

# 非保偏光纤放大器自适应偏振转换技术研究

董苏惠 王小林\* 粟荣涛 马鹏飞 周 朴 杨丽佳

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 报道了一种非保偏光纤放大器自适应偏振转换系统,可以将非保偏光转换为线偏光。结合非保偏光纤放大器中的偏振演化机理以及偏振控制器的原理,建立了非保偏光纤放大器中自适应偏振转换的数学模型,分析了不同条件下输出消光比的变化。根据理论优化参数,采用基于并行梯度下降优化算法(SPGD)的自适应偏振转换手段对非保偏光纤放大器的偏振分量进行优化控制,使非保偏光纤放大器输出的消光比达到 16.7 dB。

**关键词** 光纤光学;线偏光;偏振转换;偏振控制器;非保偏光纤放大器;随机并行梯度下降算法

中图分类号 TN929;O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP42.0902009

## Research on Adaptive Polarization Conversion of Non-Polarization Maintaining Fiber Amplifier

Dong Suhui Wang Xiaolin Su Rongtao Ma Pengfei Zhou Pu Yang Lijia

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** An adaptive polarization conversion system of non-polarization maintaining (PM) fiber amplifier is reported, which can convert any non-PM laser into linear polarized one. The model of adaptive polarization conversion system is established based on the principle of the controller and the mechanism of polarization evolution. The relationship of the output polarization extinction ratio at different conditions is analyzed. On the basis of the optimization results, the system achieves the polarization conversion of non-PM fiber amplifier with the output extinction ratio of 16.7 dB using adaptive polarization conversion technology to control the polarized component directly based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) optimization algorithm.

**Key words** fiber optics; linear polarized light; polarization conversion; polarization controller; non-polarization maintaining fiber amplifier; stochastic parallel gradient descent algorithm

**OCIS codes** 140.3510; 260.5430; 060.2420

## 1 引 言

高功率、高消光比的线偏振光在激光通信、高精度传感、引力波探测、光束合成等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。基于保偏光纤以及偏振相关器件的保偏光纤激光器是获得线偏光的有效方法,但保偏器件价格昂贵制作工艺复杂,而且保偏光纤的切割、熔接、热管理等处理工艺难度较大。利用自适应控制技术补偿非保偏光纤放大器中的退偏是降低保偏光纤激光器的成本、制作难度的有效手段<sup>[3-5]</sup>。目前,偏振控制技术已经成功用于将退偏的激光补偿为线偏振激光输出。但实验细节和参数情况公开不多,而且所报道的基本采用线偏光作为种子源,而线偏光在放大过程中的非线性效应对非保偏光纤放大器的放大效果有一定影响,不能发挥出非保偏放大器的功率优势。

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 湖南省自然科学基金(14JJ3004)

作者简介: 董苏惠(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光偏振控制方面的研究。E-mail: suhuism@163.com

导师简介: 杨丽佳(1962—),女,硕士生导师,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: ljyang@nudt.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: chinawxlin@163.com。

本文通过对非保偏种子源进行放大,利用基于随机并行梯度下降(SPGD)算法<sup>[6-8]</sup>的偏振转换技术,通过自适应驱动动态偏振控制器,对非保偏光纤放大器的偏振分量进行直接控制,实现了非保偏光纤放大器中非线偏光到线偏光的自适应偏振转换。搭建了非保偏光纤放大器自适应偏振转换系统,分析了非保偏光纤放大器中偏振转换的原理,模拟了在不同条件下输出消光比的变化,优化控制系统,并开展了自适应偏振转换实验研究,实现了非保偏光纤放大器中的偏振转换。

## 2 实验原理与理论分析

### 2.1 实验原理

非保偏光纤放大器自适应偏振转换实验原理如图1所示,波长为1064 nm的非保偏种子源经偏振控制器后由两级非保偏光纤放大器放大至1.2 W左右。放大后的激光由准直器输出经半波片后入射到偏振分束器(PBS)上,PBS将输出的激光分成两束偏振方向相互垂直的线偏光,一路偏振光由功率计监测功率,另一个方向的偏振光(P光)经过高反镜(HRM)反射,其反射光用功率计检测其输出功率,透射光由探测器(PD)接收并转化为电信号输入到算法控制器中,再由算法控制器上加载的SPGD优化算法对P光的光强进行优化,计算出偏振控制器所需的控制电压,并加载到偏振控制器上。系统在SPGD算法的优化过程中,使得P光光强最大,S光光强最小,从而获得高消光比的线偏振光输出。

