

基于半导体光放大器的干涉型器件中 不协调性的分析*

李亚捷[†] 吴重庆 王拥军 李 贇 季江辉

(北京交通大学理学院 光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘要: 分析了 SOA 线宽增强因子 α 及交叉增益调制对干涉仪输出功率的影响, 指出在 SOA 中由于交叉增益调制和交叉相位调制并存, 干涉仪的两臂输出不能同时达到极大和极小值, 存在一定的不协调性; 干涉仪最佳工作点不是唯一的, 而是存在一个和 α 一一对应的工作区间. 文中对干涉仪的不协调程度、工作区间及消光比进行了详细分析, 发现随着 α 的增加, 干涉仪的不协调程度降低、工作区间范围缩小且干涉消光比提高; 在和 α 对应的同一工作区间内, 消光比随工作点的后移呈增加趋势. 实验结果进一步证明了理论分析的正确性.

关键词: 半导体光放大器; 干涉仪; 交差相位调制; 交叉增益调制; 线宽增强因子; 不协调性

EEACC: 4255P; 42805

中图分类号: TN36

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)10-1851-06

1 引言

在高速 OTDM 网络中, 由于受光电转换器件响应时间及电子交叉互连的限制, 形成了网络节点的速率瓶颈, 解决的办法是直接进行全光信号处理. 由于半导体光放大器(SOA)具有功耗低、体积小、易集成等优点, 基于 SOA 的干涉型器件在全光信号处理中显示出了很大的应用潜力, 比如基于萨格奈克环(Sagnac)的太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)或半导体光放大器光纤环镜(SLALOM)^[1~3]、全光开关^[4]以及马赫-曾德尔结构的干涉仪(MZI)^[5,6]等. 它们均是利用信号光和控制光在 SOA 中发生的交叉相位调制(XPM)这一非线性现象来实现的. 以往工作主要集中在器件的开关时间窗口研究上^[7,8], 对解复用或开关后输出信号的功率分配未引起注意, 通常认为干涉仪两个输出端口中, 一个达到最大值的同时另一端必然是最小值, 即干涉仪的最佳工作点是唯一的. 本文以 Sagnac 和 MZI 干涉仪为例, 详细分析了 SOA 线宽增强因子 α 及交叉增益调制(XGM)对干涉仪两个端口输出功率的影响及漏光现象, 发现两端口并不能同时达到极大和极小值, 存在不协调性; 干涉仪的最佳工作点不是唯一的, 而是在一个区间内. 本文对不协调程度、工作区间范围及消光比进行了详细分析, 实验结果进一步

证明了理论分析的正确性.

2 理论分析

2.1 Sagnac 干涉仪

Sagnac 中, 当 SOA 微偏离环中心放置时被称为 TOAD(见图 1(a)), 可用于高速数据流的解复用; 当 SOA 紧邻耦合器边缘端口放置、两者之间距离和光纤环长相比可忽略($\Delta x \ll \Delta L$ 时(见图 1(b)), 可用于整个数据帧的开关及上下路切换, 两种放置位置工作原理完全相同. 耦合器端口 2 是解复用或开关后信号的输出端口, 端口 1 为全反射端口. 理想 3dB 耦合器的传输矩阵可表示为

$$T_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & j\frac{\sqrt{2}}{2} \\ j\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

用 E_i 和 E'_i ($i = 1, 2$) 分别表示进入和离开耦合器的光场复振幅. 当一个波长为 λ_s , 脉宽为 T_0 的信号脉冲 E_{in} (脉冲峰值功率 $P_{in} = |E_{in}|^2$) 由端口 1 注入到耦合器, 在端口 3, 4 将被分为等强度的两束光分别沿顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向传输. 当不存在控制光时, CW, CCW 经过 SOA 后将获得相同的增益且非线性相移差为零, 它们返回耦合器干涉

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60577020)

[†] 通信作者. Email: springyajie@126.com

2006-03-12 收到, 2006-04-18 定稿

后将会由输入端口反射输出,端口 2 处于关闭状态. 当引入控制光时两束光间将产生一非线性相移,端口 2 被打开,干涉后的信号将从端口 2 输出,从而完成对数据的解复用或开关功能.

