

808 nm 大功率半导体激光器腔面膜的制备*

套格套 尧舜 张云鹏 路国光 初国强 刘云 王立军

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 采用等离子体辅助电子束蒸发方法在 808 nm 大功率量子阱半导体激光器腔面设计镀制了 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 系前后腔面膜. 用直接测量法测量并比较了各种常用膜系的相对损伤阈值. 增透膜的反射率为 12.2%, 高反膜的反射率为 97.9%. 对于 100 μm 条宽、1000 μm 腔长的条形结构通过器件测量结果是出光功率提高 79%、外微分量子效率提高 80%、功率效率由没镀膜之前的 22.2% 提高到镀膜之后的 39.8%.

关键词 半导体激光器; 等离子体辅助电子束蒸发; 高反膜; 增透膜; 灾变性光学损伤

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

808 nm 大功率半导体激光器是 GaAs 晶体的 $\langle 110 \rangle$ 自然解理面作为谐振腔. 半导体激光器有极小的出光面积(单管仅为十几平方微米), 极高的光功率密度(一般为几个 MW/cm^2 以上)以及 GaAs 晶体的特性决定了大功率半导体激光器腔面膜的特殊性与制备的难度. 高反射膜保证激光器的单面出光、有一定反射率的增透膜保持了一定的激光增益. 腔面膜还起到提高斜率效率、防止氧化、保护腔面、提高可靠性等重要作用. 大功率半导体激光器高反射腔面膜通常采用 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[1,4,6]、 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ ^[8] 等膜系以及 $\alpha\text{-Si:H}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[7] 膜系的所谓的无吸收腔面(对吸收比较大的 $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系来说的), 出光面一般采用 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 等单层膜或双层膜. 其中 ZrO_2 大约在 800 $^\circ\text{C}$ 附近有个转折点——结晶结构从单斜晶系结构变到正方晶系结构, 这个变化引起 7% 的体积变化从而导致膜的破裂. 电子束激烈的加热会导致原材料的崩溅^[5]. Si 在 808 nm 较大的吸收^[7], 虽然早期在半导体激光器腔面 $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系用的比较多, 但随着半导体激光器输出功率的提高, 腔面膜损伤阈值的要求也不断提高, 这样越来越需要无吸收的膜材料来代替. $\alpha\text{-Si:H}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系虽然吸收较小但和一般的氧化物薄膜材料比较吸收系数还是比较大的, 而且 H 组分的控制也比较困难. 我们考虑了上述各种膜系的优缺点, 采用 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系成功制备了前后腔面膜. 考虑到实际工艺当中电子束蒸发的 SiO_2 薄膜和 GaAs 衬底结合的不是很牢固的特点, 高反射膜的第一层采用 Al_2O_3 材料. 这样既保持高的折射率比值又和衬底的附着力比较理想.

1 器件结构

外延片是无铝的量子阱结构, 是由分子束外延技术生长的. 衬底选用 n-GaAs 单晶片, 各外延层从 n-GaAs 衬底依次为: 掺 Si 的 InGaP 下限制层, 厚度为 2 μm 、非掺杂 InGaAsP 下波导层, $E_g = 1.7 \text{ eV}$, 厚度为 0.15 μm 、非掺杂 InGaAsP 量子阱有源层, $E_g = 1.5 \text{ eV}$, 厚度为 0.02 μm 、非掺杂 InGaAsP 上波导层, $E_g = 1.7 \text{ eV}$, 厚度为 0.15 μm 、非掺杂 InGaP 上限制层, 厚度为 0.1 μm 、高掺 Zn 的 InGaP 欧姆接触层, 厚度为 1 μm . 组装后的器件结构为典型的条形结构. 如图 1. 条宽 100 μm , 腔长为 1000 μm .