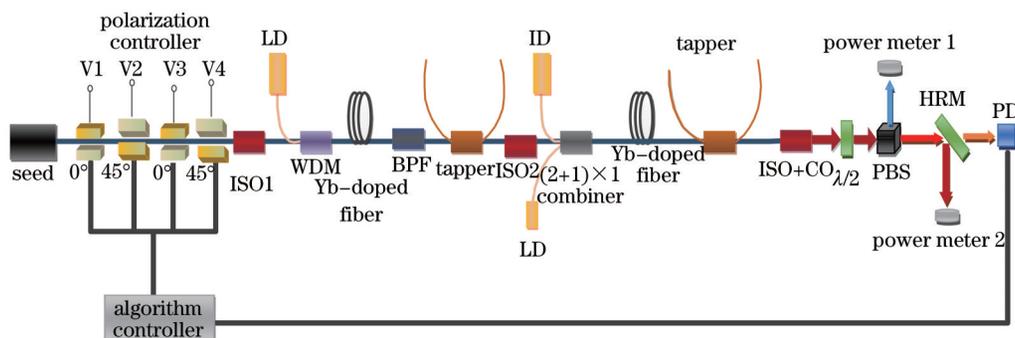


图1 非保偏光纤放大器自适应偏振转换实验原理

Fig.1 Adaptive polarization conversion system of non-polarization maintaining fiber amplifier

### 2.2 偏振控制的理论分析

假设平面电磁波沿 $z$ 方向传播,为了便于数学计算,取偏振控制器第一路压电陶瓷的主轴方向为 $x$ 方向,那么光场可以分为相互垂直的 $x,y$ 方向上的分量,令输入光 $x,y$ 方向上的电场强度的振幅之比为 $k$ ,即 $E_{ox} = kE_{oy}$ 。 $x,y$ 方向电场的相位差为 $\Delta\varphi$ ,那么在某一时刻,输入光的琼斯矩阵可以表示为

$$J_{in} = \begin{bmatrix} \frac{k}{k+1} \\ \frac{1}{k+1} \exp(i\varphi) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

实验中采用压电陶瓷型偏振控制器,由4对压电陶瓷组成,其原理是通过压电陶瓷挤压光纤,使光纤产生弹光效应来改变光纤中的双折射,且所施加的应力与光纤产生的延迟量成正比<sup>[9]</sup>。压电陶瓷型偏振控制器一般第2、4对压电陶瓷与第1、3对压电陶瓷主轴的夹角成 $45^\circ$ ,以便于在不同方向上挤压光纤。用琼斯矩阵模拟偏振控制器的控制原理,假设第1对压电陶瓷的延迟量为 $\theta_1$ ,第2对压电陶瓷的延迟量为 $\theta_2$ ,第3对压电陶瓷的延迟量为 $\theta_3$ ,第4对压电陶瓷的延迟量为 $\theta_4$ 。则偏振控制器的琼斯矩阵可以表示为

$$J = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_4}{2} & i \sin \frac{\theta_4}{2} \\ i \sin \frac{\theta_4}{2} & \cos \frac{\theta_4}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_3}{2} + i \sin \frac{\theta_3}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\theta_3}{2} - i \sin \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_2}{2} & i \sin \frac{\theta_2}{2} \\ i \sin \frac{\theta_2}{2} & \cos \frac{\theta_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_1}{2} + i \sin \frac{\theta_1}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\theta_1}{2} - i \sin \frac{\theta_1}{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

非保偏光纤产生的偏振噪声对激光偏振态的影响可以等效为一块特殊的波片,造成出射光偏振主轴的旋转( $r$ )以及两个垂直偏振分量的相移( $\varepsilon$ )<sup>[10]</sup>。非保偏光纤中的偏振噪声的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{C}(\varepsilon)\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} \exp(i\varepsilon/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varepsilon/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

那么输出光的琼斯矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{k}{k+1} \\ \frac{1}{k+1} \exp(i\varphi) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

消光比 ( $\sigma_{\text{PER}}$ ) 为

$$\sigma_{\text{PER}} = 10 \lg \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} = 10 \lg \frac{P_y}{P_x}. \quad (5)$$

