

全光纤量子通信系统中的高速偏振控制方案*

李申¹⁾ 马海强²⁾³⁾ 吴令安^{2)†} 翟光杰¹⁾

1) (中国科学院空间科学与应用研究中心空间科学实验技术研究室, 北京 100190)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 光物理重点实验室, 北京 100190)

3) (北京邮电大学理学院, 北京 100876)

(2012年11月20日收到; 2012年12月22日收到修改稿)

偏振控制在光通信中是至关重要的技术, 关系着通信系统的稳定性和误码率. 本文提出一种基于双向 Sagnac 环工作方式的全光纤高速偏振控制方案, 通过调节环中一个光纤电光相位调制器的相位差而精确控制光场偏振方向, 并且实现了单个端口输出各种偏振态, 无需后续耦合操作. 相位控制精度为 10^{-3} rad, 最大消光比可达 30 dB, 工作速率可达 2 GHz. 由于本方案的精度、调制速度和稳定性都很高, 并采用了器件简单、成本低廉的全光纤光路, 易于集成, 在量子保密通信等光通信领域中有很好的应用前景.

关键词: 光纤偏振控制器, Sagnac 环, 量子通信

PACS: 42.79.Ci, 42.25.Ja, 42.81.Gs, 03.67.Hk

DOI: 10.7498/aps.62.084214

1 引言

量子保密通信作为一个新兴的领域是目前国际研究的热点之一, 通信双方将一个真随机数比特序列加载在一串单光子上, 通过量子信道最终建立相同的密钥, 从而实现量子密钥分发. 通常的实验系统分为相位编码和偏振编码两种. 而无论采用哪种编码方案, 准确控制偏振态直接关系着系统的稳定性和误码率. 在自由空间的量子保密通信系统中, 已有很高速的电光相位调制器可用来实现偏振控制. 1992 年 Bennett 等^[1] 在自由空间的量子保密通信演示系统中, 利用泡克耳斯盒实现了光四种偏振态的随机输出. 但在较为成熟的全光纤量子密钥分发系统中, 通常采用光纤偏振控制器来实现对偏振态的调节与纠正. 而传统的光纤偏振控制器件是一种无源器件, 通过对光纤的挤压来控制输出光的偏振方向^[2,3]. 这种机械式的控制方法只可用于一般的静态偏振态的调节, 通常可用于相位编码的全光纤量子密钥分发系统中, 但对于偏振编码的全光纤

量子密钥分发系统^[4], 则需要对光子偏振态进行高速的调制, 而这种机械式的无源光纤偏振控制器就很难达到精确与高效的控制. 其实, 偏振控制的研究几乎是与单模光纤的出现同时开始的, 随着光纤通信的迅速发展, 偏振控制技术一直在不断地更新. 1979 年, Johnson^[5] 首先提出了基于电磁挤压的光纤型偏振控制器. 此后相继出现了电光晶体型^[6]、法拉第旋转型^[7] 以及延迟耦合型^[8] 等各种各样的偏振控制器. 1989 年 Aarts 与 Khoe^[9] 研制了一种新型无端偏振控制器, 解决了偏振控制的复位问题, 为其实用化奠定了基础. 2002 年 Hirabayashi 与 Amano^[10] 研制成功了低压液晶偏振控制器. 2003 年 Yoshino 等^[11] 提出了高速全光纤偏振控制器. 2011 年范飞等^[12] 提出了多功能磁光子晶体太赫兹可调偏振控制器件. 尽管如此, 对于偏振编码的量子密钥分发系统, 仍旧需要高速精准的偏振控制器来实现高效的信息加载. 所以高速、精确、低成本的偏振控制器仍然是偏振控制的主要研究方向. 在量子密钥分发实验系统中, 为了获得高速的信息

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB922904)、国家自然科学基金 (批准号: 60978002, 61178010) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA120102) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wula@aphy.iphy.ac.cn

加载, 通常采用多台光源产生各种偏振光然后再利用偏振分束器将这些不同偏振态的光耦合进同一信道中的方法来替代偏振控制器^[1314]. 此方法虽然解决了偏振控制的精准与高效的问题, 但它的最大缺点是实现成本非常大, 而且控制系统十分复杂, 对控制电路的精确度以及同步性要求十分高. 所以, 基于相位编码偏振检测的量子密钥分发方案^[15], 我们提出一种结构简单、成本低的解决光纤中偏振高速控制的方法. 此方法不需要多个法拉第镜, 并且可以在一个端口直接输出各种偏振态的光, 无需再进行后续耦合操作. 该方法可以对一束恒定的输入光, 通过电调节高效地产生各种不同偏振方向的输出光. 由于该方法采用了电控制, 工作速度取决于电控装置的工作速度, 所以不仅可以工作在高速状态, 而且可以精确地控制输出光的偏振方向, 避免了机械控制带来的弊端.

