

文章编号: 0253-2239(2003)04-0407-05

# 双折射对基于半导体光放大器的干涉型器件性能影响的模拟分析研究<sup>\*</sup>

黄黎蓉 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

黄永箴

(中科院半导体所光电研发中心, 北京 100083)

**摘要:** 分析了半导体光放大器中双折射对基于半导体光放大器的干涉型器件性能的影响,对基于半导体光放大器的马赫-曾德尔型波长转换器的理论计算表明,当半导体光放大器有双折射存在时,消光比不仅要比无双折射时的要低,而且还随着探测光的偏振态而改变,变化幅度可大于 10 dB。提出了减小双折射对干涉型器件影响的方案,并且分析了实现对增益和对相位变化同时具有偏振不灵敏的半导体光放大器的可能性。

**关键词:** 导波光学; 双折射; 偏振态; 半导体光放大器; 干涉; 波长转换器; 消光比

中图分类号: TN36 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来,基于半导体光放大器(SOA)的各种干涉型器件由于在未来全光通信中的重要作用而越来越受到重视,比如马赫-曾德尔型(Mach-Zehnder)干涉器、迈克耳孙型干涉器、萨尼亚克型干涉器被广泛用作交叉相位调制型的波长转换器<sup>[1]</sup>,或在半导体光放大器光纤环境(SLALOM)<sup>[2]</sup>、太赫兹光学不对称解复用器(TOAD)<sup>[3]</sup>中做全光去复用器、全光开关、全光再生器。由于在光纤通信中,光的偏振态是随机改变的,所以要求半导体光放大器的光增益对偏振态不灵敏。增益对偏振的不灵敏问题已受到了高度的重视<sup>[4]</sup>,目前可以说已经得到了满意的解答,主要手段是在有源区中引进张应变。然而半导体光放大器除了增益具有偏振相关性以外,它对入射光引起的相位变化也具有偏振相关性。当半导体光放大器对 TE 模和 TM 模的模式折射率不同时,我们称半导体光放大器存在双折射(birefringence),这时它对 TE 模和 TM 模引进的相位变化不同,当入射光经过半导体光放大器后,光的偏振态将发生改变。无源器件的双折射问题受到了普遍的重视,而作为有源器件半导体光放大器的双

折射问题一直没引起人们足够的注意和重视,直到最近两三年中才有少量文章报道<sup>[5~8]</sup>。

本文从双折射引起光的偏振态的改变着手研究了半导体光放大器中的双折射对基于半导体光放大器的干涉型器件的性能影响。以一个基于半导体光放大器的马赫-曾德尔型波长转换器为例,分析了双折射对消光比的不利影响,提出了如何减小这种不利影响的方案。提出了半导体光放大器除了要满足增益对偏振的不灵敏性之外,还要同时满足相位变化对偏振态不灵敏的必要性,并且对其可能性进行了分析。

## 2 理论分析

半导体光放大器中的双折射按来源可以分为形式双折射和材料双折射<sup>[5]</sup>。材料双折射是由于半导体光放大器有源区内部存在应变或量子尺寸效应,导致 TE 模与 TM 模具有不同的材料折射率;形式双折射是由于半导体光放大器波导的几何结构不对称而导致的 TE 模和 TM 模的传播常量不同,从而它们的模式折射率不同。即使半导体光放大器不存在材料双折射,即 TE 模和 TM 模具有相同的材料折射率时,也可能会由于不对称的波导结构而导致模式折射率不同,从而具有形式双折射。与无源器件不同,半导体光放大器作为有源器件,它的折射率

<sup>\*</sup> 国家 973 基金(G2000036605)资助课题。

E-mail: hlr5649@sohu.com

收稿日期:2002-05-03; 收到修改稿日期:2002-07-08

还会随着有源区中的载流子浓度而改变,双折射行为将随半导体光放大器的工作条件而改变,这叫做附加双折射<sup>[5]</sup>。

当半导体光放大器有源区中载流子浓度发生改变  $\Delta N$  时,将导致有源区折射率变化  $\Delta n_{ac}$ ,  $\Delta n_{ac}$  又会导致导波模式的有效折射率由原来的  $n_r$  变为  $n_{eff}$ <sup>[10]</sup>:

