

# 大功率宽条分布反馈激光器研究

赵懿昊 王 俊 王翠鸾 刘素平 马骁宇

(中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083)

**摘要** 大功率半导体激光器一般用作抽运源,但其抽运的离子吸收峰带宽一般都比较小。为提高大功率半导体激光器对固体或光纤激光器等的抽运效率,就要降低半导体激光器的输出波长随注入电流和热沉温度的漂移系数。分析了光栅深度和光栅填充因子对激光器输出波长锁定效果的影响,实验验证确定出合适的光栅参数,依据优化条件得出合适的激光器腔长,制备出锁定效果良好的宽条分布反馈激光器。该激光器的单管腔长 2.4 mm,发光条纹宽 100  $\mu\text{m}$ ,连续最大输出功率 400 mW,热沉温度为 15  $^{\circ}\text{C}$  时的输出波长为 954 nm,输出波长随注入电流的漂移系数为 0.67 nm/A,输出波长的温漂系数为 0.046 nm/K。

**关键词** 激光器;宽条分布反馈激光器;内置布拉格光栅;耦合系数;波长稳定

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0802005

## Study of High-Power Broad Area Distributed-Feedback Laser

Zhao Yihao Wang Jun Wang Cuiluan Liu Suping Ma Xiaoyu

(National Engineering Research Center for Optoelectronic Device, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** High-power semiconductor laser is commonly used for pump source, but the absorption spectra width of the ion which is pumped by the laser is often small. In order to improve the pumping efficiency of high-power semiconductor laser to solid or fiber laser, the current and thermal drift coefficient of wavelength should be decreased. The influence of grating depth and grating duty cycle with the laser wavelength stabilized effect are analyzed theoretically. The appropriate grating parameter is obtained by experimental verification. And the appropriate laser cavity length is obtained according to the optimized condition. The first broad area distributed-feedback (DFB) laser whose wavelength is well-locked is fabricated interiorly. The broad area DFB laser single emitter with 2.4 mm cavity length, 100  $\mu\text{m}$  stripe width produce continuous-wave output power of 400 mW at 15  $^{\circ}\text{C}$  heatsink temperature and its wavelength is 954 nm. The current drift of wavelength on this DFB laser is 0.67 nm/A and the thermal drift coefficient of wavelength on this DFB laser is 0.046 nm/K.

**Key words** lasers; broad area distributed-feedback laser; inner Bragg grating; coupling coefficient; wavelength stabilization

**OCIS codes** 140.5960; 050.2770; 300.6170; 250.5960

## 1 引言

目前,大功率半导体激光器主要用于抽运固体激光器、光纤激光器或放大器<sup>[1~4]</sup>,但这些被抽运的激光器中掺杂离子的吸收峰谱宽都比较窄<sup>[5,6]</sup>,而半导体激光器的发射波长一般都随电流增大和温度升高

变长,其波长的温漂系数一般为 0.3~0.4 nm/K<sup>[7]</sup>。因此,半导体激光器长期工作后,其发射波长因工作电流和器件温度的升高偏离被抽运激光器中掺杂离子的吸收峰。为提高抽运效率,大功率半导体激光器一般都需要配套昂贵的散热装置或复杂精密的外

收稿日期: 2011-03-09; 收到修改稿日期: 2011-04-08

基金项目: 国家重大专项(2009ZX01005-001)资助课题。

作者简介: 赵懿昊(1982—),男,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。

E-mail: zyhhiaoo@semi.ac.cn

导师简介: 马骁宇(1963—),男,硕士,研究员,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。E-mail: maxy@semi.ac.cn

腔波长锁定系统,如体全息光栅(VHG)系统提高其波长稳定性<sup>[8~10]</sup>。制备波长稳定的光谱半峰全宽(FHFW)窄的抽运用分布反馈(DFB)激光器对于减少抽运系统造价,提高其可靠性及降低其装配难度都有重要意义。国外在20世纪90年代开始研究大功率宽条DFB激光器<sup>[11]</sup>,并已在不同波段都取得了重要成果<sup>[12~15]</sup>。我国这方面起步较晚<sup>[16]</sup>,目前还没有大功率宽条DFB激光器的相关文献报道。本文报道了制备出的大功率内置布拉格光栅宽条DFB激光器,此激光器的单管腔长2.4 mm,发光条宽100 μm,工作波长为954 nm,最大出光功率400 mW,激光器发射波长的温漂系数为0.046 nm/K,波长随注入电流变化的漂移系数为0.67 nm/A。

