

# 低波长漂移的电吸收调制 DFB 激光器\*

刘国利 王 坊 汪孝杰 张佰君 陈娓兮 张静媛 朱洪亮

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083)

**摘要:** 采用端面有效反射率法, 从理论上计算了单片集成电吸收调制 DFB 激光器 (Electroabsorption Modulated DFB Laser, EML) 的腔面反射率、耦合强度 ( $\kappa L$ ) 对其波长漂移的影响。同时在实验中通过改变腔面的反射率来验证计算结果。理论与实验的结果表明: 为提高 EML 的模式稳定性, 必须减小调制器一端的反射率, 同时增加 DFB 激光器的  $\kappa L$ 。最终我们采用选择区域生长 (Selective Area Growth, SAG) 的方法, 制作了低光反馈出光面的单脊条形 EML, 在 2.5Gb/s 的非归零 (NRZ) 码调制下, 经过 280km 的标准光纤传输后, 没有发现色散代价。

**关键词:** DFB 激光器; 电吸收调制器; 单片集成; 光学镀膜; 高速光传输

**EEACC:** 4320J; 1250; 4270; 4190F; 6140C

**中图分类号:** TN 248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)05-0636-05

## 1 引言

随着 Internet、有线电视、数据服务等的快速发展, 要求光纤能够提供更高的传输速率和更大的传输容量, 而采用传统的对激光器直接调制方式会引起很大的波长啁啾, 从而限制了传输速率和传输容量的提高。对单片集成 DFB 激光器(LD)与电吸收调制器(EML)而言, 由于外调制可以避免在高速调制时电子与光子的相互作用, 可以避免直接调制引起的较大的啁啾, 因此成为高速、大容量光纤传输系统的主要光源<sup>[1,2]</sup>。

然而, EML 也存在一定大小的啁啾, 主要来自于 EML 的电吸收调制器(EA-MD)的折射率随吸收系数的改变而改变<sup>[3]</sup>。此外激光器与调制器之间的热、电串扰和光反馈均会使 EML 的啁啾增加。尤其是光反馈, 不仅受激光器与调制器之间的对接部位的晶体质量的影响, 而且与调制器出光端面的反射率有很大的关系。静态下, 如果 MD 的出光端面存在较大的光反馈, 则 EML 的激射波长将随吸收系数的改变而发生漂移<sup>[4,5]</sup>。尽管大多数文章都报道采用适当的设计来减小 MD 端面的反射率<sup>[6,7]</sup>, 但 MD 反馈光的变化量、相位的变化、DFB 激光器的

光栅耦合强度  $\kappa L$  对波长漂移量的影响却少有报道<sup>[6-10]</sup>。

本文报道了采用端面有效反射率法, 从理论上计算了 EML 在静态下的波长漂移与端面光反馈量的关系, 并同时计算了折射率耦合(Index-Coupled, IC) 和复耦合(Complex-Coupled, CC) 两种耦合机制下  $\kappa L$  对波长漂移的影响。利用计算结果, 我们制作了具有低端面光反馈、大  $\kappa L$  的 IC-EML, 从静态自发发射谱(ASE)的测试显示我们制作的 EML 具有低的波长漂移; 2.5Gb/s 的非归零(NRZ) 码调制下的光信号, 经过 280km 的标准光纤和三个掺铒光纤放大器(EDFA)后, 在  $1 \times 10^{-12}$  的误码率下, 没有观察到色散代价。

## 2 EML 波长漂移的理论计算

Streifer 曾经报道过外反馈对 DFB 激光器的纵模模式的影响<sup>[11]</sup>, 下列公式是 Streifer 建立的 DFB 激光器的纵模本征值方程:

$$(YL)^2 D + (\kappa L)^2 \sinh^2(1 - \rho_l^2)(1 - \rho_r^2) + 2i\kappa L \times (\rho_l + \rho_r)(1 - \rho)^2 YL \sinh(YL) \cosh(YL) = 0 \quad (1)$$

$$Y^2 = (\alpha - i\delta)^2 + \kappa^2 \quad (2)$$

\* 国家“863”高技术计划(项目编号: 863-307-11-1(15)) 和国家自然科学基金(批准号: 69896260) 资助项目。

$$\rho_{l,r} = \hat{\rho}_{l,r} e^{-i\beta_0 L} e^{-i\Omega} \quad (3)$$

$$\rho^2 = \rho_l \rho_r = \hat{\rho}_l \hat{\rho}_r e^{-2i\beta_0 L} \quad (4)$$

