

激光与光电子学进展

任意偏振光保偏的声光衍射效率增强系统的研究

毕然¹, 陈力荣^{1,2*}, 李晋鹏¹, 宋敏毓¹, 李卫^{1,2}

¹山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

²山西大学电子信息工程系, 山西 太原 030013

摘要 随着激光技术及量子通信技术的不断发展,声光调制器已经成为多个领域的重要器件。衍射效率和任意偏振光偏振保持能力成为声光调制器的重要指标。通过对声光调制器的衍射效率进行理论分析和实验研究,提出了提升声光衍射效率的理论方法,并设计了一种任意偏振光可偏振保持的正反馈声光调制器系统。经实验验证,该声光调制系统能显著提高声光调制器的衍射效率,且在量子通信领域中可保证任意偏振光的保偏传输。研究结果为光纤耦合声光调制器以及基于声光调制器的量子器件的研究提供了参考。

关键词 光学器件; 声光调制; 量子通信; 任意偏振光; 偏振保持

中图分类号 TN202 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0123002

Acousto-Optic Diffraction Efficiency Enhancement System for Polarization Maintaining of Arbitrarily Polarized Light

Bi Ran¹, Chen Lirong^{1,2*}, Li Jinpeng¹, Song Minyu¹, Li Wei^{1,2}

¹College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²Electronic Information Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030013, China

Abstract With the development of laser technology and quantum communication technology, an acousto-optic modulator has become an important device in many fields. The diffraction efficiency and polarization maintaining ability are important indexes of an acousto-optic modulator. In this paper, through the theoretical and experimental investigation of the diffraction efficiency of an acousto-optic modulator, we propose a theoretical method to improve the acousto-optic diffraction efficiency and design a positive feedback acousto-optic modulation system, which can make the polarization of any arbitrarily polarized light maintained. The experimental results show that this acousto-optic modulation system can significantly enhance the diffraction efficiency of the acousto-optic modulator and guarantee the polarization maintaining of any arbitrarily polarized light during propagation in the field of quantum communications. The research results provide a reference for the research of optical fiber coupled acousto-optic modulators and quantum devices based on acousto-optic modulators.

Key words optical devices; acousto-optic modulation; quantum communication; arbitrarily polarized light; polarization maintaining

OCIS codes 230.1040; 270.5565; 120.5410

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-05-05; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61805133, 11804206)

*E-mail: clr@sxu.edu.cn

1 引言

随着激光技术的发展,声光调制器成为了多个领域的关键器件,而量子通信领域涉及的声光器件,不仅可用作光开关和光路由^[1],还是量子通信的关键器件^[2-3]。目前,国外研制的声光调制器的光学损耗高达 20%~30%。国内从事光电声光器件研究的单位有:主要从事声光晶体声光器件研究的中国电子科技集团公司第二十六研究所,主要研究声光晶体材料和压电换能器的赣南师范学院和主要从事基础理论研究的北京工业大学。大多数研究是通过设计声光器件的结构来获得更高的衍射效率。常用的保偏光纤耦合声光调制器只能进行单一偏振光的偏振保持。而量子通信实验中所用到的声光调制器不仅需要具有低光学损耗、高消光比和快的开关速度,还需要能够匹配原子波段(如 795 nm)、进行相位补偿且不降低纠缠度。利用正反馈回路等外部技术提高声光调制器的衍射效率及进行任意偏振光的偏振保持等研究鲜有报道。本文通过对声光调制器衍射效率的理论分析,找到现阶段影响衍射效率的主要因素,并设计了有正反馈回路的任意偏振光偏振保持的声光调制系统。所设计的正反馈系统不仅可应用在声光调制器衍射效率要求较高的装置中,还适用于对任意偏振光的偏振保持有要求的器件中。在量子通信实验中,可用于单光子量级的纠缠开关及纠缠采集等研究中。

