

非对称超大光腔 980 nm 大功率半导体激光器

李建军 崔碧峰 邓 军 韩 军 刘 涛 李佳苑 计 伟 张 松

(北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要 为了制备高输出功率的半导体激光器,设计了非对称超大光腔波导结构,其中大光腔结构用以提高器件的灾变性腔面烧毁(COMD)水平,非对称波导则抑制高阶模的激射,并分析了非对称波导层厚度的理论优化值。优化了有源区的金属有机物化学汽相沉积(MOCVD)外延生长条件,结合管芯电极制备及腔面镀膜等工艺条件,制备了腔长为 4 mm 的 2 μm 超大光腔端面发射 980 nm 半导体激光器管芯。在室温、注入电流为 30 A 且未采取任何主动散热措施条件下,器件输出功率达到 23.6 W,未出现 COMD。非对称波导保证了垂直方向仅有基模激射,且超大光腔的采用使得垂直远场发散角只有 24°。研究表明,非对称超大光腔结构是制备高功率半导体激光器的有效途径。

关键词 激光器; 半导体激光器; 波导; 量子阱; 金属有机物化学汽相沉积

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102011

980 nm High Power Semiconductor Laser with Asymmetric Super Large Optical Cavity

Li Jianjun Cui Bifeng Deng Jun Han Jun Liu Tao Li Jiachun Ji Wei Zhang Song

(Key Laboratory of Opto-Electronics Technology of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract An asymmetric super large optical cavity waveguide is designed to realize the high output power semiconductor laser, in which the super large optical cavity is used to raise the catastrophic optical mirror damage (COMD) limit, and the asymmetric waveguide is used to inhibit the lasing of higher order modes. Meanwhile, the optimized thickness of the asymmetric waveguide is analyzed. By optimizing the process condition of metal organic chemical vapor disposition (MOCVD) epitaxy for the active layer, and combining with the electrode fabrication and facet coating, a 4-mm cavity length semiconductor laser die with 2 μm super large optical cavity waveguide at 980 nm wavelength is fabricated. Without any active cooling process, an output power of 23.6 W is reached with injection current of 30 A without COMD at room temperature. Because of the introducing of the super large optical cavity waveguide, the far field test shows that only the transverse fundamental mode is lased with a vertical far field angle of 24°. The results show that the asymmetric super large optical cavity structure is an effective way to get the high output power of semiconductor laser.

Key words lasers; semiconductor laser; waveguide; quantum well; metal organic chemical vapor disposition

OCIS codes 140.2020; 250.5960; 230.7400; 230.5590; 310.1860

1 引 言

随着输出光功率的逐渐提高,半导体激光器以其体积小、效率高和寿命长等优点在激光切割、激光焊接和激光熔覆改性等工业加工领域的应用日趋扩大。从应用方式上讲,半导体激光器在工业加工中

的应用分为两类:第一类是直接将半导体激光器输出的激光作用于被加工材料,为了得到高的输出功率可以采用列阵条结构^[1]、列阵条堆叠的面阵结构^[2]或多个线阵合束整形的结构^[3];第二类是将半导体激光器作为固体激光器或光纤激光器的抽运

收稿日期: 2013-05-03; **收到修改稿日期**: 2013-06-18

基金项目: 北京工业大学先进技术基金(002000514312003)

作者简介: 李建军(1966—),男,博士,教授,主要从事半导体光电子器件的研究及其 MOCVD 生长和半导体器件的计算机模拟等方面的研究。E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

源^[4],从而解决半导体激光器固有的光谱特性和远场特性差的问题。

不论采用何种类型,高输出功率的基本单元即单管是获得高输出光功率的前提,也是研究人员一直追求的目标。对于中小功率半导体激光器,阈值电流和效率是器件设计中关心的主要问题^[5],对于大功率半导体激光器的设计,除了阈值电流和效率外,如何提高器件的灾变性腔面烧毁(COMD)水平是设计的重点。Fang等^[6]利用0.9 μm的Al_{0.35}Ga_{0.65}As宽波导结构得到了最大输出功率为10.2 W的808 nm半导体激光器;Lichtensteint等^[7]利用E2腔面钝化技术制备了0.9 μm单管激光器,在热沉温度为15℃、注入电流为20 A的条件下连续输出功率达到21 W;Crump等^[8]采用InGaAs/GaAsP应变补偿双量子阱超大光腔结构制备了96 μm条宽单管器件,在温度为-5℃的热沉上连续工作输出功率达到21.5 W。

