

文章编号: 0258-7025(2010)09-2371-05

二阶光栅分布反馈半导体激光器的出光特性

叶淑娟^{1,2} 秦 莉¹ 戚晓东^{1,2} 胡永生^{1,2} 张 楠^{1,2} 宁永强¹ 王立军¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 基于耦合模理论,分析了二阶光栅分布反馈(DFB)激光器的综合出光特性,包括阈值增益、光子密度分布、外微分量子效率等。数值计算结果表明,对于波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的给定结构器件,二阶光栅占空比对其出光特性影响较大。最后得到优化的光栅占空比为 0.43,优化后,腔内光子密度分布均匀,边模抑制比达 35 dB,外微分量子效率达 47%。

关键词 激光器; 二阶光栅; 端面发射; 表面发射; 占空比; 耦合系数

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2371

Emission Characteristics of Second-Order Distributed Feedback Semiconductor Lasers

Ye Shujuan^{1,2} Qin Li¹ Qi Xiaodong^{1,2} Hu Yongsheng^{1,2} Zhang Nan^{1,2}

Ning Yongqiang¹ Wang Lijun¹

(¹ Key Laboratory of Excited States Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the modified coupled-wave theory, the emission characteristics, including threshold gain, photon density distribution in the cavity, external differential quantum efficiency, ect. for second-order distributed feedback (DFB) lasers are investigated. Numerical simulation results also show that for given device structure with wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$, grating duty cycle has certain influence on the emission characteristics. Finally, optimal grating duty cycle of 0.43 and optimal results include uniform photon density distribution along the cavity, the side-mode suppress ratio as high as 35 dB and external differential quantum efficiency of 47% are obtained.

Key words lasers; second-order grating; end-emitting; surface-emitting; duty cycle; coupling coefficient

1 引 言

单频、单空间模出光的分布反馈(DFB)半导体激光器在光通信等领域有着重要的应用^[1~3]。常见的端面镀抗反膜的折射率耦合一阶光栅 DFB 激光器有两个简并的模式同时激射,远场出现双瓣,影响其实际应用^[4]。为了消除简并模,相继引入了光栅相移、非对称端面镀膜等技术手段,然而这些技术导致 DFB 激光器结构复杂化,并且,不确定的端面相位容易引起空间烧孔^[5~8],造成模式不稳定。对于

增益耦合 DFB 激光器,虽具备单模激射、无简并模的特点,但其光栅制作在有源区导致自发辐射出现,激光器工作不稳定,单模场特性降低^[9]。

为了克服 DFB 激光器的不足,人们开始研究用二阶光栅代替一阶光栅制作 DFB 激光器^[10]。二阶光栅周期大约是一阶光栅的 2 倍,因此制作工艺相对简单,又因其不需要刻蚀有源层,故工作稳定^[11]。此外,二阶光栅会产生两级衍射,分别对应反馈耦合系数和表面发射耦合系数,其中表面发射耦合系数

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(60636020, 60676034, 60706007)资助课题。

作者简介: 叶淑娟(1986—),女,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。

E-mail: yeleaves1012@163.com

导师简介: 秦 莉(1969—),女,研究员,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。E-mail: qinl@ciomp.ac.cn

反映了表面发射损耗,可引起主模和最低阶次模间较大的阈值增益差(大于 10 cm^{-1}),从而消除模式简并,保证稳定的单模工作。

二阶光栅的耦合特性是影响器件出光特性的主要原因,又由于光栅耦合特性主要决定于光栅占空比^[12],故研究二阶光栅占空比对二阶光栅 DFB 激光器的出光特性的影响具有重要意义。

本文基于耦合模理论,分析二阶光栅 DFB 激光器的综合出光特性,包括阈值增益、光子密度分布和外微分量效率等。在此基础上,通过数值计算,重点讨论光栅占空比对器件出光特性的综合影响,得到最优光栅占空比,为实验工作提供指导。