$$D = (1 + \rho^2)^2 - 4\rho^2 \cosh^2(\gamma L) \quad (5)$$

对于一级光栅, 其 Bragg 波长相应的传播常数  $\beta_0$  为:

$$\beta_0 \equiv \pi/\Lambda \quad (6)$$

而 DFB 激光器的单纵模所对应的传播常数  $\beta$  为:

$$\beta = n\omega/c \quad (7)$$

两者之差  $\delta$  为:

$$\delta \equiv \beta - \beta_0 \quad (8)$$

在  $\beta \gg \kappa$  时, 耦合系数

$$\kappa = \frac{\beta}{2} \times \frac{\Delta n}{n} + i \frac{\Delta \alpha}{2} \quad (9)$$

上面公式中, 所有参数都是针对光波的电场分量而建立的. 其中  $L$  是激光器的腔长;  $\alpha L$  是 DFB 激光器在阈值时的归一化纵模模式增益;  $\delta L$  是纵模与光栅周期所决定的 Bragg 波长的归一化频率偏移;  $\kappa$  是光栅的耦合系数, 其实部表征折射率耦合, 虚部表征增益耦合;  $n$  是光栅波导层的折射率;  $\Delta n$  是光栅的折射率变化;  $\Delta \alpha$  是光栅的增益或损耗的变化;  $\Lambda$  是 Bragg 光栅的周期, 可设定为 240nm;  $\rho_{l,r}$  是 DFB 激光器的腔面反射率;  $\Omega$  是因光栅在端面处的不完整而引入的等效相位. 根据上述公式, 可以计算出 DFB 激光器在不同的腔面反射率时的纵模模式分布及其增益大小.

对于 EML, 随 MD 偏压的变化, 由于 MD 吸收系数的变化, 从 MD 一端反馈到 LD 中的光也随之变化, 相当于 DFB 激光器的腔面反射率改变, 使得 DFB 激光器的激励条件改变, 从而引起波长漂移. EML 的结构及光在内部的反馈如图 1 所示. 图中 DFB 激光器与 MD 之间有一段电学隔离区, 以防止 MD 一端的电信号耦合到 LD 一端引起额外的波长啁啾; 在我们制作的 EML 中, MD 与 LD 之间的隔离电阻大于 100kΩ, 可以避免 MD 与 LD 之间的电串扰<sup>[2]</sup>.  $I_{DFB}$  是 DFB 激光器的注入电流,  $-V_{mod}$  是 MD 的偏置电压. 在 DFB 激光器一端镀高反射膜, 在 MD 一端镀抗反射膜.  $\beta$  是光在 DFB 中的复传播常数,  $r$  是光在各段之间的反馈,  $L$  是各段的长度,  $r_{f,l,r}$  是左、右端面反射系数. 对于采用选择区域(Selective-Area-Growth, SAG) 方法制作的 EML, 由于 LD 与 MD 之间不存在 Butt-Joint 结构的波导突变, 因此  $r_1, r_2$  可以忽略; 而且 LD 与 MD 之间的渐变波导使光耦合效率大于 95%<sup>[12]</sup>, 因此波导的耦合损耗

(由波导间传播常数的不同而引入的损耗) 也可以忽略. 在计算 EML 的波长漂移时, 我们把 MD 的出光端面等效为 DFB 激光器的出光腔面, 只是该腔面反射率的大小及反射光的相位随外加偏压的变化而变化.

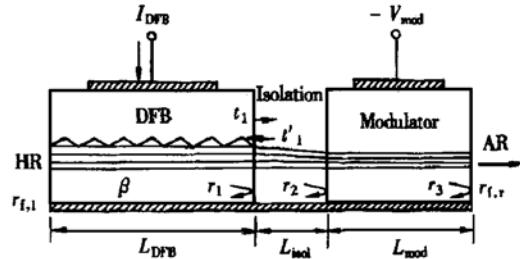


图 1 EML 结构示意图

FIG. 1 Schematic Diagram of EML Structure

DFB 激光器在隔离区一端的出射光为  $t_1$ , 只需知道最终的反馈光  $t'_1$  就可得到激光器等效出光端面的等效反射率. 隔离区及 MD 的插入损耗(由 MD 的本征吸收而引入的损耗)为  $m$ , 而 MD 的吸收系数的变化可用消光比(ER)来表征, 则在 MD 端面出射光  $t_1$  的反馈为:

