

分布反馈式半导体激光器/电吸收型调制器 单片光子集成器件的理论分析

司伟民 罗毅 李德杰 张克潜 孙长征

(清华大学电子工程系 集成光电子学国家重点实验室 北京 100084)

摘要 本文通过计算比较了分别采用普通折射率耦合型(IC)、 $\lambda/4$ 相移折射率耦合型(QWS)及增益耦合型(GC)DFB激光器作为光源部分的激光器/调制器光子集成器件的单模选择能力、调制频移及单端光输出功率等特性,在该类型集成器件的特性分析中考虑了端面反射率任意相位的影响并对此进行了统计分析. GC型器件的调制频移特性与IC及QWS型器件基本相同,而GC型器件的单模选择能力比IC和QWS型器件高得多,特别在HR-AR镀膜情况下,单端光输出效率大为提高,且考虑到GC型器件无需在光栅制作中引入相移带来的制作工艺上的简化,增益合型DFB激光器/电吸收型调制器单片光子集成器件是极有前途的光通信用理想光源.

EEACC: 4270, 4320J

1 引言

长距离、大容量光纤通信系统要求发射光源具有稳定单纵模、低调制频移及高调制速率等优良特性. 作为光源部分的半导体激光器的高速直接调制会引起严重的调制频移,采用分布反馈式(DFB)半导体激光器可以部分解决这个问题,但在高速调制下仍存在着一定的调制频移并伴随波形畸变,限制了通信系统的容量. 采用外调制技术能够在很大程度上克服调制频移和波形畸变,而DFB激光器/电吸收型调制器单片光子集成器件(PIC)因其高稳定性、高可靠性和高性能,是最有前途的器件之一,其实验研究已取得了一定进展^[1]. 通常所用的折射率耦合型DFB激光器因其原理上是双模工作的^[2],所以在集成器件的激光器部分多采用 $\lambda/4$ 相移结构^[3]以获得完全单纵模工作. 但该种器件对端面反射十分敏感,必须在激光器两端进行反射率接近于零的抗反馈膜(AR-AR),这样不但制作工艺复杂,而且无法采用其它激光器中通常采用的高反/抗反镀膜方法提高单端光输出功率. 实现单模工作的另外一种方法是在DFB激光器中引入增益耦合机制^[2,4]. 即使对于同时含有折射率耦合的增益耦

司伟民 男,1967年生,博士生,专业方向为半导体光电子学

罗毅 男,1960年生,日本国东京大学研究生院工学博士,现任清华大学电子工程系教授,博士生导师,主要专业方向为半导体光电子学

1993年11月9日收到初稿,1994年1月17日收到修改稿

合型 DFB 激光器,其单模成品率和抗端面反射能力也大为提高,因而有可能在集成器件中采用高反/抗反(HR-AR)镀膜方法提高单端光输出功率,并且由于无需制作含 $\lambda/4$ 相移结构的光栅,制作工艺也大为简化.

在本文中,我们通过计算比较了分别采用普通折射率耦合型(IC)、 $\lambda/4$ 相移折射率耦合型(QWS)及增益耦合型(GC)DFB 激光器作为光源部分的激光器/调制器光子集成器件的单模选择能力、调制频移及单端光输出功率等特性,在该类型集成器件的特性分析中考虑了端面反射率任意相位的影响并对此进行了统计分析.

2 理论模型及计算方法

我们采用的集成器件结构模型如图 1 所示,在计算中忽略激光器与调制器之间的光反射及散射损耗.理论分析方法的关键

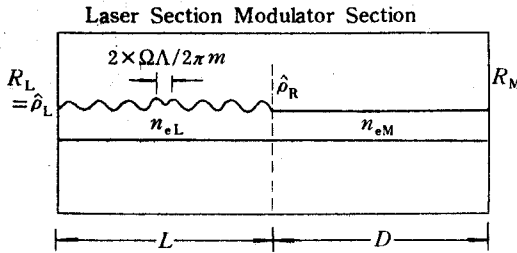


图 1 分布反馈式半导体激光器/电吸收型调制器单片子集成器件结构示意图

在于将调制器的影响转换为激光器和调制器结合处的有效反射率.假设激光器长度为 L ,调制长度为 D ,激光器端电场复数反射率为 R_L ,调制器端电场复数反射率为 R_M .为不失一般性,假设在 DFB 激光器的光栅中部有 2Ω 相移,相移点两侧的复折射率 $n(z)$ 为

$$n^{(k)}(z) = n_0 + \Delta n_m \cos\left(\frac{2\pi m}{\Lambda} z + \Omega^{(k)}\right) \quad (1)$$

