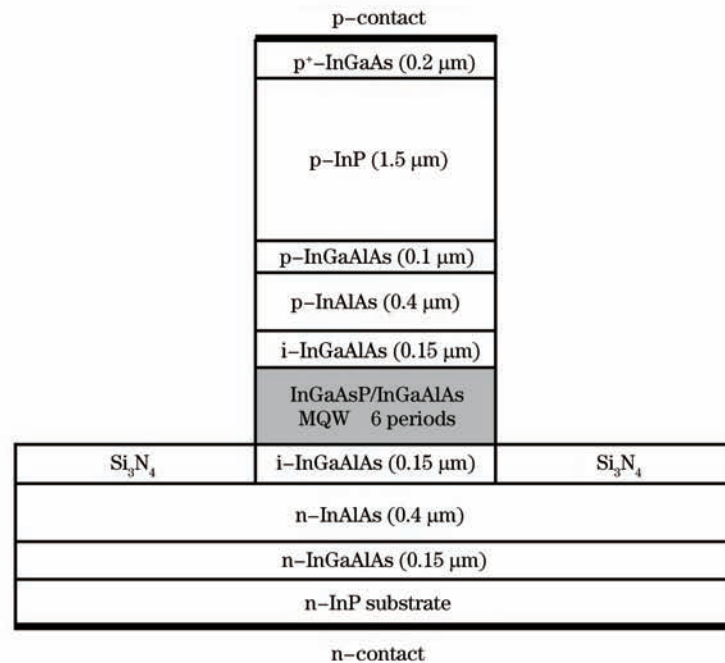


图 1 InGaAsP/InGaAlAs 激光器二维结构图

Fig.1 2D structure of InGaAsP/InGaAlAs MQW laser

表1 相关参数设定值与参考文献

Table 1 Parameter settings and corresponding references

Parameter	Material	Value	Reference
Intraband scattering lifetime	Active region	0.1 ps	[7]
Auger recombination coefficient	Active region	$C_n=C_p=2.5 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$	[8]
Gradient intraband scattering lifetime	Active region	$0.004 \times 10^{-13} \text{ K}^{-1}$	[9]
Non-radiative recombination lifetime	Active region	10 ns	[7]
	Passive bulk layers	100 ns	[7]
Inter-valence band absorption(IVBA) loss coefficient	Active region	$35 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	[8]
	Passive bulk layers	$13 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	[8]
Facets reflectivity		0.32, 0.32	-
Nonlinear gain compression factor		$3 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$	[10]
Background loss		$500 \text{ m}^{-1}$	-
Operation temperature		300 K	-
Ridge width		3 $\mu\text{m}$	-
Cavity length		400 $\mu\text{m}$	-

根据线性内插法和 Harrison 模型,调整了不同势垒时 InGaAsP/InGaAlAs 的异质结带阶比,结果如表 2 所示。利用加拿大 Crosslight 公司开发的 LASTIP 数值模拟软件<sup>[9]</sup>来分析上述激光器的发光特性和器件性能。LASTIP 软件首先通过计算库仑增强的增益谱函数来得到不同波长和不同载流子浓度下,体材料和量子阱所产生的材料增益和损耗。得到所需要的材料增益与波长的关系后,接着利用有限元方法计算各类特性方程,如泊松方程、电流连续方程、光场分布方程等,来模拟所设计的激光器特性。同时,热效应也会藉由解热流方程而包含在所模拟的器件特性中,以期计算结果与实验情况更为接近。