$$n_{eff} = n_r + \Gamma \Delta n_{ac}, \quad (1)$$

$$\Delta n_{ac} = (dn/dN) \Delta N, \quad (2)$$

其中  $dn/dN$  为微分折射率,  $\Gamma$  为光场限制因子。半导体光放大器不对称的波导结构,一方面使 TE 模和 TM 模的光场限制因子  $\Gamma_x$  和  $\Gamma_y$  不同,另一方面使它们的波导折射率  $n_{rx}$  和  $n_{ry}$  不同,从而使半导体光放大器具有形式双折射。(1) 式右边的第二项  $\Gamma \Delta n_{ac}$  则代表了模式折射率随载流子浓度而变化的情况,如果它对 TE 模和 TM 模不同,会使半导体光放大器表现出附加双折射。

波长为  $\lambda$  的光波经过  $\Delta z$  的几何路程时,相位变化  $\Delta \phi = 2\pi n_{eff} \Delta z / \lambda$ 。当半导体光放大器中有双折射存在时,它对 TE 模和 TM 模引进的相位变化是不同的,因而光的偏振态要发生改变。在基于半导体光放大器的各种干涉型器件中,由探测光分离出来的两束光,分别经过了不同工作条件下的半导体光放大器之后再重新相遇叠加,因而它们的偏振态改变情况也不相同,当它们相遇叠加时,偏振态不再相同,所以进行的不是完全相干叠加,而是部分相干叠加,干涉效果将受到影响。以下以一个基于半导体光放大器的马赫-曾德尔型波长转换器(图 1)为例进行计算分析。它属于交叉相位调制型波长转换器,原理如下<sup>[11]</sup>: 波长为  $\lambda_1$  的抽运光只通过 SOA1,对 SOA1 有源区中的载流子浓度进行调制,引起折射率的变化,在干涉仪两臂中引起相对相位差。波长为  $\lambda_2$  的探测光输入到干涉仪中并均分成两部分,分别通过 SOA1 和 SOA2 之后再重新叠加,当两臂之间的相位差为半波长的奇数倍时出现相干相消,为偶数倍时出现相干相长。所以  $\lambda_1$  上的调制信号通过改变干涉仪中的相位差,可以有效地复制到  $\lambda_2$  上,从而实现波长转换。

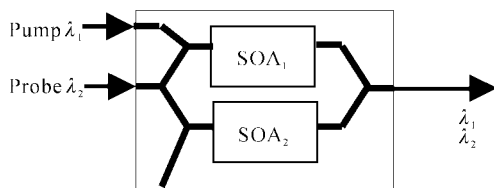


Fig. 1 SOA-based Mach-Zehnder wavelength converter

在与光波传播方向垂直的平面内,光矢量的任意一个振动状态都可以表示为两个互相垂直而独立的振动状态的线性组合,在此我们将这两个分解方向选为 TE 模和 TM 模的电场振动方向(分别沿  $x$  方向和  $y$  方向,忽略 TM 模沿  $z$  方向的电场分量)。设光矢量  $\mathbf{E}$  方向与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,则

$$E_x = E \cos \theta, \quad E_y = E \sin \theta.$$

探测光被一个理想的 3 dB 耦合器均分为两束光分别进入 SOA1 和 SOA2,这两束光的振幅和偏振态在入射半导体光放大器之前是彼此相同的,光矢量用复振幅  $\mathbf{E}_0$  表示为

$$\mathbf{E}_0 = E_{0x} \exp(i\phi_{0x}) \mathbf{x}_0 + E_{0y} \exp(i\phi_{0y}) \mathbf{y}_0, \quad (3)$$

其中  $E_{0x}$  和  $E_{0y}$ ,  $\phi_{0x}$  和  $\phi_{0y}$  分别为振幅和相位,  $\mathbf{x}_0$  和  $\mathbf{y}_0$  为单位矢量。这两束光从半导体光放大器出射后,振幅和相位都要发生变化,分别用  $E_1$  和  $E_2$  表示

$$\mathbf{E}_1 = E_{1x} \exp(i\phi_{0x} + \Delta\phi_{1x}) \mathbf{x}_0 + E_{1y} \exp(i\phi_{0y} + \Delta\phi_{1y}) \mathbf{y}_0, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_2 = E_{2x} \exp(i\phi_{0x} + \Delta\phi_{2x}) \mathbf{x}_0 + E_{2y} \exp(i\phi_{0y} + \Delta\phi_{2y}) \mathbf{y}_0, \quad (5)$$