其中 Δn_m 为复折射率沿长度方向周期性微扰的最大幅值, Λ 为光栅周期, m 为光栅阶数, $k=1,2$ 分别对应相移点的左、右两侧,并有 $\Omega^{(1)} = -\Omega^{(2)} = \Omega$.对于非相移结构(IC,GC), $\Omega=0$;对于 $\lambda/4$ 相移结构, $\Omega=\pi/2$.DFB 激光器部分的电场满足耦合波方程^[2]

$$E^{(k)}(z) = R^{(k)} e^{-j\beta_0 z} + S^{(k)} e^{-j\beta_0 z} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dR^{(k)}}{dz} + (\alpha - j\delta)R^{(k)} = j\kappa S^{(k)} e^{-\alpha z} \\ \frac{dS^{(k)}}{dz} + (\alpha - j\delta)S^{(k)} = j\kappa R^{(k)} e^{\alpha z} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\beta_0 = \pi/\Lambda$, α 为激光器的增益, $\delta = (\omega - \omega_0)/c$ 为规一化频率, κ 为耦合系数,对 IC 及 QWS DFB 激光器, κ 为实数,对 GC DFB 激光器, κ 为复数.假设激光器部分的左、右端面的电场反射率分别为 $\hat{\rho}_L, \hat{\rho}_R$ (显然 $\hat{\rho}_L = R_L$),则 DFB 激光器部分满足特征方程^[3]

$$\begin{aligned} & e^{j\alpha L} \left[1 + Q e^{\gamma L} \frac{\rho_R - Q}{1 - \rho_R Q} \right] \left[Q + e^{-\gamma L} \frac{1 - \rho_L Q}{\rho_L - Q} \right] \\ & = e^{-j\alpha L} \left[1 + Q e^{-\gamma L} \frac{1 - \rho_L Q}{\rho_L - Q} \right] \left[Q + e^{\gamma L} \frac{\rho_R - Q}{1 - \rho_R Q} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $r^2 = \kappa^2 + (\alpha_{th} - j\delta)^2$, α_{th} 为激光器激射要求的最低阈值增益, $Q = (-r + \alpha_{th} - j\delta)/j\kappa$, $\rho_L = \hat{\rho}_L \exp[-j(\beta_0 L - \Omega)]$, $\rho_R = \hat{\rho}_R \exp[-j(\beta_0 L - \Omega)]$.

对于一定耦合系数的 DFB 激光器, 给定端面反射率 $\hat{\rho}_L, \hat{\rho}_R$, 可求得激光器激射所需最低阈值增益 α_{th} 和对应的归一化频率 δ , 以及用阈值最低的两个模式的阈值增益之差表示的单模选择能力 $\Delta\alpha_{th}L$. 由此还可计算激光器的激射波长, 其计算要考虑激光器部分的线宽增加因子, 假设激光器有源层材料的线宽增加因子为 α_{HL} , 则激光器部分输出光的波数为^[5]

$$k_S = [\delta + \beta_0 - \alpha_{HL}\Gamma_L(\alpha_{th} - \alpha_{th0})]/n_{eL} \quad (5)$$

由 $\lambda = 2\pi/k_S$ 得到激射波长, 其中 n_{eL} 为激光器活性区的有效折射率, α_{th0} 为两端面的反射率为零时激光器的最低阈值增益, Γ_L 为激光器有源层的光限制因子. 这里不同于参考文献[5]的是, 我们考虑了由于光限制因子的作用而减弱了线宽增加因子的影响.