表2 阱、垒的异质结带阶

Table 2 Heterostructure bandgap offset between well and barrier

Al- fraction	Barrier bandgap $E_g/\text{eV}$	Electron barrier $\Delta E_c/\text{meV}$	HH-HH barrier $\Delta E_{v,hh-hh}/\text{meV}$	LH-LH barrier $\Delta E_{v,lh-lh}/\text{meV}$	LH-HH barrier $\Delta E_{v,lh-hh}/\text{meV}$	$\Delta E_c / (\Delta E_c + \Delta E_{v,lh-hh}) / \%$
0.4	1.309	250.6	67.9	144.4	112	69.11%
0.35	1.232	203.3	40.4	118.1	85.5	70.39%
0.315	1.177	169.4	22.3	100.5	67.3	71.57%
0.288	1.136	144.8	-	86.5	53.4	73.08%
0.225	1.040	88.7	-	54.7	21.9	80.22%

在计算连续工作模式下的器件特性时,考虑了能带重整效应。在计算不同工作温度下的器件特性时,设定俄歇复合率与温度的关系由下式表示:

$$C(T) = C_0(T_0) \times \exp\left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right],$$

式中  $k$  代表玻尔兹曼常数,  $E_A$  代表激活能。根据 InGaAsP(InAsP) 材料系统的参数,令  $T_0=300 \text{ K}$  时,  $C_0=2.5 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$ <sup>[11]</sup>, 激活能  $E_A$  则设定为 132 meV。

### 3 计算结果与分析

以考虑了应变以及轻空穴能级(LH)、重空穴能级(HH)和自旋轨道分裂能级(SO)之间的价带混合效应的  $6 \times 6$  Luttinger-Kohn 哈密顿量对量子阱能级进行精确求解,结果如图 2 所示。从图中可以看出,张应变使轻空穴能级成为价带第一子能级,轻、重空穴能级有较大的能量间隔,轻空穴能级在较大的  $k$  空间范围内呈抛物线形。应变补偿结构能进一步抑制价带混合效应,有助于获得更大的微分增益系数<sup>[12]</sup>。此外,随着势垒高度的降低,可以观察到量子阱子能级数量逐步减少。

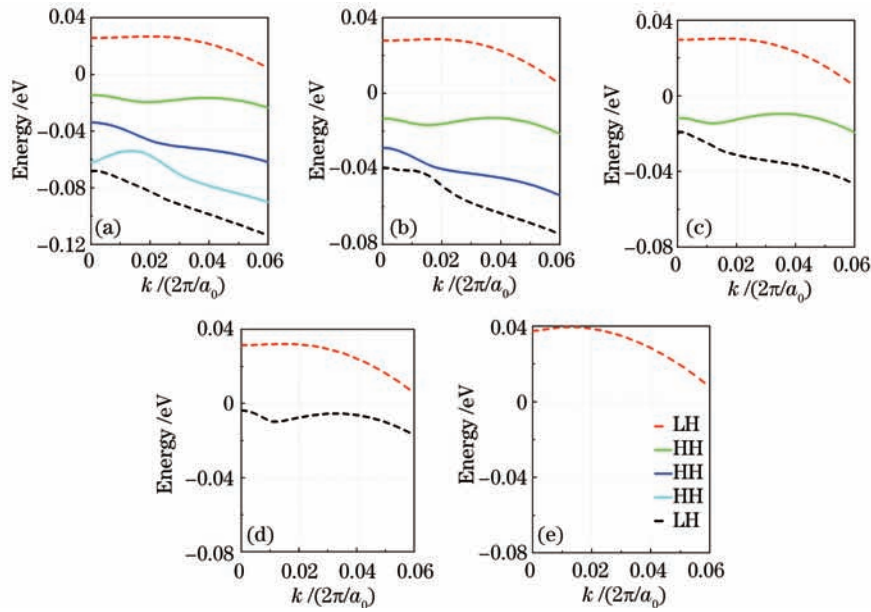


图2 五种不同量子阱的能带结构图。(a)势垒带隙为1.309 eV;(b)势垒带隙为1.232 eV;(c)势垒带隙为1.177 eV;(d)势垒带隙为1.136 eV;(e)势垒带隙为1.040 eV

