

铌酸锂偏振编码器的偏振稳定性研究

王一旭^{1,2} 吴重庆^{1,2} 李政勇^{1,2} 华 勇³

¹ 北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044
² 北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044
³ 重庆光电技术研究所, 重庆 400060

摘要 偏振编码器的稳定性是影响偏振编码通信的关键因素之一。采用时变矢量对基于铌酸锂(LN)相位调制的偏振编码器的稳定性进行了深入研究。实验表明, LN 的偏振相关损耗主态(PPL)与偏振相关相移主态基本一致, 说明 LN 的偏振相关损耗不会影响偏振态的稳定性。实验中观察到偏振态旋转具有“惯性”: 使电压从 0 增加到某个定值, 在停止增加后, 偏振态会继续变化一段时间, 大约在 30 min 后才达到稳定; 相反, 使电压从某个定值减少为 0, 在停止减少后, 偏振态仍会继续变化一段时间。该现象对于低速调制将带来不利影响; 对于高速调制, 平均功率的变化也将引起偏振抖动。

关键词 光纤光学; 光纤器件; 偏振编码通信; 偏振编码器; 稳定性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0906004

Research on Polarization Stability of Lithium Niobate Polarization Encoder

Wang Yixu^{1,2} Wu Chongqing^{1,2} Li Zhengyong^{1,2} Hua Yong³

¹ Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

² Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

³ Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China

Abstract The stability of the polarization encoder is one of the key issues affecting polarization coding communication. The stability of the polarization encoder based on lithium niobate (LN) phase modulator is studied in depth, and is described by time variant vector. The experiment results show that, for the LN phase modulator, the principal state of polarization-dependent loss (PDL) is consistent with the principal state of polarization-dependent phase shift, indicating that PDL can not affect the stability of the polarization state. A “inertia” of polarization rotation is observed in experiment. On the one hand, increasing voltage from 0 to a value, after stopping the increase of voltage, the polarization state can not be stable before about 30 min; on the other hand, decreasing voltage from a value to 0, after stopping the decrease of voltage, the polarization state can not be stable before several minutes too. It can have negative effects on low-speed modulation. For high-speed modulation, the changes of the average power can cause polarization jitter.

Key words fiber optics; optic fiber components; polarization coding communication; polarization encoder; stability

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 060.2330; 060.5060

1 引 言

偏振编码通信是一种新型编码格式的通信, 它

具有天然的功率均衡性, 可大大降低系统中的非线性效应^[1-2]、抑制偏振模色散^[3]、降低误码率^[4]、提

收稿日期: 2014-04-02; 收到修改稿日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61275075, 11274037)、北京市自然科学基金(4132035)

作者简介: 王一旭(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏振编码通信方面的研究。E-mail: 11121834@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn(通信联系人)

高谱效率^[5]等优点,因此偏振编码通信技术是高速光纤通信的重要技术之一。

目前,实现偏振编码技术的方案主要有两种:1)基于半导体光放大器(SOA)的交叉偏振调制^[6];2)基于铌酸锂(LN)相位调制器的偏振编码方案^[7-8]。基于LN相位调制的偏振编码方案又分为两种结构,分别为马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪结构和光纤Sagnac干涉仪结构。基于LN相位调制的M-Z干涉仪结构偏振编码器的基本原理为:在LN的入射端将光信号分为正交的两路线偏振光,使两臂产生一定的相位差,经过合成后,偏振方向发生旋转。由于这种编码器具有结构简单、体积小、便于集成等优点,因而获得了广泛的应用。

偏振编码器在应用中的技术指标很多^[9-12],包括编码速率、消光比、功率均衡性等,而其中偏振稳定性也是一个重要的指标。理论上,基于LN相位调制器的偏振编码器,其偏振态(SOP)应该只取决于驱动电压而不受环境影响。但在实验中发现,其偏振态在长时间(数十分钟)观测中会出现变化。这种变化与环境条件有一定的关系,是一个不稳定因素。当驱动电压改变时,这种变化的速度与驱动电压有一定的关系,电压越高变化越明显。对这种现

