文章编号：1000-7032(2012)06-0640-07

852 nm 半导体激光器 InGaAlAs、InGaAsP、InGaAs 和 GaAs 量子阱的温度稳定性

徐华伟[1,2]，宁永强[1*]，曾玉刚[1]，张 星[1]，秦 莉[1]，刘 云[1]，王立军[1]
（1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院 研究生院，北京 100039）

摘要： 为了提高 852 nm 半导体激光器的温度稳定性，理论计算了 InGaAlAs、InGaAsP、InGaAs 和 GaAs 量子阱的增益，模拟对比并研究了不同量子阱的增益峰值和峰值波长随温度的漂移。结果显示，采用 $In_{0.15}Ga_{0.74}Al_{0.11}As$ 作为 852 nm 半导体激光器的量子阱可以使器件同时具有较高的增益峰值和良好的温度稳定性。使用金属有机化学气相沉积（MOCVD）外延生长了压应变 $In_{0.15}Ga_{0.74}Al_{0.11}As$ 单量子阱 852 nm 半导体激光器，实验测得波长随温度漂移的数值为 0.256 nm/K，实验测试结果验证了理论计算结果。

关 键 词： 激光器；AlGaInAs；量子阱；数值模拟
中图分类号： TN248.4 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3788/fgxb20123306.0640

Temperature Stability of InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs and GaAs Quantum-wells for 852 nm Laser Diode

XU Hua-wei[1,2], NING Yong-qiang[1*], ZENG Yu-gang[1],
ZHANG Xing[1], QIN Li[1], LIU Yun[1], WANG Li-jun[1]
(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to enhance the temperature stability of 852 nm laser diode, the gain of InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs and GaAs quantum-wells were calculated by a comprehensive model theory, and the peak gain and wavelength versus operation temperature for the six different quantum-wells were compared and discussed. The results indicate that $In_{0.15}Ga_{0.74}Al_{0.11}As$ quantum-well is the most appropriate candidate for 852 nm laser diode when the higher gain and better temperature stability demanded simultaneously. Compressive-strained $In_{0.15}Ga_{0.74}Al_{0.11}As$ single quantum-well 852 nm laser diode was grown by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). The wavelength shift with temperature for 852 nm laser diode is 0.256 nm/K, the experimental results are in good agreement with theoretical calculation results.

Key words: lasers; AlGaInAs; quantum-well; numerical simulation

收稿日期： 2012-03-07；**修订日期：** 2012-04-26
基金项目： 国家自然科学基金(10974012,11074247,61106047,61176045,61106068,51172225,61006054)；国家自然科学基金重点项目(90923037)资助项目
作者简介： 徐华伟(1982－)，男，吉林白山人，主要从事半导体激光器外延生长的研究。
E-mail：xuhwciomp@163.com，Tel：(0431)86176348

1　引　　言

半导体激光器具有体积小、重量轻、功率大、转化效率高、可靠性强等优点[1-3]，广泛应用于光纤通信、工业材料处理、激光医疗、国防建设等领域。激射波长为 852 nm 的半导体激光器由于可以用于 Cs 原子钟，而该原子钟为空间卫星的核心部件，因此近几年在国外得到了深入的研究[4-6]。用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器必须具有良好的温度稳定性，因此对整个激光器尤其是对量子阱材料的选择设计就变得尤为重要。目前的研究主要集中在对激光器的输出结果进行讨论，尚没有关于如何设计量子阱材料来提高 852 nm 激光器温度稳定性的报道。

本文设计了无应变的 $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区、压应变的 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区、$In_xGa_{1-x}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区和 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区、通过理论计算和 PICS3D 软件模拟对比了不同量子阱材料的材料增益以及增益峰值和波长随温度的漂移，确定了 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$ 量子阱材料的厚度和组分，选择采用压应变 $In_{0.15}Ga_{0.74}Al_{0.11}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区制作 852 nm 半导体激光器，并使用 MOCVD 外延生长了该 852 nm 边发射激光器。在线监测发现量子阱具有突变的界面和良好的外延质量，实验测试的波长随温度漂移结果验证了数值模拟结果。