2 理论分析

图 1 为一般二阶光栅 DFB 激光器结构示意图。该结构^[13]由 5 层材料组成: p-InP 上包层, p-InGaAsP 上波导层(禁带宽度对应波长为 $1.3 \mu\text{m}$), InGaAsP 有源层(激光波长为 $1.55 \mu\text{m}$), n-InGaAsP 缓冲层(禁带宽度对应波长为 $1.3 \mu\text{m}$)和 n-InP 衬底。在上波导层上,刻蚀二阶矩形光栅,然后二次材料生长上包层,侧向光场限制由脊型波导提供^[13]。此外,激光器的两个端面都镀抗反膜(端面反射率约为 0),目的是为了减少端面反射引起的不确定相位,影响激光器的模式^[6]。

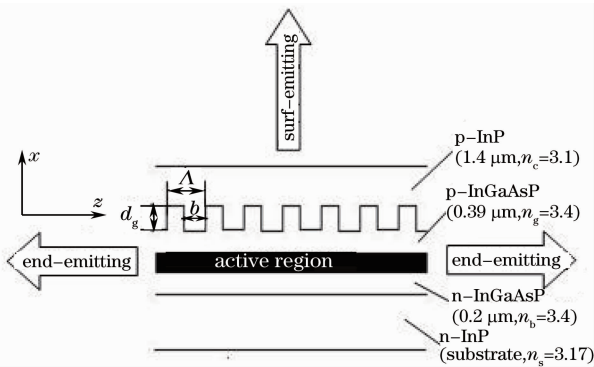


图 1 二阶光栅 DFB 激光器的结构图

Fig.1 Schematic diagram of second-order DFB laser

下面用耦合模理论分析二阶光栅 DFB 激光器的出光特性^[14]。前向波 $\mathbf{A}(z)$ 和后向波 $\mathbf{B}(z)$ 满足耦合模方程^[12]

$$\begin{cases} -\frac{d\mathbf{A}}{dz} = i\Delta\beta\mathbf{A} + i\kappa\mathbf{B}, \\ \frac{d\mathbf{B}}{dz} = i\kappa\mathbf{A} + i\Delta\beta\mathbf{B}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\kappa = \kappa_2 + i\kappa_1$ 为总的耦合系数, κ_2 为反馈耦合系数, κ_1 为表面发射耦合系数; $\Delta\beta = \delta + i\frac{\alpha_m}{2}$, δ 为相对于 Bragg 波长 λ_B 的失谐量, 满足 $\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda_B}\right)n_{\text{eff}}$, λ 为激光波长, n_{eff} 为有效折射率; α_m 为阈值时的模式增益, 即端面损耗, 满足 $\alpha_m = g_{\text{th}} - \alpha_{\text{int}} - \alpha_{\text{surf}}$, g_{th} 为总的阈值增益, α_{int} 为激光器内部损耗, α_{surf} 为表面发射损耗, 满足 $\alpha_{\text{surf}} = 2\kappa_1$ 。

2.1 耦合系数

对于矩形薄光栅, 耦合系数满足^[12]

$$\kappa_2 = k_0 \Delta n \Gamma_g \frac{\sin(2\pi\sigma)}{2\pi}, \quad (2)$$

$$\kappa_1 = \frac{2\Delta n d_g}{\lambda} \tan(\pi\sigma) \kappa_2, \quad (3)$$

式中 $\Delta n = n_g - n_c$ 为折射率差, 即上波导层和上包层的折射率差; Γ_g 为光栅限制因子; d_g 为光栅深度; σ 为占空比, 满足 $\sigma = b/\Lambda$, 其中 b 为光栅槽的宽度, Λ 为光栅周期。

2.2 阈值增益

对于两个端面都镀抗反膜的二阶光栅 DFB 激光器, 通过解方程组(1), 得到阈值振荡条件

$$\gamma^2 \exp(-i2qz) = 1, \quad (4)$$

式中 $\gamma = \frac{\kappa}{q + \Delta\beta}$ 为振幅反射率; $q = \sqrt{(\Delta\beta)^2 - \kappa^2}$ 。