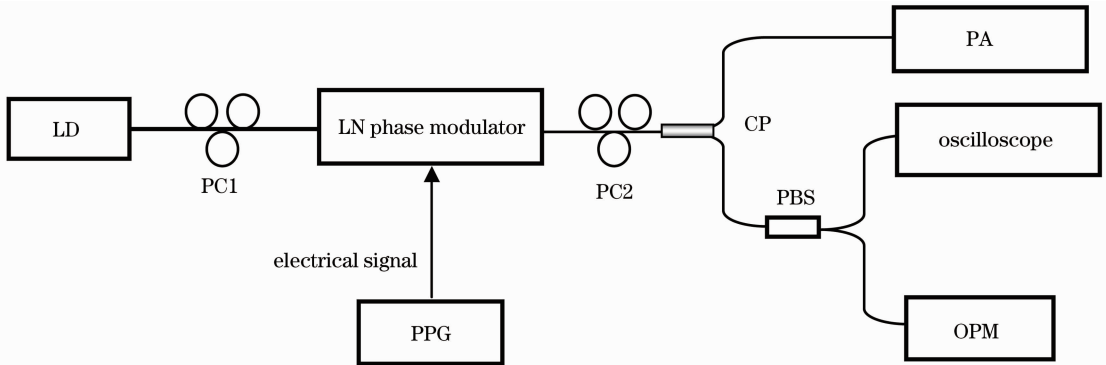
象,尚未见到有相关报道。

本文对基于LN相位调制器的偏振编码器的长时稳定性进行了实验测试,分析影响稳定性的因素,提出了利用时变矢量描述稳定性的方法,并得到了时变矢量的大小与调制电压的关系。

2 偏振编码器原理和稳定性的描述

2.1 偏振编码器的原理

基于LN相位调制器的偏振编码器主要由LN相位调制器和前置偏振控制器(PC)、后置PC构成,如图1所示。光源产生的激光经过前置PC调节到与LN的偏振轴成45°的线偏振光注入到LN中,并在入射端分解为沿x方向和沿y方向的两个分量。LN是双折射晶体,沿y和x方向的两个分量都会被外加调制,但对应的电光系数不同,分别为 γ_{33} 和 γ_{31} ,这将导致两个分量产生相位差,从而使输出合成信号的偏振态发生变化。外加电压由2.5 G/s速率的可编程图样发生器(PPG)产生。在输出端,两个分量的光重新组合注入到光纤中,合成光的偏振方向受控制电压控制,分别为水平或者垂直的偏振方向,从而实现偏振编码的目的。



LD: laser diode; PPG: programmable pattern generator; PC1, PC2: polarization controller; CP: optical coupler; PBS: polarization beam splitter; PA: polarization analyzer; OPM: optical powermeter

图1 实验系统

Fig.1 Experiment setup

LN调制器的输出琼斯矢量 J_{out} 与输入琼斯矢量 J_{in} 的关系由传输矩阵 B 描述,即

$$J_{out} = BJ_{in}, \quad (1)$$

式中

$$B = \begin{Bmatrix} A_x \exp\left(\frac{L}{\lambda} \cdot 2n\pi i\right) \exp[i(\varphi + \varphi_0)] & 0 \\ 0 & A_y \exp\left(\frac{L}{\lambda} \cdot 2n\pi i\right) \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式中 φ 为相位调制器的 x 方向与 y 方向由电压调制引起的附加相移差, $\varphi = \varphi(V)$ 是变化电压的函数, φ_0 是 LN 两偏振方向的初始相移差, L 是 LN 光波导的长度, n 为 LN 的折射率, A_x 与 A_y 分别为表征偏振相关损耗的系数(此处均小于 1)。当不考虑其偏振相关损耗时,有 $A_x = A_y$ 。

假定不考虑强度的变化,只考虑偏振态的变化,则对于任意偏振态的入射偏振光的琼斯矢量为

$$\mathbf{J}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \exp(i\sigma) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

经 LN 后输出偏振态的琼斯矢量为

$$\mathbf{J}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \exp[i(\varphi + \varphi_0 + \sigma)] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

对于 45° 的线偏振光, $\theta = \pi/4, \sigma = 0$,

$$\mathbf{J}_{\text{out}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[i(\varphi(t) + \varphi_0)] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由(3)~(5)式可知,当相位调制器引起的相移 $\varphi + \varphi_0 = 0$ 和 $\varphi + \varphi_0 = \pi$ 时,系统输出 45° 和 135° 的线偏振光,二者偏振态互相正交,功率均衡。经过 45° 的检偏器就可以获得强度调制编码信号。