## 2 理论分析

DFB激光器主要利用内置布拉格光栅达到滤波效果,使激光器输出近乎单一波长的光,通过调整内置光栅的空间周期 $\Lambda$

$$\Lambda = \frac{m\lambda}{2n_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

可以选择输出光的中心波长 $\lambda$ ,式中 $m$ 代表光栅级数, $n_{\text{eff}}$ 为激光器有效折射率。由于半导体激光器在快轴方向按平板波导理论近似认为其出光模式为基模,故选定基模光来计算光栅的空间周期。为增大光栅对激光器激射激光的耦合作用,一般选择光栅耦合系数与激光器腔长之积为1作为其优化条件<sup>[17]</sup>,即

$$\kappa L = 1, \quad (2)$$

式中 $\kappa$ 为光栅的耦合系数<sup>[18]</sup>, $L$ 为激光器的腔长。对于矩形光栅,光栅的耦合系数可表示为<sup>[19]</sup>

$$\kappa = \frac{k_0}{2n_{\text{eff}}}(n_2^2 - n_1^2)\Gamma_g \frac{\sin(\pi m\gamma)}{\pi m}, \quad (3)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ , $\lambda_0$ 为真空波长, $n_1, n_2$ 分别为光栅和光栅覆盖层的材料折射率, $\Gamma_g$ 为光栅的光限制因子, $\gamma$ 为光栅填充因子。由(3)式可知,耦合系数与光栅位置、光栅刻蚀深度、基模折射率、光栅填充因子和二次外延光栅覆盖层材料折射率有关,而目前的DFB激光器均内置二级光栅,光栅的耦合系数 $\kappa$ 随光栅深度 $d$ 的变化关系如图1所示,其中光栅深度直接决定了光栅的光限制因子<sup>[20]</sup>。计算结果表明随着光栅深度的增加,光栅耦合系数 $\kappa$ 的大小也在增加。

光栅耦合系数与光栅填充因子的关系如图2所示,在二级光栅中,光栅填充因子为25%和75%时,

光栅耦合系数最大,其数值正负的变化只反映光栅自身的相位特性<sup>[21]</sup>。

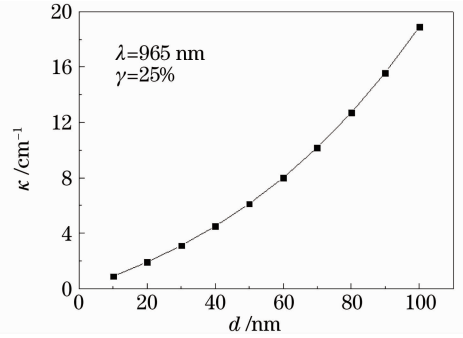


图1 光栅耦合系数与光栅深度的关系

Fig. 1 Relation between grating coupling coefficient and grating depth

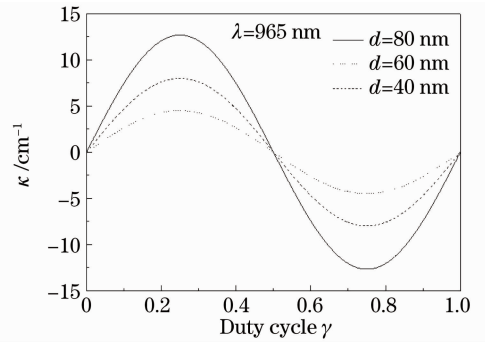


图2 二级光栅耦合系数与其填充因子之间的关系

Fig. 2 Relation between grating coupling coefficient and grating depth in second-order grating

一般制备的半导体激光器腔长为0.9 mm,由(2)式得到耦合系数应为11.1 cm<sup>-1</sup>,由图1得到对应的刻蚀深度应为74 nm左右,同样由图2得到光栅的填充因子为25%或75%。