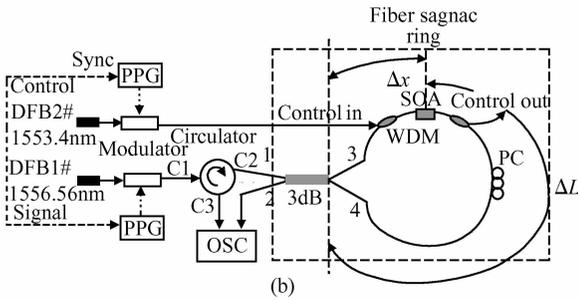
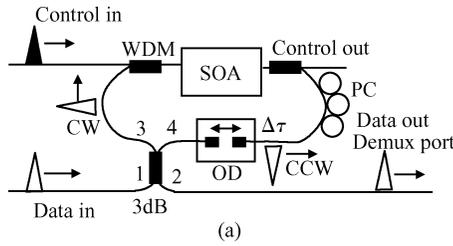


图 1 Sagnac 干涉仪 PC: 偏振控制器, OSC: 示波器

Fig.1 Sagnac interferometer PC: polarization controller, OSC: oscillograph

当控制光由波分复用器(WDM)引入光纤环时,由于 SOA 中交叉相位调制和交叉增益调制现象并存,所以当 CW 和 CCW 经过 SOA 时,在控制光的作用下两束光将经历不同的非线性相移和增益,可用光场复振幅所对应的复增益来表示

$$g_{cw} = |g_{cw}| \exp[-j\varphi_{cw}] \quad (2)$$

$$g_{ccw} = |g_{ccw}| \exp[-j\varphi_{ccw}] \quad (3)$$

其中 CW 和 CCW 的功率增益和复增益的关系可表示为 $G_{cw} = |g_{cw}|^2$, $G_{ccw} = |g_{ccw}|^2$, φ_{cw} , φ_{ccw} 是获得的非线性相移. 增益和相移之间的关系为^[9]

$$\frac{G_{cw}}{G_{ccw}} = \exp\left[-\frac{2(\varphi_{cw} - \varphi_{ccw})}{\alpha}\right] \quad (4)$$

α 的数值在 4~17 之间^[10]. 记 $\varphi_{cw} - \varphi_{ccw} = \Delta\varphi$, 由(4)式得到增益关系可表示为

$$|g_{cw}| = \exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) |g_{ccw}| \quad (5)$$

$$G_{cw} = \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) G_{ccw} \quad (6)$$

假设光纤环路的损耗为 K , 这样相位差为 $\Delta\varphi$ 的这两束光绕行光纤环一周后 CW 和 CCW 分别再次返回到耦合器的端口 4,3, 它们的光场分别为(信号光的初始相位和由光纤环路引入的相移为公共项, 对干涉结果无影响, 故此略)

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_4 g_{ccw} \sqrt{K} \\ E'_3 g_{cw} \sqrt{K} \end{bmatrix} = \exp(-j\varphi_{ccw}) \times \begin{bmatrix} j\frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} |g_{ccw}| \sqrt{K} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} \exp(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}) |g_{ccw}| \sqrt{K} \exp(-j\Delta\varphi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时返回到耦合器再次参与干涉的信号功率为

$$P_3 = |E_3|^2 = \frac{1}{2} P_{in} G_{ccw} K \quad (8)$$

$$P_4 = |E_4|^2 = \frac{1}{2} P_{in} \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) G_{ccw} K \quad (9)$$

其中 $P_{in} = |E_{in}|^2$, 为端口 1 初始注入信号光功率. 由(9)式可以看到参与干涉的一束光功率 P_4 是相位差 $\Delta\varphi$ 的函数. 此时参与干涉的信号总功率为

$$\begin{aligned} P_{total} &= P_3 + P_4 = |E_3|^2 + |E_4|^2 \\ &= \frac{1}{2} P_{in} G_{ccw} K [1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right)] \end{aligned} \quad (10)$$

