

一种高速率、高精度的全光纤偏振控制方法*

马海强[†] 李泉跃 汪龙 韦克金 张勇 焦荣珍

(北京邮电大学理学院, 北京 100876)

(2012年9月14日收到; 2012年12月8日收到修改稿)

提出了一种结构简单、高速率、高精度的全光纤偏振控制方法, 并对方案进行了详细的理论分析. 理论和实验结果表明: 本方案可以自动补偿光纤系统由于环境变化使光纤发生形变产生的额外双折射效应, 提高了系统的抗干扰能力. 实验获得了 31 dB 消光比, 此方案有望在实际中得到广泛应用.

关键词: 光纤偏振控制器, 双折射效应, 法拉第旋转镜

PACS: 42.81.-i, 42.81.Wg, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.62.084217

1 引言

光的偏振态作为信息的载体得到越来越广泛的应用, 特别是其成为量子密钥分发得以实现的一种重要途径^[1-3]. 此外在单模光纤与光波导的耦合中, 偏振态匹配也是提高耦合效率的重要方法之一; 光的偏振态在单模光纤传感器、光纤环镜^[4,5]以及光纤激光器^[6,7]中也有着重要的应用. 因此, 光偏振态的控制, 特别是光纤中光偏振态的高精度、高速度的控制方法引起了科研人员和工程人员的重视^[8].

常用的机械式光纤偏振控制器——光纤挤压/缠绕型^[9,10], 主要通过外力扭转光纤使光纤的各个方向受力不均匀, 进而导致光纤的应力双折射效应来改变偏振态, 该方法结构比较简单、容易制作, 同时也存在光纤的物理疲劳、机械结构形变等缺点, 易导致其性能不稳定, 不能实现精确的控制. 此外由于涉及到机械装置, 故其控制速度一般较慢. 机械式偏振控制器多用于实验室研究. 采用手动的粗略调节, 使得调节的精度大大降低, 但它采用在线光纤进行偏振控制, 故其损耗一般很低. 还可利用晶体电光效应特性, 通过调控电压、电流、磁场等因素实现对光偏振态的控制, 例如基于电光晶

体、液晶、磁光材料等光学材料^[11]的相位调制器, 这类相位调制器具有精度高、速率快的特点, 但它需要复杂的控制电路和较高的偏置电压, 结构较为复杂, 成本较高.

上述的偏振控制方法, 随着外界环境如温度和应力的变化都会导致光纤发生形变, 这种形变会引入额外的双折射, 从而导致偏振态发生变化, 这种改变是随机的, 如果不加以控制, 将对系统造成不稳定性, 从而降低了器件的抗干扰能力.

本文提出了一种结构简单、抗干扰性强、易于实现的高速率、高精度的全光纤偏振控制方法. 主光路由光源、四端口光偏振分束/合路器、相位调制器、90°旋转法拉第反射镜连接而成; 四端口光偏振分束/合路器与90°旋转法拉第反射镜的组合消除了光学器件、光纤的双折射效应, 增强了系统的稳定性, 高速率的相位调制器保证了该方法的高精度和高速率.

2 实验原理

高速率、高精度的全光纤偏振控制原理图如图1所示. 一台激光器(LD), 其输出光耦合进四端口偏振分束器(DPBS)的输入端口a, 为叙述方便, 定义DPBS分光面AB反射垂直偏振光 $|v\rangle$, 用 Λ_2

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2010CB23202)、国家自然科学基金(批准号: 10805006, 61178010, 61177085)和中央高校基本科研业务费(批准号: bupt2010zx04)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: hqma@bupt.edu.cn

表示;透射平行态偏振光 $|h\rangle$, 用 Λ_1 表示, Λ_1 透射后由 c 端口到达 90° 旋转法拉第反射镜 (FM_2) 被反射回来, 在被 FM_2 反射回来的同时, 其偏振方向也旋

转 90° 而成为垂直偏振; 再次到达 DPBS 分光面被反射后到 b 端口, 此路定义为参考臂. 在这一过程中, 双折射效应得到了自动补偿.