Fig.2 Band structure of MQWs for five different barrier bandgaps.(a)  $E_g=1.309$  eV barrier;(b)  $E_g=1.232$  eV barrier;(c)  $E_g=1.177$  eV barrier;(d)  $E_g=1.136$  eV barrier;(e)  $E_g=1.040$  eV barrier

设定注入载流子浓度为  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 计算的自发辐射率、TM材料增益特性如图3所示。可以观察到, 五种量子阱的自发辐射和辐射复合发光波长均在  $1.3 \mu\text{m}$  附近。采用带隙为  $1.136 \text{ eV}$  的势垒时, 量子阱具有最高的自发辐射率和TM材料增益。设定注入载流子浓度范围为  $3 \times 10^{17} \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 计算的峰值材料增益与注入载流子浓度的关系, 如图4所示。图中显示, 采用带隙为  $1.136 \text{ eV}$  的势垒时, 拥有最小的透明载流子浓度和最高的峰值材料增益。这是因为随着势垒高度的降低, 阱中的重空穴能级数量从3减至0, 价带混合效应逐步减小, 因而获得了更大的微分增益系数。当势垒高度进一步降低时, 量子阱对载流子的限制作用不足, 参与辐射复合的载流子浓度减少, 导致发光特性退化。

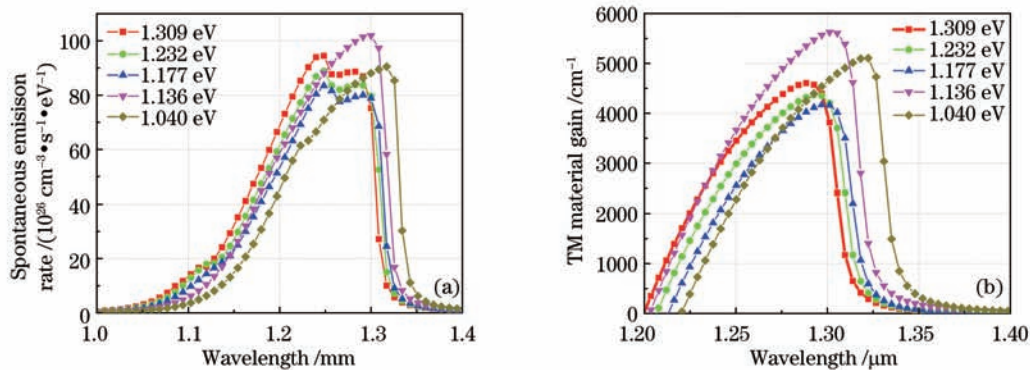


图3 (a)五种不同量子阱的自发辐射率;(b). 五种不同量子阱的TM材料增益。

Fig.3 (a) Spontaneous emission rate of MQWs for five different barrier bandgaps; (b) TM material gain of MQWs for five different barrier bandgaps

设定注入电流为  $80 \text{ mA}$ , 量子阱中的载流子浓度  $n, p$  分布如图5所示。从图中可以看到, 当势垒带隙为  $1.309 \text{ eV}$  时, 载流子集中分布于紧邻  $n$  侧SCH的量子阱中, 沿远离  $n$  侧SCH方向, 各量子阱载流子浓度逐渐降低。当势垒带隙为  $1.232 \text{ eV}$  和  $1.177 \text{ eV}$  时, 载流子在阱间的分布渐趋均匀。当势垒带隙为  $1.136 \text{ eV}$  时, 由于量子阱的限制作用进一步减弱, 各阱间载流子分布更加均匀。而当势垒带隙为  $1.040 \text{ eV}$  时, LH-HH势垒仅  $21.9 \text{ meV}$ , 虽然各阱间载流子分布均匀, 但轻、重空穴被分别限制在阱层和垒层中, 垒中重空穴能级态密度较阱中轻空穴能级态密度大, 导致垒中总空穴浓度较阱中的大。