2.2 时变矢量的概念

为了描述偏振态的不稳定性,需要给出一个定量的概念。对于一个随着时间变化的偏振态,将其表示为

$$\mathbf{S}_{\text{out}}(t) = \mathbf{M}(t)\mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{S}_{in} 是输入光偏振态对应的 Stocks 矢量^[13],假定它是固定不变的。 \mathbf{S}_{out} 是输出光偏振态对应的 Stocks 矢量, $\mathbf{M}(t)$ 是 LN 的密勒矩阵,它既是控制电压的函数,也随时间变化而出现不稳定,因此

$$\mathbf{M}(t) = \mathbf{M}(V, t). \quad (7)$$

为了观察不稳定性,令 V 不变,于是可得

$$\frac{\partial \mathbf{S}_{\text{out}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{M}(V, t)}{\partial t} \mathbf{S}_{\text{in}}. \quad (8)$$

由(6)式可得 $\mathbf{S}_{\text{in}}(t) = \mathbf{M}^{-1}(t)\mathbf{S}_{\text{out}}$,代入(8)式可得

$$\frac{\partial \mathbf{S}_{\text{out}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{M}(V, t)}{\partial t} \mathbf{M}^{-1}(t) \mathbf{S}_{\text{out}}. \quad (9)$$

由于 Stocks 矢量都是在庞加莱球上,所以变化率 $\frac{\partial \mathbf{S}_{\text{out}}}{\partial t}$ 与 \mathbf{S}_{out} 垂直,于是可以得到

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} = \mathbf{T} \times \mathbf{S}, \quad (10)$$

式中 $\mathbf{T} = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \mathbf{M}^{-1}$ 称为时变矢量^[14],它的方向表示 Stocks 矢量在庞加莱球上的旋转轴,它的大小表示 Stocks 矢量的旋转速度。利用时变矢量,可以很好

地描述偏振态的稳定性:当施加于 LN 的电压不变时,时变矢量的幅值越大,说明越不稳定;如果时变矢量的方向也随时间变化,说明存在高阶不稳定性。在 LN 中,由于两个偏振态的改变主要是由两个偏振分量的相位差导致,因此时变矢量的方向基本不变,而大小是判定稳定性的主要标志。

3 实验与测试

3.1 实验系统与偏振相关损耗的影响

实验系统仍然如图 1 所示。测量的基本原理是:LD 发出一窄线宽的连续光,经过 PC1 使其偏振方向与 LN 的两个偏振主轴成 45° ,这个光注入 LN 后,被分解成 x 与 y 两个分量,这两个分量在 LN 中被电信号(直流或者高速电的数据信号)调制,输出信号经过 PC2 后,进入一个耦合器被分成两路,一路送至 PA 观察其偏振态,另一路送至光功率计(OPM)观察功率。

研究偏振编码器的偏振稳定性,首先需要保证系统是稳定的,应排除光源、光纤和偏振控制器对系统偏振态稳定性的影响。将图 1 实验系统中的偏振编码器用光纤代替,用偏振分析仪观察偏振态随时间的变化,实验结果如图 2 所示, s_1, s_2 和 s_3 为 Stocks 矢量的三个分量。由图 2 可知,整个测试系统的偏振态是稳定的。

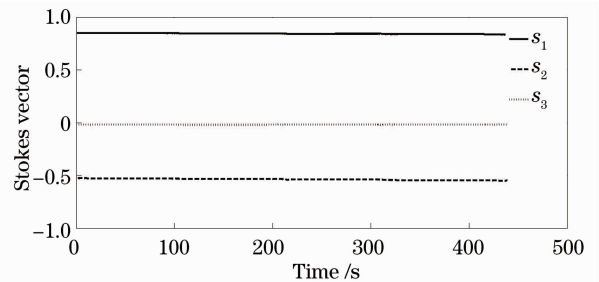


图 2 系统的偏振态稳定性

Fig. 2 Polarization stability of measurement system

其次,还需要考虑偏振相关损耗(PDL)对测量的影响。因为只有当偏振相关损耗主态与偏振相关相移主态相重合, LN 的传输矩阵才能写成(2)式的形式,也就是其副对角线上的值为 0,前面的理论才成立。若偏振相关相移主态与偏振相关损耗主态不一致,其副对角线上的值不为 0,在偏振调制的同时会产生额外的强度调制或者附加偏振调制,所以需要测定这两个主态的一致性。寻找偏振相关相移主态与偏振相关损耗主态的一致性方法可概括为:先调节加在 LN 上的电压,分别找到两个偏振相关相

