

# SGDBR 激光器中取样光栅的理论和实验研究\*

董 雷<sup>1,2,†</sup> 张瑞康<sup>2</sup> 王定理<sup>2,3</sup> 张 靖<sup>2</sup> 陈 磊<sup>2</sup> 江 山<sup>2</sup> 赵圣之<sup>1</sup> 余永林<sup>4</sup> 刘水华<sup>2</sup>

(1 山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

(2 光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

(3 武汉大学物理科学与技术学院, 声光材料与器件教育部重点实验室, 武汉 430072)

(4 华中科技大学武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 讨论了取样光栅分布布拉格反射激光器(SGDBR)中取样光栅对激光器调谐范围、输出功率和光谱质量的影响, 介绍了其设计流程, 并据此对 SGDBR 进行了实验研究. 其取样光栅的反射谱和设计相符, 且在 30nm 准连续调谐范围内边模抑制比都大于 30dB.

**关键词:** SGDBR 半导体激光器; 取样光栅; 梳状光谱

**EEACC:** 4320J; 4270; 4130

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)02-0356-05

## 1 引言

取样光栅是在均匀光栅中周期性地去除一些区域构成的一种独特的光栅结构, 这种周期性调制导致光栅具有梳状的反射谱. 利用取样光栅制作的 SGDBR 激光器如图 1 所示, 它利用游标效应大大拓宽波长的调谐范围. 与其他宽可调谐半导体激光器相比, 在调谐范围和输出光谱质量等方面都具有很大优势<sup>[1,2]</sup>; 且制作工艺相对简单, 易与其他器件集成<sup>[3,4]</sup>, 有非常好的市场前景.

设计和优化取样光栅是研制高性能 SGDBR 激光器的关键, 但目前还未见有详细的报道. 本文分析了取样光栅的结构参数对激光器调谐范围、输出功率和光谱质量的影响, 并根据优化结果成功设计制作了四段式 SGDBR 激光器. 测试结果显示当仅在有源区注入电流时, 器件的阈值电流为 25mA, 在 100mA 下输出功率大于 6mW; 通过改变前、后光栅区以及相位区电流实现准连续调谐范围大于 30nm, 且在调谐范围内边模抑制比都大于 30dB.

## 2 取样光栅对 SGDBR 性能的影响及设计

图 1 所示的取样光栅结构中,  $\Lambda$ ,  $L_g$  和  $L_s$  分别代表光栅周期、光栅区长度和取样长度,  $R$  是端面反射率,  $L$  为光栅距离端面的长度, 取样周期数为  $N$ . 取样光栅梳状反射谱如图 2 所示,  $\delta\lambda$  是反射峰的带宽,  $\Delta\lambda$  是梳状反射峰之间的波长间隔, 反射峰上的数字代表反射峰级数. 由于  $\delta\lambda$ ,  $\Delta\lambda$  和反射率直接影响激光器的性能, 而这些参数是由光栅结构直接决定. 因此只有了解取样光栅各个结构参数之间的制约关系, 优化光栅结构, 才能制作出具有宽调谐范围、较强输出功率和优良单模输出特性的 SGDBR 激光器.

### 2.1 调谐范围

取样光栅最大的特点是利用游标效应实现远大于传统 DFB 和 DBR 激光器的调谐范围. 设计时, 将激光器前、后端的取样光栅采用不同的取样周期, 导致反射谱的波长间隔  $\Delta\lambda$  不相同. 通过注入电流改变前后光栅梳状反射谱的重合位置从而实现不同波长激励.

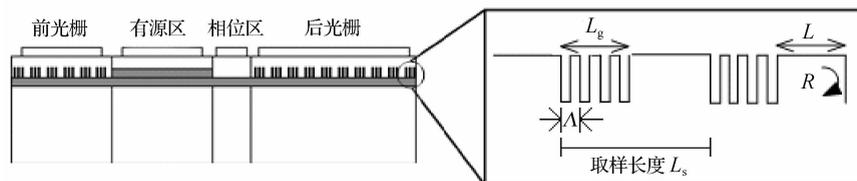


图 1 四段式 SGDBR 及其取样光栅结构图

Fig.1 Schematic illustration of four sections SGDBR and sampled grating structure

\* 国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA03Z427), 国家重点基础研究发展规划(批准号:2003CB314903)和国家自然科学基金(批准号:60677024)资助项目