$$r_3 = m^2 \text{ER}^2 r_{f,r} t_1 \quad (10)$$

而  $r_3$  经过同样的吸收和插入损耗后, 衰减为  $t'_1$ ,

$$t'_1 = m^2 \text{ER}^2 r_{f,r} t_1 \quad (11)$$

由于 MD 的吸收系数的改变, 根据 Kramers-Kronig 关系可知: MD 区域的折射率发生变化, 导致  $t'_1$  与  $t_1$  之间存在位相差  $\alpha(V)$ , 因此 DFB 激光器的端面等效反射率为:

$$\rho = m^2 \text{ER}^2 r_{f,r} e^{i\alpha(V)} \quad (12)$$

则(3)式中 MD 一端的反射率变为:

$$\begin{aligned} \rho_r &= m^2 \text{ER}^2 r_{f,r} e^{-i\beta_0 L} e^{-i\Omega} e^{i\alpha(V)} \\ &= m^2 \text{ER}^2 |r_{f,r}| e^{-i\Phi_r} \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\Phi_r = \beta_0 L + \Omega - \alpha(V) - \text{Arg}(r_{f,r})$ . 在实际计算中, 对于端面的反射率  $r_{f,r}$  和  $r_{f,l}$ , 只要  $\Phi_r, \Phi_l$  的取值从 0 到  $2\pi$ , 就足以估算出模式本征值因相位变化而引入的偏差.

根据上述的理论, 对 DFB 激光器长度为 300μm 的 EML, 我们分以下几种情况讨论在 EML 中影响其波长漂移的因素.

## 2.1 不同 $\kappa L$ 的纯折射率耦合 EML 的波长漂移

计算结果如图 2 所示, 计算的数据列于图中. 在 EML 的两端为自然解理面时, 随耦合强度的增加,

波长的漂移量减小,如对  $\kappa L = 1$ , ER 为 16dB 时, 波长漂移量为 0.25nm, 对相同的 ER, 当  $\kappa L = 3.2$  时, 波长的漂移量为 0.065nm, 这表明随耦合强度的增加, 模式受外界光反馈的影响减小。虽然更大的  $\kappa L$  有助于进一步减小波长的漂移, 然而光更加集中于激光器的腔内, 出现空间烧孔现象, 加剧波长的漂移; 同时使输出功率减小。由图中我们可以看出: 对于  $\kappa L > 1$  的情况, 当消光比大于 6—8dB 后, 波长的漂移趋于饱和, 这表明当光反馈量减弱后, 波长的漂移量亦减小。

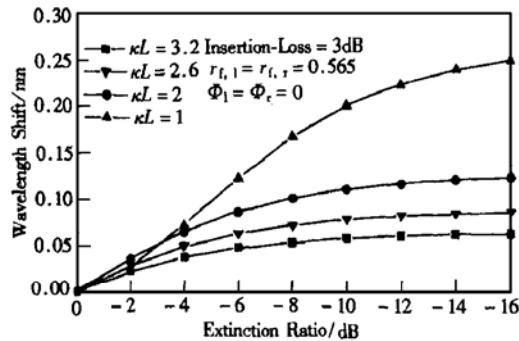


图 2 不同耦合强度的纯折射率耦合 EML 的波长漂移

FIG. 2 Wavelength Shift of IC-EML with Different  $\kappa L$

## 2.2 不同 $\kappa L$ 的复耦合(Complex-Coupled, CC) EML 的波长漂移

EML 的腔面条件同 2.1 节,  $\kappa L$  中的 index 部分固定为 3.2, gain 部分从 0.1 增加到 1.0, 计算结果如图 3 所示。可知随 gain 部分的增加, 波长的漂移量减少, 但下降的幅度不大。例如对  $\kappa_{\text{gain}} L = 0$  和 1.0, 波长的漂移量分别为 0.07nm 和 0.06nm。这表明在 CC 耦合方式下, 随消光比的增加, 复耦合 EML 的波长漂移对外反馈依然很敏感。