2.3 光子密度

光子密度 $P(z)$ 是关于 $\mathbf{A}(z)$ 和 $\mathbf{B}(z)$ 的函数, 满足

$$P(z) \propto |\mathbf{A}(z)|^2 + |\mathbf{B}(z)|^2. \quad (5)$$

2.4 外微分量效率

表面发射和端面发射的外微分量效率分别满足^[5]

$$\eta_{\text{ex-surf}} = \eta_i \frac{2 \times \kappa_1 \times \int_0^L |\mathbf{A}(z) + \mathbf{B}(z)|^2 dz}{g_{\text{th}} \times \int_0^L (|\mathbf{A}(z)|^2 + |\mathbf{B}(z)|^2) dz}, \quad (6)$$

$$\eta_{\text{ex-m}} = \eta_i \frac{(g_{\text{th}} - \alpha_{\text{int}}) \times \int_0^L (|\mathbf{A}(z)|^2 + |\mathbf{B}(z)|^2) dz - 2 \times \kappa_1 \times \int_0^L |\mathbf{A}(z) + \mathbf{B}(z)|^2 dz}{g_{\text{th}} \times \int_0^L (|\mathbf{A}(z)|^2 + |\mathbf{B}(z)|^2) dz}, \quad (7)$$

式中 η_i 为内量子效率, 近似为 1。

通过以上分析可看出, 对于不同光栅占空比, 由 (2) 和 (3) 式可得到相应的反馈耦合系数和表面发射耦合系数。再根据方程 (4) 可得 $\Delta\beta$, 进而得到相应的阈值增益。同时, 对方程组 (1) 求解, 可得到 $\mathbf{A}(z)$ 和 $\mathbf{B}(z)$, 再利用 (5)~(7) 式即可得腔内光子密度分布以及端面发射和表面发射的外微分量子效率。

3 数值计算及讨论

基于理论分析, 下面讨论其数值计算结果, 所用到的结构参数如表 1 所示。

表 1 结构参数

Table 1 Structure parameters

Parameter	Value
Cavity length $L/\mu\text{m}$	500
Active layer thickness $d/\mu\text{m}$	0.18
Cavity width $W/\mu\text{m}$	2
Internal loss $\alpha_{\text{int}}/\text{cm}^{-1}$	40
Grating depth $d_g/\mu\text{m}$	0.1
Grating confinement factor Γ_g	0.05
Approximate emission wavelength $\lambda_0/\mu\text{m}$	1.55
End reflection r_1, r_2	0

图 2 给出了表面发射耦合系数和反馈耦合系数与占空比的关系。可以看到, κ_2 在 $\sigma=0.25$ 处取得最大值 74 cm^{-1} , 而在 $\sigma=0$ 和 0.5 处, κ_2 为 0, 此时将没有光反馈, 不会有激光产生, 并且, 在其附近, 反馈都很弱, 很难有激光产生; 随着 σ 从 0 到 0.5, κ_1 从 0 增到最大值 4.3 cm^{-1} , 相对于 κ_2 来说很小。

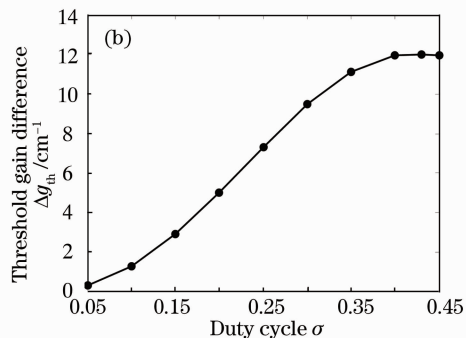
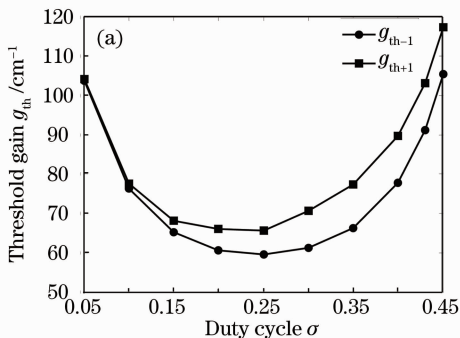


图 3 (a) ± 1 阶模的阈值增益 $g_{\text{th}+1}$ 和 $g_{\text{th}-1}$ 随占空比 σ 的变化; (b) ± 1 阶模的阈值增益差 Δg_{th} 随占空比 σ 的变化