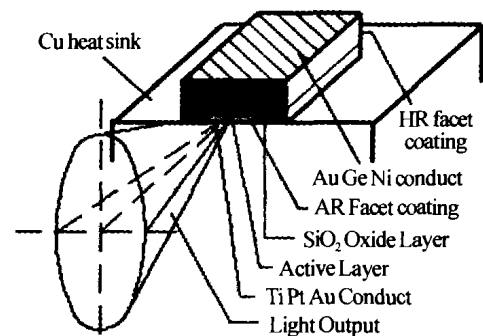


图 1 器件的结构示意图
Fig. 1 Structure of the device

2 808nm 大功率半导体激光器腔面膜的制备及表征

2.1 理论分析

半导体激光器镀前后腔面膜的目的在于实现单面出光情况下尽量小的工作电流下得到尽量高的输出功率. 因为大的注入电流不可避免地引起工作中的激光器内部热量的上升和内载流子密度的增加. 这些会引起内部损耗的增加和外量子效率的减小, 而且因为非引导作用变得更加明显导致激射特性和可靠性的退化. 要想尽量小的工作电流下得到尽量高的输出功率就要考虑两个方面, 一是提高阈值电流, 另一个是提高斜率效率. 式(1)为前后腔面反

*中科院“十五重大”(Z01Q03)与国防科研计划(A02X05Z)资助项目
Tel:0431-6176335 Email:taogt1122@sina.com.cn
收稿日期:2004-06-18

率与阈值电流和斜率效率之间的关系式

$$\frac{I_{th}}{WL} = \frac{d}{\beta\Gamma_v} \left\{ \alpha_i + \frac{\ln [1/(R_f R_r)]}{2L} \right\} + dJ_0 \quad (1)$$

式中 I_{th} 、 α_i 、 Γ_v 、 R_f 、 R_r 、 J_0 依次分别为阈值电流、内损耗、光限制因子、前后腔面反射率以及增益有关常数, W 、 L 、 d 、 β 依次分别为条宽、腔长、有源区厚度、增益有关常数。

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left\{ 1 + \frac{2\alpha_i L}{\ln [1/(R_f R_r)]} \right\} \quad (2)$$

式中 η_d 、 η_i 分别为斜率效率和内量子效率。

在后腔面的反射率接近 100% 的情况下从式 (1)、(2) 可以看出降低前腔面的反射率会提高斜率效率和阈值电流。但是很多研究结果表明前腔面反射率低到一定值以后接着降低反射率反而会把斜率效率降低。经过多次试验发现后腔面反射率 98% 左右的情况下, 前腔面的反射率为 12% 时, 采用这种外延结构激光器的斜率效率比较高。

2.2 高反膜和增透膜的制备及表征

传统的电子束蒸发方法制备的薄膜具有微观柱状结构的缺点, 为了改善薄膜的这种结构我们采用等离子体辅助电子束蒸发方法制备前后腔面膜。HfO₂ 是性能比较好的薄膜材料, 它适合用电子束蒸发, 有极好的化学稳定性以及很高的熔点(2900℃)。HfO₂ 薄膜可以用于苛刻的环境中, 具有薄膜微观结构引起的散射损耗低和较高的损伤阈值等优良的性能。SiO₂ 由电子束加热蒸发效果良好且镀出来的膜具有微观网状结构, 具有良好的化学稳定性、膜机械性能极为牢固、无吸湿性^[2,3,10]。电子束蒸发制备的 Al₂O₃ 薄膜一般来说是多孔性的, 为了改善薄膜的性质, 淀积时采用离子辅助的方法是非常有用的^[10]。当薄膜生长时离子轰击会使所制备的薄膜致密度和牢固度增加, 且可防止柱状结构及微孔的形成。

本文用的蒸发系统是分子泵和前置机械泵构成的半无油系统。等离子源是无栅源, 利用光学膜厚控制仪和石英膜厚控制仪进行膜厚控制, 利用 PE 公司的 lambda 900 分光光度计进行了反射透过率测量。薄膜的折射率是用椭偏仪测量同样的蒸发条件下蒸发的单层膜的折射率得到的。因为在波长 808nm 引起损伤阈值的机制主要是原材料不纯和散射^[8], 所以本文采用的材料纯度均为 99.99% 以上。