2 理论分析

2.1 声光调制器的工作原理

声光调制器的结构如图 1 所示。其工作原理是通过把射频调制功率信号加载到压电换能器上,压电换能器通过压电效应将电信号转换为超声信号并传入声光介质中,超声波引起声光介质的折射率发生周期性的变化,形成一个折射率光栅。当光束通过该光栅时会产生衍射光,相对于入射光,光的传播方向、强度、偏振状态、相位和频率都可能发生变化,从而实现了对光信号参数的调控。

2.2 布拉格衍射的效率理论分析

图 2 为布拉格衍射图。当超声波频率较高,声光相互作用长度较长,入射光线斜入射,且入射角 θ_i 满足 $\sin \theta_i = \sin \theta_B = \frac{m\lambda}{2\lambda_s}$ ($m = \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,可产生衍射极大,即产生了布拉格衍射。其中 λ 为光波长, λ_s 为声波波长,此时 θ_B 称为布拉格角。由

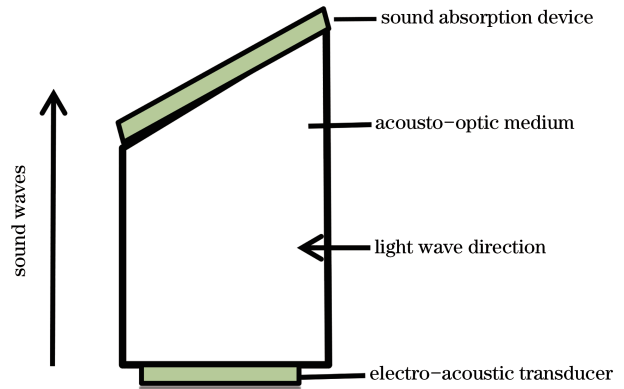


图 1 声光调制器结构图

Fig. 1 Structural diagram of acousto-optic modulator

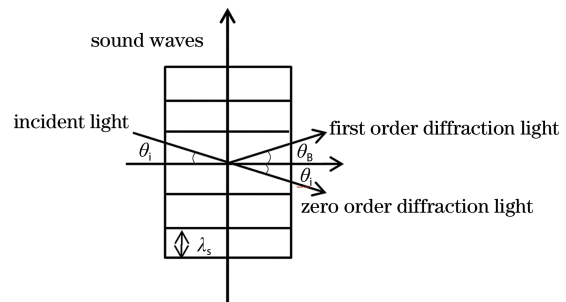


图 2 布拉格声光衍射图

Fig. 2 Bragg acousto-optic diffraction pattern

于声光相互作用长度较大,光栅变成三维空间相位光栅,除 0 级和 1 级衍射光外,其他各级衍射光强度非常小,故可仅考虑 0 级和 1 级衍射^[4]。若能合理选择参数,使超声场足够强,则入射光能量可几乎全部转移到 1 级衍射上,从而光束能量可以得到充分利用,因此声光器件一般都采用布拉格衍射。

布拉格衍射的一级衍射光作为输出是至关重要的,衍射效率 η_s 是一级衍射光强度 I_1 与入射光强度 I_i 之比,其表达式为

$$\eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{L}{\lambda} \times \sqrt{\frac{L}{H} M_2 P_s} \right), \quad (1)$$

式中: L 、 H 分别为换能器的长度和宽度; M_2 是声光介质的品质因数,由介质本身所决定; P_s 为电声换能器发出的超声波的功率。由(1)式看出,可以通过以下几点来提高声光调制器的衍射效率^[5]。

1) 选择品质因数较好的声光介质作为介质,在超声功率较小的情况下可获得相对较高的衍射效率。声光调制器在高衍射效率情况下需具有高的调制速度,即声光相互作用介质需同时有高的 M_2 和高的声速。通过比较常用的声光介质材料的性能参数,发现氧化碲材料是最好的选择^[6-7]。

2) 将电声换能器的截面设计得长而窄。但考虑到工艺成本和声光作用时声、光束发散角匹配的问题, L 不能太大。 H 需要与驱动电源的输出阻抗相匹配, 因此 L 、 H 的设计需要综合考虑。

