

# 基于偏振锁相的非线偏-线偏光转换技术研究

董苏惠 王小林 粟荣涛 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** 报道了一种基于偏振锁相的自适应非线偏光-线偏光的产生方法。将激光器输出的非保偏光分成两束偏振态相互垂直的线偏光,基于偏振相干合成的原理,利用基于随机并行梯度下降算法的相位调制器将两个偏振态的光束的相位差锁相到 $m\pi$ ,合成输出的光束即为高消光比的线偏光。理论上,建立了该方法的数学模型,并分析了各种因素对输出消光比和转换效率的影响。实验上,利用空间结构的光路,搭建了相应的实验系统,实现了非线偏激光到线偏振光的自适应偏振转换,获得输出激光偏振度为93.5%,转换效率为88%的线偏振激光输出。

**关键词** 物理光学;非线偏光;线偏光;偏振锁相;随机并行梯度下降算法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0202006

## Research on Conversion Technology from Non-Polarized to Linearly Polarized Laser Based on the Principle of Polarization Phase Locking

Dong Suhui Wang Xiaolin Su Rongtao Zhou Pu Yang Lijia

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

**Abstract** A novel method to adaptively convert laser beam from non-polarized to linearly polarized based on the principle of polarization phase locking is presented. The non-polarization laser is divided into two beams whose polarization states are perpendicular to each other by a polarization splitter. Based on the principle of coherent polarization beam combining, and used the phase modulator whose operating voltage is optimized by parallel gradient descent algorithm to keep the difference of phase of the two splitter beams to  $m\pi$ . The output beam is linearly polarized laser with high polarization extinction ratio. In theory, the model of adaptive polarization conversion is built, and the factors affecting the efficiency and polarization extinction ratio are analyzed. In experiment, experiment system is built based on the optical path of free-space structure, and the adaptive conversion of non-polarization maintaining laser to a linearly one with the polarization extinction ratio of 93.5% and the converting efficiency of 88% is realized.

**Key words** physical optics; non-polarization laser; linearly polarized light; polarization phase locking; stochastic parallel gradient descent algorithm

**OCIS codes** 260.5430; 270.1670; 350.5030

## 1 引 言

高亮度的线偏振光在非线性频率变换、相干探测、光束合成、工业加工等领域应用比较广泛<sup>[1-4]</sup>。非保偏激光器结构简单,制造相对容易,更易于获得高功率、高亮度的光束,但由于其内部或外部的扰动,且结构中并没有起偏器件,非保偏激光器的偏振态会随机变化,难以维持线偏光的传输。目前,偏振控制技术可以将偏振态不稳定的非保偏光转换为稳定的线偏光<sup>[5-7]</sup>,其基本原理是在基于主振荡放大器(MOPA)结构的光纤放大器的前级嵌入电动偏振控制器,利用反馈控制系统,根据输出光的偏振态自适应调节控制器的输入电压,从

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-10-23

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: 王小林(1985—),男,博士,副研究员,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: chinawxllin@163.com

而对种子光进行偏振预校正来补偿系统的偏振噪声,使输出光维持线偏光。但由于需要在激光器内部嵌入偏振控制器,此控制系统只适用于基于 MOPA 结构的光纤激光器,无法保证激光器的完整性,并且在激光器中嵌入偏振控制器会有较大的插入损耗。

本文报道了一种基于偏振锁相的偏振转换方案,将非保偏光分成两束偏振态相互垂直的线偏光,利用偏振相干合成的原理<sup>[8-10]</sup>,自适应的改变两束光的相位差,使其满足 $\Delta\varphi=m\pi$ ( $m$ 为整数),那么合成输出的光束即为线偏光。该方案能够在不影响激光器原有结构和功率水平的基础上,在其输出端加入自适应锁相系统,可以实时的把非保偏激光器输出的非保偏激光转换为线偏激光,同时又能保证较高的能量转换效率以及较好的光束质量。本文建立了偏振转换的理论模型,搭建了相应的转换系统,实现了非保偏光到线偏光的偏振转换。