移主态。这两个主态也分别是最大输出功率与最小输出功率对应的偏振态^[15]。经实验测得,两个偏振相关相移对应的功率分别为 $322 \mu\text{W}$ 和 $229.3 \mu\text{W}$ 。光功率计的最大值与最小值分别为 $325 \mu\text{W}$ 和 $227.5 \mu\text{W}$, 大约有 0.3% 的偏差, 两种偏振主态基本一致。这说明偏振相关损耗的影响可以基本忽略。

3.2 不同直流电压下输出偏振态的稳定性实验

前已确定测试系统的偏振态是稳定的, 偏振相关损耗的影响也已剔除, 如果加在 LN 上的电压也是稳定的, 那么理论上输出偏振态也应当是稳定的。但经过实验观察可知, 输出偏振态不是稳定的, 这说明还存在导致偏振态不稳定的其他因素。

为了清楚地观察这一现象, 首先利用 PC1 将输入偏振态调节为受电压影响很小的正交偏振态(称为 p 态或 s 态)之一, 然后调节 PC2 将它移动到庞加莱球的北极或南极, 这表明偏振主态已经处于北极或南极; 然后再调节 PC1 使庞加莱球上的点移动

到赤道位置, 则表明输入信号为两个正交线偏振态之一。此时改变电压, 发现庞加莱球上的点沿着赤道旋转。理想情况下, 如果停止调节电压, 那么输出偏振态也应当停止旋转。

然而通过实验发现, 此时尽管调制电压停止变化, 输出偏振态仍然会沿赤道的一个方向持续缓慢地转动运动。转动速度随时间增加而减慢, 经过足够长的时间后, 偏振态逐渐稳定。也就是说, 从电压改变到停止改变, 偏振态的变化存在一个“惯性效应”, 不会因电压停止变化而停止。图 3~7 分别为电压从 0 升到 2、4、6、8、10 V 后, 停止升压后对应偏振态的延续变化。图中, 左图是庞加莱球上点的运动, 右图为斯托克斯矢量中 s_1 分量随时间的变化, 观测时间为 200 s。因为点的运动是在赤道上, 所以 $s_3 \approx 0, s_2 \approx \sqrt{1-s_1^2}$, 因此利用 $s_1(t)$ 就可以反映偏振态的变化情况。

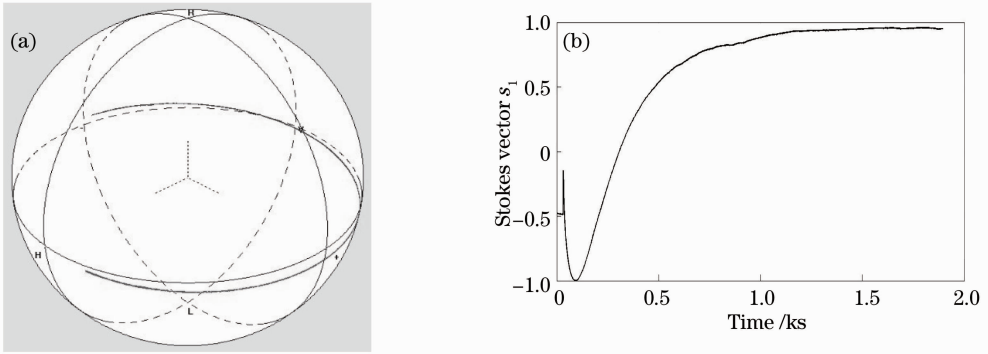


图 3 调制电压为直流 2 V 时(a)庞加莱球轨迹和(b) $s_1(t)$

Fig. 3 (a) Orbit of SOP in poincare sphere and (b) $s_1(t)$ when modulation direct current voltage is 2 V