† 通信作者. Email: lei.dong@accelink.com

2007-06-01 收到, 2007-10-09 定稿

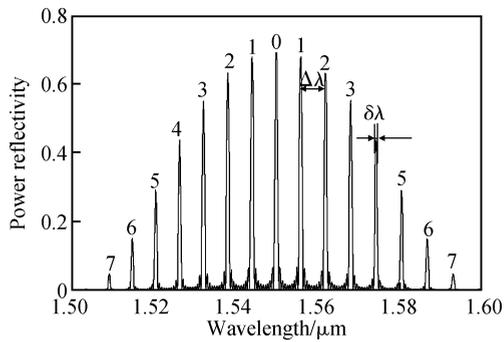


图2 取样光栅梳状反射谱

Fig.2 Comb-like reflectivity spectrum of sampled grating

实现准连续调谐的关键是必须能完全覆盖两个相邻反射峰之间的波长区域,因此各反射峰之间的间距不能大于最大波长改变量.由于 InGaAsP 材料中自由载流子等离子体效应引起的最大波长改变量一般在 6~12nm<sup>[5]</sup>,考虑到制作工艺的影响,我们将  $\Delta\lambda$  设计在 5~6nm 之间.

取样光栅中各反射峰的间隔为<sup>[3]</sup>:

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / 2n_g L_s \quad (1)$$

由此可见,波长间隔仅与取样周期长度  $L_s$  成反比.根据群折射率  $n_g$  以及所需要的中心波长,就可以由上式确定取样周期的长度.

定义调谐范围  $\Delta\lambda_{\text{tuning}}$ ,它是由前、后取样光栅的反射峰间隔决定,即<sup>[5]</sup>:

$$\Delta\lambda_{\text{tuning}} = \frac{\Delta\lambda_f \Delta\lambda_b}{|\Delta\lambda_f - \Delta\lambda_b|} \quad (2)$$

式中  $\Delta\lambda_f, \Delta\lambda_b$  分别为前、后光栅反射峰间隔.实际上方程的结果偏大,这一方面是因为各反射峰的间隔并不等距而是与波长有关,更重要的是由取样光栅反射谱的特点决定的.图 2 所示的取样光栅反射谱显示中间零级反射峰的反射率最强,同时成对称性向两边递减.调谐时,这些反射峰都有可能满足谐振条件而激射.由于各反射峰的反射率不一致会导致器件性能劣化,因此通常只考虑中间部分几个反射峰,所以在理论计算时应考虑留出富余量.为设计覆盖范围为 30nm 的激光器,我们将尺度定为 40nm.若峰值间隔为 6nm,只需关注 0~3 级反射峰的特性.

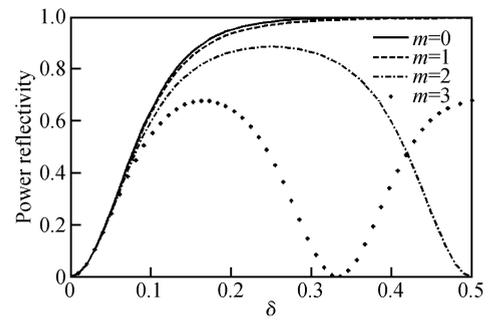
波长调谐引起的一个重要问题是调谐损耗<sup>[6]</sup>.为简单起见只考虑一阶的情况,此时可以写为线性函数<sup>[5]</sup>:

$$\langle\alpha(\lambda)\rangle = \langle\alpha_i\rangle + \nu\Delta\lambda_{\text{peak}} \quad (3)$$

式中  $\langle\alpha_i\rangle$  代表模式损耗; $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  为单个反射峰的波长调谐量; $\nu$  是由调谐引起损耗的增加速率.(3)式表明  $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  越小,由调谐引起的损耗越少.因此对于固定的取样周期数  $N$ ,较短的取样周期可以减小由无源波导带来的损耗,但同时会增加调谐损耗.综合后面要讨论的内容,作为输出端面的前光栅应该在保证激光器具有较强输出功率的前提下能同时覆盖较大的调谐范围.

## 2.2 输出功率

很多因素会影响激光器输出功率,例如有源区与无

图3 取样光栅的第  $m$  级反射峰值与  $\delta$  的关系Fig.3 Variations of the  $m$ th peak power reflectivity with respect to  $\delta$ 

源波导区的设计,各段之间光场耦合甚至是外围电路.这里我们仅讨论光栅区域对光功率的影响.

