

# 半导体光放大器交叉相位调制点的优化设计

李鑫, 王健, 陈祥敬, 吴重庆\*

北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室光信息科学与技术研究所, 北京 100044

**摘要** 提出了一种采用斐索干涉仪测量由交叉相位调制产生的非线性相移的实验方案, 得到了不同探测光功率、控制光功率和偏置电流条件下的相移公式。结果表明, 非线性相移与控制光功率和偏置电流呈单调递增关系, 与探测光功率呈单调递减关系, 优化设计了半导体光放大器交叉相位调制的工作点。提出了影响非线性相移的最佳相位调制点的确定方法, 得到  $\pi/2$  相移的最佳相位调制参数: 探测光功率为 0.29 mW, 控制光功率为 0.5 mW, 偏置电流为 276 mA。

**关键词** 光通信; 交叉相位调制; 半导体光放大器; 斐索干涉仪; 非线性相移; 相位调制点; 优化设计

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0506002

## Optimal Design of Cross-Phase Modulation Points for Semiconductor Optical Amplifier

Li Xin, Wang Jian, Chen Xiangjing, Wu Chongqing\*

*Institute of Optical Information, Key Lab of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

**Abstract** In this study, we proposed an experimental scheme for measuring the nonlinear phase shift generated by cross-phase modulation using a Fizeau interferometer. Subsequently, a formula was comprehensively obtained for evaluating the phase shift under different probe light powers, control light powers, and bias currents. The results denote that the nonlinear phase shift exhibits a monotonically increasing relation with the control light power and the bias current, and in contrast it exhibits a monotonically decreasing relation with the probe light power. Thereby, the operating points of cross-phase modulation for the semiconductor optical amplifier were optimized. Further, we proposed a method for determining the optimal phase modulation points that affect the nonlinear phase shift, and the optimal phase modulation parameters for a phase shift of  $\pi/2$  were obtained. The probe light power is 0.29 mW, the control light power is 0.5 mW, and the bias current is 276 mA.

**Key words** optical communications; cross-phase modulation; semiconductor optical amplifier; Fizeau interferometer; nonlinear phase shift; phase modulation point; optimal design

**OCIS codes** 060.5060; 250.5980; 260.3160

## 1 引言

半导体光放大器(SOA)具有功耗小、易集成和非线性效应显著的特点,是全光信号处理中重要的基础器件之一<sup>[1-2]</sup>。交叉相位调制(XPM)是半导体光放大器中光-光互作用的一种,已用于全光缓存<sup>[3-4]</sup>、全光开关<sup>[5]</sup>和异或门<sup>[6]</sup>等光信号处理器件。

SOA的交叉相位调制效应已被广泛应用<sup>[7-10]</sup>,然而关于如何获得最佳调制效果的研究较少。文献

[8-10]通过实验研究了 SOA 交叉相位调制效应在波长转换、频率转换和 NRZ-DPSK(Non-Return to Zero-Differential Phase Shift Keying)全光信号振幅再生中的应用;文献[11]研究了交叉相位调制产生的非线性相移与控制光的脉冲频率和 SOA 偏置电流的关系,从理论和实验上得到了非线性相移与控制光脉冲频率成反比并与偏置电流成正比的结论;文献[12]研究了控制光脉冲进入 SOA 时,探测光的非线性相移和输出功率随时间的变化,并得到

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61775012)

\* E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

了交叉相位调制比交叉增益调制延迟几个皮秒的结论;文献[13]采用分段模型和琼斯矩阵方法,数值分析了交叉相位调制和交叉增益调制等非线性效应之间的联系,得出交叉相位调制与交叉增益压缩成正比结论。

SOA 的交叉相位调制是一个复杂的物理过程,这种调制产生的非线性相移与注入到 SOA 中的探测光、控制光和偏置电流都有关系,导致其在实际中的应用存在一定的盲目性。实际应用中遇到的另一个严重问题是对光的调制效率的控制。为了获得较大的相位调制,必须大幅提高控制光的功率,这种大功率的控制光注入到 SOA 中,很容易使 SOA 损坏。而探测光存在一定的波动,SOA 本身也存在一定的非线性,很容易将探测光的波动和噪声带入到输出光的相位之中,造成相位不稳定。因此,一组优良的参数组合不仅可以提高调制效率和非线性相移的稳定性,还能够减小功耗,这样的优化设计对于 SOA 的实际应用具有重要意义。