## 2.3 端面镀膜对波长漂移的影响

对纯折射率耦合 EML( $\kappa_{\text{index}} L = 3.2$ ), 当端面镀不同反射率的介质膜时, 波长的漂移如图 4 所示, 介质膜的反射率及其它的参数列在图中。可以看出: 在 MD 一端的反射率越低, 波长的漂移就越小; 而在另一端面, 反射率越高, 漂移也越小。当端面采用合适的介质膜时, EML 的波长漂移可由自然解理面的 0.07nm 减小到 0.001nm。因此, 减小端面的反射率对 EML 而言关系重大。

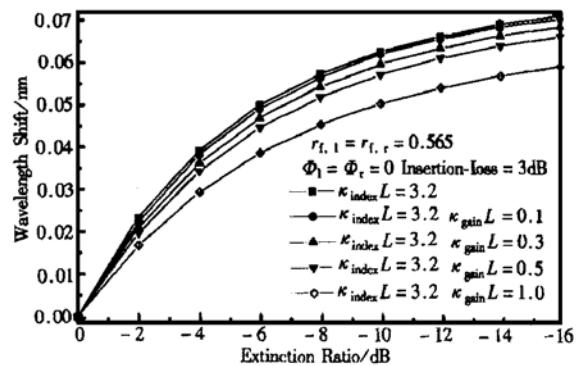


图 3 不同耦合强度的复耦合 EML 的波长漂移

FIG. 3 Wavelength Shift of CC-EML with Different  $\kappa L$

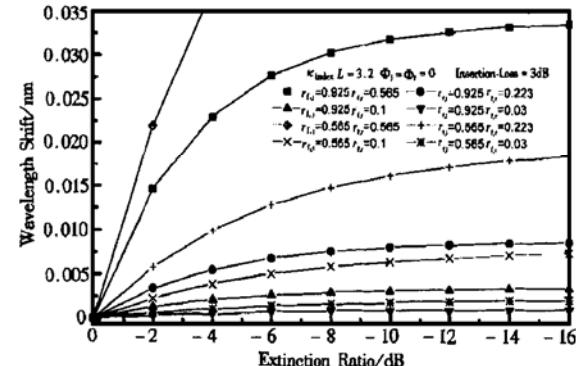


图 4 腔面的反射率对 EML 的波长漂移的影响

FIG. 4 Wavelength Shift of IC-EML with Different Facet Reflectivity

## 2.4 相位对 EML 波长漂移的影响

在上述的前三节的计算中, 我们都是在固定的  $\Phi$  和  $\Omega$  下进行的, 忽略了相位随 MD 偏压的变化, 这样的做法只是为了减少计算量。在这里我们针对某一耦合系数( $\kappa_{\text{index}} L = 3.2$ )的 IC-EML, 在相同的消光比时(0—16dB), 对端面具有相同反射系数( $r_{f,1} = 0.925, r_{f,r} = 0.223$ )、不同相位( $\Phi_r = \Phi_f = 0—2\pi$ )的介质膜, 计算了在 stop-band 一侧的波长漂移, 结果如图 5 所示。可见即使端面的反射率相同, 而随相位的变化, 波长有较大的漂移范围, 可从 0.044nm 一直到 -0.044nm。因此端面相位的变化是引起波长漂移的又一个重要的参量。而当采用反射率更小(例如反射系数为 0.03)的介质膜时, 可以计算得到即使反馈光的相位变化很大, 由于反馈光的绝对变化量很小, 对模式本征值方程的影响很小, 因此波长漂移的范围大大减小。

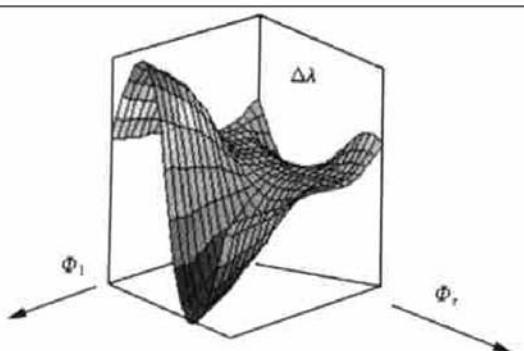


图 5 EML 在相同的端面反射率、不同的相位时的波长漂移

FIG. 5 Wavelength Shift of IC-EML with the Same Reflectivity and Different Facet phase