2 理论原理

偏振光最一般的形态是椭圆偏振光, 线偏振光和圆偏振光都可看作是椭圆偏振光的特例^[16]. 假设光沿 z 轴传播, 那么一般的椭圆偏振光矢量可看作是沿 x 轴 (水平方向) 的线偏振光和沿 y 轴 (垂直方向) 的线偏振光的合成.

$$\begin{cases} E_{Hx} = E_{0x} e^{-i\omega t} e^{i\varphi_x}, & E_{Hy} = 0, \\ E_{Vy} = E_{0y} e^{-i\omega t} e^{i\varphi_y}, & E_{Vx} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{Hx} , E_{Hy} 分别表示水平线偏振光在 x , y 轴上的投影, E_{Vx} , E_{Vy} 分别表示垂直线偏振光在 x , y 轴上的投影, E_{0x} , E_{0y} 分别表示水平和垂直偏振光的振幅, ω 为光的圆频率, φ_x , φ_y 分别为水平和垂直线偏振光的相位.

略去公因子 $e^{-i\omega t}$, 则此椭圆偏振光矢量可用列矩阵表示为

$$E = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

提取公共因子可得到更简洁的形式:

$$\begin{aligned} E &= E_{0x} e^{i\varphi_x} \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{i(\varphi_y - \varphi_x)} \end{pmatrix} \\ &= E_{0x} e^{i\varphi_x} \begin{pmatrix} 1 \\ E_0 e^{i\varphi} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $E_0 = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}$, $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$.

由 (3) 式可见, 只要通过适当地改变相位差 φ 和振幅比 E_0 就可以获得一系列我们想要得到的偏振光.

在量子密钥分发的众多协议中, Bennett 与 Brassard 在 1984 年提出的通信协议 (简称 BB84 协议)^[17] 被认为是最为经典的协议, 它的安全性基于量子力学的基本原理, 在理论上已被人们证实. 其协议的具体操作中需要高速地随机发送和检测属于两组共轭基的偏振光, 一组是线偏振的, 一组是圆偏振的, 共 4 种偏振态的光子^[18]. 在本文提出的偏振控制方案中, 可令振幅比为 $E_0 = 1$, 相位调制器分别加载 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 这四种相位所对应的电压, 即可以分别产生 45° 线偏振光, 右旋圆偏振光, 135° 线偏振光和左旋圆偏振光.

3 实验装置

实验光路如图 1 所示.

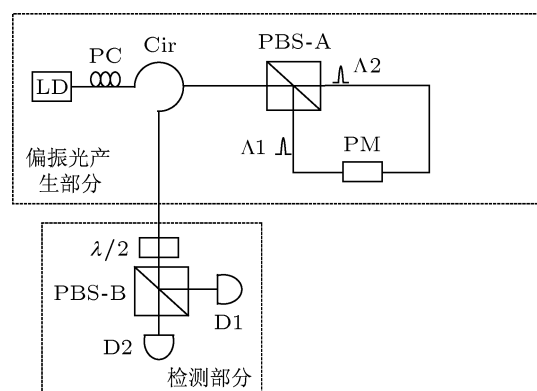


图 1 偏振控制方案实验光路图, LD, 脉冲激光器; PC, 偏振控制器; Cir, 环形器; PBS-A, PBS-B, 偏振分束器; PM, 相位调制器; $\lambda/2$, 半波片; D1, D2, 光功率计

3.1 偏振光的产生

在实验系统中, 由脉冲激光器 (advanced laser diode systems, PIL131DFB-SM) 产生一恒定偏振态的激光脉冲, 其波长为 1310 nm, 脉宽 20 ps, 重复频率 1 MHz. 利用传统的光纤线圈式结构偏振控制器 PC 将激光脉冲转为 45° 的偏振方向, 光通过环形器 Cir 以后, 由偏振分束器 PBS-A 分成两束强度相等的偏振方向正交的激光脉冲 $\Lambda 1$ 和 $\Lambda 2$. 为方便起见, 定义前者为垂直偏振方向, 后者为平行偏振方向. 这两束光经过传播方向相反但距离相等的光