## 3 器件制备和测试

### 3.1 器件制备

使用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)生长了DFB激光器外延片,为实现外延结构中的内置光栅采用了二次外延生长的方式,整体外延结构的折射率和光场分布如图3所示,其中单量子阱的光限制因子约为0.0215,对外延结构进行模拟计算可以得出其基模光场的有效折射率为3.363,实测按此完整外延结构制备的器件(没有内置光栅)输出波长为965 nm左右。

一次外延时生长了n型Al<sub>0.2</sub>GaInP限制层,200 nm的n型GaInP,260 nm的n型Al<sub>0.2</sub>GaAs,9 nm的InGaAlAs量子阱,260 nm的p型Al<sub>0.2</sub>GaAs和200 nm的p型GaInP光栅层,采用全息光

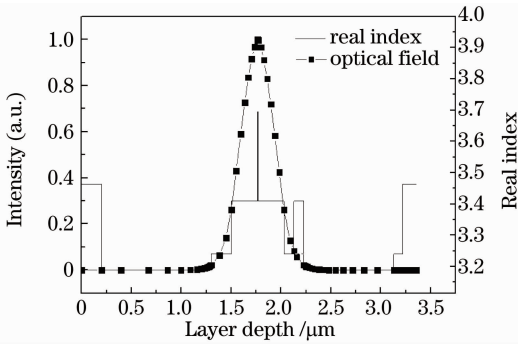


图3 外延片折射率与光场分布

Fig. 3 Index of refraction and optical field profile of the wafer

刻后干法和湿法刻蚀的方法在一次外延结构顶部的无铝 GaInP 材料上制备二级衍射光栅,由(1)式可得光栅周期设计值为  $965 \text{ nm}/3.363=287 \text{ nm}$ ,使用无铝 GaInP 作为光栅是为了克服含铝光栅始终存在的易氧化问题<sup>[22]</sup>。光栅在二次外延前后的界面扫描电子显微镜(SEM)图像如图4所示,二次外延前光栅的周期为 287 nm(由于测量误差可能小于 287 nm),与设计值一样,深度为 80 nm,与设计值接近,光栅的填充因子为 34%,也与设计值接近。而二次外延后光栅的深度变小,填充因子也有变化,这是由于在二次外延时的质量输运现象造成的<sup>[23]</sup>。在经过光栅表面清洁后,使用 MOCVD 进行二次外延,在光栅上继续生长了 100 nm 的 p 型  $\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}$ ,p 型  $\text{Al}_{0.2}\text{GaInP}$  限制层和 p 型 GaAs 接触层。

由图4(b)可知,二次外延后光栅的深度减少为大概 40 nm,光栅的填充因子大概变为 28%左右。由于显结液的腐蚀作用使图中光栅的深度与实际相比要小,取图中光栅深度最大值为实际光栅深度,取最大填充因子为实际填充因子。由(3)式可知光栅的耦合系数大约为  $4.4 \text{ cm}^{-1}$ ,由(2)式可知光栅作用明显的激光器腔长应为 2.4 mm 左右,此时  $\kappa L =$

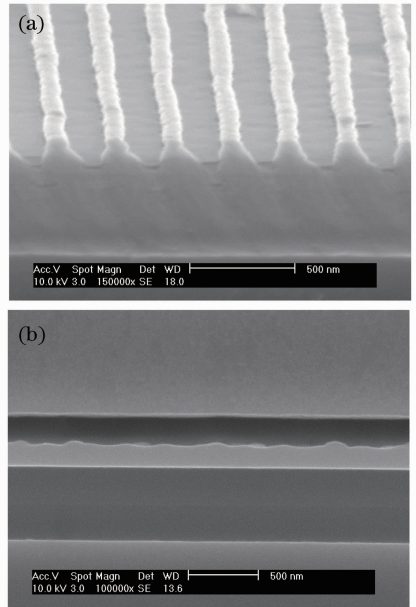


图4 二次外延前(a)和后(b)光栅的扫描电镜图像  
Fig. 4 Scanning electron micrograph of gratings before (a) and after (b) the second growth