从上述 2.1—2.4 的计算可以看出: 为减小 EML 的波长漂移, 主要是降低 MD 端面的反射率, 不仅可以减小反馈光的变化量, 而且当反馈光的变化量小到一定时, 相位的变化对模式本征值方程的影响也可以忽略; 另外采用较大  $\kappa L$  的 DFB 激光器, 可以提高对反馈光的不敏感。

### 3 EML 波长漂移的测试及传输实验

我们采用 SAG 方法制作了折射率耦合 EML, 耦合强度 $\sim 3.1$ , 详细的制作过程及结构见文献[8, 13]; 耦合强度的大小与光栅的形状、光栅层的光限制因子有关; 采用光谱仪测量 EML 中 DFB 激光器特有的 stop-band 可以得到耦合强度。在 EML 的 MD 一端, 我们采用具有不同反射率的端面结构, 一种是镀功率反射率为 5% 的光学膜, 一种是 1%, 另外一种是 1% 加窗口结构, 以希望尽量降低 MD 的光反馈。我们采用 Anritsu MS9001B1 型光谱仪(波长读数分辨率为 2pm wavelength reading resolution) 测量 EML 在近阈值时的自发发射谱(ASE), 观察三种 EML 的波长漂移。图 6 是我们的实验曲线。当端面有较大的光反馈时(5%), 波长漂移为 0.35nm; 当降低端面的反射率后(1%), 波长的漂移降至 0.04nm; 采用 1% 镀膜加窗口结构, 从 ASE 谱中没有观察到波长的漂移。

与第二节中的理论计算相比, 实际所测的波长漂移(5%)比理论的计算要大, 主要是当 MD 一端的反射率较大时, 相位的变化较大, 而反射光的变化量也较大, 因此会使模式的本征值方程有较大变化, 而在计算中, 忽略了相位的变化; 另外光场在腔内的

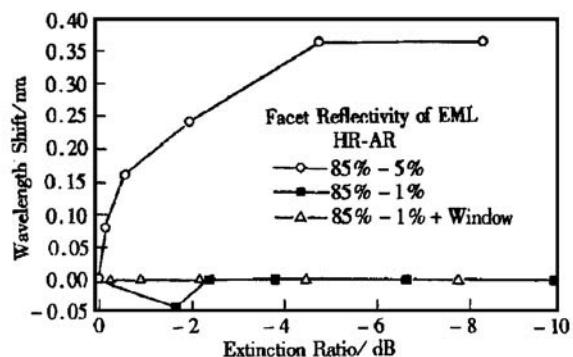


图 6 具有不同端面反射率的 EML 的波长漂移实验曲线

FIG. 6 Experiment Wavelength Shift of IC-EML with Different Facet Reflectivity

重新分布也可引起波长漂移, 但在上述理论计算中没有考虑在内<sup>[6, 7]</sup>, 尤其是在靠近 HR 一侧, 当光场有较大变化时, 该处的载流子会产生不均匀注入, 引起折射率在腔内纵向的变化, 波长随之漂移。从实际的测试结果可以看出: 波长漂移在 ER 达到 6dB 时, 漂移基本趋于饱和; 而且波长漂移主要集中在反馈光的变化量较大区域, 这些结论与理论的计算结果一致。

采用 1% 外加窗口结构的 EML, 我们进行了初步的传输实验。在 2.5Gb/s 的调制速率下, 采用长度为  $2^{23}-1$  的 NRZ 伪随机码 (PRBS), 在  $1 \times 10^{-12}$  的误码率下, 经过 0km 和 279.4km 的标准单模光纤(光纤间隔为 119.6km, 70.9km, 88.9km, 色散为 18ps/(nm · km), 光纤的标称损耗为 66.8dB) 及三个 EDFA 后, 接受机接受的平均光功率分别为 -23.6dBm 和 -23.7dBm, 即光信号在传输 280km 后, 没有观察到功率代价(Power Penalty)。这表明采用低光反馈的端面设计后, 我们制作的 EML 在动态调制下啁啾很小, 可以满足高速长途干线光通讯的要求。

### 4 结论

我们采用端面有效反射率法从理论上计算了 EML 的波长漂移与耦合强度( $\kappa L$ )、耦合机制、腔面镀膜及端面相位的关系。计算的结果表明: 与折射率耦合 EML 相比, 复耦合 EML 在减小波长漂移方面没有多大的改进; 波长漂移量的大小与反馈光的变化量及反馈光相位的变化量相关, 当端面的反射率小于 1% 后, 相位的变化对波长漂移的影响可以忽