调制器部分等效为一个吸收系数可变的波导. 由于线宽增加因子 α_{HM} 的影响, 吸收系数改变时会带来调制器部分光波导折射率的变化, 等效为波导的有效折射率 n_{eM} 的变化. 有效折射率的变化与吸收系数的关系为 $\Delta n_{eM} = \alpha_{HM}\Gamma_M A/k_0$, 其中 k_0 为被调制光的波数, Γ_M 为调制器部分波导的光限制因子, A 为调制器部分光波导的吸收系数. 这里我们假设未加调制时 $A=0$, 即波导是透明的. 设调制器输出端面反射率为 R_M , 将光程折合为相位变化, 则激光器部分靠近调制器端的电场反射率为

$$\begin{aligned} \rho_R &= R_M \exp[-2jk_0(n_{eM} + \Delta n_{eM}D) - 2AD] \\ &= R_M \exp[-2jk_0 n_{eM}D - 2C_0 M_d(1 + j\alpha_{HM}\Gamma_M)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 M_d 为以 dB 单位的调制深度, $C_0 = (\ln 10)/20 = 0.115129254 \dots$.

在实际计算中, 给定调制器消光比 M_d , 通过(6)式可求出等效反射率 $\hat{\rho}_R$, 代入 DFB 激光器的特征方程(4)中即可求出激光器对应的阈值增益 α_{th} , 归一化频率 δ 以及单模选择能力 $\Delta\alpha_{th}L$. 通过解 DFB 激光器特征方程得到的激射光波数 k_S 须同调制器等效反射率 $\hat{\rho}_R$ 表达式(6)中的 k_0 自洽, 计算中可以用叠代法求解. 调制深度为零时的集成器件右端与左端光输出功率之比 P_R/P_L 为

$$\frac{P_R}{P_L} = \frac{1 - |\rho_R|^2}{1 - |\rho_L|^2} \left| \frac{(e^{-j\Omega} - e^{j\Omega})(\rho_L - Q) + (e^{-j\Omega}Q - e^{j\Omega}/Q)e^{-\gamma L}(1 - Q\rho_L)}{(\rho_R - Q)(2\gamma/\kappa)} \right|^2 \quad (7)$$

由此可以计算集成器件调制器端输出光功率与总输出功率之比, 即集成器件的单端光输出效率.

由于 DFB 激光器的特性对端面反射率 $\hat{\rho}_L, \hat{\rho}_R$ 的相位十分敏感, 而这些相位在器件制作中是随机的, 在集成器件的特征分析中应该进行统计分析. 我们分别将左、右端面相位从 0 到 2π 之间分为 20 等份, 计算了相应分布的 20×20 种可能组合^[6,7], 并给出了统计结果.

我们考虑了三种 DFB 激光器, 即普通折射耦合型(IC), $\lambda/4$ 相移型(QWS)以及增益耦合型(GC). 在耦合系数的选取上, 我们采用了实际器件的典型值: 对 IC 及 QWS 型, 取 $\kappa L = 2$, 对 GC 型, 取 $\kappa L = 2 + 0.5j$. 由于实际 GC-DFB 激光器的调制频移低于 IC 及 QWS 型激光器^[8,9], 我们假设对 GC-DFB 激光器, $\alpha_{HL} = 1.5$ ^[8], 而对于 IC 及 QWS 激光器, $\alpha_{HL} = 3$ ^[4]. 调制

器部分波导层材料的线宽展宽因子取典型值 $\alpha_{HM}=1$, 并取激光器腔长 $L=300\mu\text{m}$, 调制器腔长 $D=200\mu\text{m}$, 激光器、调制器的有效折射率 $n_{eL}=n_{eM}=3.4$, 光限制因子取三量子阱的典型值 $\Gamma_L=\Gamma_M=0.09$. 考虑了两种端面反射率组合, 即 AR-AR ($R_L=R_M=1\%$)² 及 HR-AR ($R_L=95\%, R_M=1\%$).