图 2(a)模拟了仅控制第 1 对压电陶瓷的延迟量,输出消光比随压电陶瓷延迟量的关系,图 2(b)模拟了仅控制第 2 对压电陶瓷的延迟量,输出消光比随延迟量变化的关系。从图中可以看出,在不同条件下,放大器输出的消光比随延迟量,以  $\pi$  为周期变化。在一个周期内,可利用 SPGD 控制算法,优化控制器的输入电压,使消光比达到最大。图 3 模拟了在一个周期内,优化算法完全控制,无延迟量残差的情况下,消光比随偏振控制器的步进精度的变化,从图中看出,当步进精度为  $\pi/30$  时,已经满足控制需要。图 4 模拟了偏振控制器的步进精度为  $\pi/50$ ,优化算法未完全控制,所产生的延迟量残差对消光比的影响,从图中可以看出控制精度越高,延迟量残差越小,输出消光比越好。因此,需要优化控制器的步进精度以及优化算法的控制精度,使输出消光比达到良好的效果。

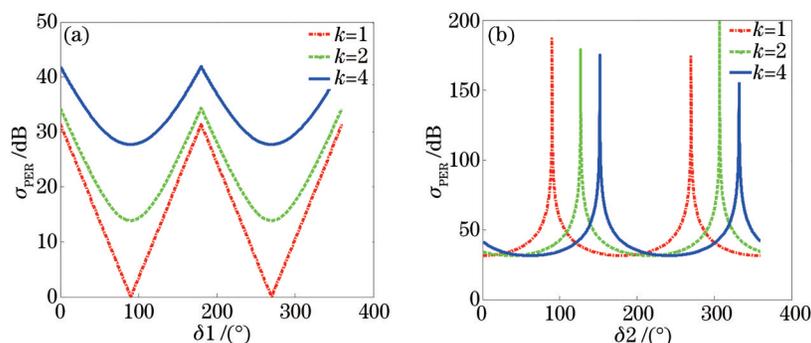


图 2 (a) 输出消光比随第 1 路压电陶瓷延迟量变化; (b) 输出消光比随第 2 路压电陶瓷延迟量变化

Fig.2 (a) Variation of the output extinction ratio with retardation of the first piezoelectric ceramics; (b) variation of the output extinction ratio with retardation of the second piezoelectric ceramics

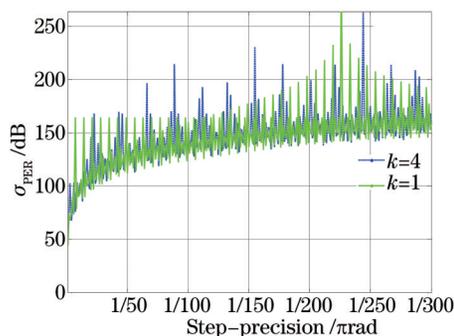


图 3 不同条件下消光比随步进精度变化

Fig.3 Relationship between the output extinction ratio and the step accuracy of the polarization controller at different conditions

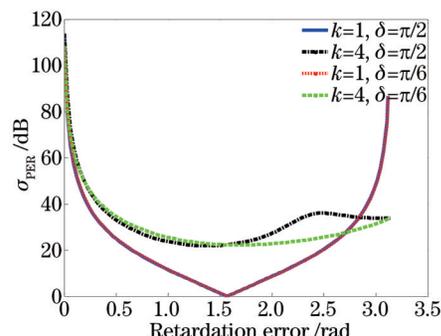


图 4 不同条件下消光比随延迟量残差变化

Fig.4 Relationship between the output extinction ratio and the retardation error at different conditions

### 3 非保偏-保偏光适应转换实验研究

根据图 1 所示的实验结构,对偏振控制器的控制性能进行了实验研究。实验中采用波长为 1064 nm,消光比为 10 dB 左右的线偏光作为输入光,在偏振控制器上加载锯齿波电压,输出光经偏振分束器后入射到探

测器上。图5(a)为仅控制第1对压电陶瓷时探测器功率与偏振控制器上加载电压的关系,图5(b)为仅控制第2对压电陶瓷时探测器功率与偏振控制器加载电压的关系。从图中可以看出,偏振控制器的半波电压  $V_{\pi}=0.75\text{ V}$ ,以  $15\text{ mV}$  为步进控制电压,偏振控制器的控制精度可达  $\pi/50$ ,满足系统的控制需要。

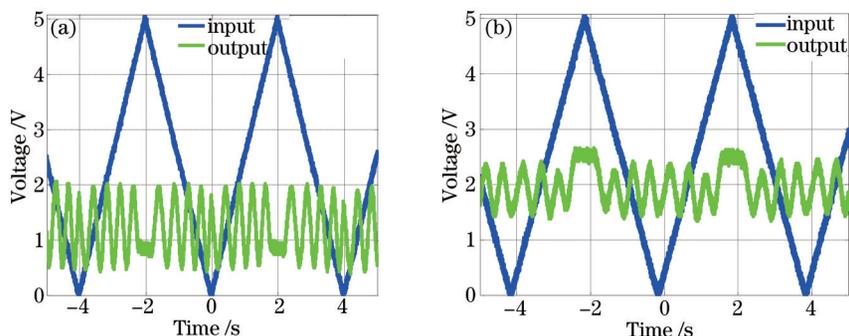


图5 (a) 仅控制1对路压电陶瓷中消光比随延迟量变化;(b) 仅控制2对压电陶瓷消光比随延迟量变化

Fig.5 (a) Variation of the output extinction ratio with retardation by only controlling the first piezoelectric ceramics;