当调节偏振控制器使得 CW 和 CCW 偏振态一致时, 两束光在耦合器中再次干涉后的结果为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = T_{2 \times 2} \begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} |g_{ccw}| \sqrt{K} E_{in} \times \exp(-j\varphi_{ccw}) \begin{bmatrix} j[\exp(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}) \exp(-j\Delta\varphi) + 1] \\ \exp(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}) \exp(-j\Delta\varphi) - 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

各端口输出功率为

$$\begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} G_{ccw} K P_{in} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 + 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos(\Delta\varphi) + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \\ 1 - 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos(\Delta\varphi) + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过调节控制光功率可得到不同的 $\Delta\varphi$, 当 $\Delta\varphi$ 达到一定值时可使端口 2 输出信号功率达到最大值, 从而完成对数据的解复用或开关功能. 图 2 给出了当 $G_{ccw} K = 3.5$, $P_{in} = 0.2 \text{ mW}$, SOA 线宽增强因子 $\alpha = 5$ 时返回耦合器再次参与干涉的信号总功率 P_{total} 和 Sagnac 干涉仪各端口输出功率 P'_1 , P'_2 随非线性相移差 $\Delta\varphi$ ($0 \sim 2\pi$) 的变化曲线. 由此图可以看到 P'_1 , P'_2 随 $\Delta\varphi$ 的增加振荡变化, 但由于 P_{total} 随 $\Delta\varphi$ 单调减小, P'_1 和 P'_2 不能同时获得极小和极大值, 存在不协调性, 这就导致干涉仪的最佳工作点并不唯一, 而是一个工作区间, 区间的左边界对应 P'_2 的极大值点, 右边界对应 P'_1 的极小值点(如图 2 所示), 工作区间和 α 一一对应. 由(12)式可以精确计算出当 $\alpha = 5$ 时 P'_1 和 P'_2 的极值点第一次分别出现在 $\Delta\varphi = 3.06 \text{ rad}$, $\Delta\varphi = 2.84 \text{ rad}$ 处, 且端口 1 输出

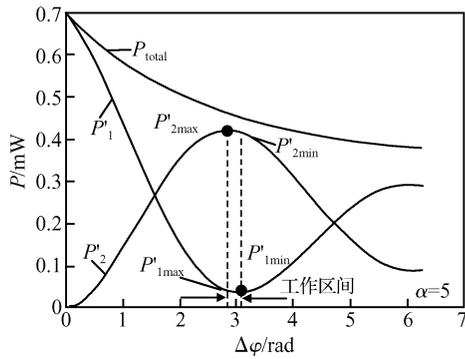


图 2 相移差变化时干涉总功率及各端口输出功率
Fig.2 Output power against phase shift difference

功率的极小值不为零,会有小部分漏光出现,即解复用或开关后的信号会有小部分从端口 1 输出,此漏光是由于 SOA 对 CW 和 CCW 增益不均衡所造成的.由于 $\Delta\varphi$ 同样和控制光功率一一对应, P'_1 和 P'_2 的极值点不同,实验中不可能在满足端口 2 获得最大输出功率的同时端口 1 漏光达到最小值,总是存在不协调性.图 3 和图 4 给出了当 $G_{ccw} K = 3.5, P_{in} = 0.2\text{mW}$, SOA 线宽增强因子取不同值时