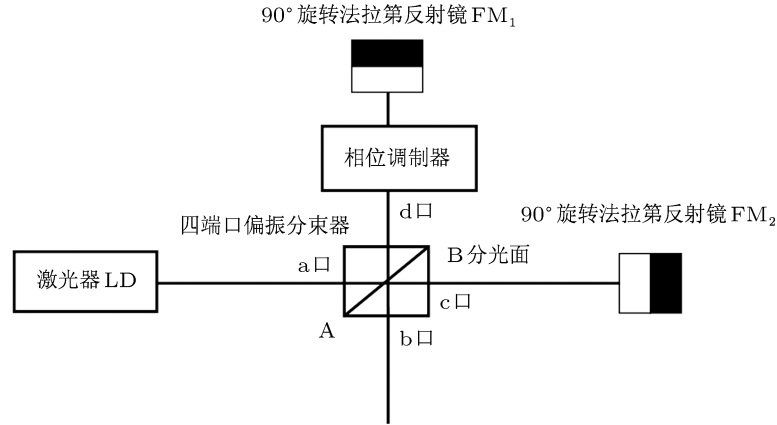


图1 高速率、高精度的全光纤偏振控制原理图

对于任一具有双折射效应的器件, 它的正向琼斯传输矩阵 T , 反向琼斯传输矩阵 T 可表述为 [12]

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(i\theta_o) & 0 \\ 0 & \exp(i\theta_e) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(i\theta_o) & 0 \\ 0 & \exp(i\theta_e) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ 是参考坐标与双折射器件的快慢轴的夹角, θ_o, θ_e 是双折射器件引起的 o 光和 e 光的相位变化.

当前普遍采用的往返一次、偏振方向旋转 90° 的法拉第旋转镜可等价成终端附有一个普通平面反射镜的 45° 法拉第旋转器, 由 (1), (2) 式容易给出终端带有 90° 法拉第旋转镜和双折射器件组成光路的琼斯传输矩阵为

$$\begin{aligned} T &= T \cdot T_{FM} \cdot T \\ &= \exp\{i(\theta_o + \theta_e)\} T_{FM} \\ &= \exp(i\phi) \cdot T_{FM}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\phi = \theta_o + \theta_e$, 从 (3) 式可以看出, 其传输矩阵等价为一个相移因子和法拉第旋转镜传输矩阵的乘积, 与输入光的偏振态、光所经过的路径、传输介质的双折射效应无关, 可从物理上自动消除光路中

各种器件引入的各种双折射效应, 进而实现了系统抗干扰的功能, 增强了系统的稳定性.

Λ_2 通过 PM 到达 FM_1 被反射回来, 在被 FM_1 反射回来的同时其偏振态变为平行偏振, 同时往返通过 PM, FM_1 组成的光路的过程中 PM 把所要调制的相位加到了 Λ_2 脉冲上, 再次到达四端口偏振分束/合路器的分光面并透射后到达 b 端口, 此路定义为控制臂. 此时刻的状态表示为

$$|\Lambda_2\rangle = \exp\{i(\theta + \phi_{\text{相位调制}})\}|h\rangle, \quad (4)$$

其中 θ 是由于控制臂光路引入的相位, $\phi_{\text{相位调制}}$ 是相位调制器所调制的相位.

Λ_1 再次到达 DPBS 的分光面, 进而被反射, 沿着 b 端口输出, 偏振态表示为

$$|\Lambda_1\rangle = \exp(i\theta)|v\rangle, \quad (5)$$

其中 θ 是由于参考臂光纤引入的相位.

调节控制臂和参考臂的光程相等, 那么 Λ_1, Λ_2 同时到达 DPBS 的分光面从 b 端口出来, 根据相互垂直振动的合成规律, Λ_1, Λ_2 就合束为一个偏振方向的光束, 其偏振态 Λ 可表示为

$$\begin{aligned} |\Lambda\rangle &= |\Lambda_1\rangle + |\Lambda_2\rangle \\ &= \exp(i\theta)|v\rangle + \exp\{i(\theta + \phi_{\text{相位调制}})\}|h\rangle \\ &= \begin{bmatrix} \exp\{i(\theta + \phi_{\text{相位调制}})\} \\ \exp(i\theta) \end{bmatrix} \\ &= \exp(i\theta) \begin{bmatrix} \exp(i\phi_{\text{相位调制}}) \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

从上式可以看出输出光的偏振态仅与相位调制器所调制的相位有关, 与所经过的路径完全无关, 也即消除了光路对光的偏振带来的影响, 提高了系统的抗干扰能力.

