

文章编号: 0258-7025(2008)09-1323-05

60%电光效率高功率激光二极管阵列

王俊¹ 白一鸣² 崇锋¹ 刘媛媛¹ 冯小明¹ 王勇刚¹ 张广泽¹ 刘素平¹ 马骁宇¹

(中国科学院半导体研究所¹ 光电子器件国家工程中心,² 半导体材料重点实验室, 北京 100083)

摘要 设计并制备了980 nm高量子效率和极低光损耗的激光二极管(LD)外延材料和器件。微通道封装1 cm激光二极管阵列在连续(CW)工作条件下最大电光效率达到60.0%,相应的斜率效率和输出光功率分别为1.1 W/A和38.2 W。测试得到外延材料的内损耗系数和内量子效率分别为0.58 cm⁻¹和91.6%。测试分析表明,器件电光效率的提高主要在于新型的InGaAs/GaAsP应变补偿量子阱和大光腔结构设计。

关键词 半导体激光器;电光效率;InGaAs/GaAsP量子阱;大光腔

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1323

High Power Laser Diode Array with 60% Electro-Optical Efficiency

Wang Jun¹ Bai Yiming² Chong Feng¹ Liu Yuanyuan¹ Feng Xiaoming¹
Wang Yonggang¹ Zhang Guangze¹ Liu Suping¹ Ma Xiaoyu¹

(¹National Engineering Research Center for Optoelectronic Device, ²Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The epitaxy material and device for high quantum efficiency and small optical loss 980 nm laser diode (LD) were designed and fabricated. The maximal electro-optical conversion efficiency of the standard 1cm laser bar with micro-channel cooler is 60.0% under continuous-wave (CW) working condition, the corresponding slope efficiency and output power are 1.1 W/A and 38.2 W, respectively. The measured internal loss coefficient and internal quantum efficiency are 0.58 cm⁻¹ and 91.6%, respectively. The result shows that the improvement of electro-optical conversion efficiency is due to new InGaAs/GaAsP strain-compensated quantum well and the large optical-cavity waveguide structure.

Key words semiconductor lasers; electro-optical conversion efficiency; InGaAs/GaAsP quantum well; large optical-cavity

1 引言

目前产品化的高功率激光二极管(LD)的电光效率一般为50%左右。对于高功率器件,如此大比例的热量不但极大地影响了器件本身的可靠性,而且增加了激光电源和散热系统的负担。这些因素极大地限制了许多重要应用。为了解决这些问题,2003年美国启动了“超高效率激光二极管光源”计划^[1]。这个计划的最终目标是把高功率激光二极管的电光效率从50%提高到80%,最终结果以达到73%而告终^[2]。

在完成这个计划的过程中,许多国际公司和研究组都提出了各自的研究方案,并取得了较大的进展。Alfilight公司^[3]的50 W 970 nm连续(CW)全无铝激光器阵列室温下的电光效率达到73%;nLight公司^[4]的940 nm激光器室温下的电光效率提高到70%;Knigge等^[5]研制的70 W 940 nm连续激光器阵列在室温下的电光效率达到73%。JDS Uniphase公司^[6]940 nm激光器室温下的电光效率提高到67%。国内学者也对高电光效率激光二极管的研究给予了关注^[1,7],但仅尧舜等^[8]报道了电光

收稿日期:2007-10-24;收到修改稿日期:2008-04-25

基金项目:国家自然科学基金(9140A02011406ZK03)资助项目。

作者简介:王俊(1976—),男,湖北人,助理研究员,目前主要从事高效率高可靠性大功率激光二极管的设计和制作。

E-mail: wangjun@semi.ac.cn

导师简介:马骁宇(1963—),男,吉林人,研究员,博士生导师,研究方向为半导体光电子器件。E-mail: maxy@semi.ac.cn

效率为56.9%的1.06 μm 激光二极管阵列。

通过对各种高效率方案的综合分析发现,设计和制备高量子效率(内量子效率大于95%)和极低光损耗(内损耗系数小于 1.0 cm^{-1})的外延材料是实现高电光效率的关键^[9]。高内量子效率要求外延材料有源区具有足够的载流子限制能力和极低的非辐射复合速率;获得低内损耗系数的主要方法为采用大光腔或非对称波导结构减小光场与高掺杂区的交叠比例。为了增加内量子效率,减小光损耗,本文设计了激光波长为980 nm波段的InGaAs/GaAsP应变补偿量子阱和AlGaAs大光腔外延材料结构。采用低压金属有机化学气相外延(LP-MOCVD)技术制备了外延材料,并制作了腔长900 μm 微通道封装的1 cm激光二极管单bar阵列器件。