把解理好的 Bar 条的解理面对齐夹持在特制的夹具上。镀高反膜时另放镀一层 $\lambda/4$ 厚 HfO₂ 的 K9 玻璃片以备测量反射曲线。镀增透膜时另放抛亮的 GaAs 片以备测量增透膜的剩余反射率。(GaAs 基片处理先用 HCl:H₂O = 1:4 的溶液去氧化层 1 min 后用酒精、丙酮加热清洗烘干) 把片子放进真空室以后抽到 5×10^{-4} Pa 以后加热衬底 200℃。蒸发参量如表 1。

表 1 材料的蒸发参量

| | 背景真空度 /Pa | O ₂ :Ar = 1:3 | 气流量/ sccm · s ⁻² | 蒸发速率/ nm · s ⁻² |
|------------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Al ₂ O ₃ (M) | 5×10^{-4} | 通 | 2.2 | 0.15 |
| HfO ₂ (H) | 5×10^{-4} | 通 | 2.5 | 0.2 |
| SiO ₂ (L) | 5×10^{-4} | 不通 | | 0.5 |

离子源能量为 30 ~ 150 eV。离子源阳极电压 150 V、阳极电流 2 A、阴极电流为 22 A。把材料充分预熔以后开始蒸镀。因为无栅源的中和灯丝衬底的温度迅速上升, 为了控制温度镀 SiO₂ 时不用等离子体, 这样有一个冷却的过程不让温度连续上升而且不会影响镀膜时时间上的连续性。高反膜膜系结构为 Sub/M (HL)⁷H/Air、增透膜的膜系结构为 Sub/HL/Air。椭偏仪测量的 Al₂O₃、HfO₂、SiO₂ 材料在 808 nm 处的折射率分别为 1.66、1.89、1.45。理论计算的前腔面反射率为 12.2%、后腔面反射率为 97.9%。膜系 Glass/H + M (HL)⁷H/Air 以及 GaAs/HL/Air 的反射率理论曲线和试验曲线如图 2、图 3。

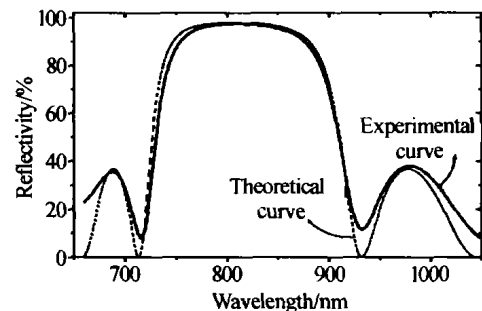


图 2 HR 膜的反射率-波长理论和试验曲线

Fig. 2 Reflectivity vs wavelength curve for HR coatings

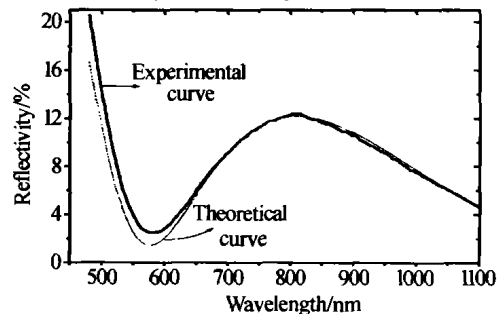


图 3 AR 膜的反射率-波长理论和试验曲线

Fig. 3 Reflectivity vs wavelength curve for AR coatings

理论曲线是在垂直入射角的情况下用特征矩阵计算得到的^[9]。

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_k + 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j$

$$\eta_j = \begin{cases} N_j / \cos \theta_j & (p\text{-偏振}) \\ N_j \cos \theta_j & (s\text{-偏振}) \end{cases} \quad (4)$$