## 2 基于偏振锁相产生线偏光基本原理

偏振转换的原理如图 1 所示,将偏振态随机变化的非偏振光由偏振分束器(PBS)分为两束偏振态相互垂直的线偏振光,然后将两路偏振光进行偏振相干合成。由于两路光相位差不一致,合束时,合成输出光的偏振态也是随机波动的,然而将两路光的光程差锁定到 $m\pi$ 时,合成光束即为完全的线偏光。当准单色光波沿 $z$ 方向传播时,光场可以分为相互垂直的 $s$ 、 $p$ 方向上的分量( $p$ 是与入射面垂直的偏振光, $s$ 是与入射面平行的偏振光),可以描述为

$$\begin{cases} E_s = E_{os} \cos[\omega t - \bar{k}z] \\ E_p = E_{op} \cos[\omega t - \bar{k}z + \Delta\varphi(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 $E_{os}$ 、 $E_{op}$ 表示光场在 $s$ 、 $p$ 方向的振幅, $\omega$ 为光频率, $\bar{k}$ 为波矢, $\Delta\varphi$ 为 $s$ 、 $p$ 方向上光场的相位差。若消去(1)式中的变量 $\omega t - \bar{k}z$ ,则会变为椭圆方程,且相位差 $\Delta\varphi$ 和振幅比 $E_{os}/E_{op}$ 共同决定该椭圆的形状,从而决定了光束的偏振态。尤其当 $\Delta\varphi=m\pi$ 时,此式即为线性方程,此时的光为线偏光,且振幅比 $E_{os}/E_{op}$ 决定了线偏光的偏振方向。因此当将两路的光程差锁相到 $m\pi$ 时,输出光的偏振态即为线偏光。

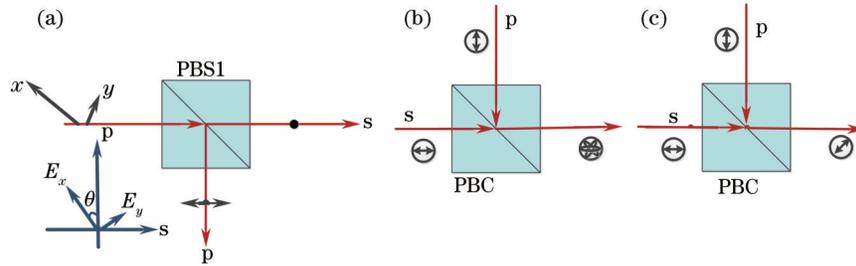


图 1 偏振转换原理图。(a) 偏振分束;(b) 无锁相时和(c)锁相时偏振合成

Fig.1 Principle of polarization conversion. (a) Polarization splitting; coherent polarization beam combing (b) without phase control and (c) with phase locked

假设激光器输出光近似高斯光束,其偏振模式的 $x$ 偏振方向与偏振分束器光轴的夹角为 $\theta$ ,该角度可由半波片补偿,那么光束经过 PBS 后的琼斯矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_p(x_1, y_1) \\ E_s(x_1, y_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x(x, y) \cos \theta \exp(i\delta_x) + E_y(x, y) \sin \theta \exp(i\delta_y) \\ -E_x(x, y) \sin \theta \exp(i\delta_x) + E_y(x, y) \cos \theta \exp(i\delta_y) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$E_y(x, y) = \sqrt{\frac{2P_y}{\pi}} \cdot \frac{1}{\omega} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right], E_x(x, y) = \sqrt{\frac{2P_x}{\pi}} \cdot \frac{1}{\omega} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right], \quad (3)$$

式中 $x, y$ 是激光器的两个偏振模式, $\delta_x, \delta_y$ 是两个偏振模式的相位, $P_x$ 和 $P_y$ 分别为两个偏振模式的光功率, $\omega$ 为高斯光束腰斑半径。分束后的光束经过锁相控制后,由偏振合束器(PBC)合为一束,此时由偏振合束器合束后输出光束的琼斯矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_{p1}(x_1, y_1) \\ E_{s1}(x_1, y_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x(x, y) \cos \theta \exp(i\delta_x) + E_y(x, y) \sin \theta \exp(i\delta_y) \\ [-E_x(x, y) \sin \theta \exp(i\delta_x) + E_y(x, y) \cos \theta \exp(i\delta_y)] \exp(i\delta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\delta=\delta_{\text{dither}}+\delta_{\text{control}}$ ,是由空间光路引起的相位抖动 $\delta_{\text{dither}}$ 与相位调制器的相位 $\delta_{\text{control}}$ 共同作用。由于实际光路中存在外界干扰等因素,会导致非保偏激光器两偏振模式的相位差会随着时间变化,因此合成光束的偏振态也会随着相位差的变化而变化,当系统锁相时,调整半波片使输出线偏光的功率达到最大,定义此时偏振态的转换效率为输出的线偏光功率与总的激光器输出功率之比,那么