3) 在自身特性参数确定后, 考虑超声波功率对衍射效率的影响, 图 3 所示为衍射效率 η_s 随 P_s 的变化关系图^[8], 其中 f_m 为光波的频率。可以得知, 当 P_s 为某一值时, η_s 达到最大值, 在这特定值之前, 两个变量呈线性关系。为了使超声功率在线性区对衍射光进行调控, 加入了超声偏置 P_{s0} 。因此可以通过增加超声功率 P_s 来使衍射效率 η_s 获得较高的数值, 同时需要注意的是, 超声功率过高也会损坏换能器并不利于驱动电路的设计。

除此之外, 在衍射过程中能量损耗也会影响衍射效率。首先声光介质晶体本身的透过率是一个影响因素。其次考虑声光互作用时的能量损耗, 如果光束发散角大于声束发散角, 激光光束超出声场范围的部分未能参与衍射, 衍射效率降低。因此要考虑声束和光束的匹配度^[9]。

2.3 正反馈的声光调制系统

本实验使用了大量的低衍射效率的声光调制器, 这不利于纠缠光子对的产生。在声光调制器自身特性参数已经确定的前提下, 考虑通过其他方法来提高声光调制器的衍射效率。

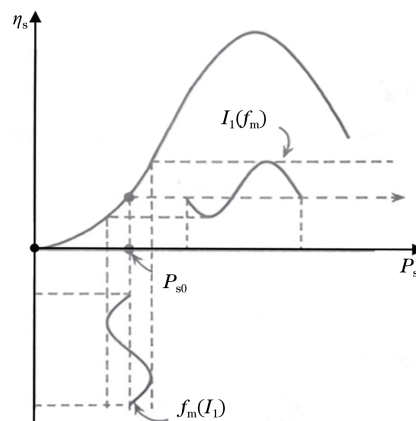


图 3 衍射效率和超声功率的关系

Fig. 3 Relationship between diffraction efficiency and ultrasonic power

图 4 为测量声光调制器衍射效率的光路图。激光器射出的激光光束先通过一个光隔离器(OI)来消除光反馈, 后经过半波片(HWP)和偏振分束棱镜(PBS)分为两束, 其中反射光进入饱和吸收光路(SAS)中来监视激光器的状态, 透射光经透镜聚焦后入射到声光调制器内^[10]。加入超声信号, 微调声光调制器固定架的旋钮, 使得 1 级衍射光信号强度最大。利用功率计测得的声光调制器输入输出的光功率, 即可算出声光调制器的衍射效率。经多次测量可知, 所使用的声光调制器的衍射效率可以达到 80% 左右。

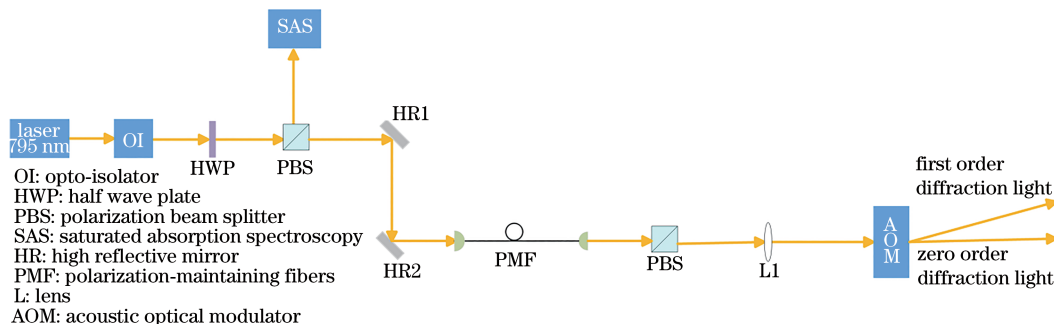


图 4 测量声光调制器衍射效率的光路图

Fig. 4 Optical path for measuring diffraction efficiency of acousto-optic modulator