$\eta_k + 1$ 和 η_0 是衬底和空气的导纳。垂直入射时 $\theta_j = 0$

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (5)$$

从高反射镜和增透膜的理论计算曲线和实验测量曲线的很好的一致性说明了我们测得的折射率值和膜厚监控是精确的。

2.3 器件测试

把做好 P-电极和 N-电极的外延片解理成单管。从中间选取出光功率、阈值电流、发散角等特性比较一致的一些单管并且保存测量结果,把其中一部分单管不镀膜直接组装。另一部分单管用特殊设计的夹具夹持好镀膜。从镀完腔面膜的单管之中选一半组装成为增透膜为出光窗口的器件,另一半组装成高反膜为出光窗口的器件。组装好的三组器件分别在 2-5% 的占空比的脉冲电流和连续电流下测量。从中找出比较代表性的一个单管的镀膜前后的测量曲线。测量结果如图 4:从图上可以看出激光器输出功率有了明显的提高。高反射镜处的光功率和增透膜处的光功率相比可以忽略不计。镀膜前后阈值电流几乎没变。外微分量子效率从镀膜之前的 50.2% 提高到镀膜之后的 90.4%, 功率效率从 22.2% 提高到 39.8%。激光波长为 806.7 nm 垂直结方向的发散角为 37.8, 平行结平面发散角为 4.8。

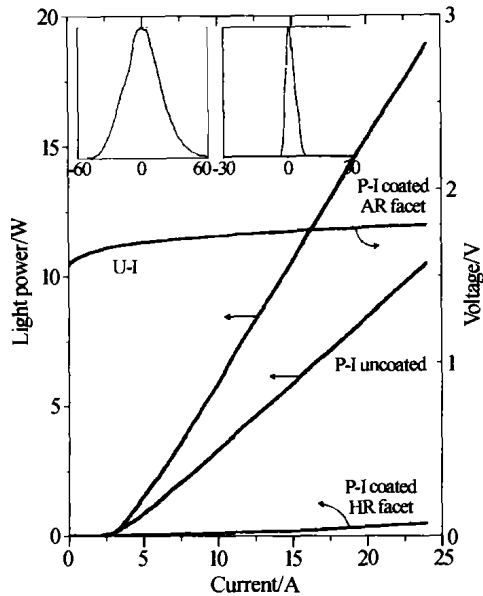


图 4 镀膜之前和之后的 P-I 曲线和 U-I 曲线
Fig. 4 The CW P-I curve and U-I curve

2.4 器件的几种不同腔面膜损伤阈值比较

在工作波长处的激光损伤阈值是半导体大功率激光器腔面膜的一个重要参量,损伤阈值直接可以说明腔面膜的好与坏。到目前为止各种材料的在紫外(比如 248 nm、308 nm)以及近红外区(比如 1064 nm、1.3 μm)的各种膜系的损伤阈值研究的文献比较

多,但是对 808 nm 处的损伤阈值没见报到。我们为了比较我们制备的膜系与别的一些常用膜系的性能,分两个步骤做试验。1)选一些光功率、阈值电流等特性比较一致的单管前后腔面镀制同一种膜系的高反膜。我们选反射率为 90% (反射率过高时计算损伤阈值时误差比较大)左右的反射膜。组装后在连续电流下测量光功率。加电流加到腔面出现灾变性光学损伤(永久性损伤)为止。有的器件可能没出现灾变性光学损伤之前就出现器件的热效应而引起增益饱和(器件没有烧坏)现象。图 5 为典型的腔面出现灾变性光学损伤和热效应引起退化的 P-I 曲线。再从出现灾变性光学损伤时的出光功率,通过透过率计算出腔面膜上的功率密度,再计算损伤阈值。2)一层 Al₂O₃ 为连接层的 HfO₂/SiO₂ 系高反膜为后腔面,以上面提到的各种增透膜为前腔面膜各制备一些器件。测量峰值功率,通过 SEM 确定出现灾变性损伤的腔面。同样的方法确定损伤阈值。表 2 为在 808 nm 处连续电流下测量的几种腔面膜系。图 6 为各种膜系的损伤阈值,其中 A、B、C、D、E 为高反膜,G、H、I 为增透膜,各种膜系均为 λ/4 膜堆。因为增益饱和现象的出现,镀 HfO₂/SiO₂、Al₂O₃ 增透膜的器件没出现灾变性光学损伤。不过从峰值功率可以确定这两种增透膜的损伤阈值均高于 2.1 MW/cm²。我们在前腔面用 HfO₂/SiO₂ 增透膜而