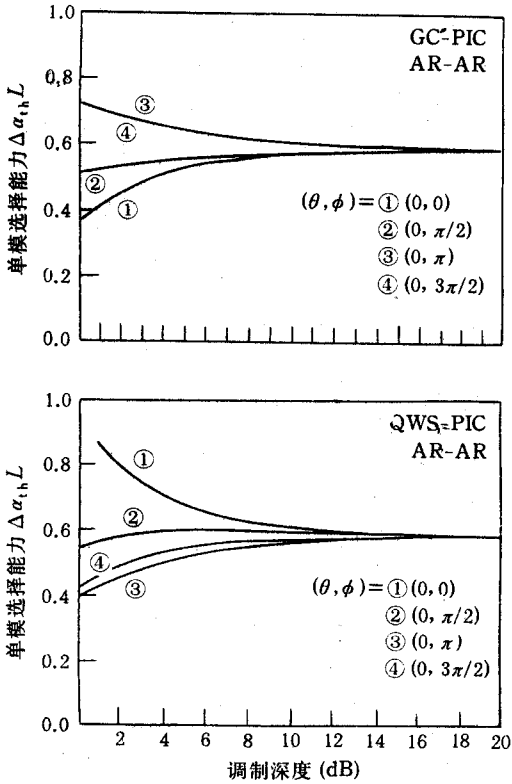


图2 在AR-AR情况下,GC型与QWS型集成器件单模选择能力与调制深度的关系

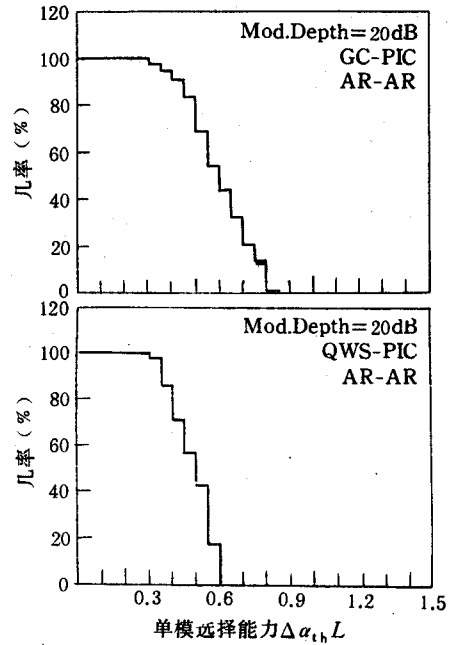


图3 在AR-AR情况下,GC型与QWS型集成器件单模选择能力的统计分布

图中纵坐标为器件单模选择能力大于对应横坐标值的几率

3 计算结果及讨论

首先,我们看 AR-AR 情况. 图 2 给出了固定激光器端反射率相位而改变调制器端反射率相位的情况下, $\Delta\alpha_{th}L$ 随调制器的调制深度 M_d 变化, 其中 θ 为 R_L 的幅角, Φ 为 R_M 的幅角. 调制深度加大到一定程度后, 调制器端反射的影响越来越小, 虽然反射率相位不同, 但单模选择能力趋于相同. 因为在不同调制深度下, 器件单模选择能力 $\Delta\alpha_{th}L$ 也不同, 所以以下计算均为调制深度为 20dB 下的 $\Delta\alpha_{th}L$ 最小值. 图 3 给出了 QWS 和 GC 型器件在这种情况下的单模选择能力的统计结果, 图中曲线的纵坐标为单模选择能力大于对应的横坐标值的器件数占总数(400)的百分比. IC 型器件在 AR-AR 情况下几乎全为双模工作, 其结果没有给出. 从图 3 可见在 20dB 调制度下, GC 型器件单模选择能力 $\Delta\alpha_{th}L$ 大于 0.5 的几率约为 82%, QWS 型器件单模选择能力大于 0.5 的几率为 58%, 这说明 GC 型器件比 QWS 型器

件单模选择能力强,单模成品率高.

器件在加调制后工作波长会略有改变,带来一定程度的调制频移,实际应用中希望这种波长移动尽量小.图4给出了当调制深度 M_d 从0到20dB变化时集成器件激光波长的最大可能移动量在给定的区间范围内GC和QWS型器件的几率分布(只考虑单模选择能力大于0.2的器件).从图4可以看出,几乎全部QWS型器件的 $\Delta\lambda$ 都在 $\pm 0.5\text{\AA}$ 以内,而GC型器件的 $\Delta\lambda$ 在 $\pm 0.6\text{\AA}$ 以内.所以在AR-AR条件下,QWS型器件比GC型器件的调制频移略小.

图5给出了调制深度为零(开态)时两种类型器件的单端光输出效率比较.GC型器件的单端光输出效率分布在0.24—0.76范围内,平均为0.5,QWS型器件则分布在0.36—0.62之间.