$1.056 \approx 1$ ,按此腔长解理出 bar 条后进行腔面镀膜,出光面蒸镀 5%增透膜,另一腔面蒸镀 95%高反膜。最后将 bar 条解理成单个管芯进行烧结封装后进行各种测试。

### 3.2 器件测试

将封装好的单管在激光器综合测试仪上进行功率-电流( $P-I$ )和电压-电流( $V-I$ )测试,同时进行不同电流、不同温度下激光器特性测试。图5为光栅锁定效果好的激光器输出功率 400 mW 时的光电特性曲线和光谱曲线,此时激光器输出波长为 954 nm,光谱 FHMW 为 1.6 nm。图6为不同连续电流驱动下锁定效果好与差的单管的光谱特性,其中当注入电流持续增加时,光栅锁定效果好的激光器的输出波长由 954.3 nm 变化到 954.7 nm,波长随注入电流的漂移系数为 0.67 nm/A。而锁定效果

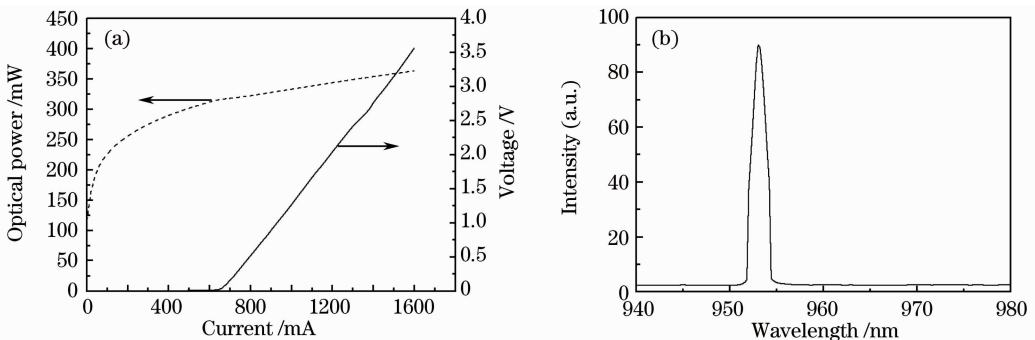


图5 宽条 DFB 半导体激光器功率-电流-电压曲线(a)和输出 400 mW 时的光谱(b)

Fig. 5 Continuous-wave  $P-I-V$  curve of broad area DFB laser (a) and lasing spectra when optical power of 400 mW (b)

差的激光器输出光谱中会同时出现光栅锁定波长和激光器主输出波长,由图 6(b)可见,当注入电流持续增加时,激光器主输出波长由 959.6 nm 变化到 961.4 nm,波长随注入电流的漂移系数为 1.8 nm/A。

之后在相同的注入电流情况下分别对锁定效果好的单管与无内置光栅的单管在不同热沉温度时的输出光谱特性进行了测试,如图 7 所示。光栅锁定

效果好的激光器当热沉温度由 290 K 增大到 305 K 时,其输出波长由 954.1 nm 变化到 954.8 nm,波长的温漂系数为 0.047 nm/K,而相同结构没有内置光栅的激光器当热沉温度由 290 K 增大到 325 K 时,其输出波长由 964.2 nm 变化到 976.4 nm,波长的温漂系数为 0.35 nm/K。

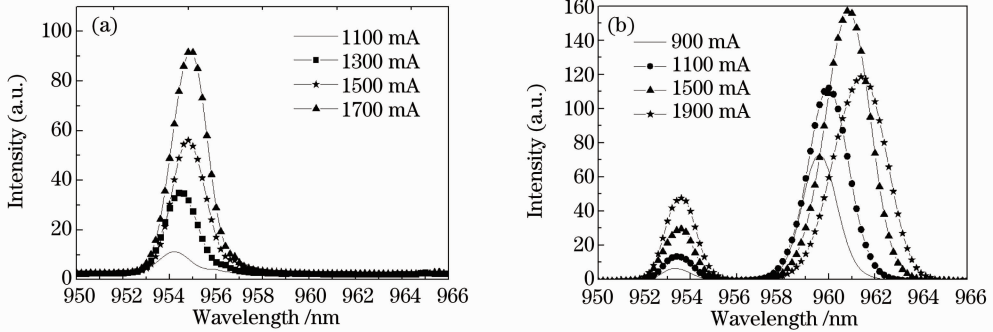


图 6 不同注入电流下锁定效果好(a)和锁定效果差(b)的宽条 DFB 单管的光谱

Fig. 6 Lasing spectra of well-locked (a) and worse-locked (b) broad area DFB single emitter with different inject currents