布拉格衍射的 0 级衍射光强 I_0 和 1 级衍射光强 I_1 的表达式分别为

$$I_0 = I_i \cos^2\left(\frac{\nu}{2}\right), \quad (2)$$

$$I_1 = I_i \sin^2\left(\frac{\nu}{2}\right), \quad (3)$$

式中: ν 是光波穿过超声场时附加的相位延迟。那么衍射效率可以写为

$$\eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\nu}{2}\right). \quad (4)$$

为了进一步提高声光调制器的衍射效率, 再次利用 0 级衍射光, 0 级衍射光相对于 1 级衍射光是无用输出。反馈回路使得 0 级衍射光再次入射到声光调制器内进行二次衍射, 从而能够得到新的 1 级衍射光。那么经过反馈后 1 级衍射光总效率 η'_s 为

$$\eta'_s = \frac{I_i \sin^2\left(\frac{\nu}{2}\right) + I_i \cos^2\left(\frac{\nu}{2}\right) \eta_s}{I_i} > \eta_s, \quad (5)$$

可以看出此时的衍射效率得到提高。

图 5 是利用正反馈的方法来提提高声光调制器衍射效率的光路图。声光调制器输出的 0 级衍射光经 A、B、C、D 四个高反镜后与声光调制器的入射光近似平行, 这些光再次进入声光调制器进行第二次衍射。由于反馈回来的入射光束在入射到声光介质

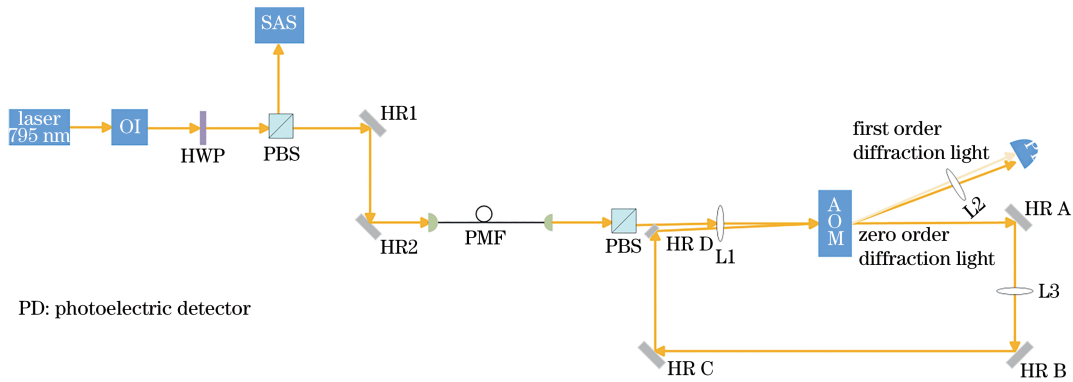


图 5 利用正反馈提高声光调制器衍射效率的光路图

Fig. 5 Optical path for enhancing diffraction efficiency of acousto-optic modulator by using positive feedback

采用该方法设计光纤器件, 正反馈后的两次 1 级衍射光位置有偏移, 光纤耦合时器件衍射效率降低, 且光纤对接两束光的效率也会降低, 可尝试利用纤芯渐变光纤及多模的光纤合束器来进行光的耦合。

2.4 任意偏振光的偏振保持理论

光束的偏振态用三角函数表示为

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta, \quad (6)$$

式中: E_x, E_y 为电矢量 E 的 x, y 分量; E_{0x}, E_{0y} 为电矢量分量的振幅; δ 为电矢量分量之间的相位差, 其中线偏振光 ($\delta=0^\circ$) 和圆偏振光 ($\delta=90^\circ, E_{0x} = E_{0y}$) 是椭圆偏振光的特例。

本实验所选用的声光调制器的声光介质是 TeO_2 晶体, 该晶体属于四方晶体系的单轴晶体。单轴晶体在任意光波矢方向上有两个偏振方向互相垂直的本征模式, 对应 e 光和 o 光。考虑入射光为线偏振光, 当其偏振方向与晶体本征模式偏振方向