2　理论分析

本文设计的 852 nm 激光器有源区分别采用无应变的 GaAs 和应变 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$、$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$、$In_xGa_{1-x}As$ 作为量子阱材料，$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 作为势垒材料。其材料参数除了非应变带隙外，均可以通过相关二元半导体化合物的材料参数线性插值得到，插值公式为[7-8]：

$$P(In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}) = P(GaAs)xy + P(GaP)x(1-y) + P(InAs)(1-x)y + P(InP)(1-x)(1-y), \quad (1)$$

$$P(In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs) = P(InAs)(1-x-y) + P(GaAs)x + P(AlAs)y, \quad (2)$$

$$P(In_xGa_{1-x}As) = P(InAs)x + P(GaAs)(1-x) - x(1-x)C. \quad (3)$$

表 1 列出了本文所需要的二元化合物的材料参数，公式 3 中的 C 值为 bowing 参数[7]，把表 1 中的参数代入公式（1）、（2）、（3）即可得到 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$、$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ 和 $In_xGa_{1-x}As$ 的带隙。其非应变公式表示为：

$P(Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y})$：

$$E_g(x,y) = 1.35 + 0.642x - 1.101y + 0.758x^2 + 0.101y^2 - 0.159xy - 0.28x^2y + 0.109xy^2, \quad (4)$$

表 1　文章中需要的二元半导体化合物参数

Table1　Parameters of the binary semiconductors used in this study[7-9]

Parameter	Symbol(unit)	GaAs	InAs	InP	GaP	AlAs
Lattice constant	a(nm)	0. 565 33	0. 605 83	0.586 97	0.545 05	0.566 1
Spin-orbit split-off	Δ(eV)	0.34	0.39	0.108	0.08	0.28
Elastic stiffness constant	C_{11}(10^6 N/cm^2)	12.21	8.33	10.11	14.05	12.5
Elastic stiffness constant	C_{12}(10^6 N/cm^2)	5.66	4.53	5.61	6.203	5.34
Hydrostatic deformation potential						
For conduction band	a_c(eV)	−7.17	−5.08	−6.0	−8.2	−5.64
For valence band	a_v(eV)	1.16	1.00	0.6	1.7	2.47
Shear deformation potential	b(eV)	−2.0	−1.8	−2.0	−1.6	−2.3
	γ_1	6.8	20.4	4.95	4.05	3.45
Luttinger parameters	γ_2	1.9	8.3	1.65	0.49	0.68
	γ_3	2.73	9.1	2.35	1.25	1.29
Electron effective mass	m_e/m_0	0.067	0.026	0.079 5	0.13	0.15
Heavy-hole effective mass	m_{hh}/m_0	0.51	0.41	0.6	0.79	0.76

$P(In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs)$：

$$E_g(x,y)=0.36+0.629x+2.093y+0.436x^2+0.577y^2+1.013xy-2xy(1-x-y),\quad(5)$$

$P(In_xGa_{1-x}As)$：

$$E_g(x,y)=1.424-1.584x+0.475x^2.\quad(6)$$

$In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$，$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$和$In_xGa_{1-x}As$的晶格常数大于GaAs衬底，因此会产生压应变效应。基于应变理论[8-10]，我们计算了压应变的体带隙。在(001)方向生长时，量子阱层平面内的应变以及导带边和价带边的漂移值可表示为：

$$\varepsilon=\varepsilon_{xx}=\varepsilon_{yy}=\frac{a_0-a}{a},\quad(7)$$

$$\varepsilon_{zz}=-\frac{C_{12}}{C_{11}}(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy})=-2\frac{C_{12}}{C_{11}}\varepsilon,\quad(8)$$

$$\delta E_c(x,y)=a_c(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}+\varepsilon_{zz})=2a_c\left(1-\frac{C_{12}}{C_{11}}\right)\varepsilon,\quad(9)$$