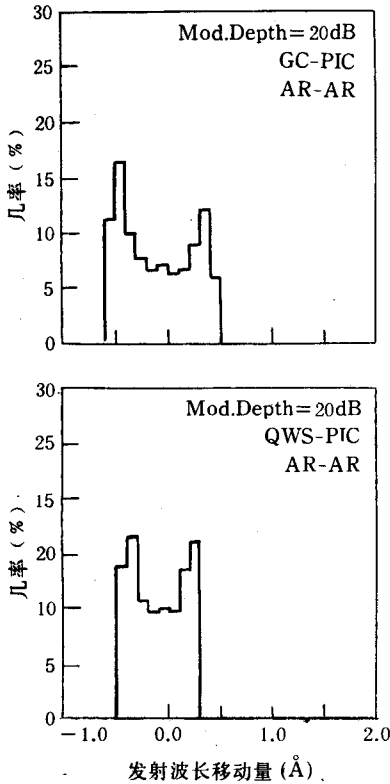


图4 在AR-AR情况下,GC型与QWS型集成器件在20dB调制深度时发射波长最大移动量的几率分布

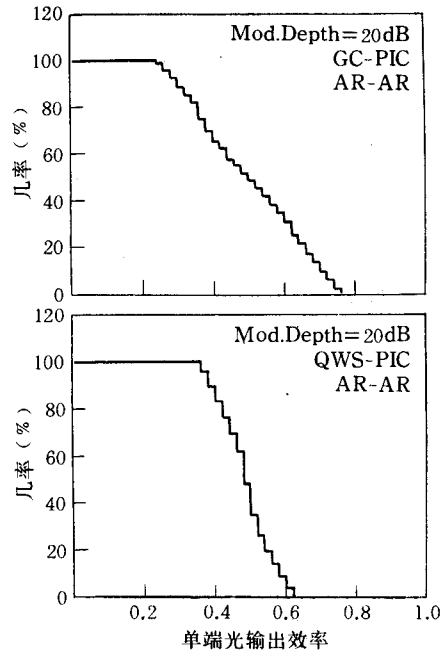


图5 在AR-AR情况下,GC型与QWS型集成器件单端光输出效率的统计分布
图中纵坐标为集成器件单端光输出效率大于对应横坐标值的几率

接下来,我们看HR-AR情况.QWS型器件在这种情况下几乎完全失去了单模选择能力,其结果没有给出.图6给出了IC和GC型器件单模选择能力的统计结果.由于端面反射的非对称性在一定程度上消除了模式简并,IC型器件在HR-AR的情况下具有一定的单模

选择能力 $\Delta\alpha_{th}L > 0.2$ 的器件, 约占 52%, 但全部器件的单模选择能力均小于 0.4. 而 GC 器件 (虽然仅为部分增益耦合) 则显出较大的优势, $\Delta\alpha_{th} > 0.2$ 的器件约占 59%, $\Delta\alpha_{th}L > 0.5$ 器件约占 36%. 对于单模选择能力大于 0.2 的 IC 型器件, $\Delta\lambda$ 在 $\pm 0.4 \text{ \AA}$ 范围, 而 GC 型器件 $\Delta\lambda$ 在 $\pm 0.5 \text{ \AA}$ 之间. 图 7 给出了开态 $\Delta\alpha_{th}L > 0.2$ 的集成器件单端光输出效率的统计结果. GC 型器件单端光输出效率大于 80% 的几率约占 35%, 而 IC 型器件单端光输出效率大于 80% 的几率只有 10% 左右. GC 型器件的优越性是十分明显的.