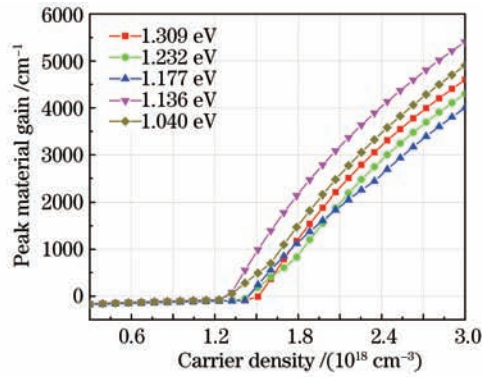


图4 五种不同量子阱的峰值材料增益与注入载流子浓度关系

Fig.4 Relationship between peak material gain and carrier density of MQWs for five different barrier bandgaps

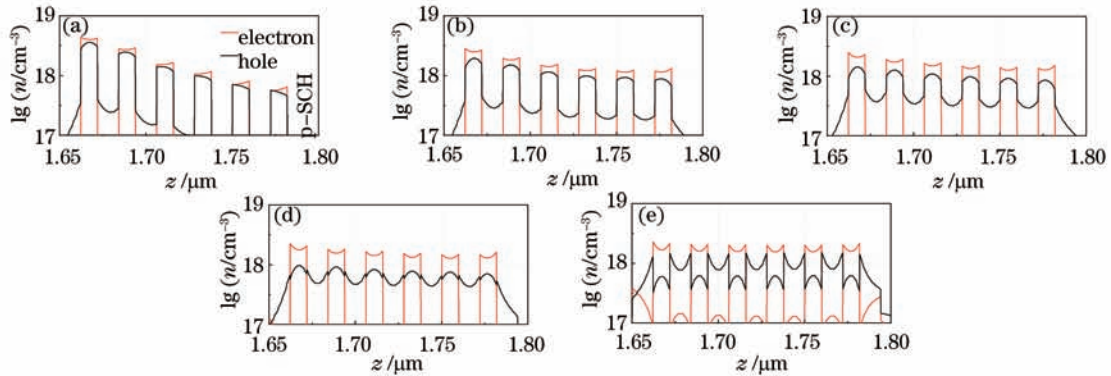


图5 五种不同量子阱的载流子浓度。(a)势垒带隙为 1.309 eV ;(b)势垒带隙为 1.232 eV ;(c)势垒带隙为 1.177 eV ;(d)势垒带隙为 1.136 eV ;(e)势垒带隙为 1.040 eV

Fig.5 Carrier concentrations of MQWs with five different barrier bandgaps. (a)  $E_g=1.309$  eV barrier; (b)  $E_g=1.232$  eV barrier; (c)  $E_g=1.177$  eV barrier; (d)  $E_g=1.136$  eV barrier; (e)  $E_g=1.040$  eV barrier

对于直接调制激光器,微分增益系数是限制调制带宽的主要因素之一,提高微分增益系数可以提高调制带宽,并降低线宽增强因子。上述五种多量子阱的微分增益系数如图6所示。可以观察到,当势垒带隙为 1.309 eV时,紧邻 p 侧 SCH 的量子阱微分增益系数最大,沿远离 p 侧 SCH 方向,各量子阱微分增益系数逐渐下降;这是由于微分增益系数与载流子浓度  $n$  成反比( $\frac{\partial g}{\partial n} \propto n^{-1}$ )。随着势垒带隙减小,电子易溢出量子阱,为达到粒子数反转条件所需注入的电子浓度增大,因此电子的微分增益系数降低;同时,当势垒越低时,阱中空穴浓度越小,空穴的微分增益系数越大。