增加输出端面的透射系数,或是提高反射端面的反射系数都可以增加输出功率<sup>[7]</sup>.由耦合模理论得到的取样光栅反射率为<sup>[8]</sup>:

$$R(m) = \tanh^2(|\kappa_m| N \times L_s) \quad (4)$$

其中  $N$  为取样周期数; $\kappa_m$  是第  $m$  个反射峰的耦合系数,即:

$$\kappa_m = \kappa_0 \frac{L_g}{L_s} \times \frac{\sin(\pi m L_g / L_s)}{\pi m L_g / L_s} e^{-i\pi m L_g / L_s} \quad (5)$$

$\kappa_0$  是均匀光栅的耦合系数,定义  $\delta = L_g / L_s$ .上式表明光栅的反射率是由  $\kappa_0, N, L_s$  以及  $\delta$  来决定,且与前三者成正比.

为讨论  $\delta$  对反射率的影响,选取  $\kappa_0, N$  和  $L_s$  的值分别为  $200\text{cm}^{-1}, 10$  和  $55\mu\text{m}$ ,并以 0 到 3 级反射峰作为研究对象,得到  $\delta$  和反射率的函数关系如图 3 所示.

图 3 表明,当  $\delta$  小于 0.1 时,各反射峰之间的差别很小,但此时整个包络的反射率也较低.增大  $\delta$ ,除零级反射峰外,其余反射峰的反射率均呈起伏变化.为保证 4 个反射峰都有相近且较强的反射率, $\delta$  取值应考虑设在 10%~15% 之间.为减小前光栅反射率和增加后光栅反射率,在前光栅采用较少的取样周期数,同时增加后光栅的取样周期数.

对于固定的  $N$  和  $\delta$ ,应在前光栅采用较短的取样周期而后光栅则较长.根据(1)和(3)式,此时前光栅的峰值间隔大于后光栅,且调谐损耗也相应增加.为在调谐损耗和波导损耗之间取得平衡,我们将前光栅  $\Delta\delta$  设计为 6nm.

在取样光栅结构各个参数中,另外两个很重要同时容易被忽视的参量是端面的反射率  $R$  以及端面距光栅的距离  $L$ (图 1).由于和均匀光栅相比,取样光栅的反射率和端面反射率为同一量级,因此对端面反射率更加敏感<sup>[9]</sup>.端面与光栅之间构成的 F-P 腔会产生额外的选模作用<sup>[10]</sup>,图 4(a)的结果表明此时各反射峰的反射率均受到影响.

解决端面问题最简单的方法就是在管芯解理时端面尽量靠近光栅,但这在实际中很难做到.我们注意到图 4(b),当  $R$  降为  $10^{-4}$  量级时,此时端面的影响就可

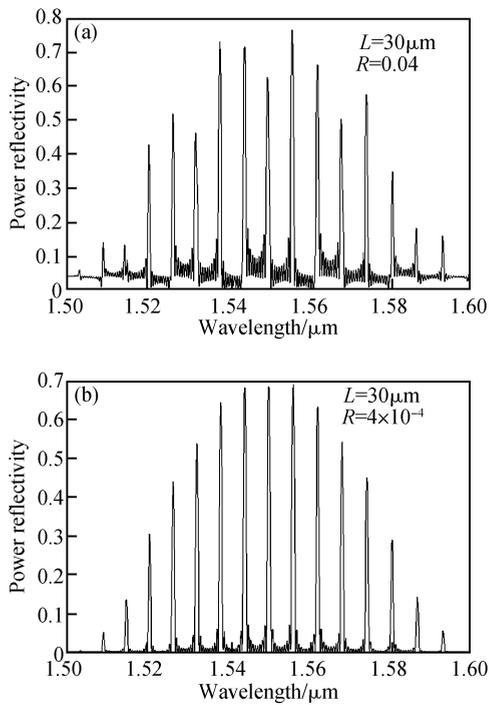


图 4 端面对取样光栅反射谱的影响

Fig.4 Influence of facet reflections on sampled grating spectrum

以忽略. 因此为了获得良好的反射谱, 应给端面镀上增透膜.

### 2.3 边模抑制比

设计 SGDBR 的另一个重点是在实现宽可调谐范围的前提下, 保证激光器的高质量单模输出. 其边模抑制比的表达式可以写为<sup>[8]</sup>:

$$SMSR \geq \left( \frac{\Gamma \Delta g}{\Gamma g_{th}} + M \right) \times 10^4 (\text{mW}^{-1}) \times P (\text{mW}) \quad (6)$$

式中  $\Gamma \Delta g$  是模间的增益差;  $\Gamma g_{th}$  为阈值增益;  $M$  为两个竞争模式之间的腔损耗差;  $P$  为输出功率.