本文采用非对称超大光腔波导结构来提高器件的COMD水平并抑制高阶模的激励,通过优化材料外延的金属有机物化学汽相沉积(MOCVD)工艺条件提高辐射复合的内量子效率并降低内损耗,结合管芯电极工艺和腔面镀膜条件,虽然采用了散热不佳的TO3封装并且在室温条件下测试,仍然实现了波长为980 nm、光输出功率为23.6 W的单管半导体激光器。

2 器件波导设计

在通过良好的封装保证充分散热的前提下,COMD将是功率半导体激光器设计时考虑的主要因素。从器件结构上讲,提高COMD水平的最直接措施是增加腔面处的光斑面积。光斑面积的增加可通过横向尺寸和侧向尺寸的增加来实现。侧向尺寸决定于管芯工艺的条宽,为了与标准的多模光纤进行耦合,条宽一般选为100 μm左右,因此,如何增加腔面处光斑的横向尺寸就成为大功率半导体激光器结构设计的关键。

光斑的横向尺寸决定于横向光波导的结构,采用大光腔波导结构是增加光斑横向尺寸的最有效途径。最简单的形式是对称大光腔结构,图1给出了波导层厚度为1.2 μm和2.0 μm时的对称波导折射率分布,其中有源层是In_{0.2}Ga_{0.8}As材料,波导层和限制层分别是Al_{0.1}Ga_{0.9}As和Al_{0.3}Ga_{0.7}As材料,材料的折射率选取见文献^[9]。设有源层两侧的波导层厚度分别为W_l和W_r,对于对称波导,有

W_l=W_r=W,且有源层两侧的波导层和限制层的折射率分别相等。图2给出了利用传输矩阵法^[10]模拟得到的基模TE₀的有源区光限制因子Γ_a与W的关系,由图可见,随着光波导厚度的增加,基模的光限制因子单调减小。设有源区的厚度为d,则基模的有效光斑尺寸d/Γ_a^[11]将随光腔厚度的增加而增加。在图1中同时给出了模拟得到的W分别等于0.6 μm和1.0 μm时的近场分布,其中虚线对应于W=1.0 μm的情形,实线对应于W=0.6 μm的情形,与1.2 μm光波导相比,2.0 μm波导结构具有更大的光斑尺寸,对应于1.2 μm和2.0 μm的光波导,其有效光斑尺寸分别为0.76 μm和1.12 μm。

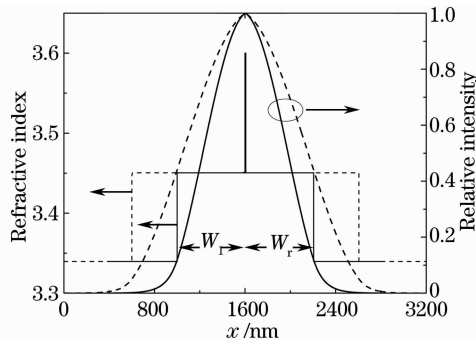


图1 对称光波导的折射率及近场分布
Fig. 1 Refractive index and near field of symmetric waveguides

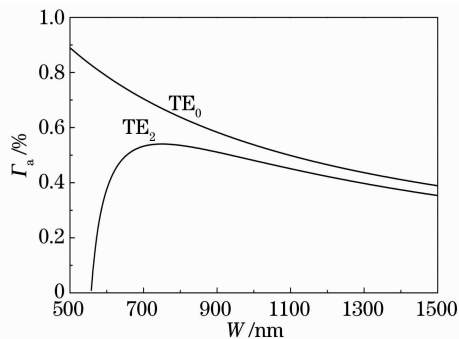


图2 对称光波导光限制因子随波导层厚度的变化
Fig. 2 Optical confinement factor versus waveguide thickness of symmetric waveguides

随着大光腔波导厚度的增加,波导允许的导波模式数目将增加。对于图1所示对称波导结构,当W>558 nm时,除了TE₀和TE₁模外,还允许TE₂模的存在。究竟哪个模式激励取决于以下阈值条件^[12]:

$$\Gamma_a g_{th} = a_i + (1/L)\ln(1/R), \quad (1)$$

式中g_{th}是有源区的光增益,a_i是腔内损耗,L是腔长,R是腔面反射率。由(1)式可见,对于一定的器件结构,光限制因子Γ_a越大,g_{th}越小,对应的模式越