为了优化设计,首先需要全面研究上述三个因素对 SOA 交叉相位调制的非线性相移的影响,并进行实验测量。目前测量此相移的方法有两种:马赫-曾德尔干涉测量法<sup>[11,14]</sup>和光谱分析法<sup>[12]</sup>。考虑

到马赫-曾德尔干涉对环境敏感,易受外界因素的影响,导致测量结果不可靠;光谱分析法的实验结构复杂,很难进行在线测试。为此,本文提出一种用光纤斐索干涉仪来测量非线性相移的方法,并给出测量公式。斐索干涉仪结构简单,由于两相干光在同一光纤中传输,干涉信号对外界不敏感,测量结果比较准确<sup>[15]</sup>。通过测量在不同探测光功率、控制光功率和偏置电流条件下产生的干涉信号,得到非线性相移随探测光功率、控制光功率和偏置电流的变化规律。通过对实验结果进行理论分析和数据拟合,得到了非线性相移与探测光功率、控制光功率和偏置电流的不同组合关系,从而提出一种最佳组合(最佳相位调制点)的优化设计。

## 2 实验原理

研究交叉相位调制的实验装置如图 1 所示。由激光器(LD1)发出波长为  $\lambda_1$  的探测光,探测光经过偏振控制器(PC1)和波分复用器(WDM1)后进入 SOA;而由激光器 LD2 发出的波长为  $\lambda_2$  的控制光,先经调制器调制[调制信号由脉冲码型发生器(PPG)产生],使连续光变为脉冲光后,再经过 PC2 和 WDM1 也进入 SOA。

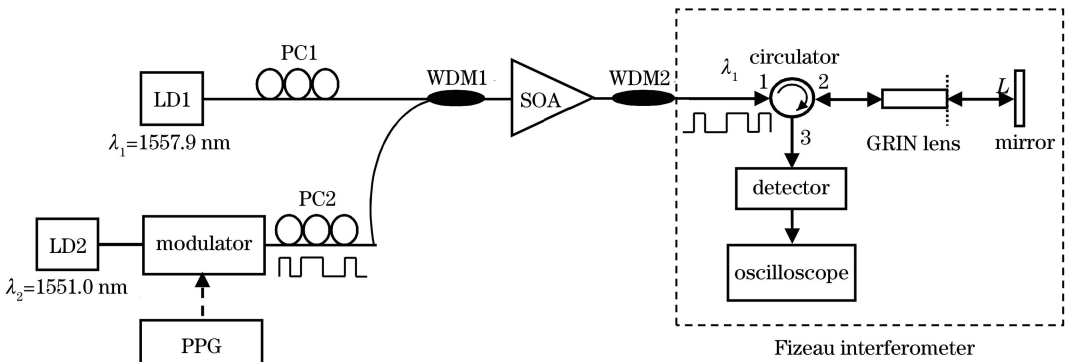


图 1 实验原理示意图

Fig. 1 Experimental principle diagram

由 SOA 增益  $G$  引起的相移  $\varphi$  可表示为<sup>[1]</sup>

$$\varphi = -\frac{1}{2}\beta_c \ln G, \quad (1)$$

式中:  $\beta_c$  为 SOA 的线宽增强因子。当波长为  $\lambda_2$  的控制光分别为“0”和“1”时,SOA 的增益分别为  $G_1$  和  $G_2$ , 则波长为  $\lambda_1$  的探测光的相移分别为  $\varphi_1 = -\beta_c \ln G_1/2$ ,  $\varphi_2 = -\beta_c \ln G_2/2$ , 这样经过波长为  $\lambda_2$  的控制光的调制后,波长为  $\lambda_1$  的探测光的相位变化 ( $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ) 为

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2}\beta_c \ln(G_1/G_2). \quad (2)$$

在注入 SOA 的探测光功率  $P_{\text{prob}}$ 、控制光功率  $P_{\text{ctrl}}$  和偏置电流  $I$  不同的情况下,SOA 的增益  $G_1$  和  $G_2$  会有所不同,产生的  $\Delta\varphi$  值也不同。若准确测量出  $\Delta\varphi$  值,便可得到上述因素对交叉相位调制的影响。