略; 只有尽量降低出光端面的反射率, 同时采用较大的  $\kappa L$ , 才能减小波长的漂移。采用理论计算结果, 我们用选择区域方法制作了具有低端面反馈的 EML, 从 ASE 谱中观察到: 随端面反射率的下降, 波长漂移量明显减少。经过初步的传输实验, 证明我们已获得可应用于 2.5Gb/s 干线传输用的低啁啾的 EML。

**致谢** 感谢北京大学光通讯国家重点实验室王子宇教授、北京邮电大学通讯工程学院武剑博士后在传输实验上的大力帮助。

## 参考文献

- [ 1 ] H. Takeuchi, K. Sasaki, K. Sato *et al.*, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., 1997, **3**(2): 336—343.
- [ 2 ] Y. K. Park, T. V. Nguyen, P. A. Morton *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 1996, **8**(9): 1255—1257.
- [ 3 ] F. Koyama and K. Iga, J. Lightwave Technol., 1988, **6**(1): 87—93.
- [ 4 ] W. Fang, S. L. Chuang, T. Tanbum-EK *et al.*, SPIE, 1997, **3006**: 207—215.
- [ 5 ] J. Hong, W. P. Huang and T. Makino, IEE Proc. Optoelectron., 1995, **142**(1): 44—50.
- [ 6 ] M. Yamaguchi, T. Kato, T. Sasaki *et al.*, J. Lightwave Technol., 1995, **13**(10): 1948—1954.
- [ 7 ] D. A. Ackeman, L. M. Zhang, L. J-P. Ketelsen *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1998, **34**(7): 1224—1230.
- [ 8 ] XU Guoyang, WANG Wei, YAN Xuejin *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(8): 706—709.
- [ 9 ] Yan Xuejin, Xu Guoyang, Zhu Hongliang *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(5): 412—415.
- [ 10 ] LUO Yi, SUN Chengzheng, WEN Guopeng *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(15): 416—420 (in Chinese) [ 罗毅, 孙长征, 文国鹏, 等, 半导体学报, 1999, **20**(5): 416—420].
- [ 11 ] W. Streifer, R. D. Burnham and D. R. Scifres, IEEE J. Quantum Electron., 1975, **11**(4): 154—161.
- [ 12 ] T. Tanbum-ek, S. Suzuki, W. S. Min *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1984, **QE-20**: 131—140.
- [ 13 ] LIU Guoli, WANG Wei, XU Guoyang *et al.*, Chinese Journal of Lasers, to be published [ 刘国利, 王坪, 许国阳, 等, 中国激光, 待发表].

## Low Wavelength Shift Electroabsorption Modulated DFB Laser<sup>\*</sup>

LIU Guo-li, WANG Wei, WANG Xiao-jie, ZHANG Bai-jun, CHEN Wei-xi,  
ZHANG Jing-yuan and ZHU Hong-liang

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

**Abstract:** Effective facet reflectivity incorporating couple wave theory is adopted to calculate wavelength shift of electroabsorption modulated DFB laser (EML) with different facet reflectivity, facet phase and coupling strength,  $\kappa L$ . Wavelength shift of index coupled EML is measured by optical spectrometer when the modulator side facet of the EML is coated with different reflectivity optical thin films. Theoretic and experimental results show that light feedback from the modulator output facet must be minimized and a relatively larger  $\kappa L$  is needed to maintain the longitudinal mode stability. Single ridge waveguide EML incorporating InP window and anti-reflection optical film coating is fabricated by selective area growth. No power penalty is observed at a bit-error-ratio of  $10^{-12}$  after standard single mode fiber transmission of 280km long when the EML is modulated with 2.5Gb/s NRZ 2<sup>23</sup>—1 PRBS data.

**Key words:** DFB laser; electroabsorption modulator; photonic integration; optical film coating; high speed optical transmission  
**EEACC:** 4320J; 1250; 4270; 4190F; 6140C

**Article ID:** 0253-4177(2001)05-0636-05

\* Project Supported by National High Technology Research and Development Plan(No. 863-307-11-1(15)) and National Natural Science Foundation of China(No. 69896260).