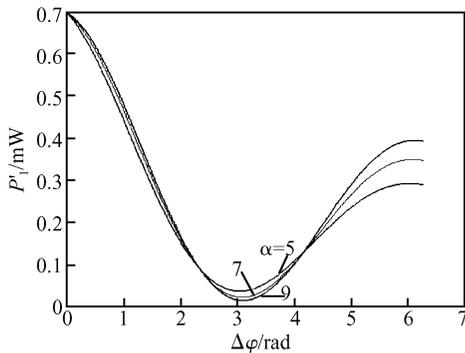


图 3 相移差变化时端口 1 输出功率
Fig.3 Output power of port 1 against phase shift difference

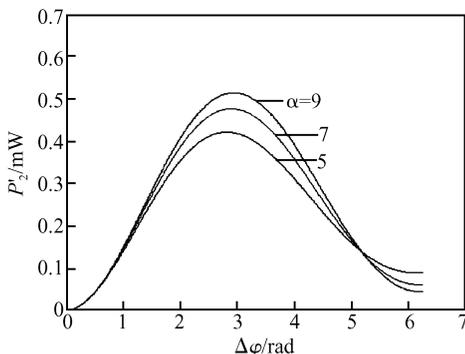


图 4 相移差变化时端口 2 输出功率
Fig.4 Output power of port 2 against phase shift difference

端口 1 和端口 2 的输出功率随 $\Delta\varphi$ 的变化曲线.随着 α 的增加,各自对应的极值点向后推移,当 $\alpha=5, 7, 9$ 时, P'_1 的极值点分别出现在 $\Delta\varphi = 3.06\text{rad}, 3.09\text{rad}, 3.11\text{rad}$ 处; P'_2 对应的极值点则分别出现在 $\Delta\varphi = 2.84\text{rad}, 2.91\text{rad}, 2.95\text{rad}$ 处.图 5 给出了不同 α 所对应的干涉仪的工作区间,由图可以看到随着 α 的增加,两端口对应的极值点相互靠近,干涉仪的工作区间呈缩减的趋势.干涉仪的不协调程度可用“工作区间边界点处各端口的输出功率差”来衡量.图 6 给出了在和 α 对应的工作区间边界点处,各端口的输出功率差 $P'_{1\max} - P'_{1\min}, P'_{2\max} - P'_{2\min}$ ($P'_{1\min}, P'_{1\max}, P'_{2\min}, P'_{2\max}$ 含义参见图 2) 随 α 的变化情况.由图可以看到当 $\alpha < 9$ 时, $(P'_{1\max} - P'_{1\min}) > (P'_{2\max} - P'_{2\min})$; 当 $\alpha > 9$ 时, $(P'_{1\max} - P'_{1\min}) < (P'_{2\max} - P'_{2\min})$, 但两者均随 α 的增加而减小,即在整个区间内功率变化趋于平缓,即干涉仪的不协调程度随 α 的增加而降低.在每个 α 所对应的工作区间内干涉仪消光比 $ER = 10\lg(P'_2/P'_1)$ 的变化情况见图 7, 由图可以看到当 $\Delta\varphi$ 一定时, ER 随 α 的增大而增大; 当 α 一定时, 在对应的整个工作区间内, 随工作点的后移呈增加趋势, 且 α 越大, 增加趋势越明显, 即在工作区间左右边界点测量的消光比差值随 α 的增加而增大.而在基于光纤非线性效应的干涉仪如非线性光纤环路镜(NOLM)中, CW 和 CCW 间不存在增益不均衡, 所以它的最佳工作点唯一, 两端口干涉后的输出功率可同时达到最大值和最小值, 且反射端口的最小值为零, 不会出现漏光现象.此外, 不论信号光脉冲的脉宽和速率是多少, 上述的这些结论是基于 SOA 的干涉仪所固有的.

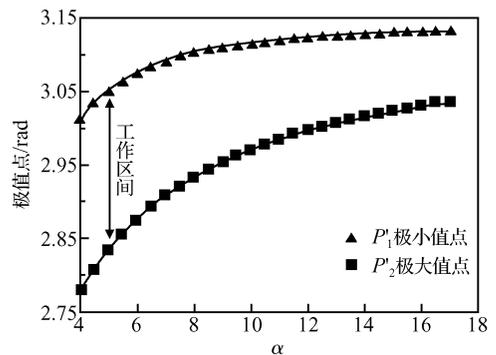


图 5 不同 α 所对应的干涉仪的工作区间
Fig.5 Working scope of interferometer against different α

2.2 MZI 型干涉仪

MZI 干涉仪结构如图 8 所示, 两干涉臂长度相等且两个 SOA 对称放置, 端口 1 是信号输入端口, 端口 7 为解复用信号输出端口. 和 Sagnac 干涉原理

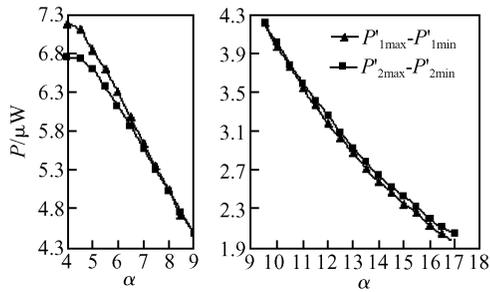


图 6 不同 α 对应的工作区间边界点处输出功率差

Fig.6 Output power difference of each port within working scope under different α