时很难与原入射光保持平行, 声光调制器第二次输出的 1 级衍射光的位置和强度发生变化。为了后续更方便地将两次 1 级衍射光进行耦合并获得更高的第二次 1 级衍射光的衍射效率, 在这一反馈过程中, 需反复不断地调节 C、D 反射镜的角度, 使得 0 级反馈光所对应的 1 级衍射光的位置与第一次 1 级衍射光的位置较合适并且强度相对较大, 同时为了得到较高的二次衍射功率并不影响光脉冲的采集, 我们将环路反馈长度设置为 1 m。

不同时, 将其分解到两个本征模式上并进行同向传播。由于此时 e 光和 o 光的折射率不相同, 两束光分量具有不同的传播速度, 产生相位差 δ , 从而在晶体出射面上得到与光程有关的椭圆偏振光。加入超声场后, 晶体材料的折射率椭球的主轴方向相比于正常情况不会发生变化, 只是折射率大小在主轴方向上被压缩, 因此当入射线偏光与晶体本征模式的偏振方向不同时, 声光调制器的出射衍射光偏振态与入射偏振光的偏振态不一致^[11]。研究者也曾对声光调制器的偏振特性进行了实验研究, 并证明了衍射光的偏振态发生了改变, 同时指出衍射光大多数情况属于椭圆偏振光^[12]。

出射衍射光为椭圆偏振光, 这是因为电矢量分量之间产生了相位差, 这里用一组由四分之一波片-二分之一波片-四分之一波片构成的波片组来进行补偿。

对于任意角度摆放的四分之一波片:

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta' & -\sin\theta' \\ \sin\theta' & \cos\theta' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta' + i\sin^2\theta' & (1-i)\sin\theta'\cos\theta' \\ (1-i)\sin\theta'\cos\theta' & \sin^2\theta' + i\cos^2\theta' \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: A 为任意角度摆放的四分之一波片的琼斯矩阵; θ' 为四分之一波片快轴与 x 轴的夹角。

对于任意角度摆放的二分之一波片:

$$B(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - \sin^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ 2\sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: B 为任意角度摆放的二分之一波片的琼斯矩阵; θ 为二分之一波片快轴与 x 轴的夹角。

如果偏振光初态为 $\begin{bmatrix} \exp(if) \\ 1 \end{bmatrix}$, 那么通过相位补偿波片组补偿后, 琼斯矩阵为

$$A\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot B(\theta) \cdot A\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \begin{bmatrix} \exp(if) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(i(f+4\theta)) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: f 为偏振光的相位延迟。由此可知, 可以通过改变二分之一波片的角度 θ 来补偿任意相位差。

3 实验结果

首先, 对声光衍射效率增强系统的衍射效率进行了测量。如图 5 所示, 在透镜 L1 前用功率计测得入射光的入射功率。无反馈时, 在透镜 L2 后测得 1 级衍射功率。此时, 我们得到未加反馈时的 1 级衍射效率。将 0 级衍射光反馈回声光调制器再次进行测量, 在透镜 L2 后可测得第一次和第二次 1 级衍射光的总功率, 从而得到加入正反馈后的 1 级衍射效率。表 1 是选用三个不同声光调制器进行实验测量

得到的数据, 可以看出, 在加入正反馈后, 声光调制器的衍射效率得到了显著提高。而 0 级衍射光在反馈过程中会有一部分不可忽略的损耗。如果减小这一损耗, 系统的衍射效率可以继续提高。