容易激励。在图 2 中同时给出了 TE_2 的光限制因子与波导层厚度的关系,由图 2 可见,光波导尺寸大于 $1.5 \mu\text{m}$ 后,尽管随着波导层厚度的增加 TE_0 和 TE_2 的光限制因子都减小,但二者的差距却在不断减小。因此,对于对称大光腔波导结构,可能会有高阶模激励的情形,这是不希望出现的。

为了抑制大光腔波导的高阶模激励,应采取措增加基模和高阶模间的光限制因子 Γ_a 的差,采用非对称波导结构是一有效的途径,其中最简单的形式就是令图 1 中的 $\Delta W = W_1 - W_2 \neq 0$ 。在 $W_1 + W_2$ 固定等于 $2 \mu\text{m}$ 的情况下,图 3 给出了 TE_0 模和 TE_2 模的光限制因子随 ΔW 的变化关系。从图 3 看出,随着 ΔW 的增加, TE_0 模和 TE_2 模的光限制因子都减小,但 TE_2 模的 Γ_a 下降得更快,而 TE_0 模的 Γ_a 随 ΔW 的变化要缓慢得多。图中同时给出了 TE_0 模和 TE_2 模的光限制因子的相对变化值 $(\Gamma_{a0} - \Gamma_{a2})/\Gamma_{a2}$ 与 ΔW 的关系,可见,随着 ΔW 的增加,两个模式的光限制因子的相对差增加。当 $\Delta W = 300 \text{ nm}$ 时, Γ_{a0} 是 Γ_{a2} 的 1.55 倍。

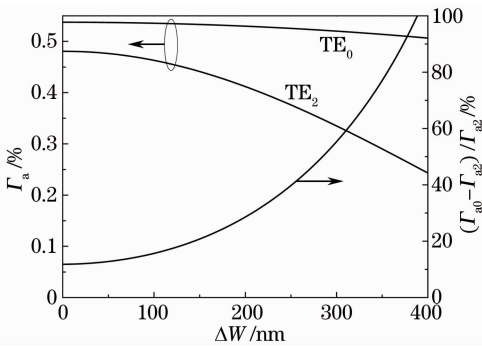


图 3 非对称光波导光限制因子随 ΔW 的变化
Fig. 3 Optical confinement factor versus ΔW of asymmetric waveguides

对于应用于半导体激光器中的非对称大光腔, p 侧和 n 侧波导层二者中的哪一侧应该较厚是需要考虑的一个具体问题。为此,从降低阈值增益的角度出发,将(1)式改写为

$$g_{\text{th}} = [a_{\text{wn}}\Gamma_{\text{wn}} + a_{\text{wp}}\Gamma_{\text{wp}} + (1/L)\ln(1/R)]/\Gamma_a, \quad (2)$$

式中 a_{wn} 和 a_{wp} 分别是 n 侧波导层和 p 侧波导层的光吸收系数, Γ_{wn} 和 Γ_{wp} 分别是 n 侧波导层和 p 侧波导层的光限制因子。由于此处考虑的是大光腔结构,大部分光都集中在波导层中,在(2)式中忽略了限制层中的光损耗,且没有考虑散射损耗和有源区的损耗。波导层光损耗的主要原因是自由载流子吸收,且由于空穴的迁移率小于电子的迁移率,空穴对光的吸收损耗

更强,对于 AlGaAs 材料,可由经验式表示为^[12]

$$a_{\text{wn}} = 3 \times 10^{-18} C_n, \quad a_{\text{wp}} = 7 \times 10^{-18} C_p, \quad (3)$$