(6)式括号中前者是由材料性质决定, 而后者则会受到两种竞争模式的影响<sup>[8]</sup>: 相邻的腔模损耗差  $M_{cm}(R_1 R_2(\lambda_0), R_1 R_2(\lambda_2))$  以及相邻的前后光栅反射峰损耗差  $M_{ch}(R_1 R_2(\lambda_0), R_1 R_2(\lambda_1))$ , 如图 5 所示.

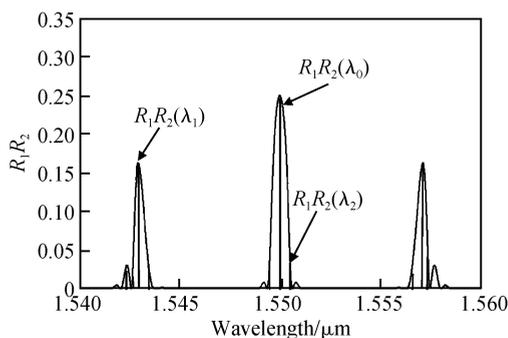


图 5 前、后取样光栅反射谱乘积

Fig.5 Reflectivity product of the front and rear sampled grating

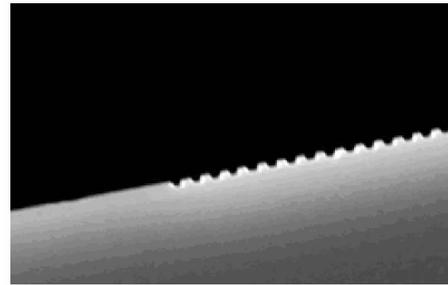


图 6 取样光栅的 SEM 图

Fig.6 SEM micrograph of sampled grating

和普通 DBR 激光器相同,  $M_{cm}$  一般大于 0.1, 即对于输出功率为 10mW 的 InP/InGaAsP 半导体激光器, 边模抑制比能够大于 40dB<sup>[8]</sup>; 而提高  $M_{ch}$  则是设计 SG-DBR 的难点. 增加激光器前、后光栅反射峰的间距可以减小  $R_1 R_2(\lambda_1)$ , 但根据(2)式, 这会减少激光器的调谐范围. 另一个解决方法是减小反射峰带宽  $\delta\lambda$ . 根据耦合模理论, 反射峰带宽可以表述为<sup>[8]</sup>:

$$\delta\lambda_m = \frac{\lambda^2}{\pi n_g} \sqrt{|\kappa_m|^2 + (\pi/N \times L_s)^2} \quad (7)$$

上式表明  $\delta\lambda$  与波长的平方成正比, 与  $N$  和  $L_s$  成反比. 因此对于固定的取样周期, 较多的  $N$  可以增加  $M_{ch}$ . 在设计中, 我们通过增加后取样光栅区的周期数, 使激光器在保证宽调谐范围和高输出功率的前提下, 同时具有优良的光谱特性.

### 3 实验结果

根据以上分析, 我们设计制作了 SGDBR 激光器. 首先在 n 型 InP 衬底上依次生长 InP 缓冲层、下波导层、多量子阱层、上波导层以及 InP 覆盖层. 接着用 PECVD 淀积 150nm 厚的  $\text{SiO}_2$ . 利用光刻划分出有源区和无源波导区并采用选择性腐蚀技术将无源波导区中的材料全部腐蚀. 然后对接生长 1.42Q 的 InGaAsP 无源波导层和 1.24Q 的光栅层, 采用掩膜版遮盖和全息曝光的方法制作悬浮取样光栅(图 6). 根据前面的优化结果, 前光栅反射峰的间隔设计为 6nm. 由(1)式求出取样周期长度为  $50\mu\text{m}$ , 光栅区长度设计为  $5\mu\text{m}$ , 以满足  $\delta$  为 10% 的要求, 取样周期数为 6. 后光栅的取样周期为  $55\mu\text{m}$ , 选取较大的  $\delta$  值 12%, 则光栅区长度为  $7\mu\text{m}$ . 为