Fig. 3 (a) Variation of threshold gain of ± 1 mode $g_{\text{th}+1}$ and $g_{\text{th}-1}$ with duty cycle σ ;

(b) variation of threshold gain difference Δg_{th} with duty cycle σ

图 4 给出的是在注入电流为 $2I_{\text{th}}$ 时, 不同占空比下激光器腔内光子密度分布。结合图 2, 可以看出, 随着 σ 从 0.05 变化到 0.25, 从 0.45 变化到 0.25, 由于阈值增益降低, 腔内光子密度越来越大,

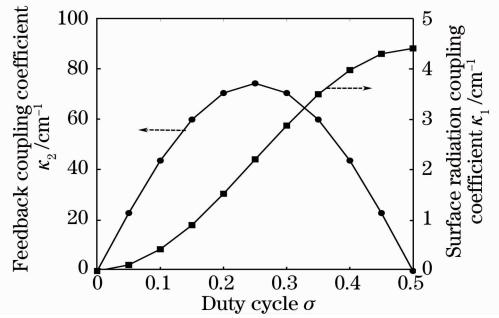


图 2 耦合系数 κ_1, κ_2 随占空比的变化

Fig. 2 Variation of coupling coefficient κ_1, κ_2 with duty cycle σ

图 3(a) 是 ± 1 阶模阈值增益随占空比的变化。反馈耦合系数反映了周期性光栅对光波的反馈程度, 而反馈又使得前向波和后向波在传播过程中相互之间发生耦合^[15] 反馈耦合系数越大, 光栅对光波的反馈就越强, 从而前向波和后向波之间的耦合越强, 耦合输出损耗越小, 阈值增益越小, 这类类似于法布里-珀罗激光二极管 (F-P-LD) 中的端面反射率增大的情况^[16]。因此, 当 $\sigma=0.25$ 时, $+1$ 阶模的阈值增益 $g_{\text{th}+1}$ 和 -1 阶模的阈值增益 $g_{\text{th}-1}$ 都取得最小值, 这是因为此时反馈耦合系数最大; 同样, 由图 3(b) 可知, 随着 σ 的增大, 两个模的增益差 Δg_{th} 也越来越大, 由于此时表面发射耦合系数也是随之增大的, 这说明表面发射耦合系数可增大 ± 1 阶模之间的阈值增益差^[5, 17]。当 σ 约为 0.4 时, $g_{\text{th}-1}$ 与 $g_{\text{th}+1}$ 之差达 12 cm^{-1} 之大, 此时很容易实现单模 (-1 阶模) 激光。

且光子大量集中在腔中间, 很容易引起空间烧孔效应。当占空比 σ 为 0.1 和 0.4 时, κ_2 约为 40 cm^{-1} , 光子密度在腔中分布相对均匀, 可避免空间烧孔效应的产生。

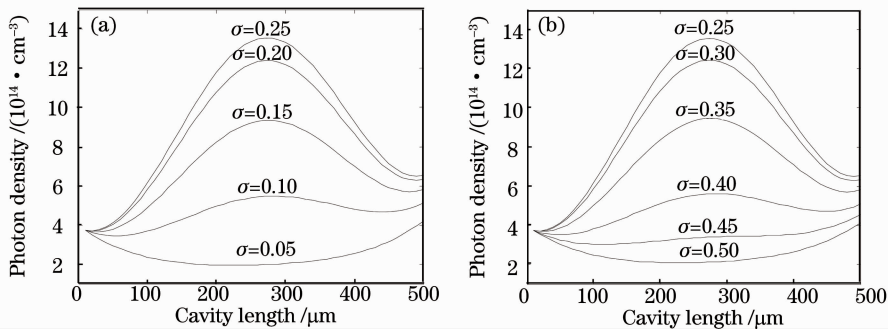
图 4 不同占空比 σ 下的光子密度沿激光器腔的分布Fig. 4 Photon density distribution along the laser cavity under different duty cycle σ