式中 C_n 、 C_p 分别表示 n 侧波导层和 p 侧波导层中载流子的浓度,其单位为 cm^{-3} 。结合(2)式的分子项和(3)式看到,如果 n 侧波导层的电子浓度与 p 侧波导层的空穴浓度相等,那么通过增加 n 侧波导层厚度或减小 p 侧波导层厚度,使 Γ_{wn} 减小或 Γ_{wn} 增加即可有效降低 g_{th} 。但是,进一步研究发现,随着 n 侧波导层厚度的增加(或 p 侧波导层厚度的减小),基模光场峰值将偏离有源区而向 n 侧波导层推移,使得(2)式中的分母项 Γ_a 减小。因此, n 侧波导层与 p 侧波导层的厚度差 ΔW 存在一最佳值。图 4 给出了对于不同的波导层载流子浓度,阈值增益 g_{th} 与 ΔW 间的关系,图中 n 侧波导层与 p 侧波导层总厚度固定为 $2 \mu\text{m}$ 不变,腔长 $L = 4 \text{ mm}$,根据文献[8]中 AlGaAs 的折射率值,取 $R = 30.3\%$ 。由图 4 可见,非对称波导存在一最佳的 ΔW 值,图中同时用虚线标出了不同波导区载流子浓度时阈值增益的最低值,随着波导层中载流子浓度的增加, ΔW 的最佳值增加。

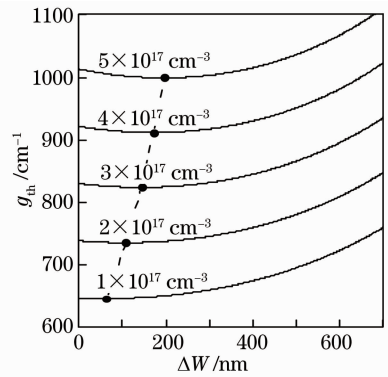


图 4 非对称光波导阈值增益随 ΔW 的变化
Fig. 4 Threshold optical gain versus ΔW of asymmetric waveguides

3 外延条件优化

对于大功率半导体激光器,提高器件的电光转换效率同样至关重要。例如一输出功率为 12 W 的激光器,如果电光转换效率为 50% ,则工作时的产热功率为 12 W ,若电光转换效率提高到 60% ,则产热功率为 8 W ,此时效率提升 10% 产热功率降低 4 W 。对于设计好的器件结构,半导体激光器的电光转换效率首先取决于外延材料的质量,特别是量子阱有源区的晶体质量。为此,对 InGaAs 量子阱有源区的 MOCVD 外延生长条件进行了优化。图 5 是不同生长温度下量子阱的室温光致发光(PL)谱测试结果。由图 5 可

见,外延生长条件对材料的晶体质量有着重要的影响,太高和太低的生长温度都不利于高质量晶体材料的获得,虽然生长温度对 PL 谱峰值波长影响不算太大,但对峰值强度及谱宽的影响却要明显得多。在图 5 的插图中给出了 PL 谱峰值强度与外延温度的关系,在 575 °C 可获得最高的峰值强度,并且在该温度下 PL 的半峰全宽(FWHM)也最小,只有 22.1 nm,折合光子能量为 30 meV,与室温下电子的热能量范围(约 26 meV)相近,表明此时的 FWHM 主要受室温温度的影响。

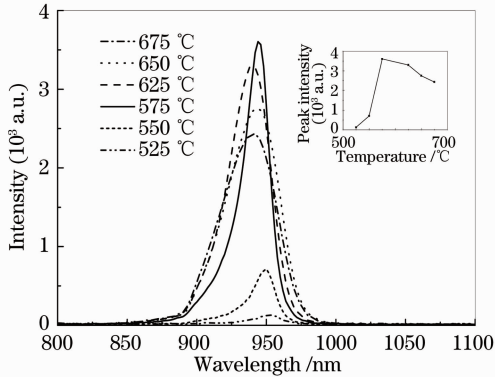


图 5 外延温度对量子阱 PL 特性的影响
Fig. 5 Effect of the epitaxial temperature on the quantum well PL characteristics

4 器件制备及结果讨论

基于设计的非对称大光腔波导结构和优化的 MOCVD 外延条件,首先进行器件的 MOCVD 外延生长,其中 n 型和 p 型限制层是 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 材料,波导层是总厚度为 $2 \mu m$ 的 $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$,综合考虑高阶模的抑制及阈值光增益的降低,采用 $\Delta W=300 \text{ nm}$ 的非对称超大光腔波导结构,即 n 侧波导层厚度为 $1.15 \mu m$,p 侧波导层厚度为 $0.85 \mu m$ 。调整 InGaAs 量子阱的组分使器件的激励波长为 980 nm。外延过程中,III 族源是 TMAI, TMGa 和 TMIIn, V 族源是 100% 的 AsH_3 ,载气是经钼管纯化后的高纯 H_2 ,n 型掺杂源是经 H_2 稀释的 SiH_4 ,p 型掺杂源是 CCl_4 。反应室的压力约为 8000 Pa,衬底转速为 1000 r/min,有源区的生长温度为 575 °C。