合成光振幅为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2, \quad (6)$$

合成光功率

$$P = P_x + P_y \propto |\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*|, \quad (7)$$

其中  $\mathbf{E}^*$  为  $\mathbf{E}$  的复共轭。

$$P_x \propto E_{1x}^2 + E_{2x}^2 + 2E_{1x}E_{2x} \cos(\Delta\phi_{2x} - \Delta\phi_{1x}), \quad (8)$$

$$P_y \propto E_{1y}^2 + E_{2y}^2 + 2E_{1y}E_{2y} \cos(\Delta\phi_{2y} - \Delta\phi_{1y}), \quad (9)$$

当半导体光放大器中有双折射存在时,TE 模和 TM 模的相位变化情况不同,难以保证它们的相位变化差  $\Delta\phi_{2x} - \Delta\phi_{1x}$  和  $\Delta\phi_{2y} - \Delta\phi_{1y}$  的值相同,所以  $P_x$  和  $P_y$  难以同时达到最大值或最小值,从而使合成光功率  $P$  的最大值和最小值打了折扣。波长变换信号好的标志之一是有大的消光比,当消光比退化时,会加大功率代价<sup>[8]</sup>。消光比的定义为

$$R_E = 10 \lg[P(1)/P(0)], \quad (10)$$

其中  $P(1)$  为光信号为“1”时的光功率,  $P(0)$  为光信号为“0”时的光功率。

设 SOA1 和 SOA2 是两个相同的半导体光放大器,而且它们的增益对偏振具有不灵敏性。对半导体光放大器的分析使用分段模型,考虑半导体光放大器的腔面反射,将光波分解为正向传播的波和反向传播的波,光场分别用复振幅  $E_i^+$  和  $E_i^-$  表示,  $N_i$  为载流子浓度,下标  $i$  表示第  $i$  段。则<sup>[11]</sup>

$$\frac{dE_i^\pm}{dz} = \pm (-jB_i + 0.5g_i)E_i^\pm, \quad (11)$$

其中  $j$  为虚数单位,  $B_i$  为传播常量,  $g_i$  为模式增益, 设  $\alpha$  为损耗,  $a$  为微分增益,  $N_0$  为透明载流子浓度, 则  $B_i = 2\pi n_{\text{eff}i}/\lambda$ ,  $g_i = (a\Gamma_i(N_i - N_0) - \alpha)$ 。

载流子速率方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{J}{ed} - (AN_i + BN_i^2 + CN_i^3) - \sum_{\omega=1,2} V_g g_{\omega,i} S_{\omega,i}, \quad (12)$$

其中  $J$  为电流密度,  $e$  为电子电荷,  $d$  为有源区厚度,  $A, B, C$  为复合系数, 下标  $\omega = 1, 2$  分别代表抽运光和探测光,  $\sum$  表示对  $\omega$  求和,  $S_{\omega,i}$  为光子密度,  $V_g$  为群速度。计算中取  $L = 1000 \mu\text{m}$ ,  $d = 2 \mu\text{m}$ , 有源区宽度  $W = 0.2 \mu\text{m}$ 。取<sup>[11]</sup>  $N_0 = 1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,  $\alpha = 100 \text{cm}^{-1}$ ,  $a = 4.63 \times 10^{20} \text{m}^2$ ,  $A = 10^8 \text{s}^{-1}$ ,  $B = 10^{-16} \text{m}^3/\text{s}$ ,  $C = 7.5 \times 10^{-41} \text{m}^6/\text{s}$ 。SOA1 和 SOA2 的工作电流分别为  $I_1 = 178 \text{mA}$ ,  $I_2 = 150 \text{mA}$ , 抽运光波长  $\lambda_1$  为  $1556 \text{nm}$ , 探测光波长  $\lambda_2$  为  $1553 \text{nm}$ , 入射探测光功率为  $-15 \text{dBm}$ 。