公式中的a和a_0分别为量子阱材料和GaAs衬底的晶格常数，a_c和a_v分别为导带静压力形变势和价带静压力形变势，b为切变形变势，C_{11}和C_{12}为弹性应变系数。因此，量子阱的压应变带隙可以表示为：

$$\delta E_{hh}=a_v(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}+\varepsilon_{zz})+\frac{b}{2}(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}-2\varepsilon_{zz}),\quad(10)$$

$$E_{c\text{-}hh}=E_{g0}(x,y)+\delta E_c-\delta E_{hh}.\quad(11)$$

$In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$、$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$和$In_xGa_{1-x}As$材料中的E_{g0}可以分别通过公式(4)、(5)、(6)得到，δE_c和δE_{hh}可以通过公式(6)和(7)得到。压应变会使得价带重空穴有效质量变小，在进行应变量子阱中空穴子能级计算时其值可以取为：

$$m_z=\frac{1}{\gamma_1-2\gamma_2}.\quad(12)$$

带阶是指势阱和势垒材料的带边差，在$In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$、$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$和$In_xGa_{1-x}As$材料中，压应变量子阱带阶采用固体模型理论计算[8,11]，其价带带边和导带带阶比可以表示为：

$$E_v=E_{v,av}+\frac{\Delta}{3}+\delta E_{hh},\quad(13)$$

$$Q_c=\frac{\delta E_c}{\delta E_g}=1-\frac{E_v^w-E_v^b}{E_g^b-E_g^w},\quad(14)$$

公式中$E_{v,av}$为价带能量平均值；Δ为自旋裂带能量，其值可以通过表1得到；E_v^w和E_v^b分别为势阱和势垒的价带边；E_g^w和E_g^b分别为势垒和势阱的应变带隙。

在量子阱结构中，方形势阱中子能级可以用克龙尼克-潘纳模型来估算[12]，能级分布可以由以下公式得到：

$$\cos[k(L_w+L_b)]=\cos(k_bL_b)\cos(k_wL_w)-\frac{k_w^2+k_b^2}{2k_wk_b}\sin(k_bL_b)\sin(k_wL_w),\quad(15)$$

公式中L_w和L_b分别为势阱和势垒宽度，其中k_b和k_w分别为：

$$k_b=i\sqrt{2m_b(V-E_i)}/\hbar,\quad(16)$$

$$k_w=\sqrt{2m_wE_i}/\hbar,\quad(17)$$

公式中的m_w和m_b分别为势阱和势垒的有效质量，V为导带或者价带的带阶，E_i为量子化子能级。将计算得到的电子有效质量和空穴有效质量、导带和价带带阶以及材料带隙带入到公式(15)中便可以得到量子化能级和阱宽的关系。

半导体量子阱激光器的激射波长主要是由导带电子的第一子能级到价带空穴的第一子能级之间的跃迁决定，这一跃迁的光子能量可以表示为：

$$E=\frac{hc}{\lambda}=E_{c\text{-}hh}+E_{c1}+E_{hh1},\quad(18)$$

式中的E_{c1}和E_{hh1}分别为导带电子的第一子能级和价带重空穴的第一子能级。

3 结果与讨论

根据跃迁矩阵元计算能带间的跃迁可以得到量子阱的增益谱，增益谱的计算公式为：

$$g(E)=\frac{e^2\pi\hbar}{\varepsilon_0m_0^2n_wcE}\cdot\int_{-\infty}^{\infty}\rho_c(E_c)\rho_v(E_v)M_{ij}^2(f_c+f_v-1)\cdot dE,\quad(19)$$

只需要在$k_{//}$方向对量子阱进行积分，并且利用跃迁选择定则即可将上式化简为：

$$g(E)=\frac{e^2\pi\hbar}{\varepsilon_0m_0^2n_wcE}M_{av}^2\left\{\frac{n_cn_v}{n_c+n_v}\right\}(1-f_c-f_v),\quad(20)$$