(b) variation of the output extinction ratio with retardation by only controlling the second piezoelectric ceramics

然后,对非保偏的种子源进行放大,在利用偏振控制器对非保偏光进行转换,以输出高消光比线偏光。实验采用消光比为  $6\text{ dB}$  的非保偏种子源,经两级放大到  $1.2\text{ W}$ ,消光比随时间成秒量级缓慢变化。偏振控制前后探测器的功率变化如图6所示,在算法控制器运行SPGD算法后,P光的功率提高了  $1.27$  倍。当系统处于开环状态时(未执行SPGD算法,没有进行偏振控制),功率计1的平均功率为  $270\text{ mW}$ ,功率计2的平均功率为  $927\text{ mW}$ ,当系统闭环,执行SPGD算法时,功率计1的平均功率为  $25.2\text{ mW}$ ,功率计2的平均功率为  $1.176\text{ W}$ ,消光比达到  $16.7\text{ dB}$ 。经过多次反复实验,获得激光的消光比都在  $16\text{ dB}$  左右。

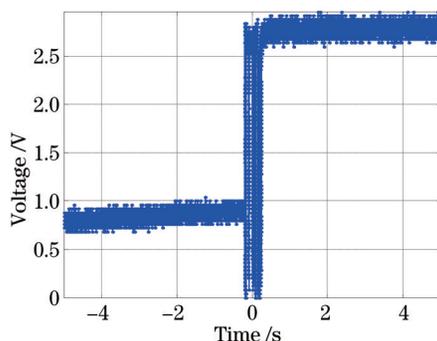


图6 偏振控制前后探测器功率变化

Fig.6 Output power with and without polarization control

## 4 结 论

提出了非保偏光纤放大器中的自适应偏振转换方法,建立了非保偏光纤放大器中自适应偏振转换的数学模型,通过对系统转换原理、相位失配、锁相残差的分析,优化偏振控制器的实验参数,实现了非保偏光纤放大器自适应偏振转换,可将非保偏放大器输出的偏振态不稳定的非保偏光纤转换为偏振态稳定的线偏光,输出消光比达到  $16.7\text{ dB}$ 。采用该偏振转换技术,可实现利用非保偏光纤放大器输出高消光比线偏光,有望在光纤通信、传感、高功率光纤激光相干合成等领域得到广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Ryun K K, Kwang N P, Chul S K, *et al.*. Highly linear-polarized external cavity laser with  $45^\circ$ -tilted waveguide grating[C]. Proc of SPIE, 2006, 6352: 63522S.
- 2 Ding Yagian, Qi Yunfeng, Liu Chi, *et al.*. High power, single-frequency, linear-polarized, all-fiber MOPA system for coherent detection[C]. 2011. Proc of SPIE, 2011, 8192: 819220.
- 3 Gregory D G, Stuart J M, Joshua E R. Active phase and polarization locking of a  $1.4\text{ kW}$  fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2010, 35(10):

1542-1544.

- 4 Gregory D G, Stuart J M, Joshua E R. Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays[J]. Opt Lett, 2012, 37(20): 4272-4274.
- 5 Mcnaught S J, Thielen P A, Adams L N, *et al.*. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 174-181.
- 6 Redmond S M. Active coherent combination of >200 semiconductor amplifiers using a SPGD algorithm[C]. CLEO, 2011, CTuV1.
- 7 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxin, *et al.*. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm[J]. Opt Lett, 2011, 36(16): 3121-3123.
- 8 Luke R T, Yan Feng, Domenico B C. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fiber amplifiers[J]. Opt Express, 2010, 18(8): 8540-8555.
- 9 Shimizu H, Yamaziki S, Ono T, *et al.*. Highly practical fiber squeezer polarization controller[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(10): 1217-1224.
- 10 Xiong Yupeng. Study on Adaptive Polarization Control Technology of Fiber Amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.  
熊玉鹏. 光纤放大器的偏振自适应控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.

栏目编辑: 韩 峰