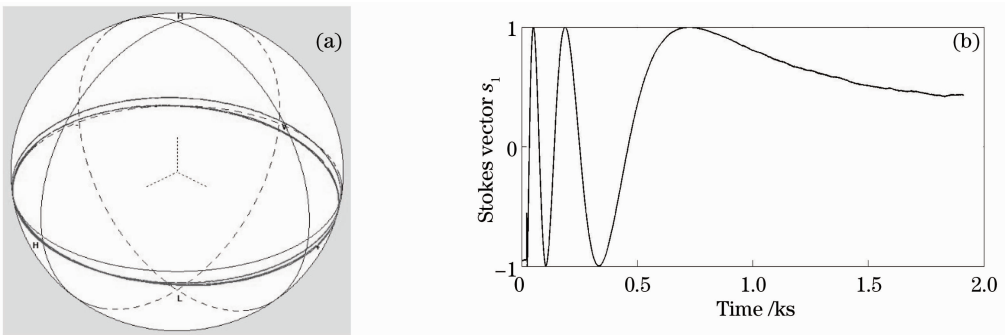


图 4 调制电压为直流 4 V 时(a)庞加莱球轨迹和(b) $s_1(t)$

Fig. 4 (a) Orbit of SOP in poincare sphere and (b) $s_1(t)$ when modulation direct current voltage is 4 V

从图 3~7 可以看出, 直流调制电压越大, 在停止电压变化后, 偏振态在庞加莱球上旋转的速度越快, 旋转角越大, 但总体的不稳定时间大都在千秒(数

十分钟)的数量级上。对于大的直流调制电压, 在刚刚停止加压的时候, 旋转速度是相当大的, 即时变矢量很大。这表明, LN 的工作点不宜频繁地调整。

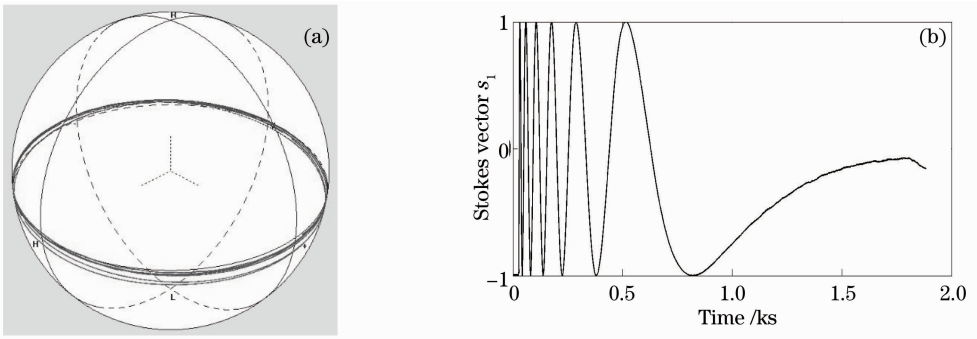


图 5 调制电压为直流 6 V 时(a)庞加莱球轨迹和(b) $s_1(t)$

Fig. 5 (a) Orbit of SOP in poincare sphere and (b) $s_1(t)$ when modulation direct current voltage is 6 V

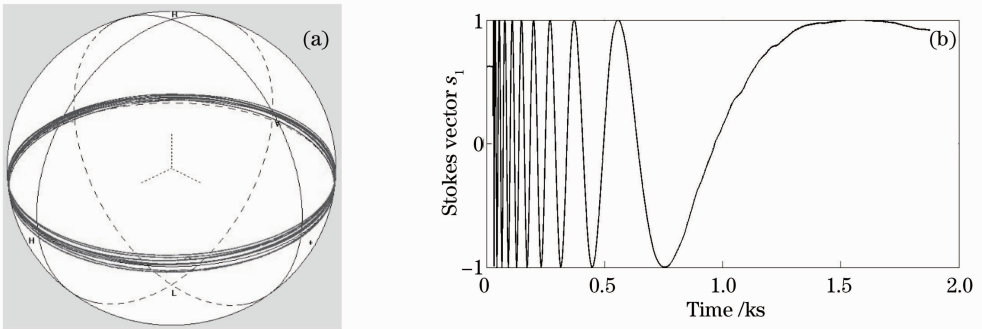


图 6 调制电压为直流 8 V 时(a)庞加莱球轨迹和(b) $s_1(t)$

Fig. 6 (a) Orbit of SOP in poincare sphere and (b) $s_1(t)$ when modulation direct current voltage is 8 V