为了从理论上得到  $\Delta\varphi$  值随  $P_{\text{prob}}$ 、 $P_{\text{ctrl}}$  与  $I$  的变化趋势,测量了不同  $I$  情况下 SOA 的输入-输出特性曲线,如图 2 所示,其中增益  $G = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$  可以从输入-输出特性曲线估算出来。从图 2 可以看出:在偏置电流不变的情况下,当波长为  $\lambda_2$  的控制光为“0”,即输入功率  $P_{\text{in}}$  仅为探测光功率  $P_{\text{prob}}$  时,SOA

的增益  $G_1$  随  $P_{\text{prob}}$  的增大而减小;当波长为  $\lambda_2$  的控制光为“1”,即输入功率  $P_{\text{in}}$  为探测光功率  $P_{\text{prob}}$  与控制光功率  $P_{\text{ctrl}}$  之和时,SOA 的增益  $G_2$  也随  $P_{\text{prob}}$  或  $P_{\text{ctrl}}$  的增大而减小。因此,当  $P_{\text{ctrl}}$  不变、仅  $P_{\text{prob}}$  增加时, $G_1$  和  $G_2$  都减小,但  $G_1$  减小的速度比  $G_2$  快;当  $P_{\text{prob}}$  不变、仅  $P_{\text{ctrl}}$  增加时, $G_1$  不变, $G_2$  减小;当  $P_{\text{prob}}$  和  $P_{\text{ctrl}}$  不变时,SOA 的增益  $G_1$  和  $G_2$  均随偏置电流的增大而增大,但  $G_1$  增大的速度比  $G_2$  快。

根据上述分析,再结合(2)式,可以得到:SOA 交叉相位调制产生的非线性相移  $\Delta\varphi$  随探测光功率  $P_{\text{prob}}$  的增大而减小,且随偏置电流  $I$  和控制光功率  $P_{\text{ctrl}}$  的增大而增大。

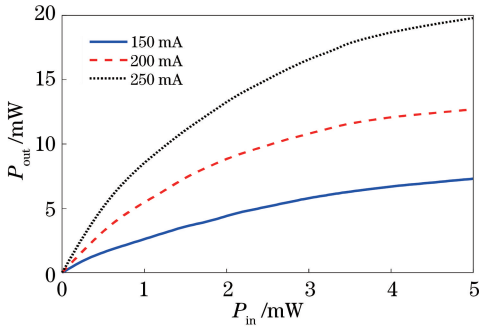


图 2 SOA 增益特性曲线

Fig. 2 Gain characteristic curve of SOA

下面说明如何测量  $\Delta\varphi$  值。

波长为  $\lambda_1$  的探测光和波长为  $\lambda_2$  的控制光从 SOA 输出后经过波分复用器 WDM2,探测光被滤出,进入斐索干涉仪(图 1 中虚线方框中的装置)中环行器(circulator)的 1 端口,从 2 端口输出后进入自聚焦透镜(GRIN lens)。自聚焦透镜的表面为部分反射表面,到达透镜表面的光一部分被反射、另一部分透射过去。在自聚焦透镜表面上的反射光为一次反射光,而透射光照射至反射镜后又被反射,再回到自聚焦透镜中,成为二次反射光。一次和二次反射光通过自聚焦透镜进入环行器的 2 端口,从 3 端口输出进入光电探测器。利用探测器的平方检测特性,一次反射光,以及一次和二次反射光的干涉信号被检测出来,然后用高速示波器记录。通过分析记录的波形和相应的数据,获得调制相位。

设未被调制的探测光进入自聚焦透镜后,电场的复振幅为  $A_{10} \exp(i\varphi_1)$ ,则一次和二次反射光电场的复振幅分别为

$$E_1 = A_1 \exp(i\varphi_1), E_2 = A_2 \exp[i(\varphi_1 - \omega_{10}\tau)], \quad (3)$$

式中: $A_1$  和  $A_2$  为振幅, $A_1 = r_1 A_{10}$ , $A_2 = t_1^2 r_2 A_{10}$ ;