式中

$$M_{av}^2=\frac{1}{6}\left(\frac{m_0}{m_e}-1\right)\frac{E_g+\Delta}{E_g+\frac{2}{3}\Delta}m_0E_g,\quad(21)$$

n_w 是量子阱材料的折射率，f_c 和 f_v 分别为电子和空穴的准费米能级。

采用以上公式，使用 PICS3D 软件模拟计算了不同量子阱材料的增益谱。图 1 显示，载流子浓度为 5×10^{18} cm^{-3}、温度为 360 K 时，有源区材料 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$、$GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$、$In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.88}P_{0.12}/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 和 $In_{0.06}Ga_{0.94}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 的增益谱的峰值波长都在 852 nm 左右，压应变量子阱 $In_{0.15}Al_{0.10}Ga_{0.75}As$ 的增益峰值最高，无应变的 GaAs 的增益峰值最低。量子阱材料增益峰值越大，越容易使器件实现高功率输出。

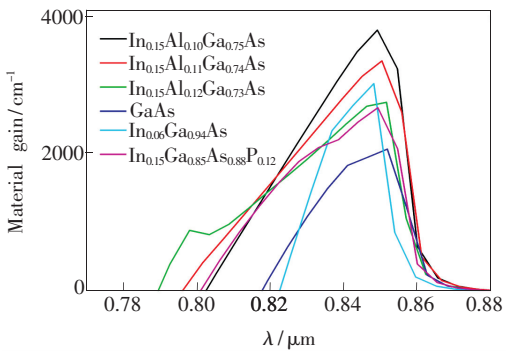

图 1　不同量子阱在温度为 360 K 的增益

Fig. 1　Material gains of the six QWs at the temperature 360 K

图 2 显示 280 ~ 360 K 之间的增益峰值和激射波长随温度的变化，注入的载流子浓度为 5×10^{18} cm^{-3}。$In_{0.15}Al_{0.12}Ga_{0.75}As$ 和 $In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.88}P_{0.12}$ 的增益峰值随温度变化最小，$In_{0.06}Ga_{0.94}As$ 的增益峰值随温度变化最大，$In_{0.15}Al_{0.10}Ga_{0.75}As$ 和 $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 在室温下的增益峰值均大于 4 000 cm^{-1}。在 340 K 以下，$In_{0.06}Ga_{0.94}As$ 的增益峰值大于 $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.75}As$ 的增益峰值；在 340 K 以上，$In_{0.06}Ga_{0.94}As$ 的增益峰值小于 $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.75}As$ 的增益峰值。

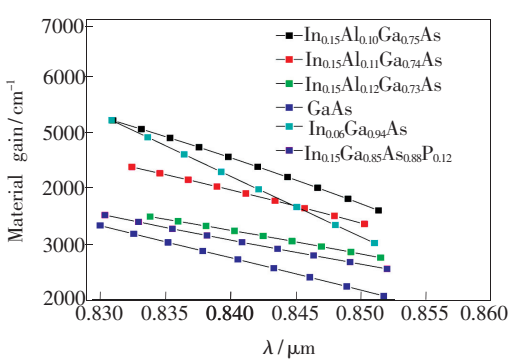

图 2　不同量子阱增益峰值随温度的变化

Fig. 2　Peak material gains versus operation temperature for the six QWs

图 3 显示不同量子阱材料峰值波长随温度的变化。峰值波长随温度增高有明显红移现象发生，$In_{0.15}Al_{0.10}Ga_{0.75}As$、$In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$、$In_{0.15}Al_{0.12}Ga_{0.73}As$、$Ga_{0.94}As$、$In_{0.06}Ga_{0.94}As$ 和 $In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.88}P_{0.12}$ 的波长随温度漂移分别为 0.224、0.222、0.22、0.271、0.285 和 0.269，显示 $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ 整体波长随温度变化最小，不同组分的 $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ 之间的数值差别不大，$In_{0.06}Ga_{0.94}As$ 波长随温度漂移值最大。通过以上对比，我们选择增益高并且增益和峰值波长随温度变化小的 $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ 材料作为 852 nm 半导体激光器量子阱材料。