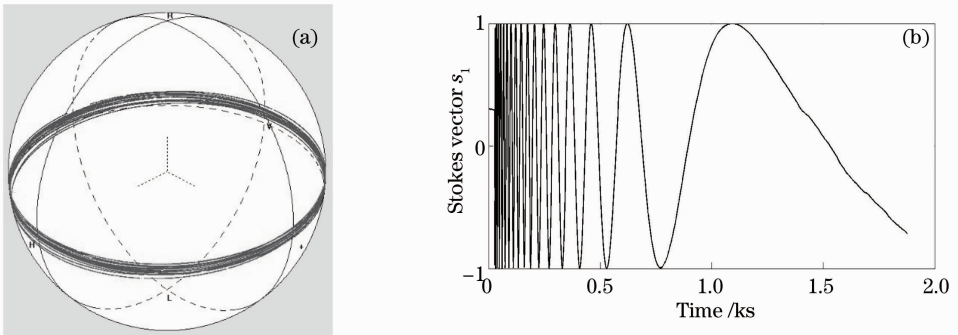


图 7 调制电压为直流 10 V 时(a)庞加莱球轨迹和(b) $s_1(t)$

Fig. 7 (a) Orbit of SOP in poincare sphere and (b) $s_1(t)$ when modulation direct current voltage is 10 V

3.3 高速交流信号下输出偏振态的稳定性实验

用峰峰值为 6 V, 频率为 1 Gb/s 的正弦交流信号取代上述实验中的直流电压, 并使输出光信号通过检偏器, 用示波器观测。调制波形随时间的变化如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 在不同的观测时间, 信号的偏振态发生了明显的改变。根据光信号偏振态随电信号变化的规律, 结合检偏器的方向, 不难由图 8 推断出, 不同观测时间点的高电平(或低电平)所对应光信号的偏振态产生了周期性的变化。在观察时间内, 偏振方向的改变量接近 2π 。在图 8 中可知, 波形的变化规律基本完成了一个周期。峰峰值为 6 V

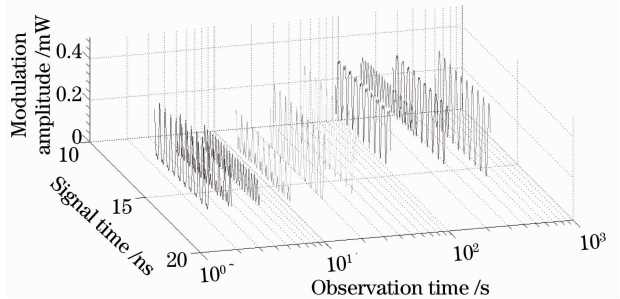


图 8 不同观察时间的偏振编码信号检偏后的输出波形
Fig. 8 Waveform of polarization encoding signals after an analyser at different observation times

的正弦交流信号的电压有效值约为 2 V,因此可用该实验与直流电压为 2 V 时的实验现象进行对比,可以发现两者的变化规律基本吻合。

4 实验结果分析与讨论

在直流电压下 LN 输出偏振态的稳定性实验中,偏振态基本上沿赤道变化,故可认为时变矢量 T 的方向近似不变,而 $|T|$ 的大小逐渐在变小。当 $S(t)$ 处于赤道上时,不难证明 $|T| = \left| \frac{\partial S(t)}{\partial t} \right|$,即旋转轨迹的切向速度。根据不同直流电压下 $S(t)$ 的变化情况,计算可得不同电压下 $|T|$ 随时间变化的情况,如图 9 所示。图 9 中的尖峰是因为电压的快速调节而导致的偏振态的突然变化,之后是电压停

止变化后时变矢量大小随时间的变化。由图 9 可知,大约经过 30 min 后时变矢量才趋于零,偏振态才达到稳定。

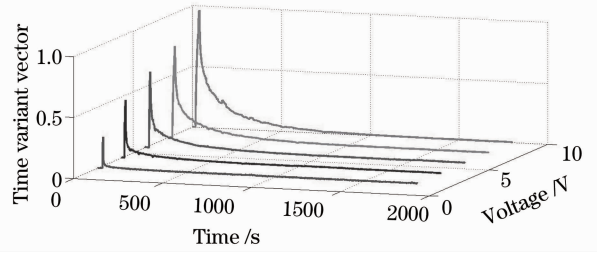


图 9 直流电压为 2~10 V 时时变矢量变化
Fig. 9 Time variant vectors for different direct current voltages from 2 V to 10 V