随后, 我们增加了声光衍射效率增强系统的偏振保持功能。在加入相位补偿模块后, 实验装置图如图 6 所示。HWP1、HWP2、QWP1、HWP3 和 QWP2 为偏振保持系统的固定装置, HWP4、HWP5、QWP3 和 QWP4 为偏振保持系统的检验波片。在未放置检验波片时, 通过调整波片 HWP1 和 HWP2 来进行线偏振光的补偿。通过旋转 HWP3 的角度来实现圆偏振光的补偿。此时用于验偏的验偏波片可将通过 PBS 后的线偏振光设置为 H、V、D、A、R、L 六种偏振态。H、V、R、L、D 和 A 分别表征水平偏振、垂直偏振、右旋圆偏振、左旋圆偏振、对角线偏振(45°)和反对角线偏振(-45°)。选用特殊的反射镜(s 偏振和 p 偏振的反射率几乎一致)且反射镜的数量为偶数, 通过减小二次衍射角等措施, 在 PBS2 处进行偏振消光比测量。此时测得线偏光消光比可达到 0.1% 以下, 圆偏振光消光比可达到 0.5% 以下, 系统实现了任意偏振光的偏振保持。

表 1 系统衍射效率的实验数据

Table 1 Experimental data of diffraction efficiency of system

Experimental group	First order diffraction efficiency without feedback / %	First order diffraction efficiency with positive feedback / %	Degree of diffraction efficiency improvement / %
1	82.73	89.25	6.52
2	80.60	88.30	7.70
3	83.54	91.40	7.86

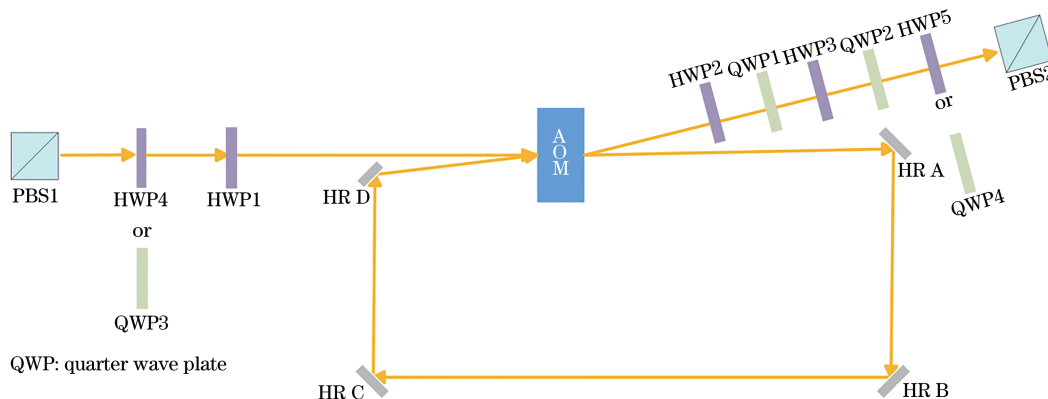


图 6 测量偏振保持的实验装置图

Fig. 6 Experimental apparatus for measuring polarization retention

最后,进行偏振保持的声光衍射效率增强系统稳定性的监控。图7是实验中测得的衍射效率随时间变化的曲线图。可以看出,声光调制器的衍射效率能在很长时间内保持相对稳定。由于选用的声光调制器放置在光学调整架上,调整架会随着外界环境变化,因此,可以通过降低调整架高度、系统加透明外罩及调整半小时后再微调一下等措施,使得系统性能及稳定性得到有效保证。