图 2(a) 是从干涉仪中出射的探测光功率随抽运光功率的变化情况图。对 TE 模分量和 TM 模分量的光场限制因子  $\Gamma$ , 波导折射率  $n_r$  和微分折射率  $dn/dN$  分别用下标  $x, y$  来表示:

$$\Gamma_x = 0.30, n_{rx} = 4.1, \frac{dn_x}{dN} = -1.20 \times 10^{-26} \text{m}^3,$$

$$\Gamma_y = 0.25, n_{ry} = 3.8, \frac{dn_y}{dN} = -1.20 \times 10^{-26} \text{m}^3.$$

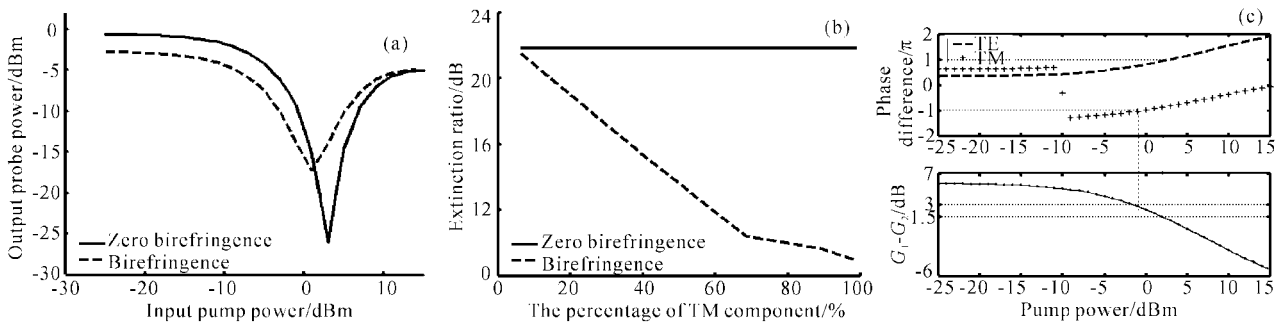


Fig. 2 (a) Output probe power versus pump power for SOAs with birefringence and SOAs with zero birefringence; (b) Output extinction ratio for probe wave versus the polarization state of input probe wave; (c) Phase difference and gain difference versus pump power

从图 2(c) 可以看到, 当 TE 模到达反相点时, SOA1 的增益  $G_1$  比 SOA2 的增益  $G_2$  大 1.5 dB; 而当 TM 模达到反相点时, SOA1 的增益  $G_1$  与 SOA2 的增益  $G_2$  之差将近 3 dB, 说明这时两相干涉的振幅差别更大一些, 因此 TM 模的最小合成光功率要比 TE 模的最小合成光功率大。所以当入射探测光中 TM 模分量增加时, 最小光功率值  $P(0)$  将增大。

图中虚线代表的半导体光放大器具有双折射 (birefringence), 此时的半导体光纤放大器只满足增益对偏振的不灵敏性, 但是引进的相位变化与偏振相关; 实线代表的半导体光放大器不具有双折射 (zero birefringence, 计算中将 TM 模分量的有效折射率取得跟 TE 模分量的相同), 即此时半导体光放大器同时具备了增益和相位变化对偏振的不灵敏性。由图可见, 有双折射存在时, 合成光的最小光功率要比无双折射的要大, 这将使波长转换的消光比下降。

图 2(b) 是消光比随入射探测光的偏振态而改变的情况, 横坐标代表 TM 模分量在入射探测光中所占比例。抽运光为“0”时的功率取  $-5 \text{dBm}$ , 抽运光为“1”的功率由图 2(a) 中的最小输出光功率所在点来确定 (即此时进行的是反相波长转换)。可以看到, 无双折射存在时, 消光比不随偏振态改变; 而有双折射存在时, 消光比随偏振态而改变, 变化量大于 10 dB; 而且有双折射存在的消光比要比零双折射的消光比要低。消光比随偏振态改变的原因可以由图 2(c) 中找到答案。

由干涉原理和 (8) 式及 (9) 式知道, 两个偏振相同的光发生干涉后, 合成光功率的值由它们的振幅和相位共同决定。当半导体光放大器中有双折射存在时, TE 模和 TM 模的相位变化不相同, 因而它们不会同时达到反相点。