3 实验结论和分析

为了方便控制参考臂和控制臂等光程, 我们的实验光路较原理图 1 做了改动, 如图 2 所示. 一个激光器发出一恒定偏振态的光脉冲 (以 45° 线偏振态为例), 该光脉冲通过环形器 (CIR) 以后, 入射到 DPBS/合路器分光面 AB, 分成两个光强相等且偏振方向正交的激光脉冲 Λ_1 和 Λ_2 . Λ_1 到达 FM_1 被

反射回来, 偏振变成水平偏振态, 透射通过 DPBS 分光面到达 FM_2 , 而后被 FM_2 反射回来, 偏振变成垂直偏振态, 再次到达 DPBS 分光面而被反射到达 FM_3 , 被 FM_3 反射回来, 偏振变成水平偏振态, 再次到达 DPBS 分光面而透射, 到达环形器的反向输出端. 同理可以分析 Λ_2 与 Λ_1 所走的路径完全一样, 只是先后顺序不一样. 最终 Λ_1 和 Λ_2 同时抵达 DPBS 的分光面而相遇, 并且叠加成一个新的脉冲 Λ , 沿着如入射时相反的方向传输, 而 Λ 的偏振方向就是由 Λ_1 和 Λ_2 的相位差所决定的. 所以, 通过对 PM 的控制可以控制 Λ_1 和 Λ_2 的相位, 从而实现叠加脉冲 Λ 偏振方向的控制.

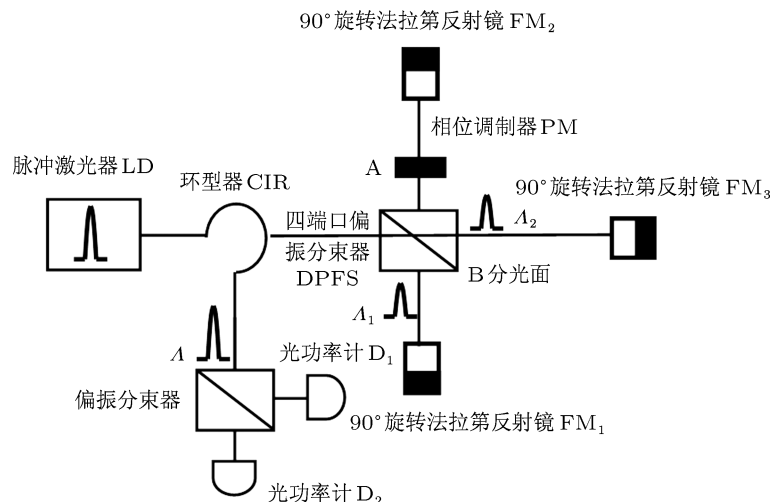


图 2 高速、高精度的全光纤偏振控制的实验光路图

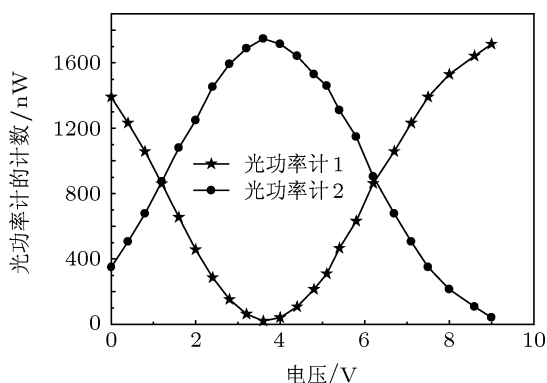


图 3 加在相位调制器上的电压

光脉冲 Λ 输出后接入到一个三端口偏振分束器的公共端 (PBS), PBS 的放置可以根据使用要求摆放成 PBS 与 DPBS 的基矢一致, 也可以不一致. 在我们的实验中两个偏振分束器的基矢是不一致

的. PBS 的两个保偏输出端口分别接光功率计 (用以测量输出光的偏振态在两个正交分量的功率) 检验输出光的偏振态的变化, 两个光功率计的计数结果如图 3 所示.