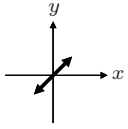
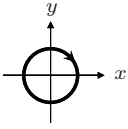
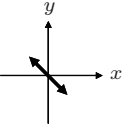
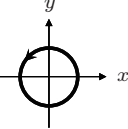
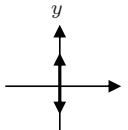
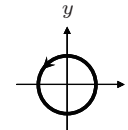
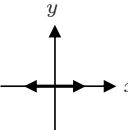
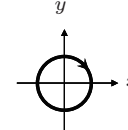
程后,在 PBS-A 处叠加,形成一个双向 Sagnac 环.在这个过程中,相位调制器 PM 会对垂直偏振方向的激光脉冲 $\Delta 1$ 进行相位调制.所采用的电光相位调制器为重庆中国电子科技集团公司第四十四研究所生产,工作于单线偏振状态,器件的输入、输出均用保偏光纤.我们自制的相位驱动电路,其半波电压约为 4.2 V,选择 0, 2.1, 4.2, 6.3 V 电压可分别实现 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 的相位调制,调制频率为 1 MHz,最高调制速率可达 2 GHz,精度为 10^{-3} rad.由 (3) 式可知,在 PBS-A 处两束光叠加后的结果取决于两束光的相位差,即 PM 的调制相位.叠加产

生的光脉冲经过环形器 Cir 输出.

3.2 生成偏振光的检测

产生的偏振光用半波片、偏振分束器 PBS-B 和光功率计 D1 和 D2 进行测量.半波片的作用是将光的偏振方向旋转 45° .如表 1 所示,不同相位差产生的不同方向的偏振光,经过半波片后,偏振方向的变化导致通过偏振分束器 PBS-B 后,在光功率计测量的结果不同.光功率计 D1 和 D2 两行表示所测得的光强的百分比.

表1 不同偏振光的测量结果

相位差 φ	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
偏振态				
	45° 线偏振光	右旋圆偏振光	135° 线偏振光	左旋圆偏振光
经过半波片后				
	90° 线偏振光	左旋圆偏振光	180° 线偏振光	右旋圆偏振光
D1/%	100	50	0	50
D2/%	0	50	100	50

从表 1 可以看出系统产生的不同线偏振态的光可以通过 D1 和 D2 的计数不同反映出来.

4 实验结果

生成偏振光的检测结果如图 2 所示.从图 2 中可以看出,在不同的调制电压下对应于不同的偏振光的输出.当相位调制器加载 4.2 V 的电压时,会有 135° 的线偏振光从 Sagnac 环输出.到了检测系统的半波片后偏振态会旋转 45° ,变为水平的线偏振光,最后将全部透过偏振分束器由 D2 探测,D1 将不会探测到任何光的输出.从图中可以看出,当 D1 输出的光功率为 0, D2 输出的光功率最大时,对应的相位调制器的调制电压值恰好是 4.2 V,理论与

实验符合得非常好.但由于检偏光路中两个光功率计 D1, D2 的探测效率不同以及偏振分束器 PBS-B 的两个输出端口与光功率计的耦合效率的差异,导致图中 D1 光功率的最大值与 D2 光功率的最大值不同.图 2 中 D2 探测到的最大值为 15.00 nW,而此时 D1 的读数为 0,即光强已小于功率计的探测灵敏度.若按功率计灵敏度为 0.01 nW 估算,则消光比为 $-10 \times \lg(0.01/15) = 31.76$ dB.但实验中所用的偏振分束器 PBS-A 的消光比为 30 dB,它决定了系统所产生偏振光的最大消光比.根据分析,实验误差是系统中各器件以及光纤对光的衰减和探测器的误差所引起的.综合考虑,此系统生成偏振光的最大消光比可达 30 dB.

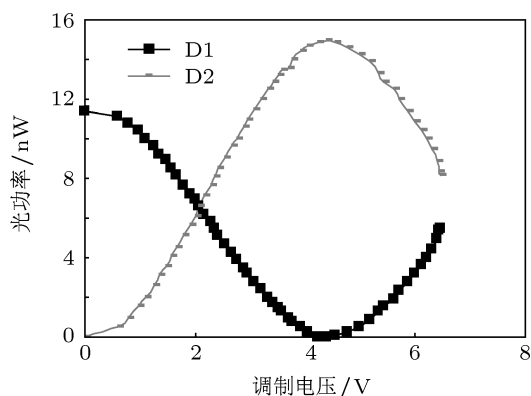


图2 生成偏振光的检测结果

将此偏振控制方案应用于基于 BB84 协议的偏振编码的量子密钥分发系统中时,只需要将相位差分别调制到 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$, 即可以分别产生 45° 线偏振光、右旋圆偏振光、 135° 线偏振光和左旋圆偏振光. 此方案的偏振控制速率完全取决于相位调制器的工作频率. 目前, 市场上商用的相位调制器的工作频率可达 40 GHz, 所以此方案最快的偏

振控制速率可达到 40 GHz. 本文中的实验只是进行一个原理性的验证. 由于受限于实验室所使用的相位调制器的工作频率, 本文的方案演示只可达到 2 GHz, 但这已能完全满足目前基于偏振编码的量子密钥分发系统中所需的偏振控制速率.