另一方面, 当抽运光为“0”时 (取  $-5 \text{dBm}$ ), 输出探测光为“1” [功率记为  $P(1)$ ], 由图看到, 此时  $\cos(\Delta\phi_{2y} - \Delta\phi_{1y})$  的值比  $\cos(\Delta\phi_{2x} - \Delta\phi_{1x})$  的要小些, 所以当入射探测光的 TM 分量增加时,  $P(1)$  减小, 由消光比定义 (10) 式知, 消光比要下降。

由 (1) 式和 (2) 式及交叉相位调制波长转换的原理分析, TE 模和 TM 模的波导折射率  $n_{rx}$  和  $n_{ry}$  对叠

加效果不带来影响,但是  $\Gamma dn/dN$  会对相位差带来影响,即附加双折射的存在会对叠加效果带来负面影响。由此可以推出,当  $\Gamma_x dn_x/dN$  与  $\Gamma_y dn_y/dN$  值越接近时,有利于减小附加双折射,使两出射探测光的偏振态接近一些;而当它们的差距越大时,双折射影响更厉害,叠加效果更差。下面就  $\Gamma_x dn_x/dN$  与  $\Gamma_y dn_y/dN$  之差,取了三种情况与零双折射的情况进行对比分析,结果见图 3 和图 4。计算中除了  $dn_x/dN$  和  $dn_y/dN$  随情况 a, b, c, d 而有所不同外,其他参量均与图 2 中的取值一样。在 a 中,

$$|\Gamma_x dn_x/dN - \Gamma_y dn_y/dN| = 8 \times 10^{-28} \text{ m}^3,$$

在 b 中

$$|\Gamma_x dn_x/dN - \Gamma_y dn_y/dN| = 6 \times 10^{-28} \text{ m}^3,$$

在 c 中,

$$|\Gamma_x dn_x/dN - \Gamma_y dn_y/dN| = 0 \times 10^{-28} \text{ m}^3,$$

d 为零双折射的情况。

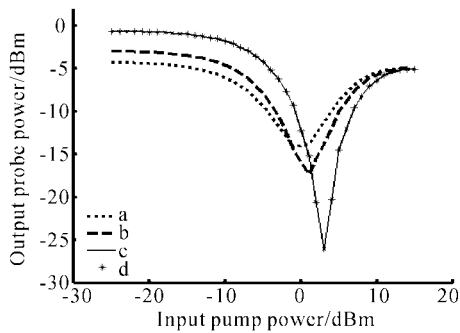


Fig. 3 Output probe power versus pump power

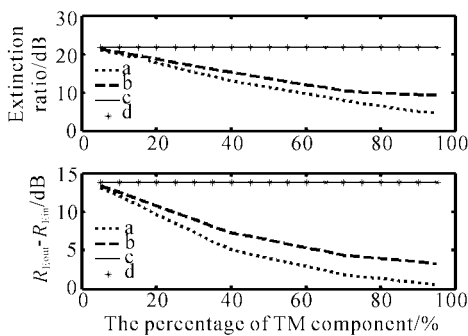


Fig. 4 Output extinction ratio and extinction ratio improvement versus pump power

由图 3 和图 4 中可以看到,当  $|\Gamma_x dn_x/dN - \Gamma_y dn_y/dN|$  越大时,双折射带来的负面效果越大,表现在探测光输出的最小光功率增大,输出消光比减小,消光比的改善变差(即探测光的输出消光比  $R_{\text{out}}$  减去抽运光的输入消光比  $R_{\text{in}}$ )。当  $|\Gamma_x dn_x/dN - \Gamma_y dn_y/dN|$  为零时,双折射的影响完全消除,与零双折射的情况一样了。