$A_{10}$ 、 $\varphi_1$  分别为未被调制的探测光的振幅和相位; $r_1$ 、 $t_1$  分别为自聚焦透镜的振幅反射率和透射率; $r_2$  为反射镜的振幅反射率; $\tau$  为二次反射光相对一次反射光的时间延迟( $\tau = 2L/c$ , $c$  为光速, $L$  为自聚焦透镜与反射镜之间的距离); $\omega_{10}$  为探测光的角频率。将一次和二次反射光的功率分别记为  $P_1$  和  $P_2$ 。

设被调制的探测光进入自聚焦透镜后,电场的复振幅为  $A_{20} \exp(i\varphi_2)$ ,则一次和二次反射光电场的复振幅分别为

$$E_3 = A_3 \exp(i\varphi_2), E_4 = A_4 \exp[i(\varphi_2 - \omega_{10}\tau)], \quad (4)$$

式中: $A_3$  和  $A_4$  为振幅, $A_3 = r_1 A_{20}$ , $A_4 = t_1^2 r_2 A_{20}$ ; $A_{20}$ 、 $\varphi_2$  分别为调制的探测光的振幅和相位。将调制的探测光的一次和二次反射光对应的功率分别记为  $P_3$  和  $P_4$ 。

由于一次和二次反射光的干涉包括: $E_1$  和  $E_2$ 、 $E_3$  和  $E_4$ 、 $E_1$  和  $E_4$ 、 $E_2$  和  $E_3$  之间的干涉。调整自聚焦透镜与反射镜之间的距离  $L$ ,使  $\omega_0 \tau = \pi$ ,则  $\cos(\omega_0 \tau) = -1$ ,干涉后对应的功率分别为  $P_{12}$ 、 $P_{34}$ 、 $P_{14}$ 、 $P_{23}$ ,不难推导出:

$$P_{12} = (\sqrt{P_1} - \sqrt{P_2})^2, \quad (5)$$

$$P_{34} = (\sqrt{P_3} - \sqrt{P_4})^2, \quad (6)$$

$$P_{14} = P_1 + P_4 + 2\sqrt{P_1 P_4} \cos(\Delta\varphi), \quad (7)$$

$$P_{23} = P_2 + P_3 - 2\sqrt{P_2 P_3} \cos(\Delta\varphi)。 \quad (8)$$

实验可获得  $P_{12}$ 、 $P_{34}$ 、 $P_{14}$  和  $P_{23}$  的值,通过遮挡二次反射信号又可获得一次反射信号的  $P_1$  和  $P_3$ ,利用上述公式,可计算出  $P_2$ 、 $P_4$  和  $\Delta\varphi$ 。

### 3 实验结果与分析

实验中,激光器 LD1 的输出波长为 1557.9 nm,如图 3(a) 所示;激光器 LD2 先输出波长为 1551.0 nm 的连续光,再经铌酸锂调制器调制后产生一个重复频率为 500 MHz、脉冲宽度为 2 ns 的脉冲光信号,如图 3(b) 所示。经过 WDM2 过滤出的探测光的一次反射信号如图 3(c) 所示,图中的高电平表示未调制时探测光的光功率  $P_1$ ,低电平表示被控制光调制后探测光的光功率  $P_3$ 。一次和二次反射光的干涉信号如图 3(d) 所示,图中标注了干涉信号  $P_{12}$ 、 $P_{34}$ 、 $P_{14}$ 、 $P_{23}$  的位置。

#### 3.1 非线性相移的测量

图 4(a) 给出了  $P_{\text{ctrl}} = 1.5$  mW,  $P_{\text{prob}}$  为 0.3、0.4、0.5 mW 时,非线性相移  $\Delta\varphi$  随 SOA 偏置电流  $I$  的变化。图 4(b) 给出了  $P_{\text{prob}} = 0.3$  mW,  $P_{\text{ctrl}}$  为 0.5,