5 结论

本文提出的全光纤的偏振控制方法, 采用的是 Sagnac 环中加电光相位调制的工作方式, 通过不同的相位调制而精确输出各种偏振光, 并且实现了单个端口直接输出各种偏振态的光, 无需后续耦合操作. 其光路简单, 易于调节, 所需器件少, 系统稳定性极高. 由于本方案是通过电控相位调制器的方法来实现不同的偏振光的输出, 所以系统可以工作在很高的频率下, 无论从偏振控制的精准度上还是控制速率上均可满足量子通信系统的要求. 此外, 由于采用全光纤的光路系统, 将来可通过集成光学技术实现微小尺寸的封装, 成本低廉.

- [1] Bennett C H, Bessette F, Brassard G, Salvail L, Smolin J 1992 *J. Cryptology* **5** 3
- [2] Li H W, Wang S, Huang J Z, Chen W, Yin Z Q, Li F Y, Zhou Z, Liu D, Zhang Y, Guo G C, Bao W S, Han Z F 2011 *Phys. Rev. A* **84** 062308
- [3] Zhao H, Ma H Q, Li Y L, Wu L A 2005 *Acta Sin. Quantum Opt.* **11** 2 (in Chinese) [赵环, 马海强, 李亚玲, 吴令安 2005 量子光学学报 **11** 2]
- [4] Gordon K J, Fernandez V, Townsend P D, Buller G S 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 900
- [5] Johnson M 1979 *Appl. Opt.* **18** 1288
- [6] Kidoh Y, Suematsu Y, Furuya K 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 991
- [7] Okoshi T, Cheng Y H, Kikuchi K 1985 *Electron. Lett.* **21** 787
- [8] Liu D M, Huang D X, Nie G 1993 *Acta Opt. Sin.* **13** 1120 (in Chinese) [刘德明, 黄德修, 聂刚 1993 光学学报 **13** 1120]
- [9] Aarts W H J, Khoe G D 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 1033
- [10] Hirabayashi K, Amano C 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 504
- [11] Yoshino T, Yokota M, Kenmochi T 2003 *Electron. Lett.* **39** 1800
- [12] Fan F, Guo Z, Bai J J, Wang X H, Chang S J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084219 (in Chinese) [范飞, 郭展, 白晋军, 王湘晖, 常胜江 2011 物理学报 **60** 084219]
- [13] Liu Y, Chen T Y, Wang J, Cai W Q, Wan X, Chen L K, Wang J H, Liu S B, Liang H, Yang L, Peng C Z, Chen K, Chen Z B, Pan J W 2010 *Opt. Express* **18** 8587
- [14] Shao J, Wu L A 1995 *Acta Sin. Quantum Opt.* **1** 41 (in Chinese) [邵进, 吴令安 1995 量子光学学报 **1** 41]
- [15] Ma H Q, Zhao J L, Wu L A 2007 *Opt. Lett.* **32** 698
- [16] Yao Q J 2002 *Optical Tutorial* (Beijing: Higher Education Press) p362 (in Chinese) [姚启钧 2002 光学教程 (北京: 高等教育出版社) 第 362 页]
- [17] Bennett C H, Brassard G 1984 *Proc. IEEE Internat. Conf. on Computers Bangalore, India, December 10-19 1984*, p175
- [18] Wu L A 1998 *Physics* **27** 544 (in Chinese) [吴令安 1998 物理 **27** 544]

High-speed polarization controller for all-fiber quantum communication systems*

Li Shen¹⁾ Ma Hai-Qiang²⁾³⁾ Wu Ling-An^{2)†} Zhai Guang-Jie¹⁾

1) (*Laboratory of Space Science Experiment Technology, Center for Space Science and Applied Research,*

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (*College of Physics, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(Received 20 November 2012; revised manuscript received 22 December 2012)

Abstract

Polarization control is of vital importance in optical communications, which can affect the stability and bit error rate of a system. We demonstrate an all-fiber high-speed polarization control scheme based on a bidirectional Sagnac ring. The polarization direction can be accurately controlled by adjusting the phase difference of an electro-optic fiber phase modulator in the ring, meanwhile it is realized that only a single beam port outputs different polarization states. The phase can be adjusted accurately to 10^{-3} rad, giving an extinction ratio as high as 30 dB, and the modulation speed can reach 2 GHz. The system has excellent stability, and as the optical circuit consists of simple, low cost components which can be easily integrated, there are good prospects for its application in quantum cryptography and other optical communications fields.

Keywords: optical fiber polarization controller, Sagnac ring, quantum communications

PACS: 42.79.Ci, 42.25.Ja, 42.81.Gs, 03.67.Hk

DOI: 10.7498/aps.62.084214

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB922904), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978002, 61178010), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA20102).

† Corresponding author. E-mail: wula@aphy.iphy.ac.cn