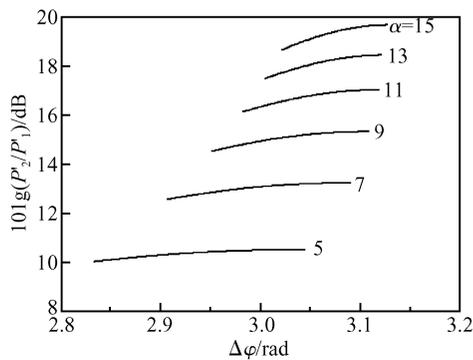


图 7 不同 α 对应的工作区间内干涉仪的消光比

Fig.7 Extinction ratio against nonlinear phase shift within working scope under different α

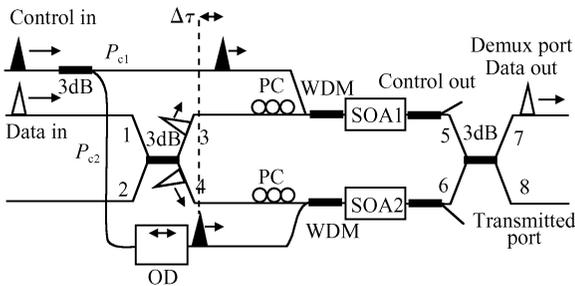


图 8 马赫-曾德尔干涉仪

Fig.8 Configuration of MZI

相似:注入信号被左侧 3dB 耦合器等分为两部分后分别进入上(CW)下(CCW)干涉臂,控制光也被分为两路等幅输出 P_{c1}, P_{c2} 经 WDM 耦合后进入相应干涉臂,两者延迟 $\Delta\tau$. P_{c1} 首先在 SOA1 中与 CW 相遇发生交叉相位调制,产生非线性相移,二者在右侧耦合器中干涉后信号由端口 7 输出,这样就完成了对数据的解复用功能. $\Delta\tau$ 后 P_{c2} 进入 SOA2 对 CCW 引入同样的相移, CW 和 CCW 的相移差抵消为零,端口 7 关闭,干涉后信号由端口 8 输出.当端口 7 被打开时,推导过程和 Sagnac 相同, CW 和 CCW 在右侧耦合器干涉后的结果为

$$\begin{bmatrix} P'_7 \\ P'_8 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} G_{ccw} K P_{in} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 - 2\exp(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha_1})\cos(\Delta\varphi) + \exp(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha_1}) \\ 1 + 2\exp(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha_1})\cos(\Delta\varphi) + \exp(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha_1}) \end{bmatrix}$$

(13)

其中 K 为干涉臂损耗; α_1 为 SOA1 的线宽增强因子.由此可见干涉后输出信号的功率分配及结论和 Sagnac 干涉仪完全相同,端口 7 和 8 同样存在不协调性.

3 实验结果

实验中用的是 Sagnac 干涉仪图 1(b) 的结构,控制光和信号光的波长分别是 1553.4 和 1556.56nm,其格式由码型发生器(PPG)驱动铌酸锂外调制器产生;SOA 为 Inphenix 公司产品,驱动电流设为 200mA,线宽增强因子 5.31,小信号增益 20.8dB;WDM 中心波长 1556.56nm,带宽 0.4nm.图 9 给出了该干涉仪对 622Mb/s 数据包的开关实验结果,其中为(a)控制脉冲格式,(b)为从端口 1 输入的信号光格式,每个数据包包含 32 字节数据,控制光和信号光之间采用帧同步方式,且编辑的控制