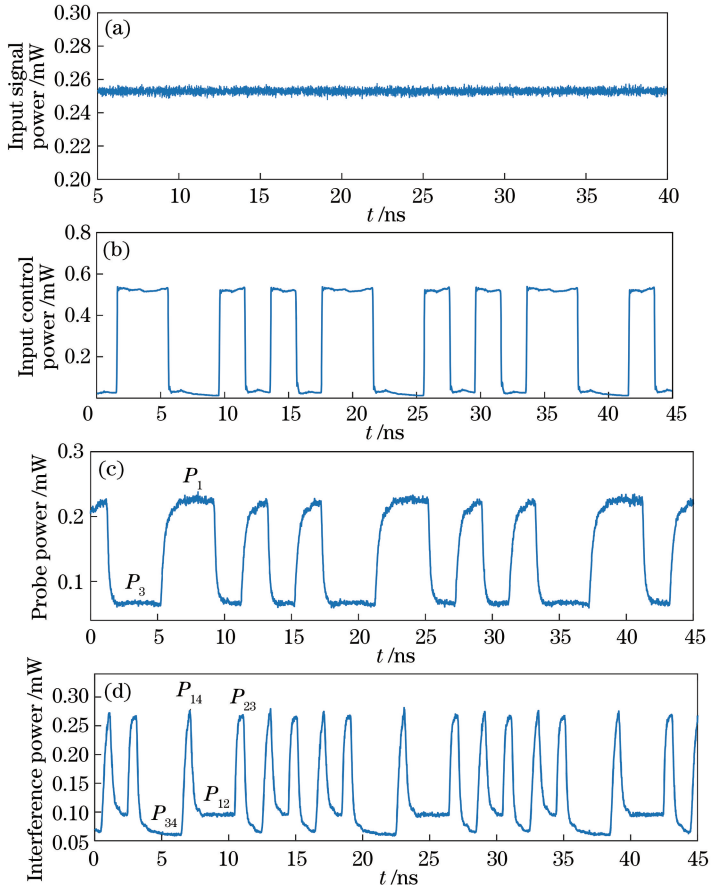


图 3 实验波形图。(a)探测光波形图;(b)控制光波形图;(c)一次反射信号波形图;(d)干涉信号波形图

Fig. 3 Experimental waveforms. (a) Probe light waveform; (b) control light waveform; (c) waveform of first reflected signal; (d) interference signal waveform

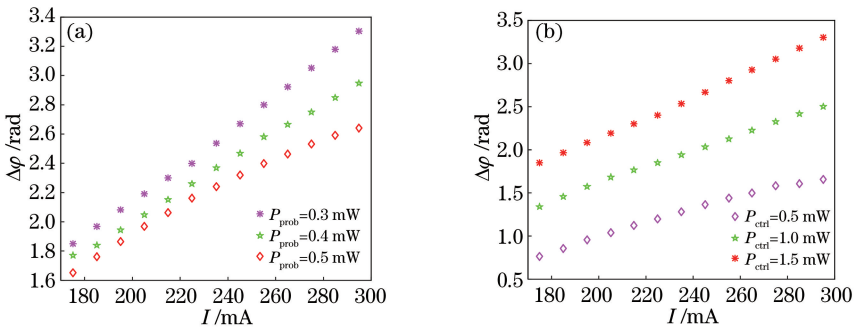


图 4 非线性相移变化图。(a)不同探测光功率下,非线性相移随偏置电流变化;  
(b)不同控制光功率下,非线性相移随偏置电流变化

Fig. 4 Variation of nonlinear phase shift. (a) Variation of nonlinear phase shift with bias current under different probe light powers; (b) variation of nonlinear phase shift with bias current under different control light powers

1.0, 1.5 mW 时,非线性相移  $\Delta\varphi$  随 SOA 偏置电流  $I$  的变化。从图 4 可以明显看出: $\Delta\varphi$  随  $P_{ctrl}$  和  $I$  的增大而单调增大,随  $P_{prob}$  的增大而单调减小,这一规律与前面的理论分析结果完全一致。

比较图 4(a)中的曲线可以看出:随着  $P_{prob}$  的增加, $\Delta\varphi$  随  $I$  变化曲线的斜率减小,这说明了  $P_{prob}$  的

增加使得  $\Delta\varphi$  随  $I$  的变化减慢。同样,比较图 4(b)中的曲线可以看出:随着  $P_{ctrl}$  的增加, $\Delta\varphi$  随  $I$  变化曲线的斜率增大,这说明了  $P_{ctrl}$  的增加使得  $\Delta\varphi$  随  $I$  的变化加快。