2 材料结构设计

运用量子理论对量子阱有源区材料、组分和结构进行了计算和设计^[10],同时应用电磁模式理论设计了光波导结构^[11]。经过优化设计后的外延材料由 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 应变补偿量子阱和 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ 大光腔波导结构组成。主要材料结构为:n型和p型限制层分别为900 nm $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$;上、下波导层分别为630 nm $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$;应变补偿量子阱有源区由10 nm $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 阱层和10 nm $\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 垒层组成。外延材料折射率分布和理论计算的基横模光场分布如图1所示。

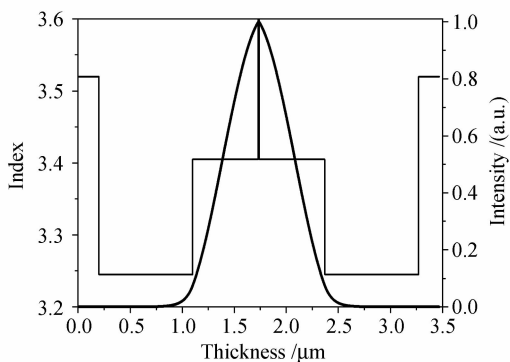


图1 外延材料折射率和光场分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of refractive index and optical intensity profile of laser material

10 nm $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 量子阱材料结构有如下优点:1) 具有最低的阈值载流子密度。图2为根据四带理论模型^[10]计算结果绘出的激光波长均为980 nm的不同量子阱结构的峰值增益与载流子密度的关系。对量子阱厚度和材料组分分

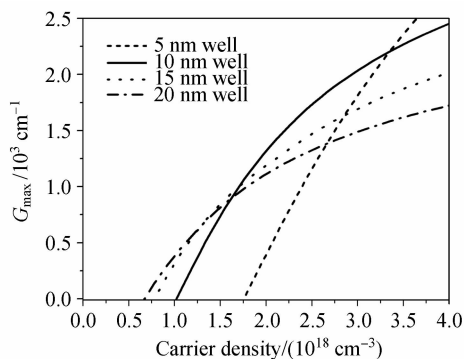


图2 不同厚度及材料组分的量子阱峰值增益(TE模)与载流子密度的关系

Fig. 2 Peak gain of TE polarization as a function of the carrier density calculated for 5 nm-thick $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ quantum well, 10 nm-thick $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ quantum well, 15 nm-thick $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ quantum well and 20 nm-thick $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ quantum well

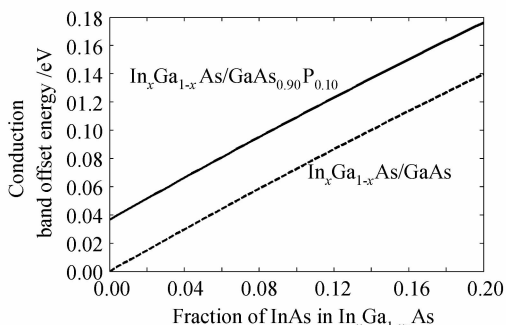


图3 不同In组分异质结导带带阶对比

Fig. 3 Comparison of conduction band offset energy with different compositions (calculated by model-solid theory) 别为5 nm $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$, 10 nm $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$, 15 nm $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 和20 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 。由图可知,对应约 1500 cm^{-1} 的材料增益时,10 nm $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 量子阱结构的阈值载流子密度最低。2) 对于波长980 nm激光二极管,现有结构一般采用GaAs作为量子阱的垒层^[12,13]。由于GaAs的带隙(1.42 eV)小于 $\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ (1.53 eV),与InGaAs形成的量子阱导带和价带带阶也较小。采用 $\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 量子垒,提高了量子阱导带的带阶,具有更强的限制电子漏电流的能力。图3为根据模型固体理论^[14]计算的不同In组分($\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 与 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$)时异质结导带带阶对比图。3) 采用应变补偿量子阱,减小了材料的净应变量,从而有助于减少外延材料中的