由于半导体光放大器不对称的波导结构,一般来说,TE 模的光场限制因子  $\Gamma_x$  总要大于 TM 模的光场限制因子  $\Gamma_y$ ,因而为了使  $\Gamma_x dn_x/dN$  与  $\Gamma_y dn_y/dN$  值相等,消除双折射对基于半导体光放大器干涉器件的不利影响,应该提高 TM 模的微分折射率  $\Gamma_y dn_y/dN$ 。导带与轻空穴之间的跃迁主要对应于 TM 模的折射率改变,导带与重空穴之间的跃迁则只对应于 TE 模的折射率改变<sup>[9]</sup>。在半导体光放大器的设计中,为了达到增益对偏振态的不灵敏性,常常在有源区中引进张应变,使轻空穴价带上升到重空穴价带之上,这一方面有利于提高 TM 模的材料增益,另一方面也有利于提高 TM 模的微分折射率。由上所述,如果在半导体光放大器的波导设计和有源区设计上下功夫,是有可能使  $\Gamma_x dn_x/dN$  与  $\Gamma_y dn_y/dN$  值相等,消除双折射对基于半导体光放大器干涉型器件的不利影响,也有可能实现对增益和相位变化都对偏振态不灵敏的半导体光放大器。

**结论** 本文对半导体光放大器中的双折射对基于半导体光放大器干涉型器件的性能影响进行了分析,提出了减小双折射影响的方案,提出了制作对增益和对相位变化同时具有偏振不灵敏的半导体光放大器的必要性和可能性。

由于半导体光放大器中存在的双折射使光的偏振态发生改变,从而影响基于半导体光放大器干涉型器件的性能和其他对偏振态有严格要求的器件性能,比如在半导体光放大器的四波混频应用中,为了提高转换效率,要求抽运光的偏振态必须满足一定的要求,因而在它们进入半导体光放大器之前就进行偏振态的严格控制,但是光进入半导体光放大器之后,双折射导致的偏振态改变使原来的偏振态关系无法维持,从而使转换效率降低<sup>[9]</sup>。因此对半导体光放大器中的双折射进行深入研究有着重要的实践意义。

## 参 考 文 献

- 1 Joergensen C, Danielsen S L, Durhuus T *et al.*. Wavelength conversion by optimized monolithic integrated Mach-Zehnder Interferometer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(4):521~523
- 2 Eiselt M, Pieper W, Weber H G. SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(10):2099~2112
- 3 Sokoloff J P, Prucnal P R, Glesk I *et al.*. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD). *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **7**(5):787~790

- 4 Liu Xuefeng, Sun Junqiang, Liu Deming *et al.*. Investigation on polarization characteristics of travelling-wave semiconductor optical amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(10):1306~1310 (in Chinese)
- 5 Manning R J, Antonopoulos A, Le Roux R *et al.*. Experimental measurement of nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(4):229~231
- 6 Soto H, Erasme D, Guckos G. Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8):970~972
- 7 Stephens M F C, Asghari M, Penty R V *et al.*. Demonstration of ultrafast all-optical wavelength conversion utilizing birefringence in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4):449~451
- 8 Lee Hyuek Jac, Sohn Manjin, Kim Kwangjoon *et al.*. Wavelength dependent performance of a wavelength converter based on cross-gain modulation and birefringence of a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2):185~187
- 9 Aizawa Takuya, Ravikumar K G, Suzuki Shinzo *et al.*. Polarization-independent quantum-confined stark effect in an InGaAs/InP tensile-strained quantum well. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(2):585~592
- 10 Davis M G, O'Dowd R F. A transfer matrix-based analysis of multielectrode DFB lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(7):603~605
- 11 Chu C Y J, Ghafouri-Shiraz H. Analysis of gain and saturation characteristics of a semiconductor laser optical amplifier using transfer matrices. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(8):1378~1385

## Analysis of Birefringence Effect on Performance of SOA-Based Interferometer Device

Huang Lirong Huang Dexiu

(Department of Opto-Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Huang Yongzhen

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

(Received 3 May 2002; revised 8 July 2002)

**Abstract:** The effects of birefringence on performances of SOA-based interferometer devices are analyzed theoretically. The necessity of fabricating SOA whose gain and induced phase shift are both independent on polarization state is proposed. The calculations for a SOA-based Mach-Zehnder interferometer wavelength-converter indicate that the extinction ratio will decrease and become very sensitive to the polarization state of input light if there is birefringence in SOAs, the extinction ratio variation is higher than 10 dB. A scheme is proposed to eliminate these effects, and the possibility of making a SOA with both gain and induced phase shift insensitive to polarization is analyzed.

**Key words:** guiding wave optics; birefringence; polarization state; semiconductor optical amplifier (SOA); interference; wavelength converter; extinction ratio