$$\eta = \frac{P_c}{P_0}, \quad (5)$$

式中

$$P_0 = \iint [E_x^2(x,y) + E_y^2(x,y)] dx dy, \quad (6)$$

$$P_c = \frac{1}{2} \iint [E_x^2(x,y) + E_y^2(x,y)] dx dy + \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} dt, \quad (7)$$

$$\zeta_1 = \iint [E_x^2(x,y) - E_y^2(x,y)] dx dy, \zeta_2 = \iint E_x(x,y)E_y(x,y) dx dy, \quad (8)$$

$$\Delta = \delta_x - \delta_y, \quad (9)$$

$$\xi_2(t) = \frac{\zeta_1}{2} \sin 2\theta \cos \Delta(t) - \zeta_2 \{ \cos^2 \theta \cos [\Delta(t) - \delta(t)] - \sin^2 \theta \cos [\Delta(t) + \delta(t)] \}, \quad (10)$$

$$\xi_1(t) = \frac{\cos 2\theta}{2} \zeta_1 + \zeta_2 \sin 2\theta \cos \Delta(t), \quad (11)$$

$P_0$ 为激光器输出的总功率, $P_c$ 为锁相时输出的最大线偏光功率, $\Delta$ 为激光器两个偏振模式的相位差。令 $k_m = \frac{E_y}{E_x}$ ,模拟当 $\delta=\pi/30$ 时,在不同初始相位与 $k_m$ 值下, $\theta$ 对总效率的影响,如图2(a)所示。可以看出当 $\theta$ 为0时,即激光器输出两个偏振模式的偏振方向与偏振分束器的光轴完全对轴,总效率达到最大。反之,在锁相的情况下,若输出功率达到最大,则 $\theta$ 约为0时。而当 $\theta=0$ 时,该偏振转换系统近似等效为偏振相干合成系统。图2(b)模拟了当 $\theta=0$ 时,在不同 $k_m$ 值条件下,锁相残差 $|\delta-\Delta|$ 对总效率的影响,从图中看出,当完全锁相或锁相比较残差比较小时,可以忽略 $k_m$ 值对总效率的影响,即可以忽略两路合成光功率的影响,锁相残差是影响总体转换效率的总要因素。

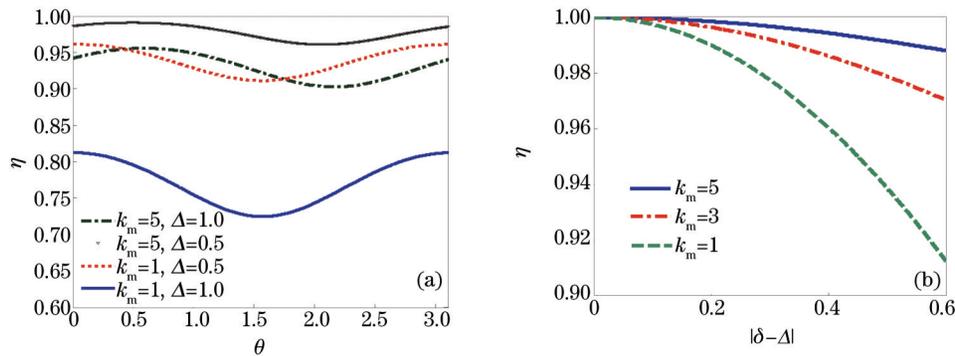


图2 (a) 偏转角 $\theta$ 和(b)锁相残差对总效率影响

Fig.2 Total efficiency dependence on (a) deflection angle  $\theta$  (b) phase error