缺陷密度,减少载流子的非辐射复合。4) 量子垒 $\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 材料不含铝元素,与量子阱组合成无铝有源区结构,有利于提高器件的可靠性和使用寿命。5) 垒层 $\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 材料与衬层 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 材料具有相同的外延生长参数窗口,容易得到高质量的外延材料。这种量子阱有源区结构有利于提高器件的内量子效率。

为了减小器件的光损耗,采用 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ 大光腔结构。这种波导结构减少了光场与高掺杂区域的交叠比例,降低了光吸收和散射损耗。同时,采用厚的波导层,增加了有效光斑尺寸,减小了端面光功率密度,有利于提高器件的可靠性。另外,波导层和限制层均为 AlGaAs 材料,外延条件成熟,外延材料质量高。由理论分析可知,这种大光腔结构,除基横模 TE_0 之外, TE_1 和 TE_2 也可以存在。为了抑制高阶偶数模(奇数模的光限制因子接近零,不必考虑),需要对限制层的厚度和掺杂浓度进行适当优化^[15]。运用电磁模式理论对大光腔结构的光损耗进行计算,图 4 给出了基模和二阶模的光损耗随 p 型限制层厚度的关系。由图 4 可知,为了实现稳定的基模工作,可选择 p 型限制层的厚度为 900 nm。与以前结构相比^[11~13, 16~18],限制层的厚度减薄到 900 nm,并适当提高了掺杂浓度。这种优化也减小了器件的串联电阻和热阻。

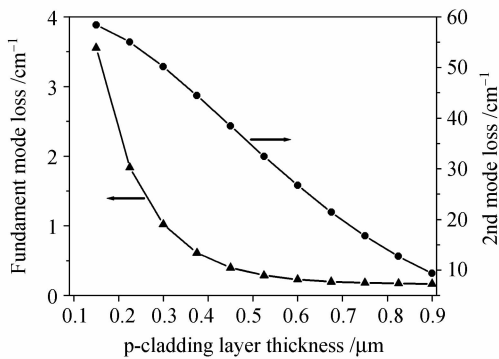


图 4 基模和二阶模的光损耗随 p 型限制层厚度的关系
Fig. 4 Calculated optical losses of the fundamental mode and second order mode with the p-cladding layer thickness

3 材料制备与器件制作

采用 LP-MOCVD 技术制备了激光器外延材料。外延过程在 n 型 GaAs 衬底(100)面进行,载气为 H_2 , III 族源为三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)和三甲基铟(TMIIn);V 族源为砷烷(AsH_3)和叔丁基磷(TBP)。n 型和 p 型掺杂剂分

别为硅烷(SiH_4)和二甲基锌(DMZn)。生长温度范围为 $550 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$,反应室压力范围为 $5000 \sim 8000 \text{ Pa}$ 。

材料外延结束后,通过光荧光谱,X 光双晶衍射和电化学 C-V 等方法检测外延片质量。300 K 时,光荧光谱的半峰全宽为 19.5 nm,说明量子阱界面均匀,材料缺陷密度低。在 GaAs 衬底生长低晶格失配度($\leq 2 \times 10^{-3}$)的限制层和波导层是保证器件可靠性的关键。图 5 为外延材料的 X 光双晶衍射回摆曲线。测试得到限制层和波导层的晶格失配度分别为 1.2×10^{-3} 和 5.3×10^{-4} 。材料的掺杂浓度分布与器件光损耗和串联电阻紧密相关。图 6 为采用电化学 C-V 方法测量的外延材料掺杂浓度分布。由图可知,材料的掺杂浓度渐变均匀,可以达到对降低光损耗和串联电阻损耗的兼顾。表面 p 型欧姆接触层的掺杂浓度大于 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,可以保证良好的欧姆接触。