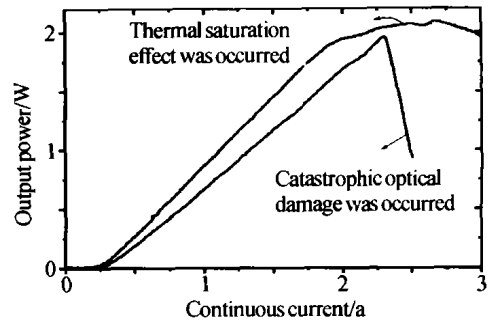


图 5 发生 COD 和热饱和的 P-I 曲线
Fig. 5 Two kind of typical P-I curve

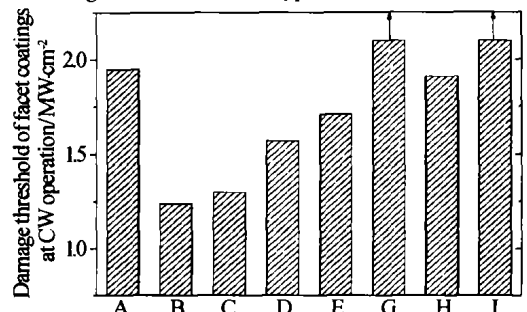


图 6 各种腔面膜的 808 nm 处的相对损伤阈值
Fig. 6 Comparatively damage threshold of face coatings at 808 nm

表 2 测量损伤阈值的各种膜系

| | A | B | C | D | E | G | H | I |
|-----|--|---|--|---|---|--|------------------|--------------------------------|
| 源材料 | M(Al ₂ O ₃)H(HfO ₂)L(SiO ₂) | H(ZrO ₂)L(SO ₂) | H(HfO ₂)L(SiO ₂) | H(Si)L(Al ₂ O ₃) | H(α-Si:H)L(Al ₂ O ₃) | H(HfO ₂)L(SiO ₂) | ZrO ₂ | Al ₂ O ₃ |
| 膜系 | Sub + M4(HL)H | Sub + 3(LH) | Sub + 4(LH) | Sub + 2(LH) | Sub + 2(LH) | SubHL | H | M |
| 离子源 | MH 用 L 不用 | H 用 L 不用 | H 用 L 不用 | 都用 | 都用 | H 用 | 用 | 用 |
| 反射率 | 90% | 88.4% | 87.3% | 94.4% | 92.1% | 12.2 | 1.3 | 1.5 |

不用 Al_2O_3 单层膜是因为前者是 $\lambda/4$ 膜堆好控制厚度,后者要想得到 12% 左右的反射率要求高的膜厚控制精度,重复性不是很好. 从图 6 看出高反膜 B、C 的损伤阈值低于 D、E 的损伤阈值,这可能因为高反膜和衬底接触的第一层 Al_2O_3 比 SiO_2 更好地阻止表面态行为.

影响大功率半导体激光器腔面膜损伤阈值的因素很多,包括表面处理、蒸发条件、源材料的纯度、膜系的散射损耗等等. 至于引起灾变性光学损伤的机制以及特点等问题需要更深入的研究. 相对损伤阈值试验可以证明本文采用的膜系优于其它结构而且对于一定的功率范围之内有很好的应用前景.