### 3 实验研究

#### 3.1 实验装置

根据偏振转换的原理,搭建了相应的实验系统,如图3所示。非保偏单频激光器经准直隔离(CO+ISO)后输出,输出的激光经过半波片入射到偏振分束器PBS1上,PBS1将输入光束分成s光和p光。其中,s光透射到反射镜上并由半波片将其偏振态旋转至p光的偏振方向,而另一路反射光p光经1/4波片后入射到由压电陶瓷驱动的反光镜上,通过压电陶瓷的伸缩改变两束光的相位差,反射后的光束二次经过1/4波片,其偏振态可旋转至s光的偏振方向。两路光束再由PBC合为一束后输出。输出后的光束由半波片、偏振分束器PBS2提取其偏振信息,并由探测器探测功率波动信号输送到算法控制器中,算法控制器上加载的并行梯度下降(SPGD)算法<sup>[11-14]</sup>可以根据探测信号波动情况,优化压电陶瓷的控制电压,使两路光的相位差满足 $\Delta\varphi=$

$m\pi$ ,从而使探测器上的功率达到极值。利用功率计测量输出光功率,利用光斑分析仪探测其远场光斑。

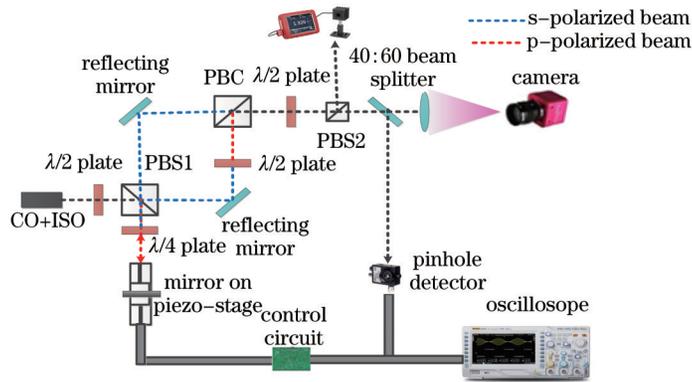


图3 偏振转换装置图

Fig.3 Experimental setup of polarization conversion

### 3.2 实验结果与分析

根据图3所示的实验结构,测试非保偏激光器偏振态的变化,激光器的工作波长为1064 nm,输出光功率为180 mW,由于波片吸收以及偏振态的转换不完全,到达PBC后输出的功率为170 mW左右。图4为PBS1分束后透射光s光功率的变化,反应了激光器偏振态的变化,在15 min内由于内外扰动,激光器的偏振态会随着时间缓慢变化。图5(a)给出了两个偏振线偏光在经PBC合束后由半波片与PBS2探测的功率起伏。与图4相比,虽然激光器本身偏振态变化缓慢,但在经过空间的分束合束后,由于实验平台振动、外部风机等影响导致相位差 $|\delta-\Delta|$ 变化频率增加,输出偏振态也会随相位差的变化而迅速变化,因此探测器测得的两路光功率起伏反映了空间光路引起的相位抖动与激光器两个偏振模式本身的相位差。图5(b)是在有无水冷条件下对探测器测得的s光信号进行傅里叶变化得到的噪声频谱图。在无水冷情况下噪声频率约为100 Hz,当对激光器进行水冷,两路相位差的噪声频率可达200~300 Hz。