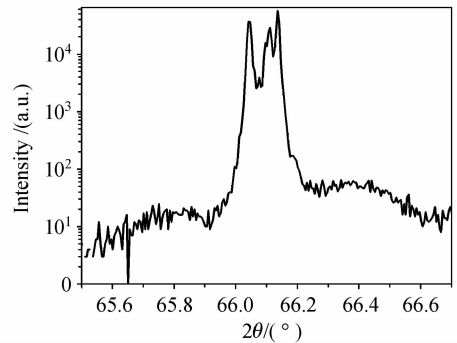


图 5 外延材料 X 光双晶衍射回摆曲线
Fig. 5 Double crystal X-ray diffraction rocking curve for the epitaxy material

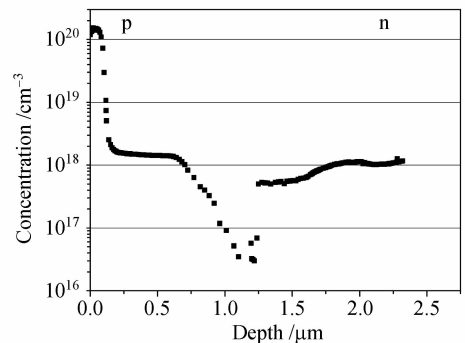


图 6 外延材料掺杂浓度分布
Fig. 6 Doping concentration profile of the epitaxy material

将制备好的外延片进行器件制作。先在外延片 p 面沉积 SiO_2 介质膜,光刻并通过湿法腐蚀制作出标准的 1 cm 激光 bar 的条形结构,发光单元尺寸和

周期分别为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $330\ \mu\text{m}$,填充因子为 30% ;再在p面溅射Ti/Pt/Au电极;将外延片衬底减薄抛光后,制作n面AuGeNi/Au电极,并进行高温合金,将大片解理成不同腔长的激光bar。一部分激光bar解理成管芯,以测试外延材料特性;对另一部分激光bar进行端面镀膜(AR/HR=5%/95%),然后p面向下封装在微通道铜热沉上。

4 器件特性测试

在室温脉冲条件($50\ \mu\text{s}$, $200\ \text{Hz}$)下,测试了不同腔长管芯的各种光电特性。根据测试数据,将微量子效率倒数与腔长进行了线性拟合,得到其内损耗系数和内量子效率分别为 $\alpha_i = 0.58\ \text{cm}^{-1}$ 和 $\eta_i = 91.6\%$,如图7所示。内损耗主要来源于外延材料对光子的吸收和散射,与波导结构及外延质量相关;内量子效率主要与量子阱有源区结构及外延质量相关。从测试结果可以看出,采用 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.90}\text{P}_{0.10}$ 应变补偿量子阱和 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ 大光腔材料结构明显提高了内量子效率,降低了材料的内损耗系数,也反映了理想的外延质量。

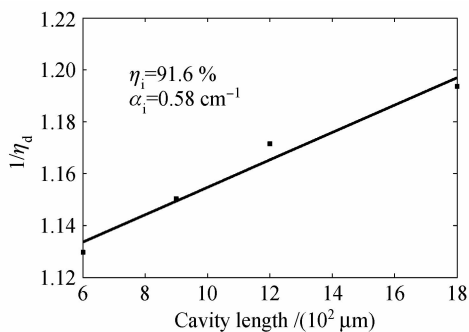


图7 微量子效率倒数与腔长的关系

Fig. 7 Dependence of reverse differential quantum efficiency on the cavity length