这样缓慢的变化,究其原因,是由于 LN 调制器内部结构电荷存储效应以及热效应所致。LN 调制器内部如图 10 所示^[16]。

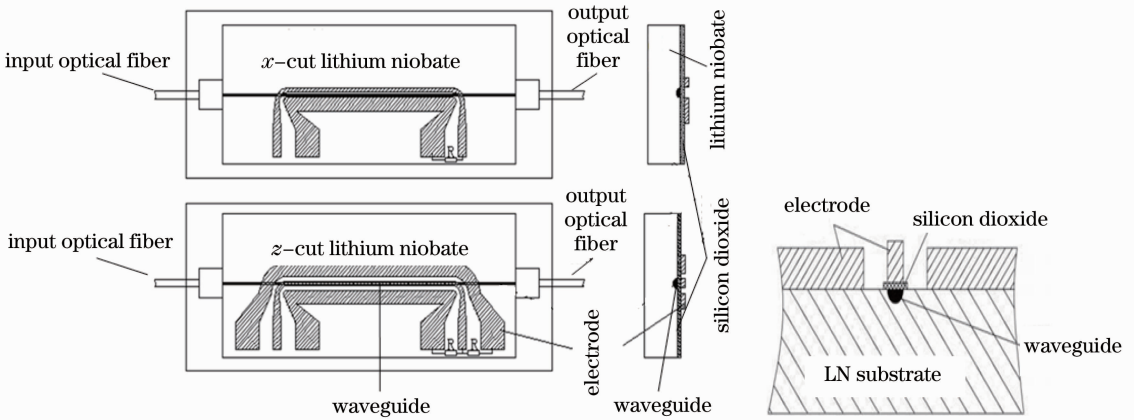


图 10 LN 调制器内部结构(左)与电极部分(右)

Fig. 10 Construction of LN modulator (left) and electrodes (right)

在电极和 LN 衬底之间有一层二氧化硅缓冲层,用来调整共面波导电极的微波有效折射率和特征阻抗,以使微波和光波相速一致及阻抗匹配。在加电调制时,二氧化硅能储存电荷,相当于叠加了一个附加的调制电场;随着二氧化硅缓冲层电荷的缓慢释放,附加电场消失。另外 LN 晶体是热晶体,由于电阻的发热会产生电荷,并积累在晶体表面和二氧化硅晶体中,之后慢慢释放。这些电荷会对波导产生一个附加调制,并且逐渐衰减,为证明这一推论,用热敏电阻观察 LN 的温度变化。记录的温度变化如图 11 所示。

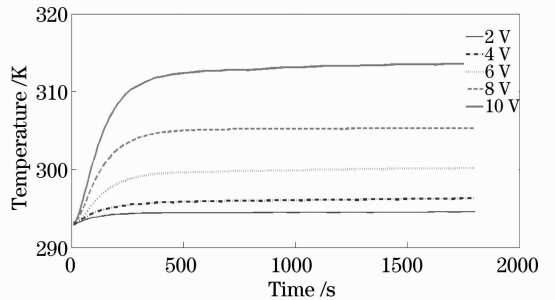


图 11 不同电压情况下温度变化情况
Fig. 11 Temperatures of LN for different voltages

比较图 11 温度变化和图 9 时变矢量的变化规律可以看出,时变矢量趋于零与温度趋于稳定的时间基本吻合。

5 结 论

对基于 LN 相位调制的 M-Z 干涉仪结构偏振编码器的稳定性进行了深入研究,提出了采用时变矢量描述其稳定性,研究了 LN 的偏振相关损耗主

态与偏振相关相移主态的一致性。实验表明,两个主态基本一致,说明 LN 的偏振相关损耗不会影响偏振态的稳定性。同时,在实验中观察到当电压从 0 增加到某个值时,热惯性将导致电压停止变化后偏振态继续变化一段时间;同样,当电压从某个值降到 0 时,热惯性将导致电压停止变化后偏振态继续变化一段时间。对于实验中的 LN 调制器,其稳定时间约在 30 min,这种惯性来自于 LN 调制器二氧化硅缓冲层的电荷存储效应及 LN 晶体的热电效应。这种偏振态旋转的“惯性”,对于低速调制将带来不利影响。对于高速调制,不同的平均功率也将引起偏振抖动。为了解决这一问题,建议将 50 Ω 的匹配电阻置于 LN 之外,并加强散热,以减小热惯性的影响。