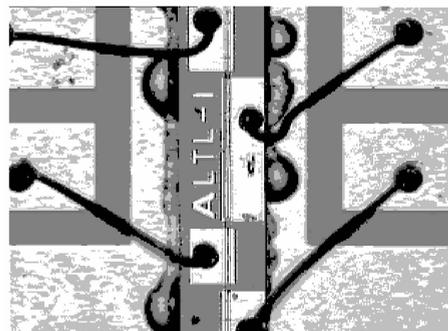


图 7 焊在铜质热沉上 SGDBR 激光器

Fig.7 SGDBR soldered on copper heat sink

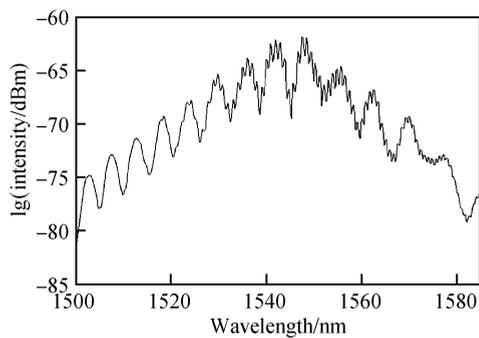


图 8 阈值下后取样光栅透射谱

Fig. 8 Below threshold spectra from rear sampled grating

保证后光栅有较大的反射率,取样周期数取为 12. 此时,前、后取样光栅反射峰间隔分别为 6 和 5.4nm. 若仅考虑前三级反射峰,则调谐范围在 36nm 左右,为实现 30nm 的调谐范围留出一定的富余量.

完成光栅制作后,再利用 LP-MOVPE 生长 p 型 InP 覆盖层和 p<sup>+</sup> 型 InGaAs 接触层. 此后的制作流程除要在接触层上制作电极隔离图形外,其余步骤与脊波导激光器的制作相同. 经过溅射、解理,利用电子束蒸发器在激光器前、后端面上镀上防反射膜以减小端面对光栅反射谱的影响. 最后将管芯焊在铜质热沉上以保证良好的电和热接触并方便测试,如图 7 所示.

器件 *L-I* 测试结果显示当仅在有源区加电时,阈值电流为 25mA; 在 100mA 下输出功率大于 6mW. 为测量集成到激光器中取样光栅的特性,我们将增益区电流调到阈值以下,此时相当于宽光谱光源照射光栅<sup>[11]</sup>, 输

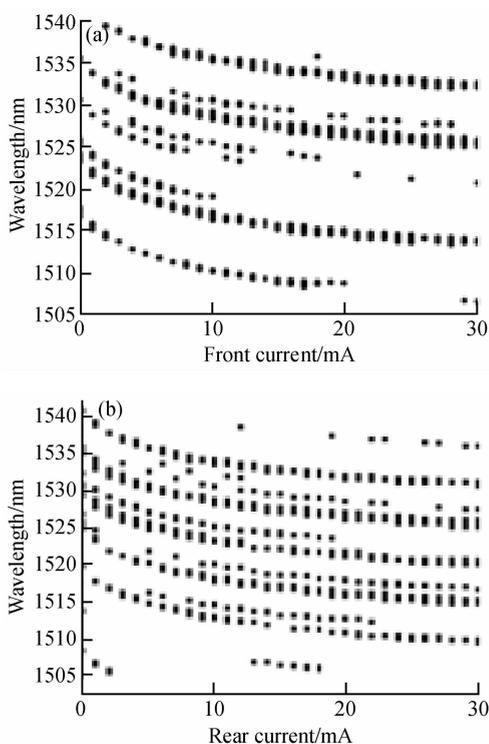


图 9 前、后光栅区电流与波长关系

Fig. 9 Wavelength versus currents in front and rear grating region

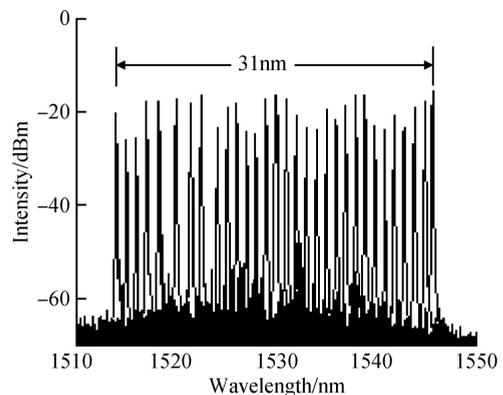


图 10 30nm 调谐范围光谱叠加图

Fig. 10 Superimposed tuning spectra for the laser over a 30nm tuning range

出光谱可以认为是 SGDBR 光栅透射谱. 图 8 为实验测得的后光栅透射谱,图中可以观察到清晰的梳状反射峰,反射峰间距为 6nm,和设计值基本相符.