将微通道结构封装的 $1\ \text{cm}$ 激光bar(腔长 $900\ \mu\text{m}$)器件在连续工作电流条件下进行光电特性测试。测试时冷却水温度为 $15\ ^\circ\text{C}$,输出光功率、电光效率和电压随注入电流的关系如图8所示。测试结果为:激光器的阈值电流为 $6.2\ \text{A}$,当注入电流为 $42.0\ \text{A}$ 时,器件的最大电光效率为 60.0% 。此时,输出光功率为 $38.2\ \text{W}$,斜率效率为 $1.1\ \text{W/A}$,中心波长为 $983.6\ \text{nm}$,光谱宽度为 $4.4\ \text{nm}$ 。对10支单bar器件进行了电学和热学特性测试,其串联电阻和热阻的平均值分别为 $5.9\ \text{m}\Omega$ 和 $0.5\ \text{K/W}$ 。

半导体激光器的能量损耗可分为5种途径^[1]:

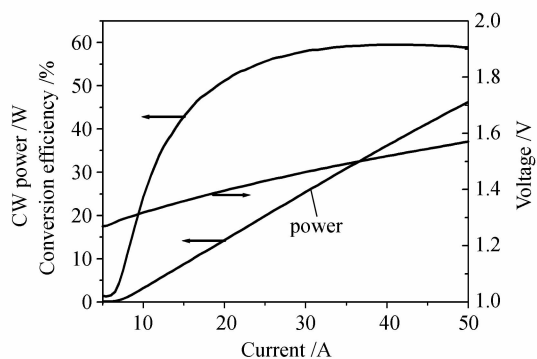


图8 腔长 $900\ \mu\text{m}$ 激光二极管单bar的光电特性
Fig. 8 Electro-optical performance of $900\ \mu\text{m}$ cavity length LD bar

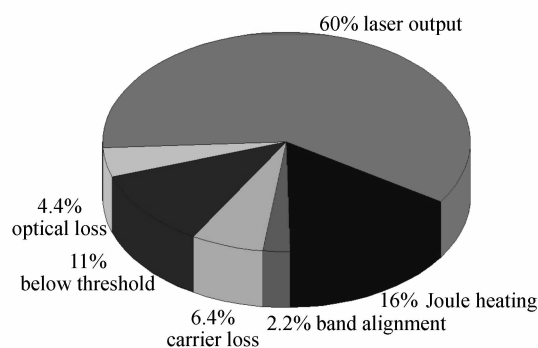


图9 器件各种能量损耗分配饼图

Fig. 9 Pie chart of contribution of various loss mechanisms

1) 阈值以下自发辐射;2) 异质结能带结构导致的电压损失;3) 有源区载流子泄漏损耗;4) 激光腔和端面对光子的吸收和散射;5) 器件产生的焦耳热损耗。为了分析各种能量损耗的比例,根据测试数据计算了对应的器件能量分配饼图,如图9所示。由图可知,器件的光损耗和异质结电压损失所占比例已经达到优化值,但焦耳热损耗和阈值以下损耗所占比例仍较大,可望进一步降低。

5 结 论

设计了 $980\ \text{nm}$ 高功率连续激光二极管阵列的材料结构,并制作了腔长 $900\ \mu\text{m}$ 的微通道封装单bar器件。将外延材料的内损耗系数和内量子效率分别改善为 $0.58\ \text{cm}^{-1}$ 和 91.6% 。当注入电流为 $42.0\ \text{A}$ 时,器件的最大电光效率为 60.0% ,输出光功率为 $38.2\ \text{W}$,斜率效率为 $1.1\ \text{W/A}$,中心波长为 $983.6\ \text{nm}$,光谱宽度为 $4.4\ \text{nm}$ 。还有几个问题需要进一步的研究:1) 当GaAsP垒层P的组分太小,对载流子的限制能力不够;当P的组分太高时,晶格应力大,容易导致缺陷产生。本文从理论上确定为

10%, 还需要实验方面的探索优化。2) 对于如此厚的波导层(共1.26 μm), 目前未掺杂。这显然需要从串联电阻和载流子光吸收损耗等几个方面来综合优化整个外延材料的掺杂浓度分布。3) 目前未对器件的腔长进行优化。通过这几个方面的优化, 将会使器件的电光效率继续提高。