3 结论

从器件的出光特性看出采用等离子体辅助电子束蒸发方法在 808 nm 大功率量子阱半导体激光器腔面制备 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系前后腔面得到了很好的效果. 我们采用的高反膜膜系结构为 Sub/M(HL)⁷H/Air、增透膜的膜系结构为 Sub/HL/Air,第一层用 Al_2O_3 代替 SiO_2 保持了高的折射率比值又增加了附着力. 做出的单管对于 100 μm 条宽、1000 μm 腔长的条形结构通过器件测量结果是出光功率提高 79%、外微分量子效率提高 80%、功率效率有没镀膜之前的 22.2% 提高到镀膜之后的 39.8%. 经过多次实验发现这种方法制备腔面膜厚度均匀性好、重复性好、性能稳定且和衬底的附着力较好,该膜系能有效地减小腔面的灾变性光学损伤、损伤阈值高等优点,是大批量制备大功率半导体激光器腔面膜的一个比较好的方法.

参考文献

- 1 Ettenberg M. A new dielectric facet reflector for semiconductor lasers. *Appl Phys Lett*, 1978, 32(11): 724 ~ 725
- 2 Giulio M D, Alvisi M, Perrone M R, et al. Laser damage testing of SiO_2 and HfO_2 thin films. *SPIE*, 1999, 3738: 337 ~ 346
- 3 Yoshida K, Yoshida H, Motokoshi S. Laser-Induced Damage of Optical Coatings. *レーザー研究*, 1996, 24(1): 11 ~ 17
- 4 Ohtani M, Yoshida K. Optical Coatings for High Power laser produced by Mixed Films Method. *应用物理(日本)*, 1990, 59(7): 953 ~ 958
- 5 Aoki T. Optical Coatings and Their Starting Materials. *レーザー研究*, 1996, 24(1): 61 ~ 73
- 6 谭满清, 茅冬生. ECR Plasma CVD 法沉积 808 nm 大功率半导体激光器光学膜工艺研究. *半导体学报*, 1999, 20(7): 589 ~ 592
Tan M Q, Mao D S. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(7): 589 ~ 592
- 7 李秉臣, 彭晔, 廖显伯. 808 nm 大功率量子阱激光器无吸收腔面膜的研究. *半导体学报*, 1999, 20(8): 698 ~ 701
Li B C, Peng Y, Liao X B. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(8): 698 ~ 701
- 8 付雄鹰, 孔明东, 马平, 等. 等离子体辅助沉积 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 减反、高反光学薄膜. *光学技术*, 1998, (3): 91 ~ 93
Fu X Y, Kong M D, Ma P, et al. *Optical Technology*, 1998, (3): 91 ~ 93
- 9 唐晋发, 郑权. *应用薄膜光学*. 上海: 科学技术出版社, 1984. 49 ~ 51
Tang J F, Zheng Q. *Applied Optical Coatings*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. 49 ~ 51
- 10 钟迪生. *真空镀膜*. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001, 205, 216, 235
Zhong disheng. *Vacuum Deposition Coatings*. Shenyang: Liaoning University Publishers, 2001. 205, 216, 235

Fabrication of 808 nm SQW Semiconductor Laser Facet AR HR Coating

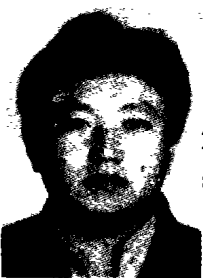
Tao Getao, Yao Shun, Zhang Yunpeng, Lu Guoguang, Chu Guoqiang, Liu Yun, Wang Lijun

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033

Received date: 2004-06-15

Abstract $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ front and back facet coatings of 808 nm SQW semiconductor laser has been fabricated with Plasma Assisted Electron Beam Deposition (Plasma-Ion Assisted Deposition) method. Front AR coating reflectivity is as low as 12.2% and back HR coating is as high as 97.9%. The output power is improved 79%, external different quantum efficiency improved 80%. The output efficiency increased from 22.2% to 39.8% for 100 μm wide 1000 μm -cavity length device.

Keywords Semiconductor laser; Plasma assisted electron beam deposition; AR coating; HR coating; Output efficiency; Catastrophic optical damage



Tao Getao born in 1974, Chifeng in Inner Mongolia province. He received M. S. degree from Physics Department at Inner Mongolia Normal University in 1996, obtained M. S. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2000. Now he is pursuing Ph. D. at the same institute. His main research is high-power semiconductor laser technology.