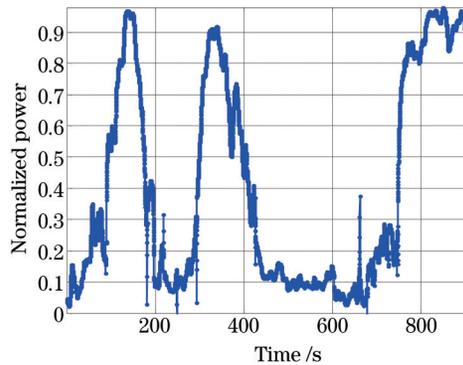


图4 PBS1后s光功率

Fig.4 Power of s-polarized beam passing through PBS1

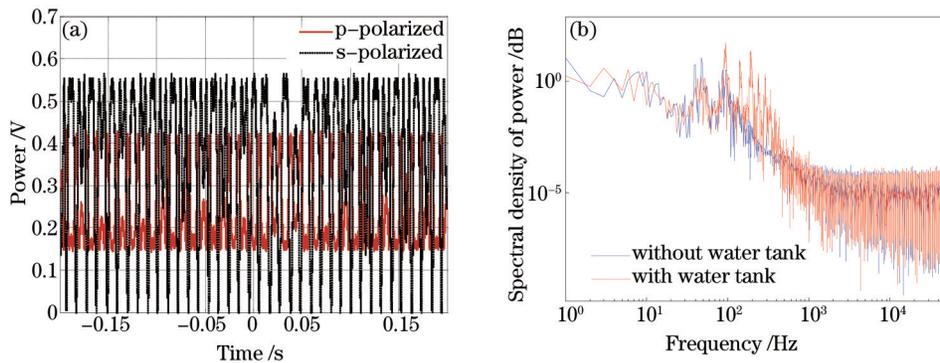


图5 (a) 经PBS2后探测器接收的相位信号噪声; (b) 有无水冷时相位噪声频谱

Fig.5 (a) Phase noise received by the detector passing through PBS2; (b) spectral density of phase noise with or without water tank

实验使用压电陶瓷的极限分辨率为 0.05 nm, 谐振频率为 30 kHz。通过对 SPGD 算法电路的调整, 使压电陶瓷输入的电压精度为 0.32 V, 半波电压为 4.6 V, 压电陶瓷的伸缩精度为 0.07 λ。当执行 SPGD 算法, 系统闭环时, 调节第一个与最后一个半波片使功率计输出光功率达到最大, 此时 θ 为 0, 效率达到最大。图 6(a) 给出了系统分别在开环和闭环时探测器接受的信号, 闭环时, 将 s 光锁相到最小, 那么 p 光的功率达到最大, 输出的 p 光功率利用功率计测量。图 6(b) 为执行 SPGD 算法, 系统闭环, 功率计测得的闭环输出功率, 输出平均功率为 0.159 W, 输出光的偏振度为 93.5%, 系统总效率为 88%。根据偏振合成理论, 锁相残差对系统效率的影响估算公式为

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt, & \text{phase locking at maximum state} \\ \frac{1}{T} \int_0^T [1 - V(t)] dt, & \text{phase locking at minimum state} \end{cases} \quad (12)$$

根据探测器测量的锁相输出电压, 估算锁相残差对总效率影响为 12%。远场光斑如图 7 所示, 图 7(a) 为系统开环时远场的光斑, 会随时间不断变化, 图 7(b) 为系统锁相时输出的光斑, 左图是系统锁相到最大, 即光电探测器上光功率达到最大时, 输出的远场的光斑, 右图为系统锁相到最小时的远场光斑。从远场光斑可以看出, 系统的光束质量并没有进一步恶化, 仍是基模, 且光斑半径与激光器直接输出的一致。

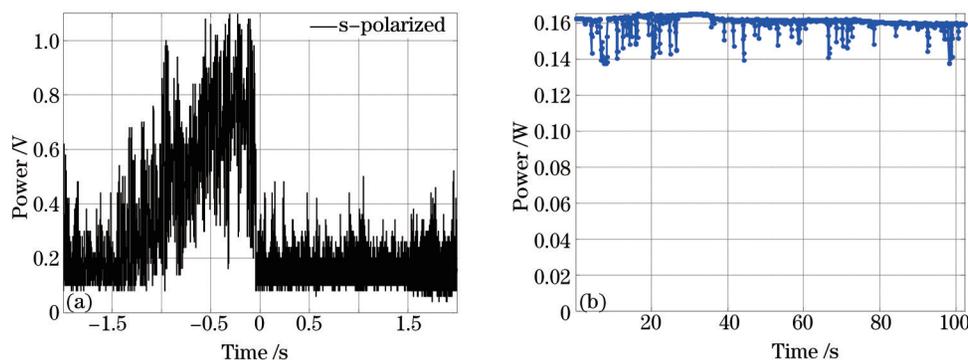


图 6 (a) 锁相前后探测器测量的功率变化; (b) 锁相时系统输出的光功率

Fig.6 (a) Power received by the detector with or without phase locking; (b) output power with phase locking

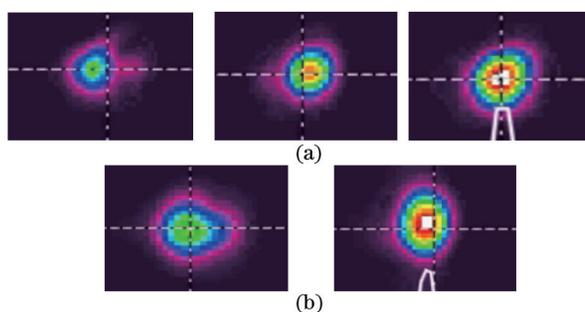


图 7 远场光斑。(a) 开环时远场光斑; (b) 锁相到最小时远场光斑(左图)锁相到最大时远场光斑(右图)