通过图 3 可以看出, 随着加在相位调制器上电压的变化, 也即 Λ_1 和 Λ_2 的相位差的变化, 输出光的偏振态在两个正交分量上的值也在变化着, 变化也是互补的, 而且消光比可达 31 dB.

4 结论

通过相位调制器调节光的相位可以做到高速率、高精度, 可以消除机械式的偏振光控制方法很难做到的精确、高效、高速. 该方案可以对一恒定偏振态的输入光, 通过电调节高效地产生各种不同偏振态的输出光, 克服了传统偏振控制器由于存在物理疲劳等因素和环境因素的影响, 很容易引入额

外的双折射,造成系统的抗干扰能力差.本方案中四端口偏振分束/合路器与 90° 旋转法拉第反射镜的组合消除了光学器件、光纤的双折射效应,增强

了系统的稳定性.实验上取得了可达31 dB消光比的偏振态控制.

- [1] Chen J, Wu G, Xu L, Gu X, Wu E, Zeng H 2009 *New J. Phys.* **11** 065004
- [2] Xavier G B, Vilela de Faria G, Ferreira da Silva T, Temporão G P, Weid J P 2010 *Quantum. Com.* **36** 125
- [3] Donald S B, William P R 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 340
- [4] Feng S J, Shang L, Mao Q H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4677 (in Chinese) [冯素娟, 尚亮, 毛庆和 2007 物理学报 **56** 4677]
- [5] Wang J, Zheng K, Li J, Liu L S, Chen G X, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7695 (in Chinese) [王静, 郑凯, 李坚, 刘利松, 陈根祥, 简水生 2009 物理学报 **58** 7695]
- [6] Zuo L, Yang A Y, Zhou D W, Sun Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054211 (in Chinese) [左林, 杨爱英, 周大伟, 孙雨南 2012 物理学报 **61** 054211]
- [7] Mao Q H, Lit J W Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1335
- [8] Benetou M I, Thomsen B C, Bayvel P, Dickson W, Zayats A V 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 111109
- [9] Liao Y B 2005 *Polarization Optics* (Beijing: Science Press) p219 (in Chinese) [廖延彪 2005 偏振光学 (北京: 科学出版社) 第 219 页]
- [10] Benkish A 1991 *Opt. Lett.* **19** 687
- [11] Fan F, Guo Z, Bai J J, Wang X H, Chang S J 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 697
- [12] Ma H Q, Jiao R Z, Wang C, Li L X, Wu Z B, 2009 *Chinese Patent* 200910086185 [2009-06-15] (in Chinese) [马海强, 焦荣珍, 王川, 李林霞, 吴张斌 2009 中国专利 [200910086185] [2009-06-15]]

A high-speed fiber polarization controller with high accuracy*

Ma Hai-Qiang[†] Li Quan-Yue Wang Long Wei Ke-Jin
Zhang Yong Jiao Rong-Zhen

(School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 14 September 2012; revised manuscript received 8 December 2012)

Abstract

An all-fiber polarizing controller scheme with high speed and high accuracy is proposed. The stability is tested in detail and the system can compensate for the birefringence effects induced by the deformation of the fiber automatically. The system is simple and has high accuracy and efficiency. A preliminary experiment demonstrates that it reaches an high extinction ratio of 31 dB. The experimental results show that this system has prospects for practical applications.

Keywords: fiber polarization controller, birefringence effects, Faraday rotator mirror

PACS: 42.81.-i, 42.81.Wg, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.62.084217

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB23202), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10805006, 61178010, 61177085), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. bupt2010zx04).

[†] Corresponding author. E-mail: hqma@bupt.edu.cn