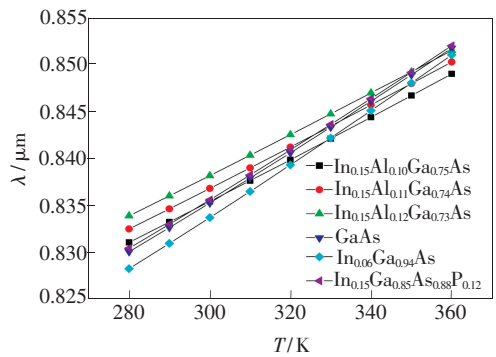

图 3　不同量子阱峰值波长随温度的变化

Fig. 3　Peak wavelengths versus operation temperature for the six QWs

将计算得到的电子有效质量和空穴有效质量以及导带带阶和价带带阶代入公式(15)，便可以得到量子化子能级和阱宽的关系。经过模拟发现，不同组分的 $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ 量子阱的量子化子能级差别不大，因此图 4 只列出 $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 的量子化子能级。图 4 中的电子子能级和空穴子能级分别是从导带底和价带顶算起，第一空穴子能级为重空穴带。

通过公式(18)可以确定在设计波长处量子阱材料的组分和厚度，图 5 显示了不同组分的 $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ 量子阱所对应的激射波长和阱宽的关系。激光器在工作状态下，由于自热效应，激射波长会随着有源区温度升高而红移，因此所设计的 852 nm 激光器在室温下工作的激射波长应该在 832 nm 左右。经过计算，得到了室温下不同组分 $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ 量子阱具体厚度。$In_{0.15}Al_{0.10}Ga_{0.75}As$ 的量子阱厚度为 6.5 nm，$In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 的量

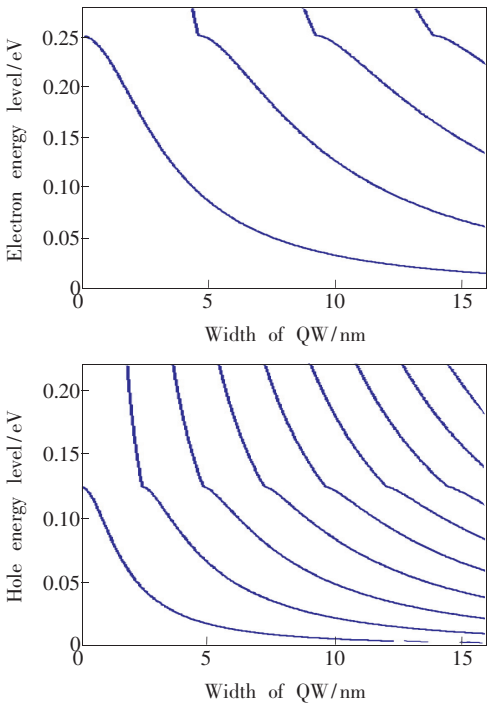

图 4 $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 压应变量子阱的子能级

Fig. 4 Energy levels of compressively strained $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ QW

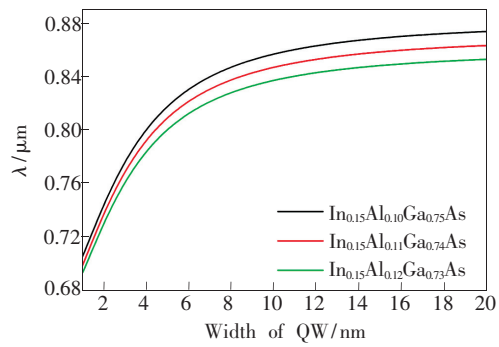

图 5 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$ 压应变量子阱的激射波长与量子阱宽度之间的关系

Fig. 5 The emission wavelength versus the width of QW for compressively stained $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ QW

子阱厚度为 8 nm，$In_{0.15}Al_{0.12}Ga_{0.73}As$ 的量子阱厚度为 10 nm。考虑到 MOCVD 外延生长难度和量子阱厚度的测量难度，我们所设计的量子阱厚度不能太小而且最好取纳米整数。$In_{0.15}Al_{0.10}Ga_{0.75}As$ 的量子阱厚度为 6.5 nm，厚度较小且不是整数，MOCVD 外延生长难度较大。$In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 和 $In_{0.15}Al_{0.12}Ga_{0.73}As$ 的外延生长均无难度，由于前面已经对增益和波长随温度漂移进行了对比，$In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 的材料增益和温度稳定性均优于 $In_{0.15}Al_{0.12}Ga_{0.73}As$，因此最终选择 $In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As$ 作为 852 nm 半导体激光器的量子阱材料。