### 3.2 $\pi/2$ 相位调制面和最佳相位调制点

在光通信中,四相位移键控(QPSK)是高阶编

码格式的基础,由它可以发展更高阶的编码,这些编码格式已被广泛应用于速率为 15 Gbit/s 以上的通信系统中,而 DPSK 编码格式可通过  $\pi/2$  的调制相移得到。鉴于  $\Delta\varphi$  是  $P_{\text{prob}}$ 、 $P_{\text{ctrl}}$  和  $I$  三个自变量的函数,即  $\Delta\varphi = \mathcal{F}(P_{\text{prob}}, P_{\text{ctrl}}, I)$ ,根据实验数据拟合得到

$$\Delta\varphi = -1.46 + 0.11P_{\text{prob}} - 2.89P_{\text{prob}}^2 + 3.27P_{\text{prob}}^3 + 1.22P_{\text{ctrl}} + 0.68P_{\text{ctrl}}^2 - 0.45P_{\text{ctrl}}^3 + 0.0088I. \quad (9)$$

应该注意的是:1)根据图 4,  $\Delta\varphi$  与  $I$  基本上呈线性关系,因此在拟合式中只有  $I$  的一次项;2)考虑到  $\Delta\varphi$  与  $P_{\text{prob}}$  和  $P_{\text{ctrl}}$  呈非线性关系,用  $P_{\text{prob}}$  和  $P_{\text{ctrl}}$  的三次多项式进行了拟合;3)因同时含有  $P_{\text{prob}}$  和  $P_{\text{ctrl}}$  的交叉项很小,可以忽略不计,因此在(9)式中没有交叉项。

从(9)式得到  $\Delta\varphi = \pi/2$  时,偏置电流  $I$  的表达式为

$$I = 344.0 - 12.7P_{\text{prob}} + 328.1P_{\text{prob}}^2 - 371.6P_{\text{prob}}^3 - 138.8P_{\text{ctrl}} - 77.1P_{\text{ctrl}}^2 + 50.9P_{\text{ctrl}}^3. \quad (10)$$

(10)式表示  $\Delta\varphi = \pi/2$  的一个曲面,称之为  $\pi/2$  相位调制面,其中第一项 344.0 mA 表示当输入光很小时,探测光达到  $\pi/2$  相移所需的电流。 $\pi/2$  相位调制面的存在说明:相位调制面上的不同点,称为相位调制点,代表  $P_{\text{prob}}$ 、 $P_{\text{ctrl}}$  和  $I$  的不同组合,都能产生  $\pi/2$  的相移。在应用交叉相位调制时,选择最佳  $P_{\text{prob}}$ 、 $P_{\text{ctrl}}$  和  $I$  的组合,即最佳相位调制点是一个很重要的问题,最佳调制点通过以下两方面考量来选取:1)在最佳调制点处,  $\Delta\varphi$  的变化随探测光功率  $P_{\text{prob}}$  的变化越小越好,因为这样可以最大限度地克服探测光不稳定产生的影响;2)  $\Delta\varphi$  的变化随控制光功率  $P_{\text{ctrl}}$  的变化越大越好,因为此时调制效率最高。为此,通过(9)式,分别计算出  $\Delta\varphi$  的一阶偏导数  $\partial\Delta\varphi/\partial P_{\text{prob}}$  和  $\partial\Delta\varphi/\partial P_{\text{ctrl}}$ ,得到二者分别取极小值和极大值时,  $P_{\text{prob}} = 0.29 \text{ mW}$ ,  $P_{\text{ctrl}} = 0.5 \text{ mW}$ 。最后通过(10)式可以计算出相应的  $I = 276 \text{ mA}$ ,因此  $\pi/2$  相移最佳相位调制点为(0.29, 0.5, 276)。

为了说明最佳相位调制点的效果,选一个非最佳点进行比较。设此点的  $P_{\text{prob}} = 0.8 \text{ mW}$ ,  $P_{\text{ctrl}} = 1.5 \text{ mW}$ ,用(10)式计算出相应的  $I = 144 \text{ mA}$ ,即非最佳点为(0.8, 1.5, 144)。根据(9)式,当探测光功率  $P_{\text{prob}}$  变化  $0.01 \text{ mW}$  时,最佳点处相移变化  $0.0024\pi$ ,非最佳点处相移变化约为  $0.0057\pi$ ,可见最佳点处探测光功率的变化对非线性相移的影响较小;当控制光功率  $P_{\text{ctrl}}$  变化  $0.01 \text{ mW}$  时,最佳点处