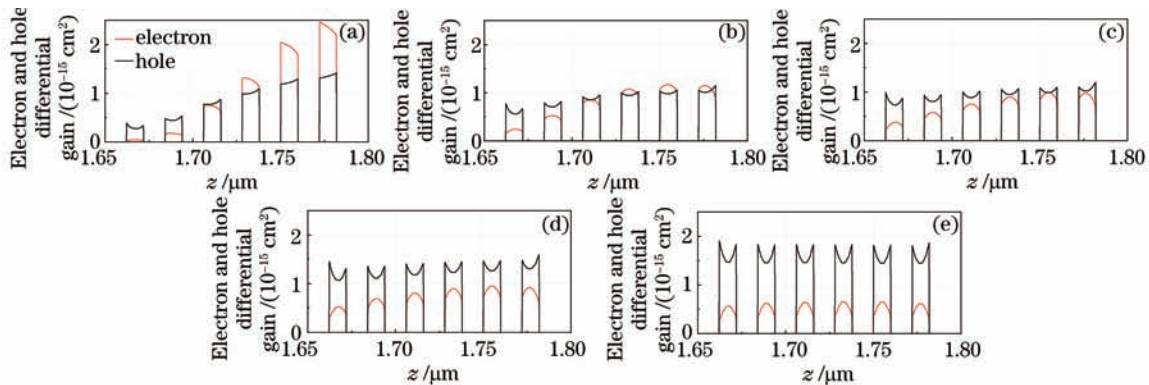


图6 五种不同量子阱的微分增益系数。(a)势垒带隙为 1.309 eV ;(b)势垒带隙为 1.232 eV ;(c)势垒带隙为 1.177 eV ;(d)势垒带隙为 1.136 eV ;(e)势垒带隙为 1.040 eV

Fig.6 Differential gain factors of MQWs with five different barrier bandgaps. (a)  $E_g=1.309$  eV barrier; (b)  $E_g=1.232$  eV barrier; (c)  $E_g=1.177$  eV barrier; (d)  $E_g=1.136$  eV barrier; (e)  $E_g=1.040$  eV barrier

对于光纤通信激光器,俄歇复合是制约其温度特性的主要因素。我们对比了不同势垒带隙下量子阱的俄歇复合率,如图7所示。由于俄歇复合率与载流子浓度的三次方成正比,因此各量子阱不同的俄歇复合率反映了不同的载流子注入水平。值得注意的是,当势垒带隙为1.040 eV时,量子阱以载流子大量溢出为代价,而拥有最小的俄歇复合率。

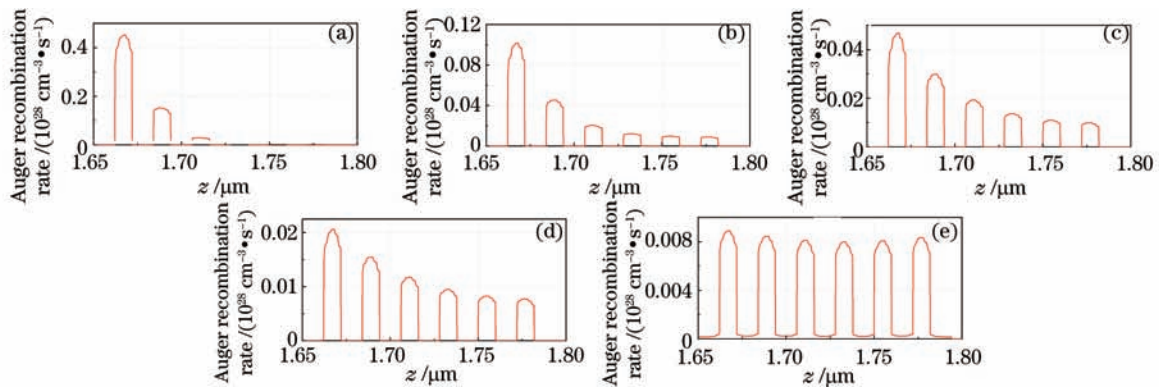


图7 五种不同量子阱的俄歇复合率。(a)势垒带隙为1.309 eV;(b)势垒带隙为1.232 eV;(c)势垒带隙为1.177 eV;(d)势垒带隙为1.136 eV;(e)势垒带隙为1.040 eV