图 5 给出了端面发射和表面发射的外微分子效率与占空比的关系。可以看出,对于任意 σ , $\eta_{\text{ex-m}}$ 始终大于 $\eta_{\text{ex-surf}}$, 尤其在 σ 约为 0.4 时, $\eta_{\text{ex-m}}$ 可达 40%, 是 $\eta_{\text{ex-surf}}$ 的 2 倍之多, 这也是把端面出光作为二阶光栅 DFB 激光器研究重点, 而把表面发射作为损耗的原因^[18]。其中端面发射外微分子效率在 σ 约为 0.3 处取得最小值, 是反馈耦合系数和阈值增益共同影响的结果, 因为此时反馈耦合系数较大, 使得端面损耗 α_m 较低, 但较之其他 α_m 更低的情况, 此时阈值增益更高。对于表面发射外微分子效率在 σ 约为 0.35 处取得最大值, 认为是表面发射耦合系数和阈值增益共同影响的结果, 因为此时表面发射耦合系数较大, 使得表面发射损耗 α_{surf} 较大, 但较之其他 α_{surf} 更大的情况, 此时阈值增益较低。

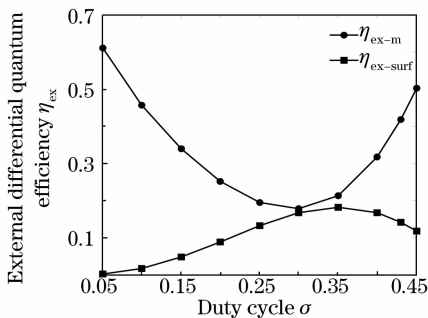


图 5 端面发射和表面发射的外微分子效率随占空比的变化

Fig. 5 Variation of external differential quantum efficiency η_{ex} of end-emitting and surface-emitting with duty cycle σ

由以上数值计算结果可以看出, 对于上述给定结构, 当 σ 约为 0.4 时, +1 阶模与 -1 阶模的阈值增益差较大, 很容易实现单模激射, 且光子密度在腔内分布较均匀, 端面发射外微分子效率高于 40%。

表 2 是在 $\sigma = 0.43$ 下, $\kappa_1 = 4.1942 \text{ cm}^{-1}$, $\kappa_2 = 31.5901 \text{ cm}^{-1}$ 时得到的二阶光栅 DFB 激光器的出光特性结果, 同时也对比了相同反馈耦合系数

(31.5901 cm^{-1}) 下的一阶光栅 DFB 激光器出光特性。

表 2 出光特性对比

Table 2 Emission characteristics contrast

	Mode	δ	g_{th}	Δg_{th}	$\eta_{\text{ex}}/\%$
Second-order DFB	-1	-58.5932	91.1048	12.0056	47
	+1	64.3117	103.1104		
First-order DFB	-1	-61.4758	89.216	0	55
	+1	61.4758	89.216		

可以看出, 一阶光栅 DFB 激光器的 ± 1 阶模没有阈值增益差, 二者同时激射, 是人们所不希望的; 对于二阶光栅 DFB 激光器, ± 1 阶模阈值增益差很大 (12 cm^{-1}), 计算得^[18] 在注入电流为 $2I_{\text{th}}$ 时, 边模抑制比 (SMSR) 达到 35 dB, 如此强的单模选择机制在 DFB 激光器的设计中是非常有利的。不过, 由于二阶光栅 DFB 激光器的表面发射损耗, 外微分子效率 (47%) 相对于一阶光栅 DFB 激光器 (55%) 稍低。

此外, 对 Choa 等^[19] 在 1995 年做的二级光栅 DFB 器件, 进行了模拟计算, 并且与其实验结果进行了对比。其器件结构为 InP/InGaAsP 材料体系, 二阶光栅制作于 n-InP 下波导层上, 激射波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 腔长为 $250 \mu\text{m}$, 宽为 $1.2 \mu\text{m}$, 其实验结果为阈值电流 6 mA, 表面出光效率是端面出光效率的 15%。对其模拟计算, 得到优化的占空比为 0.37, 阈值电流为 4 mA, 边模抑制比为 42 dB, 端面出光外微分子效率为 54%, 表面发射外微分子效率为 12%, 即表面出光效率是端面出光效率的 22%, 与实验结果基本一致。