参 考 文 献

- 1 Li Zhengyong. High-Speed Polarization Control in Optical Fiber and Polarization Encoding Communication [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. 3-14.
李政勇. 光纤偏振态的高速控制与偏振编码通信[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. 3-14.
- 2 Shi Yan, Zhang Qi, Yu Chongxiu, *et al.*. Label swapping and packet transmission of DPSK-labeled PPM signal in optical label switching [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(8): 080602.
- 3 Weng Xuan, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia, *et al.*. Experimental research of adaptive PMD compensator for 20 Gb/s DQPSK system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 175-179.
翁 轩, 张晓光, 席丽霞, 等. 20 Gb/s 差分四相移键控系统偏振模色散自适应补偿实验研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 175-179.
- 4 Lin Mi, Zhang Jinnan, Yuan Xueguang, *et al.*. A novel electric equalization in 40 Gb/s pol-mux RZ-DQPSK transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100201.
林 密, 张锦南, 袁学光, 等. 40 Gb/s 偏分复用差分四相移键控传输系统中新型电均衡技术的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100201.
- 5 J X Cai, Y Cai, C R Davidson, *et al.*. 100-Gb/s undersea transmission with high spectral efficiency using pre-filtered QPSK modulation format [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(9): 831-836.
- 6 J Zhang, J Wu, C Feng, *et al.*. All-optical logic or gate exploiting nonlinear polarization rotation in a SOA and red-shifted sideband filtering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(1):

33-35.

- 7 Tang Zhilie, Li Ming, Wei Zhengjun, *et al.*. The quantum key distribution system based on polarization states produced by phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2534-2539.
唐志列, 李 铭, 魏正军, 等. 相位-偏振编码的量子保密通信系统的研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(6): 2534-2539.
- 8 Yu Xiangzhi. State of Polarization Encoding Technology Based on LN-MZI [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. 5-8.
余向志. 基于 LN-MZI 的偏振编码技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. 5-8.
- 9 Zhou Muchun, Chen Yanru, Zhao Qi, *et al.*. Study on encoding using LiNbO₃ crystal in laser polarization encoding guidance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 290-293.
周末春, 陈延如, 赵 琦, 等. 激光偏振编码制导中铌酸锂晶体编码技术研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 290-293.
- 10 Richard J Blaikie, Desmond P Taylor, Peter T Gough. Multilevel differential polarization shift keying [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(1): 95-102.
- 11 Zhou Muchun, Chen Yanru, Zhao Qi. Study on encoding using LiNbO₃ crystal in laser polarization encoding guidance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 290-293.
周末春, 陈延如, 赵 琦. 激光偏振编码制导中铌酸锂晶体编码技术研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 290-293.
- 12 Wei Jia, Jing Hongmei, Zhou Jing. One-channel hit-miss transform with zero threshold by polarization encoding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1479-1482.
韦 嘉, 景红梅, 周 静. 利用偏振编码实现取零阈值的单通道击中与否运算 [J]. *光学学报*, 2006, 26(10): 1479-1482.
- 13 E Wolf. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams [J]. *Phys Lett A*, 2003, 312(5-6): 263-267.
- 14 Liu Haitao, Wu Chongqing, Fu Songnian. The unstability of fiber polarization mode dispersion [J]. *Optical Communication Technology*, 2003, 3: 46-48.
刘海涛, 吴重庆, 付松年. 光纤偏振模色散的不稳定性[J]. *光通信技术*, 2003, 3: 46-48.
- 15 Cheng Mu, Wu Chongqing, Zhao Rui, *et al.*. All-optical buffer based on polarization rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1898-1902.
程 木, 吴重庆, 赵 瑞, 等. 基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1898-1902.
- 16 Hua Yong, Cui Jianmin, Lü Min, *et al.*. Study on high-speed LiNbO₃ optical waveguide phase modulator with low half-wave voltage [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(12): 1440-1443.
华 勇, 崔建民, 吕 敏, 等. 低半波电压高速铌酸锂光波导相位调制器研究[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(12): 1440-1443.

栏目编辑: 王晓琰