Fig.7 Auger recombination rates of MQWs with five different barrier bandgaps. (a)  $E_g=1.309$  eV barrier; (b)  $E_g=1.232$  eV barrier; (c)  $E_g=1.177$  eV barrier; (d)  $E_g=1.136$  eV barrier; (e)  $E_g=1.040$  eV barrier

图8为连续工作模式下,激光器的阈值电流和斜率效率与势垒带隙的关系图。随着势垒带隙的减小,载流子得以均匀注入各阱,阈值电流明显降低,斜率效率提高;而若势垒过低则造成载流子大量溢出量子阱,使阈值电流略微增大,斜率效率略微降低。势垒带隙为1.040 eV时,阈值电流为2.6 mA,斜率效率为0.666 mW/mA;而势垒带隙为1.136 eV时,阈值电流为2.5 mA,斜率效率为0.669 mW/mA,具有最低的阈值电流和最大的斜率效率。

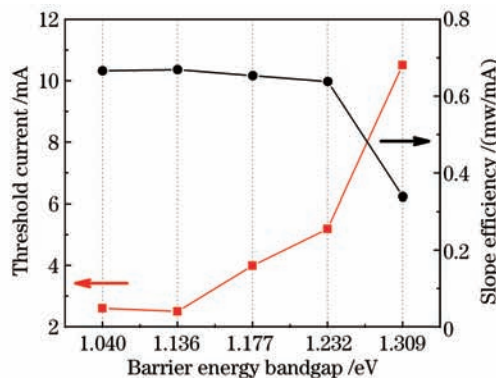


图8 连续工作模式下激光器的阈值电流和斜率效率与势垒带隙的关系

Fig.8 Dependence of threshold current and slope efficiency for continuous-wave (CW) operation on device structure

设定注入电流为20 mA,激光器的3 dB调制带宽与势垒带隙的关系如图9所示。可以看到,当势垒带隙从1.309 eV减小至1.136 eV时,调制带宽随势垒带隙减小而增大,这主要得益于微分增益系数逐渐提高。但调制带宽不仅与微分增益系数有关,还与激光器的阈值电流等有关。当势垒带隙进一步减小至1.040 eV时,虽然微分增益系数提高,但阈值电流增加,导致调制带宽反而减小。

因此,势垒带隙为1.136 eV,既能提高量子阱发光特性,又能获得最低的阈值电流和最大的调制带宽,是上述五种势垒带隙的最优值。

最后计算了以1.136 eV作为势垒带隙时,激光器在290 K~390 K温度区间的阈值电流和斜率效率,如图10所示。在290 K~360 K温度区间,激光器特征温度为110.8 K;在360 K~390 K温度区间,激光器特征温度为76.4 K。可以看出,该激光器具有较高的特征温度,能够满足无制冷工作的要求。