4 结 论

基于耦合模理论, 分析了二阶光栅 DFB 激光器的出光特性; 通过数值计算, 详细讨论了光栅占空比对器件出光特性的综合影响, 并得到了优化的光栅占空比, 对实验工作具有重要的指导作用。计算表

明,二阶光栅 DFB 激光器在消模式简并、单模激射等方面具有突出优势,具有广阔的研究前景。此外,该理论分析和数值讨论方法提供了一种完整的二阶光栅 DFB 激光器的出光特性综合分析方法,具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 H. Wenzel, A. Klehr, M. Braun *et al.*. Design and realization of high-power DFB lasers[C]. *SPIE*, 2004, **5594**: 110~123
- 2 T. Fessant. Gaussian-like tapered grating quarter wave-shifted DFB semiconductor lasers for high-power single-mode operation [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**: 679~772
- 3 Xu Zhen, Zhou Shuyu, Wang Yuzhu. Electro-optical crystal tuned external cavity diode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 915~918
徐震,周蜀渝,王育竹. 电光晶体调谐的外腔反馈半导体激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 915~918
- 4 Cheng Can, Xin Guofeng, Feng Huizhong *et al.*. Temperature characteristics of volume Bragg grating external cavity semiconductor laser working at continuous wave[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 27~30
程灿,辛国锋,封惠忠等. 连续工作的布拉格光栅外腔半导体激光器的温度特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 27~30
- 5 T. Makino, Jan Glinski. Effects of radiation loss on the performance of second-order DFB semiconductor lasers [J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(1): 73~82
- 6 D. Wang, N. Zhou, R. Zhang *et al.*. High speed and wide temperature range uncooled 1.3- μm ridge waveguide DFB lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 809~811
- 7 Y. Xi, X. Li, W. Huang. Dispersive-grating distributed feedback lasers[J]. *Opt. Express*, 2009, **16**(14): 10809~10814
- 8 B. Kim, S. Cho, A. Shakouri. The symmetry of the amplified apontaneous emission spectrum in complex-coupled DFB lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(6):1088~1093
- 9 C. Gourgon, J. Robadey, E. Gaud *et al.*. CW second-order complex coupled DFB lasers with low threshold current density and high monomode stability[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(24): 2119~2120
- 10 W. Streifer, D. Scifres. Coupled wave analysis of DFB and DBR lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1977, **QE-13**(4): 134~141
- 11 X. F. Li, S. F. Yu. Static and dynamic modeling of circular grating-coupled distributed feedback lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(8): 770~775
- 12 R. Kazarinov, C. Henry. Second-order distributed feedback lasers with mode selection provided by first-order radiation lossed [J]. *J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(2): 143~149
- 13 S. F. Yu, R. G. S. Plumb, L. M. Zhang *et al.*. Large-signal dynamic behavior of distributed-feedback lasers including lateral effects [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8): 1740~1750
- 14 A. Shams-Zadeh-Amiri. Second-and higher order resonant gratings with gain or loss-part I: green's function analysis[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(12): 1421~1424
- 15 Cai Borong, Chen Zheng, Liu Xun. Semiconductor Lasers[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 1995. 103
蔡博荣,陈铮,刘旭. 半导体激光器[M]. 北京:电子工业出版社, 1995. 103
- 16 Guo Liyan. The Simulation of 1550 nm DFB-LD and Reserch for Uniform Gratings[D]. Tianjin: Hebei Universiyt of Technology, 2005. 13
高丽艳. 1500 nm 分布反馈激光器的模拟及制作均匀光栅的研究[D]. 天津:河北工业大学, 2005. 13
- 17 D. Park, M. Kim. Mode analysis of DFB SE lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(8): 1432~1440
- 18 Xiyuan Minming. Fundamental of Semiconductor Laser (Japanese)[M]. Beijing: Science Press, 2002. 203
栖原敏明. 半导体激光器基础(日本)[M]. 北京:科学出版社, 2002. 203
- 19 F. S. Choa, M. H. Shih, J. Y. Fan *et al.*. Very low threshold 1.55 μm grating coupled surface-emitting lasers for optical signal processing and interconnect [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(19): 277~279