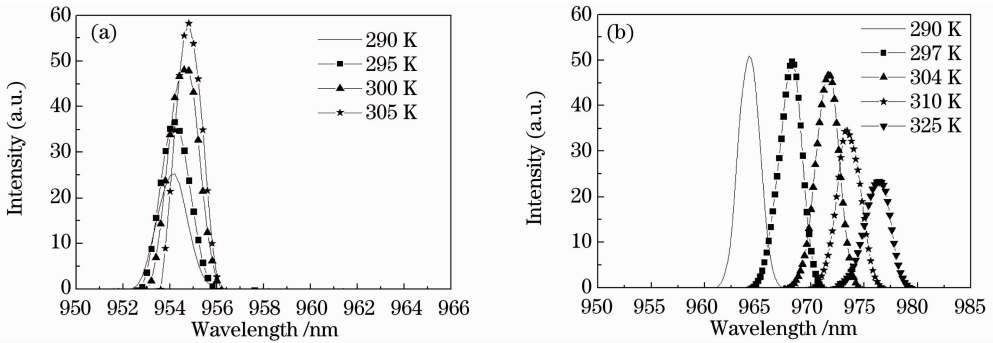


图 7 不同热沉温度下锁定效果好的宽条 DFB 单管(a)和无内置光栅的单管(b)的光谱

Fig. 7 Lasing spectra of well-locked broad area DFB single emitter (a) and single emitter without inner grating (b) with different heat sink temperatures

## 4 分析与讨论

一般大功率半导体激光器输出波长的温漂系数为 0.3~0.4 nm/K<sup>[7]</sup>,而本文制备的大功率宽条 DFB 激光器的温漂系数降低为 0.046 nm/K,同时其输出波长随注入电流的漂移系数也由原来的 1.8 nm/A 降低到 0.67 nm/A,大大提高了大功率激光器的波长稳定性。

从实验结果可以看出,激光器最终的光栅锁定峰与设计值相差较多,设计值为 965 nm,实际为 954 nm,其根本原因在于激光器内置光栅的实际周期小于设计周期,这是由于制备光栅的全息光刻工艺本身的误差造成的。同时由图 6(b)可知在激

光器输出主波长与内置光栅锁定波长差大于 5 nm 时,锁定效果较差。这是由于内置光栅的锁定效果是一种微扰效应的结果<sup>[24]</sup>。如果锁定波长与激光器主波长相差较大,微扰效应引起的锁定波长的模式增益并不足以抑制激光器主波长的激射,结果形成激光器中锁定波长与激光器输出主波长同时并存的现象。解决锁定效果差的方法主要有以下两点:1)内置光栅锁定的波长与激光器的输出波长的差值尽可能小,从而增大锁定波长的模式增益;2)调节光栅参数,提高光栅的耦合系数,尤其是要优化二次外延条件,减少二次外延对光栅深度和填充因子的影响。

## 5 结 论

通过理论分析与实验相结合制备出大功率宽条DFB激光器。此激光器单管腔长为2.4 mm,发光条宽100  $\mu\text{m}$ ,热沉温度为15  $^{\circ}\text{C}$ 时的工作波长为954 nm,通过测试单管在不同注入电流和不同热沉温度条件下的 $P$ - $I$ , $V$ - $I$ 特性,当注入电流为1.7 A时,激光器的最大出光功率为400 mW,激光器发射波长随注入电流的漂移系数为0.67 nm/A,激光器发射波长的温漂系数为0.046 nm/K。