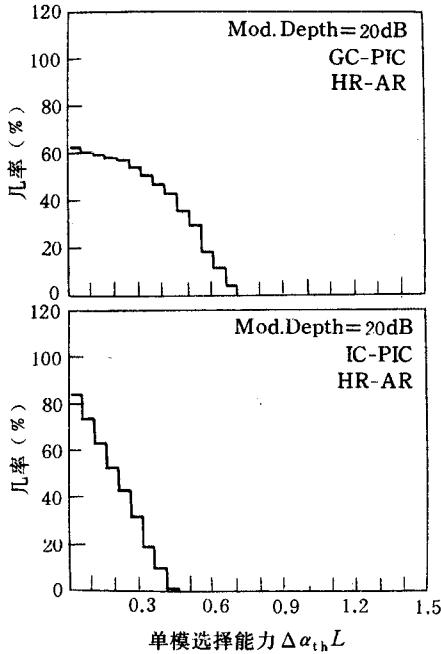


图 6 在 HR-AR 情况下, GC 型与 IC 型集成器件单模选择能力的统计分布
图中纵坐标为器件单模选择能力大于对应横坐标值的几率

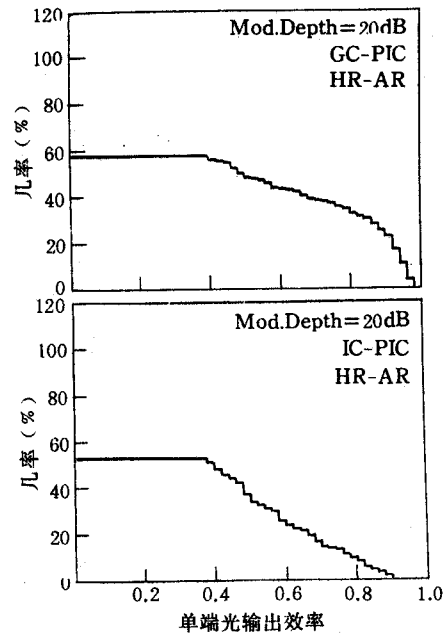


图 7 在 HR-AR 情况下, GC 型与 IC 型集成器件单端光输出效率的统计分布
图中纵坐标为集成器件单端光输出效率大于对应横坐标值的几率

4 结论

通过计算对 IC、QWS 和 GC 三种 DFB 激光器/调制器集成器件的模式选择能力和调制频移特性进行统计分析, 得知 GC 型器件的调制频移特性与 IC 及 QWS 型器件基本相同, 而 GC 型器件的单模选择能力比 IC 和 QWS 型器件高得多, 特别在 HR-AR 镀膜情况下, 单端光输出效率大为提高, 且考虑到 GC 型器件无需制作相移光栅, 增益耦合型 DFB 激光器/电吸收型调制器单片光子集成器件是极有前途的光通信理想光源.

致谢 作者感谢王健华副教授在本研究进行过程中给予的关心和帮助. 作者特别感谢日本东京大学多田邦雄教授、中野义照副教授给予的指导.

参 考 文 献

- [1] For example, M. Suzuki *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(1):90-94.
- [2] H. Kogelnik *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(5):2327-2335.
- [3] K. Utaka *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **22**(7):1042-1051.
- [4] Y. Luo *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6):1724-1731.
- [5] D. Marcuse *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(2):262-269.
- [6] Y. Nakano *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(4):308-311.
- [7] Y. Nakano, Y. Luo, and K. Tada, private communication.
- [8] Y. Luo *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(1):37-39.
- [9] C. Zah *et al.*, *Tech. Dig. of OFC/IOOC'93*, pap. TuM4, San Jose, CA, pp. 61-62.

Theoretical Analysis of Photon Integrated Circuits Monolithically Integrating Distributed Feedback Semiconductor Laser and Electroabsorption Modulator

Si Weimin, Luo Yi, Li Dejie, Zhang Keqian and Sun Changzheng

*(National Integrated Opto-Electronics Laboratory, Department
of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)*

Received 9 November 1993, revised manuscript received 17 January 1994

Abstract In this paper, characteristics such as single-mode selectivity, chirping (modulation-induced wavelength shift) and normalized output power of photon integrated circuits (PIC) integrating distributed feedback (DFB) semiconductor lasers and electroabsorption modulators are analyzed. Characteristics of devices with conventional index-coupled (IC), quarter-wave-shifted (QWS) and gain-coupled (GC) DFB laser sections are calculated and compared. The effect of random facet phase is considered and statistic analysis is carried out. Although chirping of GC-PIC is similar to those of IC-PIC and QWS-PIC, however, the single-mode selectivity of GC-PIC is much higher than those of IC-PIC and QWS-PIC. Furthermore, in the case of HR-AR coating, which is favorite for high power operation, GC-PIC shows much higher probability of single-mode operation than IC-PIC, while QWS-PIC can not be used at all. Considering the simplification of fabrication processing of GC-DFB lasers without the formation of quarter-wave shifted gratings, the monolithically integrated GC-DFB laser/electroabsorption modulator is a very promising light transmitter for optical communications.

EEACC: 4270, 4320J