Fig.7 Far-field intensity profiles. (a) Intensity profiles in open loop; (b) intensity profiles in closed loop with phase locking to minimum (left) and maximum (right) state

锁相残差是影响基于偏振锁相的偏振转换系统的重要影响因素。影响锁相残差的因素主要有两个: 一是基于 SPGD 锁相算法电路, 虽然锁相电路的精度在理论上可以满足控制系统的需要, 但是算法中不同的步进增益也会影响最终可控精度, 步进增益的取值如果过低则会影响算法的迭代速率, 过高则会影响控制精度, 实验中步进增益的选取根据系统的扰动进行调整, 可以进一步提高最终可控精度; 二是实验硬件, 例如高反镜等实验器件镀膜不均匀, 导致反射面并非垂直, 环境扰动(风机、空调等)导致器件的振动, 探测器上的功率也会受到影响。系统的空间光路光轴不重合也会影响转换效率, 因此进一步提高光轴重合度以及减少锁相残差, 将会进一步提高输出光的消光比。

## 4 结 论

提出了基于偏振相干合成理论的自适应偏振转换的方法,建立了相应的数学模型,并分析了锁相残差是影响转换效率的重要因素,基于理论搭建了实验系统,开展了相应的实验研究。实现了非保偏光到保偏光的自适应偏振转换,输出光的偏振度为93.5%。该系统在激光器外部直接对激光进行偏振转换,并不影响本身激光器的性能。如果采用高功率器件,将该系统用于高功率的非保偏光纤激光器,有望能够直接将高功率的非保偏光转为线偏振光。系统本质源于偏振相干合成,在保证脉冲同步与两路合成光的光程差相等的条件下,在理论上是可以对脉冲光束进行偏振转换,只是实际操作过程中对系统的调节和控制精度要求较高。

致谢 感谢张坤、徐小勇、刘思柳在实验中给予的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Dejun, Liu Guanxiu, Zhang Maosen, *et al.*. Linear polarized Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser with an intracavity cubic polarization beam splitter as polarization selection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0714002.  
冯德军, 刘冠秀, 张茂森, 等. 基于腔内偏振分束器偏振控制的线偏振掺镱双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0714002.
- 2 Nikita Simakov, Alex Hemming, Shayne Bennets, *et al.*. Efficient, polarised, gain-switched operation of a Tm-doped fibre laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 14949-14954.
- 3 Lr Taylor, Y Feng, Db Calia. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- 4 Liu A, Norsen M A, Mead R D. 60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(1): 67-69.
- 5 Goodno Gregory D, Mcnaught Stuart J, Rothenberg Joshua E, *et al.*. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- 6 Goodno Gregory D, Mcnaught Stuart J, Weber Mark E, *et al.*. Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4272-4274.
- 7 Mcnaught Stuart J, Thielen Peter A, Adams Leah N, *et al.*. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2014, 20(5): 174-181.
- 8 Uberna Radoslaw, Bratcher Andrew, Tiemann Bruce G. Coherent polarization beam combination[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2010, 46(8): 1191-1196.
- 9 Ma P F, Zhou P, Su R T, *et al.*. Coherent polarization beam combining of eight fiber lasers using single-frequency dithering technique [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(6): 456-458.
- 10 Ma Pengfei, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.*. Study of coherent polarization beam combining technique of multi-channel fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0402009.  
马鹏飞, 周 朴, 马阎星, 等. 多路光纤激光相干偏振合成技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0402009.
- 11 Huang Zhimeng, Tang Xuan, Liu Cangli, *et al.*. Stochastic parallel gradient descent algorithm with a variable gain coefficient and its application in coherent beam combining[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402004.  
黄智蒙, 唐 选, 刘仓理, 等. 变增益随机并行梯度下降算法及其在相干合成中的应用[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402004.
- 12 Xiaolin Wang, Pu Zhou, Yanxing Ma, *et al.*. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3121-3123.
- 13 Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 907-909.
- 14 Chao G, Wen L, Yi T, *et al.*. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25045-25055.

栏目编辑: 史 敏