## 参 考 文 献

- R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056
- G. Erbert, A. Bärwolff, J. Sebastian *et al.*. High-power broad-area diode lasers and laser bars[J]. *High Power Diode Lasers*, 2000, **78**: 173~223
- M. Frede, R. Wilhelm, D. Kracht. 250 W end-pumped Nd:YAG laser with direct pumping into the upper laser level[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(24): 3618~3619
- S. D. Setzler, M. P. Francis, Y. E. Young *et al.*. Resonantly pumped eyesafe erbium lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 645~657
- A. A. Demidovich, A. P. Shkadarevich, M. B. Danailov *et al.*. Comparison of cw laser performance of Nd:KGW, Nd:YAG, Nd:BEL, and Nd:YVO<sub>4</sub> under laser diode pumping[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1998, **67**(1): 11~15
- P. Leisher, K. Price, S. Karlsen *et al.*. High-performance wavelength-locked diode lasers[C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 719812
- J. Fricke, F. Bugge, A. Ginolas *et al.*. High power 980 nm broad-area lasers spectrally stabilized by surface Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(5): 284~286
- G. J. Steckman, W. Liu, R. Platz *et al.*. Volume holographic grating wavelength stabilized laser diodes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 672~678
- Liu Dong, Wang Dayong, Zheng Xiaodan *et al.*. Experiment of wavelength selectivity of volume holographic wavelength division multiplexing filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 413~416
- 刘东,王大勇,郑小丹等.体全息波分复用器件波长选择性实验[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 413~416
- Hui Yongling, Li Qiang, Zhang Xiang *et al.*. Single frequency mode laser controlled by volume Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2805~2807
- 惠勇凌,李强,张翔等.基于体布拉格光栅选模的单纵模激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2805~2807
- T. Earles, L. J. Mawst, D. Botez. 1.1 W continuous-wave, narrow spectral width ( $< 1\text{\AA}$ ) emission from broad-stripe, distributed-feedback diode lasers ( $\lambda = 0.893\ \mu\text{m}$ ) [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(15): 2072~2074
- Y. He, H. An, J. Cai *et al.*. 808 nm broad area DFB laser for solid-state laser pumping application[J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(3): 163~164
- C. M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel *et al.*. Narrow vertical far-field 975 nm broad area DFB lasers for wide temperature range operation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(9): 593~595
- Marc Eichhorn. Transient wavelength performance of 1.53  $\mu\text{m}$  InP laser diodes for pumping of Er<sup>3+</sup>-doped solid-state lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(17): 3129~3133
- Wentao Hua, Falgun D. Patelb, Mark L. Osowskia *et al.*. High-spectral brightness pump sources for diode-pumped solid state lasers[C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 71981R
- Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2190~2197
- 王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2190~2197
- K. David, G. Morthier, P. Vankwikelberge *et al.*. Gain-coupled DFB lasers versus index-coupled and phase-shifted DFB lasers: a comparison based on spatial hole burning corrected yield[J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1714~1723
- W. Streifer, D. R. Scifres, R. D. Burnham. Coupling coefficients for distributed feedback single- and double-heterostructure diode lasers[J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1975, **QE-11**(11): 867~873
- A. Laakso, M. Dumitrescu, J. Viheriälä *et al.*. Optical modeling of laterally-corrugated ridge-waveguide gratings [J]. *Opt. and Quantum Electron.*, 2008, **40**(11-12): 907~920
- L. A. Coldren, S. W. Corzine. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits[M]. Hoboken, New York: Wiley, 1995. 37~54
- A. M. Shams-Zadeh-Amiri, J. Hong, X. Li *et al.*. Second and higher-order resonant gratings with gain or loss—part I: green's function analysis [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(12): 1421~1430
- P. K. York, J. C. Connolly, N. A. Hughes *et al.*. MOCVD regrowth over GaAs/AlGaAs gratings for high power long-lived InGaAs/AlGaAs lasers[J]. *J. Crystal Growth*, 1992, **124**(1-4): 709~715
- S. N. G. Chu, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan *et al.*. Grating overgrowth and defect structures in distributed-feedback-buried heterostructure laser diodes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(3): 862~873
- A. M. Shams-Zadeh-Amiri, J. Hong, X. Li *et al.*. Second- and higher order resonant gratings with gain or loss—part II: designing complex-coupled DFB lasers with second-order gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(12): 1431~1437