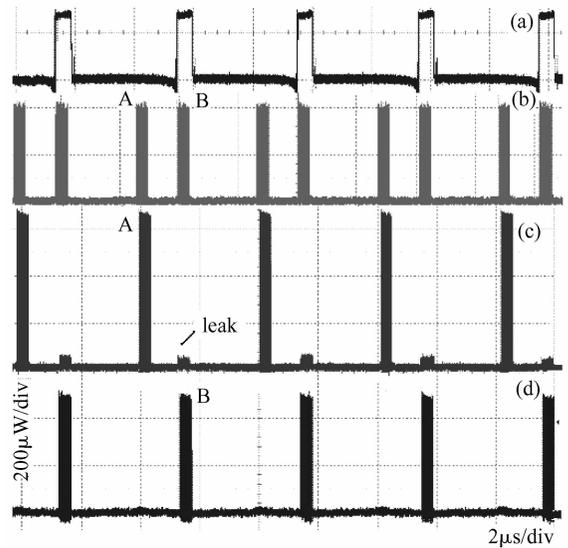


图 9 Sagnac 光开关中数据包开关结果 (a)控制光格式;(b)输入信号光格式;(c)端口 1 输出信号;(d)端口 2 输出信号

Fig.9 Switch results of packet (a) Control pulse; (b) Input signal; (c) Output of port 1; (d) Output of port 2

光格式只和数据包 B 同步,数据包 A 没有控制光对其作用.图 9(c),(d)分别是干涉后漏光功率达到最小值时端口 1 和端口 2 的输出波形,由该图形可以

清晰地看到没有控制光作用的数据包 A 将从输入端口反射输出,而数据包 B 在控制光作用下将从端口 2 输出,但由于 XGM 的影响会有小部分漏光出现在端口 1(如图中所示).图 10 给出了该漏光和输出数据包 B 的细节对比,由此图可以看到两者是一致的,这也进一步证明了泄漏的确是信号光而非控制光所造成的串扰.为了精确测量干涉仪各端输出功率,随后实验中信号光采用了 400ps 单脉冲,峰值功率 1mW,控制光和信号光格式完全相同.图 11 给出了当控制光功率逐渐增加时 Sagnac 干涉仪各端口的输出功率值.由于控制光功率和相位差一一对应,而相位差不可测量,所以图 11 可以间接反应各端输出功率随非线性相移差的变化关系.由图可以

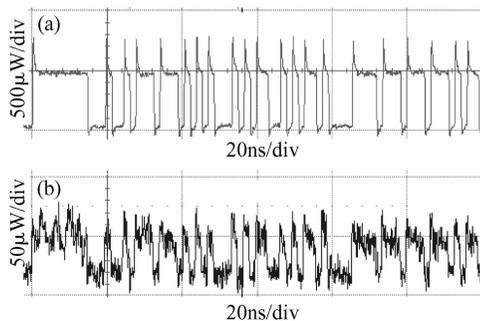


图 10 漏光及端口 1 输入信号细节对比 (a) 端口 1 输入数据包细节;(b) 漏光细节

Fig. 10 Comparison of the detail between leak signal and input packet of port 1 (a) Input packet of port 1; (b) Leak signal

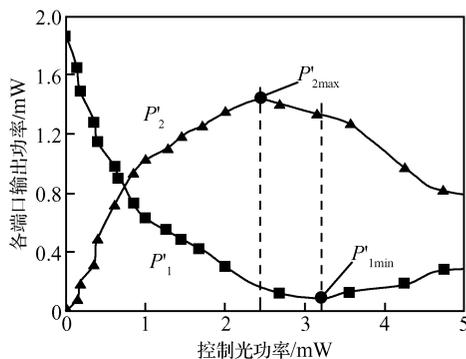


图 11 Sagnac 光开关中输出功率随控制光功率的变化曲线

Fig. 11 Experiment results of output power against control power in all-optical switch based on Sagnac ring

看到随着控制光功率的增加,端口 1 功率逐渐减小,端口 2 逐渐增加,当控制光为 2.46mW 时,端口 2 首次出现最大值,此后逐渐减小;而此时端口 1 并未出现极小值,等控制光功率增加到 3.15mW 时端口 1 出现极小值,端口 1 的工作点要滞后于端口 2,而且端口 1 的极小值不为零,总有漏光存在.在工作区

间边界点处测量的消光比分别是 10.13 和 11.16dBm,这些均和前面的理论分析相吻合.