外延生长结束后,进行宽条脊形器件制备,先腐蚀形成高度为 300 nm 的脊形台,再溅射 200 nm 的 SiO_2 并光刻形成 $95 \mu m$ 的 p 型电极孔,接着溅射 Ti/Au 作为 p 型电极,然后减薄衬底至 $130 \mu m$ 并溅射 AuGeNi/Au 作为 n 面电极。合金退火后解理

成不同腔长的管芯进行测试。对于不同的腔长 L ,图 6 给出了器件的外微分效率 η_d 的倒数与腔长 L 的关系。 η_d 和 L 存在以下关系:

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} + \frac{a_i}{\eta_i \ln(1/R)} L, \quad (4)$$

式中 η_i 是内量子效率。利用(4)式并结合图 6 的测试结果,通过拟合得到器件的 a_i 仅为 1.45 cm^{-1} ,且 η_i 高达 96.9%,显示出文中器件结构设计的合理性和材料外延的高质量。

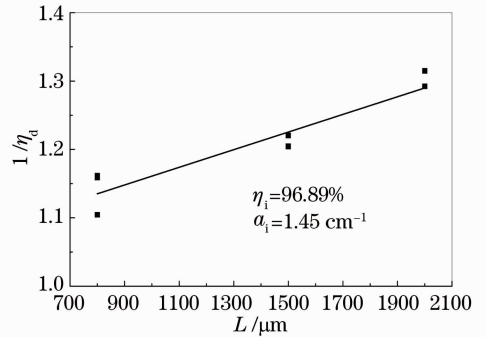


图 6 外微分效率的倒数与腔长的关系
Fig. 6 Relationship between cavity length and inverse external differential efficiency

将 4 mm 腔长的管芯进行腔面镀膜后,管芯 p 面向下用 In 焊料烧结在 C-mount 热沉上,然后再封装到 TO3 管座上进行测试。测试在室温条件下进行,且没有采取任何风冷或水冷等主动温度控制措施,采用脉冲条件测试,其中脉冲的重复频率为 50 Hz,脉冲宽度为 $100 \mu s$ 。图 7 是器件在脉冲条件下的光电特性测试结果,器件的阈值电流为 0.6 A,30 A 下器件的电压降为 2.1 V,由于采用了大光腔结构,即使在 30 A 的注入电流下也没有出现腔面的 COMD 现象,光输出功率达到 23.6 W。由于没有采取任何主动散热措施,器件的热效应严重,

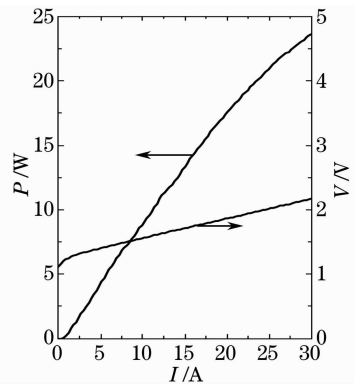


图 7 光电特性测试结果
Fig. 7 Experimental results of optical and electrical characteristics

随着测试电流的增加,光功率未能线性增加,而是呈下弯的趋势,导致在 30 A 电流时的光电转换效率仅有 36%。如果采用导热性更好的 AuSn 焊料,并辅以有效的散热,器件的性能将会进一步提升。图 8 (a)是在不同注入电流下器件的光谱特性,注入电流为 5 A 时器件的峰值波长为 980.4 nm,FWHM 为 2.6 nm。当注入电流为 10 A 和 15 A 时,由于热效应,峰值波长分别增加到 981.4 nm 和 982.8 nm,