采用 $Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As$ 量子阱制作了 852 nm 半导体激光器。为了得到质量良好的量子阱，抑制 In 从 $Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As$ 势阱层向 $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 势垒层扩散，在外延过程中采用变温生长（$Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区采用 650 ℃生长，其他外延层采用 710 ℃生长），并在势阱层与势垒层之间采用 10 s 的中断时间。为了监测外延生长条件对 $Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区的影响，使用原位监测设备在线监测了整个外延生长过程。图 6 为 852 nm 半导体激光器随时间变化的反射各向异性谱（RAS）[13-15]，从图中可以分辨出外延生长的每一层以及升温和降温的过程。从图 6 可以观察到 $Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As$ 势阱层和 $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 势垒层的 RAS 是突变的，这说明采用变温生长和在势阱层与势垒层之间采用中断时间可以有效地抑制 In 从 $Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As$ 势阱层向 $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 势垒层扩散。

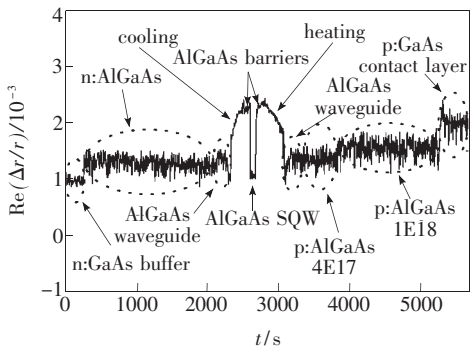

图 6 使用 RAS 在线监测整个激光器结构的外延生长过程

Fig. 6 The growth process of a complete laser structure was monitored by RAS transient spectra taken

图 7(a)为本文研制出的腔长为 1 mm、条宽为 100 μm 的用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器在室温下不加水冷时的 *P-I* 和 *V-I* 曲线。在脉冲宽度为 50 μs、重复频率为 100 Hz 的准连续工作状态下，阈值电流为 50 mA，斜率效率为 0.64 W/A，电光转换效率为 31.6%，外加电流为 500 mA 时的输出功率为 290 mW。图 5(b)表示激射波长随环境温度呈线性变化，激光器测试结果显示激射波长随温度漂移为 0.256 nm/K，其结果与理论设计模拟的数值吻合。

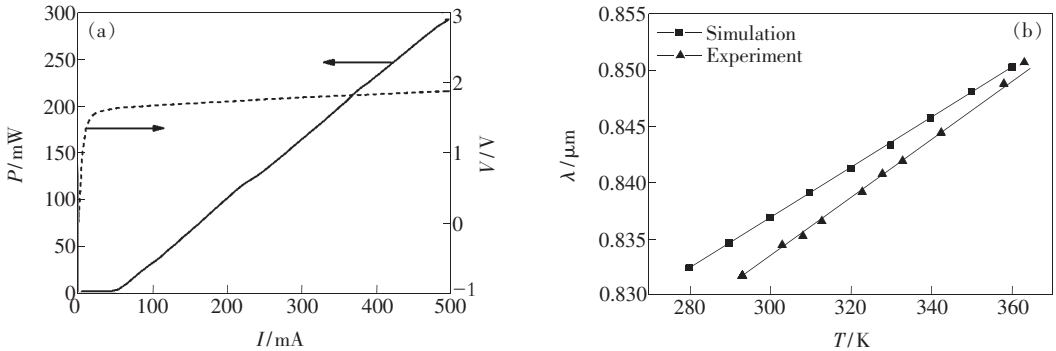

图 7　(a) *P-I* 和 *V-I* 特性曲线的实验结果；(b) 波长随温度(λ-*T*)变化的实验结果和模拟结果。

Fig. 7　(a) Experimental results of *P-I* and *V-I* output characteristics; (b) experimental and simulation results of λ-*T* output characteristics.