## 4 结 论

以InGaAsP(阱)/InGaAlAs(垒)材料体系为有源区,设计并数值模拟了1.31 μm TM偏振量子阱激光

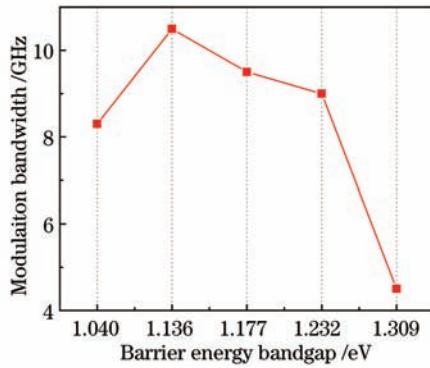


图9 激光器的调制带宽与势垒带隙的关系

Fig.9 Dependence of modulation bandwidth with CW operation on device structure

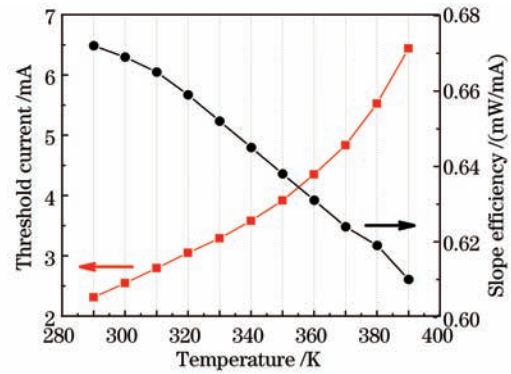


图10 势垒带隙为1.136 eV时,激光器在290 K~390 K区间内的阈值电流和斜率效率

Fig.10 Threshold current and slope efficiency of laser diode with  $E_g=1.136$  eV barrier at operation temperature from 290 K to 390 K

器。通过计算不同的势垒带隙对量子阱发光特性和激光器性能参数的影响,我们认为采用适度小的势垒带隙,既能将载流子有效限制在有源区,又能得到载流子在多量子阱间的均匀分布,从而提高量子阱的发光特性,并获得更低的阈值电流、更低的特征温度、更大的微分增益系数以及更大的调制带宽。分析结果表明,InGaAsP/InGaAlAs张应变量子阱结构在需要TM偏振输出的高速光纤通信激光器、双偏振量子阱激光器等领域具备相当的优势和较好的应用前景。下阶一段我们将进一步优化器件结构,并开展该型量子阱激光器的MOCVD生长、制作和特性研究等工作。

#### 参考文献

- 1 E P O'Reilly, G Jones, A Ghati, *et al.*. Improved performance due to suppression of spontaneous emission in tensile-strain semiconductor lasers[J]. *Electron Lett*, 1991, 27(16): 1417-1419.
- 2 S W Ryu, W G Jeong, B D Choe. Analysis of the performance of 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAs-InP tensile strained quantum-well lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 35(8): 1207-1212.
- 3 Piprek J, Abraham P, Bowers J E. Carrier nonuniformity effects on the internal efficiency of multi-quantum well lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(4): 489-491.
- 4 Yasuhiro Matsui, Hitoshi Murai, Shin Arahira, *et al.*. Enhanced modulation bandwidth for strain-compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 34(10): 1970-1978.
- 5 M Nadeem Akram, O Kjebon, M Chacinski, *et al.*. Experimental characterization of high-speed 1.55  $\mu\text{m}$  buried heterostructure InGaAsP/InGaAlAs quantum-well lasers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(2): 318-327.
- 6 Yasuhiro Matsui, Hitoshi Murai, Shin Arahira, *et al.*. 30-GHz bandwidth 1.55- $\mu\text{m}$  strain-compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(1): 25-27.
- 7 M Nadeem Akram, Christofer Silfvenius, Olle Kjebon, *et al.*. Design optimization of InGaAsP-InGaAlAs 1.55  $\mu\text{m}$  strain-compensated MQW lasers for direct modulation applications[J]. *Semicond Sci Technol*, 2004, 19(5): 615-625.
- 8 Piprek J, White J K, SpringThorpe A J. What limits the maximum output power of long-wavelength AlGaInAs/InP laser diodes?[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(9): 1253-1259.
- 9 LASTIP Users's Manual 2011[EB/OL]. <http://www.crosslight.com>
- 10 J C L Yong, J M Rorison, I H White. 1.3  $\mu\text{m}$  quantum-well InGaAsP, AlGaInAs, and InGaAsN laser material gain: a theoretical study[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(12): 1553-1564
- 11 S Mogg, J Piprek. Optimization of the barrier height in 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP multiple-quantum-well active regions for high temperature operation[C]. *SPIE*, 2001, 4283: 227-237.
- 12 Masaaki Nido, Koh-ichi Naniwae, Jun-ichi Shimizu, *et al.*. Analysis of differential gain in InGaAs-InGaAsP compressive and tensile strained quantum-well lasers and its application for estimation of high-speed modulation limit[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1993, 29(3): 885-895.