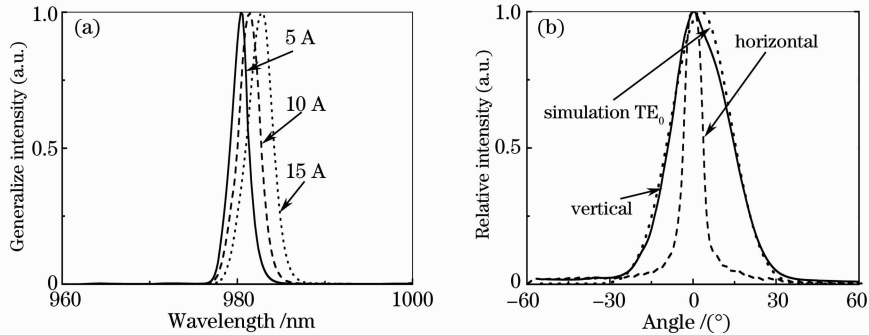


图 8 (a) 器件的光谱; (b) 远场测试结果

Fig. 8 (a) Spectrum of the device; (b) far field pattern test result

5 结 论

为了提高单管大功率半导体激光器的输出功率,需要综合考虑以下因素:1) 在器件结构设计时需采用超大光腔结构以提高腔面的 COMD 水平;2) 为了有效抑制由于光腔增大可能出现的高阶模激射,采用非对称波导结构是一有效的途径,但应对波导的非对称性进行优化设计;3) 应优化 MOCVD 外延、电极制备及腔面镀膜等工艺条件,得到高可靠的管芯结构。据此,得到了在室温条件下(脉冲)输出功率为 23.6 W 的 980 nm 大功率半导体激光器,远场测试及其与模拟结果的对比表明垂直方向为基模激射,且远场发散角只有 24.0°。通过继续改进封装措施和散热条件,器件性能有望进一步提升。

参 考 文 献

- 1 Lang Chao, Yao Shun, Chen Bingzhen, *et al.*. "Smile" effect on the beam quality for diode laser arrays[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502006.
郎超, 尧舜, 陈丙振, 等. 半导体激光器阵列的"Smile"效应对光束质量的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502006.
- 2 Fang Gaozhan, Ma Xiaoyu, Wang Guohong, *et al.*. Quasi-CW 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(6): 649-653.
方高瞻, 马晓宇, 王国宏, 等. 准连续 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs 叠层激光二极管阵列[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 649-653.
- 3 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yun, *et al.*. Kilowatt-output and high beam quality diode laser linear array coupling source[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202010.

FWHM 分别增加到 3.4 nm 和 4.2 nm。图 8(b)是器件的远场特性测试结果,水平方向的 FWHM 发散角为 6.6°,由于采用了大光腔结构,垂直方向的 FWHM 发散角只有 24.0°。图 8(b)中同时给出了垂直方向 TE₀ 模的模拟结果,与实验结果符合得很好,表明非对称波导结构的采用保证了在垂直方向只有基模激射。

- 张俊, 单肖楠, 刘云, 等. 千瓦级高光束质量半导体激光阵列合束光源[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202010.
- 4 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.
刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 5 Li Jianjun, Han Jun, Deng Jun, *et al.*. InAlGaAs quantum well 808 nm laser diode with low threshold current and high efficiency [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(9): 1159-1162.
李建军, 韩军, 邓军, 等. 低阈值高效率 InAlGaAs 量子阱 808 nm 激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1159-1162.
- 6 Fang Gaozhan, Xiao Jianwei, Ma Xiaoyu, *et al.*. High power 808 nm AlGaAs/GaAs quantum well laser diodes with broad waveguide[J]. Chinese J Semiconductors, 2002, 23(8): 809-812.
- 7 Norbert Lichtenstein, Martin Krejci, Yvonne Manz, *et al.*. Recent developments for BAR and BASE; setting the trends[C]. SPIE, 2008, 6876: 68760C.
- 8 P Crump, G Blume, K Paschke, *et al.*. 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μm[C]. SPIE, 2009, 7198: 719814.
- 9 Y Kokubo, I Ohta. Refractive index as a function of photon energy for AlGaAs between 1.2 and 1.8 eV[J]. J Appl Phys, 1997, 81(4): 2042-2043.
- 10 Li Jianjun, Chen Changhua, Lian Peng, *et al.*. A numerical method for analyzing multi-transverse modes of a complex index waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(7): 800-803.
李建军, 陈昌华, 廉鹏, 等. 多横模复折射率波导的数值求解[J]. 光学学报, 2001, 21(7): 800-803.
- 11 Ling Bao, Jun Wang, Mark DeVito, *et al.*. Reliability of high performance 9xx-nm single emitter diode lasers[C]. SPIE, 2010, 7583: 758302.
- 12 H C Casey, M B Panish. Heterostructure Lasers, Part A[M]. New York: Academic Press, 1978. 174-182.