4　结　　论

基于能带理论对激射波长为 852 nm 的半导体激光器的量子阱进行了设计，通过理论计算和 PICS3D 模拟，对比了 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$、$In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.88}P_{0.12}/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$、$In_{0.06}Ga_{0.94}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 和 $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 有源区的增益峰值以及增益峰值和波长随温度的漂移，确定增益峰值大且温度稳定性好的 $Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 作为 852 nm 半导体激光器有源区，其在室温下的材料增益峰值大于 4 000 cm^{-1}。使用 RAS 在线监测了整个激光器的 MOCVD 外延生长过程，激光器测试结果显示激射波长随温度漂移为 0.256 nm/K，其结果与理论设计模拟的数值吻合。

参　考　文　献：

[1] Peng Biao, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Polarization characteristics of 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, 29(5):845-850 (in Chinese).

[2] Zhang Yan, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Design and fabrication of vertical-cavity surface-emitting laser with small divergence [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(1):47-52 (in Chinese).

[3] Liang Xuemei, Lu Jinkai, Cheng Liwen, *et al.* Structural design of vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser with 920 nm [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1):79-85 (in English).

[4] Cayron C, Ligeret V, Resneau P, *et al.* Four level, atomic Cs laser at 852.1 nm with a quantum efficiency above 98%: Observation of three body photoassociation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(2):021104-1-3.

[5] Timmons B, Stoner R E. Radiation exposure of distributed-feedback lasers for use in atom trapping and atom interferometry [J]. *Nuclear Science*, 2011, 58(2):490-498.

[6] Boutillier M, Gauthier-Lafaye O, Bonnefone S, *et al.* Strong electron irradiation hardness of 852 nm Al-free laser diodes [J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(9-11):1715-1719.

[7] Vurgaftman I, Meyer J R, Rarn-Mohan L R, *et al.* Band parameters for Ⅲ-Ⅴ compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(11):5815-5875.

[8] Minch J, Park S H, Keating T, *et al.* Theory and experiment of InGaAsP and InGaAlAs long-wavelength strained quantum-well lasers [J]. *Quantum Electronics*, 1999, 35(5):771-782.

[9] Zhang P, Song Y R, Tian J R, *et al.* Gain characteristics of the InGaAs strained quantum wells with GaAs, AlGaAs, and GaAsP barriers in vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 105(5):053103-1-8.

[10] Chang C S, Chuang S L. Modeling of strained quantum-well lasers with spin-orbit coupling [J]. *Quantum Electronics*, 1995, 1(2):218-229.

[11] Chris G, van de Walle. Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory [J]. *Phys. Rev.* B, 1989, 39(3):1871-1883.

[12] Yan Changling, Qin Li, Ning Yongqiang, *et al.* Calculation of energy band structure of GaInAs/ GaAs quantum well [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2004, 25(5):29-31 (in Chinese).

[13] Bugge F, Zorn M, Zeimer V, *et al.* MOVPE growth of InGaAs/GaAsP-MQWs for high power laser diodes studied by reflectance anisotropy spectroscopy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(4):1065-1069.

[14] Xu Huawei, Zhang Jinlong, Ning Yongqiang, *et al.* In-situ monitoring of AlGaAs growth by reflectance anisotropy spectroscopy in MOCVD [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(12):1297-1302 (in English).

[15] Zorn M, Weyers M. Comprehensive study of (Al) GaAs Si-doping using reflectance anisotropy spectroscopy in metal-organic vapour-phase epitaxy [J]. *J. Phys.* D: *Applied Physics*, 2007, 40(3):878-882.

欢迎订阅 欢迎投稿
《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,青年科学家曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国权威学术期刊(RCCSE)
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省精品期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国 INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网
中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

地 址: 长春市东南湖大路3888号
《光学 精密工程》编辑部
邮 编: 130033
电 话: (0431)86176855
传 真: (0431)84613409
E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn
gxjmgc@vip.sina.com
http://www.eope.net

国内邮发代号: 12-166
国外发行代号: 4803BM
定 价: 50.00元/期
帐 户: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
银 行: 中行吉林省分行营业部
帐 号: 220801471908091001