4 结论

基于 SOA 的干涉仪由于 XGM 和 XPM 并存,使得干涉后两端口输出功率不能同时达到最大值和最小值,存在不协调性;干涉仪的最佳工作点不是唯一的,而是存在一个工作区间,此区间和 SOA 线宽增强因子 α 的数值一一对应.随着 α 的增加,干涉仪的不协调程度降低,区间范围缩小且干涉消光比提高;在和 α 对应的同一工作区间内,ER 随工作点的后移呈增加趋势.在实际使用中为降低不协调性的影响并获得较高的干涉消光比,应尽量选择 α 数值大的 SOA.不论信号光脉冲的脉宽和速率是多少,上述的这些结论是基于 SOA 的干涉仪所固有的.本文分析所得到的现象及结论不仅对基于 SOA 的干涉型器件适用,而且也适用于所有 XGM 和 XPM 并存的干涉型器件,应引起人们的重视.

参考文献

- [1] Sokoloff J P, Prucnal P R, Glesk I. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD). IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5(7): 787
- [2] Diex S, Ludwig R, Weber H G. All-optical switch for TDM and WDM/TDM systems demonstrated in 640Gbit/s demultiplexing experiment. Electron Lett, 1998, 34(8): 803
- [3] Glesk L, Sokoloff J P, Prucnal P R. Demonstration of all-optical demultiplexing of TDM data at 250Gbit/s. Electron Lett, 1994, 30(4): 339
- [4] Liu Aiming, Wu Chongqing, Gong Yandong. All-optical switch with double switched ports based on semiconductor optical amplifier. Journal of Beijing Jiaotong University, 2004, 28(5): 28 (in Chinese) [刘爱明, 吴重庆, 龚岩栋. 基于半导体光放大器的双端口全光光开关. 北京交通大学学报, 2004, 28(5): 28]
- [5] Diez S, Schubert C, Ludwig R. 160Gbit/s demultiplexer using hybrid gain-transparent SOA Mach-Zehnder interferometer. Electron Lett, 2000, 36(17): 1484
- [6] Studenkov P V, Gokhale M R, Wei J. Monolithic integration of an all-optical Mach-Zehnder demultiplexer using an asymmetric twin-waveguide structure. IEEE Photonics Technol Lett, 2001, 13(6): 600
- [7] Toptchiyski G, Randel S, Petermann K. Analysis of switching windows in a gain-transparent-SLALOM configuration. J Lightwave Technol, 2000, 18(12): 2188
- [8] Zhao Yongpeng, Ye Peida. Switching characteristic of semiconductor optical amplifier based demultiplexer with symmetric Mach-Zehnder interferometer configuration. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 99 (in Chinese) [赵永鹏, 叶培大. 对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪解复用器的开关特性分析. 光学学报, 2002, 22(1): 99]
- [9] Eiselt M, Pieper E, Weber H G. SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror. J Lightwave Technol, 1995, 13

- (10);2099
[10] Storkfelt N, Mikkelsen B, Olesen D S. Measurement of carrier lifetime and linewidth enhancement factor for 1.5- μ m

ridge-waveguide laser amplifier. IEEE Photonics Technol Lett, 1991, 3(7):632

Analysis of the Unbalanced State of an Interferometer Based on an SOA^{*}

Li Yajie[†], Wu Chongqing, Wang Yongjun, Li Yun, and Ji Jianghui

(Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The influence of the linewidth enhancement factor and cross-gain modulation on the output power of an interferometer based on a semiconductor optical amplifier (SOA) is analyzed. It is found that two output ports of the interferometer do not reach the minimum and maximum simultaneously due to cross-gain modulation. The interferometer has a working range instead of one working point, and this range has a relation with α . The unbalanced state, working range and extinction ratio are discussed. With the increase of α , the degree of unbalanced and work range decrease, while the extinction ratio increases. Experimental results prove the correctness of theoretical analysis.

Key words: semiconductor optical amplifier; interferometer; cross-phase modulation; cross-gain modulation; linewidth enhancement factor; unbalanced state

EEACC: 4255P; 4280S

Article ID: 0253-4177(2006)10-1851-06

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No.60577020)

[†] Corresponding author. Email:springyajie@126.com

Received 12 March 2006, revised manuscript received 18 April 2006