参 考 文 献

- Mei Suisheng. Progress of super high efficiency diode source reseach [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(11): 2~8
梅遂生. 超高效率二极管抽运光源研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(11): 2~8
- C. M. Stickley, M. E. Filipkowski, E. Parra *et al.*. Overview of progress in super high efficiency diodes for pumping high energy lasers [C]. *SPIE*, 2006, **6104**:610405
- M. Kanskar, T. Earles, T. J. Goodnough *et al.*. 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(5):226~227
- P. Crump, Weimin Dong, Mike Grimshaw *et al.*. 100-W + diode laser bars show >71% power conversion from 790-nm to 1000-nm and have clear route to >85% [C]. *SPIE*, 2007, **6456**:64560M
- A. Knigge, G. Erbert, J. Jönsson *et al.*. Passively cooled 940 nm laser bars with 73% wall-plug efficiency at 70 W and 25 °C [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(5):246~247
- M. Peters, V. Rossin, B. Acklin. High efficiency, high reliability laser diodes at JDS uniphase [C]. *SPIE*, 2005, **5711**:142~151
- Xin Guofeng, Qu Ronghui, Fang Zujie *et al.*. New development of high power semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2):3~8
辛国锋, 瞿荣辉, 方祖捷 等. 大功率半导体激光器的最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(2):3~8
- Yao Shun, Tao Getao, Liu Yun *et al.*. High efficiency 1.06 μm wavelength high power diode array modul [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(3):260~262
尧 舜, 套格套, 刘 云 等. 高效率 1.06 μm 波段大功率半导体激光阵列模块 [J]. 半导体光电, 2006, **27**(3):260~262
- Götz Erbert, Frank Bugge, Andrea Knigge *et al.*. Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency [C]. *SPIE*, 2006, **6133**:61330B
- Peter S. Zory. Quantum Well Lasers [M]. United Kingdom: Academic Press, 1993. 17~90
- Wang Jun, Ma Xiaoyu, Lin Tao *et al.*. Design of SCH structure for high-power broad area 808 nm GaAsP/AlGaAs quantum-well laser [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, **26**(12):2449~2454
王 俊, 马晓宇, 林 涛 等. 大功率宽面 808 nm GaAsP/AlGaAs 量子阱激光器分别限制结构设计 [J]. 半导体学报, 2005, **26**(12):2449~2454
- Xu Zuntu, Xu Junying, Yang Guowen *et al.*. 980 nm InGaAs strained quantum well lasers and modules [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(10):873~876
徐遵图, 徐俊英, 杨国文 等. 980 nm InGaAs 应变量子阱激光器及组合件 [J]. 中国激光, 1997, **A24**(10):873~876
- Gao Xin, Qu Yi, Bo Baoxue. Fabrication of 980 nm strained quantum well laser array [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(3):225~227
高 欣, 曲 轶, 薄保学. 980 nm 高功率应变量子阱阵列激光器的研制 [J]. 光电子 • 激光, 2003, **14**(3):225~227
- Chris G. Van de Walle. Band lineups and deformation potentials in the mode-solid theory [J]. *Phys. Rev. B*, 1989, **39**(3):1871~1883
- A. Al-Muhanna, L. J. Mawst, D. Botez *et al.*. High-power (>10 W) continuous-wave operation from 100- μm -aperture 0.97-nm-emitting Al-free diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(9):1182~1184
- Zhong Li, Wang Jun, Feng Xiaoming *et al.*. 808 nm high-power lasers with Al-free active region with asymmetric waveguide structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1037~1042
仲 莉, 王 俊, 冯小明 等. 808 nm 大功率无铝有源区非对称波导结构激光器 [J]. 中国激光, 2007, **34**(8):1037~1042
- Kai Zheng, Tao Lin, Li Jiang *et al.*. High power red-light GaInP/AlGaInP laser diodes with nonabsorbing windows based on Zn diffusion-induced quantum well interming [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1):27~29
- Li Jianjun, Han Jun, Deng Jun *et al.*. Tunnel regeneration high-power semiconductor laser with four active regions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12):1819~1822
李建军, 韩 军, 邓 军 等. 隧道再生四有源区大功率半导体激光器 [J]. 光学学报, 2006, **26**(12):1819~1822