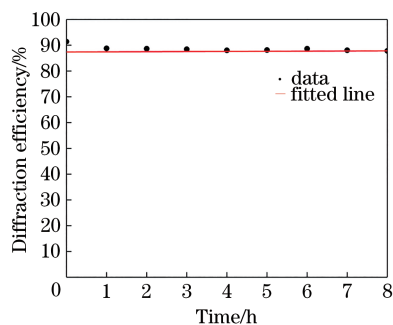


图7 系统稳定性监控图

Fig. 7 System's stability monitoring diagram

4 结 论

对声光调制器的衍射效率进行了理论研究。为了提高其衍射效率并保证任意偏振光的偏振保持,提出了一种正反馈的方法。设计了光路并进行了实验验证,可以看出,由高反射镜构成的0级衍射光的正反馈声光调制系统能够有效提高声光调制器的衍射效率,衍射效率提高到90%左右。与其他相关工作相比,这个实现了较高衍射效率的声光调制系统可以在不改变器件的条件下提高衍射效率,且支持任意偏振光的保偏传输^[13-14]。研究结果为实验室大量低性能声光调制器提供了一种低成本高利用率的解决方案,具有较高的应用价值。所设计的声光增强系统可以使用在纠缠源装置中,但在实际应用中还面临着较难控制任意偏振光的偏振、声光晶体存在微弱的反射及非光纤类声光器件较光纤类器件不稳定等问题。

参 考 文 献

[1] Chen L R, Xu Z X, Zeng W Q, et al. Controllably releasing long-lived quantum memory for photonic polarization qubit into multiple spatially-separate photonic channels[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33959.
 [2] Mu Q X, Yang J, Luo D D, et al. Influences of anisotropy and spin coupling parameters on quantum

entanglement of Heisenberg XYZ chain[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 242701.

慕琦雄, 杨晶, 罗丹丹, 等. 各向异性和自旋耦合参数对海森堡XYZ链量子纠缠的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 242701.

- [3] Tian L, Xu Z X, Chen L R, et al. Spatial multiplexing of atom-photon entanglement sources using feedforward control and switching networks [J]. Physical Review Letters, 2017, 119 (13) : 130505.
 [4] Liu H X, Gai L, Liu G J, et al. The principle of acousto-optic diffraction and experimental research [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2009, 28(1): 56-59.
 刘海霞, 盖磊, 刘光娟, 等. 声光衍射及实验研究 [J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(1): 56-59.
 [5] Zhao C X. Principle and application of acousto-optic modulator [J]. Optical Instruments, 1984, 6 (4) : 14-19.
 赵传勋. 声光调制器原理及其应用[J]. 光学仪器, 1984, 6(4): 14-19.
 [6] Chang I C . I. Acousto-optic devices and applications [J]. IEEE Transactions on Sonics & Ultrasonics, 1976, 23(1):2-21.
 [7] Xu J P. Principle, design and application of acousto-optic device [M]. Beijing: Science Press, 1982: 43-56.
 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 43-56.
 [8] Gao J. The research of driver source and communication system of AOM [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
 高晶. 声光调制器驱动源及其通信系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
 [9] Yang T, Pu X S, Zhou D, et al. Study on the influence of laser parameter on acousto-optic device performance [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(3): 333-334, 338.
 杨涛, 蒲雪松, 周丹, 等. 激光光束参数对声光器件性能的影响研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(3): 333-334, 338.
 [10] Li Q Y, Hu H Y. Experimental research on the positive feedback loop for acousto-optic modulation [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010(15): 141-143.
 李乾勇, 胡海燕. 声光调制正反馈环路的实验研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2010(15): 141-143.
 [11] Chen H Z, Liu W, Wu Z C, et al. A fiber coupled

- acousto-optic device with polarization maintaining ability[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015, 37(2): 228-231.
- 陈华志, 刘伟, 吴中超, 等. 一种具有偏振保持能力的光纤耦合声光器件[J]. *压电与声光*, 2015, 37(2): 228-231.
- [12] Lu X D, Zhang L J, Ou W Y. The experimental study of polarization characteristics in acousto-optic modulator[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(z1): 395-397.
- 卢向东, 张丽娟, 欧伟英. 声光调制器偏振特性的实验研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(z1): 395-397.
- [13] Chu J K, Shi C, Wang Y L, et al. Design of polarized light real-time positioning system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0310002.
- 褚金奎, 时超, 王寅龙, 等. 偏振光实时定位系统的设计[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0310002.
- [14] Li P C, Liu K, Jiang J F, et al. Research on polarization control of distributed optical fiber sensing system based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510002.
- 李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于FPGA的分布式光纤传感系统偏振控制研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510002.