通过改变前、后光栅电流(0~30mA),测试得到其与波长的关系分别如图 9(a),(b)所示. 图中表明调谐时由于不同反射峰发生激射而产生的模式跳跃现象. 同时改变前、后光栅区的电流就可以实现准连续调谐. 但为了使反射峰值波长与腔模中心波长重合,可以适当调整相位区电流(0~10mA)以获得较高的边模抑制比. 图 10 的结果即为同时调整光栅区以及相位区电流得到的大于 30nm 连续调谐范围,且在此范围内边模抑制比均大于 30dB.

## 4 总结

对于四段式可调谐 SGDBR,光栅区的设计是整个激光器制作中非常重要的一环. 本文,我们首次详细讨论了取样光栅各个参数对光栅反射谱以及激光器性能的影响,并根据理论结果设计制作了 SGDBR 激光器. 器件的阈值电流为 25mA,在 100mA 下输出功率大于 6mW; 在前后光栅区和相位区注入调谐电流,获得的准连续调谐范围大于 30nm 且边模抑制比大于 30dB.

## 参考文献

- [1] Coldren L A, Fish G A, Akulova Y, et al. Tunable semiconductor lasers: a tutorial. *Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 193
- [2] Larson M C W, Akulova Y A, Coldren C W, et al. High performance widely-tunable SG-DBR lasers. *SPIE Photonics West*, 2003, 4995: 66
- [3] Lee S L, Heimbuch M E, Cohen D A, et al. Integration of semiconductor laser amplifiers with sampled grating tunable lasers for WDM applications. *Quantum Electronics*, 1997, 3(2): 615
- [4] Mašanović M L, Lal V, Summers J A, et al. Widely tunable monolithically integrated all-optical wavelength converters in InP. *Lightwave Technology*, 2005, 23(3): 1350
- [5] Skogen E J. Quantum well intermixing for wavelength-agile photonic integrated circuits. electrical and computer engineering. PhD Dissertation of University of California, 2003: 199

- [ 6 ] Bennett B R, Soref R A, Del Alamo J A. Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP. *Quantum Electronics*, 1990, 26(1):113
- [ 7 ] Coldren L A, Corzine S W. *Diode lasers and photonic integrated circuits*. Wiley-Interscience, 1995
- [ 8 ] Jayaraman V, Chuang Z M, Coldren L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings. *Quantum Electronics*, 1993, 29(6):1824
- [ 9 ] Buus J, Amann M C, Blumenthal D J. *Tunable laser diodes and related optical sources*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005
- [ 10 ] Todt R, Amann M C. Influence of facet reflections on monolithic widely tunable laser diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17:2520
- [ 11 ] Jayaraman V, Mathur A, Coldren L A, et al. Extended tuning range in sampled grating DBR lasers. *Photonics Technology Letters*, 1993, 5(5):489

## Theoretical and Experimental Investigation of SGDBR on Sampled Grating\*

Dong Lei<sup>1,2,†</sup>, Zhang Ruikang<sup>2</sup>, Wang Dingli<sup>2,3</sup>, Zhang Jing<sup>2</sup>, Chen Lei<sup>2</sup>, Jiang Shan<sup>2</sup>,  
Zhao Shengzhi<sup>1</sup>, Yu Yonglin<sup>3</sup>, and Liu Shuihua<sup>2</sup>

(1 School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

(2 Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

(3 Key Laboratory of Acoustic and Photonic Materials and Devices of Ministry of Education, Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(4 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The impact of the sampled grating in a distributed Bragg reflector laser on the tuning range, output power, and side-mode suppression ratio (SMSR) are investigated in detail. Design criteria are proposed, and the results are applied practically. The reflection spectrum of the sampled grating in the device is consistent with our design and a 30nm quasi-continuous-wave tuning range with SMSR > 30dB is achieved.

**Key words:** SGDBR laser; sampled grating; comb-shape spectrum

**EEACC:** 4320J; 4270; 4130

**Article ID:** 0253-4177(2008)02-0356-05

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z427), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB314903), and the National Natural Science Foundation of China (No. 60677024)

† Corresponding author. Email: lei.dong@accelink.com

Received 1 June 2007, revised manuscript received 9 October 2007

©2008 Chinese Institute of Electronics