相移变化为  $0.005\pi$ ,非最佳点处相移变化约为  $0.001\pi$ ,因此,在最佳点控制光功率可有效控制非线性相移,且该相移对探测光的功率波动不敏感,防止探测光的强度噪声带入到相位调制信号中。

## 4 结 论

采用光纤斐索干涉仪分析了工作电流、探测光功率和控制光功率三个因素对 SOA 非线性相移的影响,并进行了较为全面的实验测量,得到了探测光功率、控制光功率和偏置电流对 SOA 交叉相位调制产生的非线性相移  $\Delta\varphi$  的影响。所提出的实验装置结构简单,对外界不敏感,测量精度高。在实验结果的基础上,对 SOA 交叉相位调制点进行了优化设计,给出了最佳相位调制点的概念和选取方法,得到了  $\Delta\varphi = \pi/2$  时的最佳相位调制点,为基于 SOA 交叉相位调制的 DPSK 系统提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Wu C Q. Interaction of two light beams in semiconductor optical amplifier and its applications for all-optical signal processing (II) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(11): 12-17.  
吴重庆. 半导体光放大器的光-光互作用及在全光信号处理中的应用(II) [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(11): 12-17.
- [2] Ma J, Lu J, Wu P H, et al. Influence of semiconductor optical amplifier parameters on high speed all-optical wavelength conversion system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030606.  
马杰, 卢嘉, 伍萍辉, 等. 半导体光放大器参数对高速全光波长变换系统的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030606.
- [3] Cheng M, Wu C Q, Liu H. Cascaded optical buffer based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers [J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(11): 4026-4029.
- [4] Berrettini G, Meloni G, Poti L, et al. All-optical variable buffer based on semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(4): 510-516.
- [5] Liu Y, McDougall R, Seoane J, et al. Characterization of hybrid integrated all-optical flip-flop [C] // LEOS 2006-19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. IEEE, 2006: 943-944.
- [6] Wang Y P, Wu C Q, Wang Z, et al. An encryption-decryption method using XOR gate based on the

- XPM between O-band and C-band light waves [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(7): 074219.
- [7] Yang W H, Wang H L, Wang Z X, *et al.* Wavelength conversion efficiency of quantum dot semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0406005.  
杨文华, 王海龙, 王兆翔, 等. 量子点半导体光放大器的波长转换效率 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0406005.
- [8] Dong J J, Zhang X L, Fu S N, *et al.* Investigation on inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient cross phase modulation of semiconductor optical amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2250-2255.  
董建绩, 张新亮, 付松年, 等. 基于半导体光放大器瞬态交叉相位调制效应的高速反相和同相波长转换的研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2250-2255.
- [9] Cao T, Chen L, Yu Y, *et al.* Experimental demonstration and devices optimization of NRZ-DPSK amplitude regeneration scheme based on SOAs [J]. Optics Express, 2014, 22(26): 32138-32149.
- [10] Kim D H, Lee J Y, Choi H J, *et al.* All-optical single-sideband frequency upconversion utilizing the XPM effect in an SOA-MZI [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20309-20317.
- [11] Ueno Y, Nakamura S, Tajima K. Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40-160-GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(11): 2573-2589.
- [12] Wang J, Maitra A, Poulton C G, *et al.* Temporal dynamics of the alpha factor in semiconductor optical amplifiers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(3): 891-900.
- [13] Huang L R, Chen H F, Huang D X, *et al.* Relationship among several nonlinear effects in semiconductor optical amplifier[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(1): 84-86.  
黄黎蓉, 陈洪峰, 黄德修, 等. 半导体光放大器中几种非线性效应关系研究 [J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(1): 84-86.
- [14] Ehrhardt J, Villeneuve A, Stegeman G I, *et al.* Interferometric measurement of the linewidth enhancement factor of a 1.55  $\mu\text{m}$  strained multi-quantum-well InGaAs/InGaAsP amplifier [J]. Photonics Technology Letters, 1992, 4(12): 1335-1338.
- [15] Liu G D, Wu C Q, Mao Y Y, *et al.* A tunable demodulator of DPSK signal based on free space light [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(3): 164-167.  
刘国栋, 吴重庆, 毛雅亚, 等. 基于自由空间光的可调谐 DPSK 信号解调器 [J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(3): 164-167.