

❖ 特约专栏 ❖

基于光学零差偏振探测和锁相的合束激光偏振控制

沈 辉¹, 全 昭¹, 杨依枫¹, 赵 翔^{1,2}, 柏 刚^{1,2}, 何 兵¹, 周 军¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全国态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 激光偏振合束是提升窄线宽光纤激光亮度的重要技术, 能够实现多路激光的共孔径合束输出, 同时维持较高的光束质量和线偏振态。文中探索和研究了基于线性锁相技术的合束激光偏振控制系统, 详细分析和建立了光零差偏振检测物理模型和线性锁相控制环路的数学模型。利用高精度的光零差技术对合束激光的偏振相位进行检测, 并通过快速实时反馈进行激光锁相, 获得了输出功率为 279 mW 的线偏振态激光。锁相控制后, 合束激光的偏振消光比达到 19.3 dB, 控制带宽高达 39.6 kHz, 剩余相位噪声为 $7 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 Hz) 和 $3 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。当提高激光输出总功率达 1 W 时, 偏振消光比维持在 ~15 dB, 其限制因素在于光功率波动引入的相位噪声和光斑空间模式不匹配。

关键词: 相干偏振合成; 激光锁相; 光零差探测; 线性反馈控制; 偏振消光比

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0103007

Polarization control of combined laser beams based on optical homodyne polarization detection and phase locking

Shen Hui¹, Quan Zhao¹, Yang Yifeng¹, Zhao Xiang¹, Bai Gang^{1,2}, He Bing¹, Zhou Jun¹

(1. Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a critical technique for increasing the brightness of narrow-linewidth fiber lasers, coherent polarization beam combining can achieve common aperture joining of multiple lasers, while maintaining higher beam quality and linear polarization state. A polarization control system of combined lasers was investigated based on the linear phase locking technique. A physical model for optical homodyne polarization detection and a mathematical equation for linear phase-locking loop were established and analyzed in detail. The polarization phase of combined lasers was checked by employing high-precision optical homodyne method and then fed back to phase lock lasers in real time. A linear polarization laser was output with the power of 279 mW. After phase locking, the polarization extinction ratio of combined lasers attained 19.3 dB and the control bandwidth was 39.6 kHz. The residual phase noise is $7 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-20

基金项目: 上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200); 国家自然科学基金(61705243, 61405202); 上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800); 上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200); 江苏省重点研发计划(BE2016005-4); 王宽诚教育基金

作者简介: 沈辉(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。Email: nature0546@163.com

通讯作者: 何兵(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率光纤激光和光束合成方面的研究。Email: bryanho@mail.siom.ac.cn

(1 Hz) and $3 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. When the power was increased to 1 W, the polarization extinction ratio was -15 dB, which was restricted by power-induced phase noise and spatial mismatch of beam spots.

Key words: coherent polarization beam combining; laser phase locking; optical homodyne detection; linear feedback control; polarization extinction ratio

0 引言

低相位噪声、窄线宽的光纤激光光源能用于许多精密物理实验,如光谱探测、激光冷却、光频率标准等。然而由于光纤本身的热效应、非线性效应、材料特性以及高亮度泵浦源等限制因素,单频窄线宽光纤激光的输出功率仍然十分有限,无法满足一些高功率激光实验^[1,2]的需求,如大型激光干涉仪、引力波探测、大气光谱探测、激光雷达、远距离激光通信、激光时频传递等。

为了提高窄线宽低相噪的光纤激光光源器的输出功率,主动激光相干光束合成^[3-5]被提出和深入研究,并成为了目前最重要的技术手段之一。该技术是通过将多路基于主振荡器功率放大(MOPA)结构的低相位噪声光纤激光进行合束,然后利用调相器件来对各路激光相位进行高精度反馈控制,以达到相位锁定,从而实现各路激光的相干叠加。这样既保证输出激光具有与单路激光相近的较低的相位噪声,同时又能有效地提高相干合成后的激光输出功率。在基于阵列排布结构的主动相干合成中主要采用的锁相技术有外差法、多抖动法、随机并行梯度下降法(SPGD)等^[6-7]。

基于阵列排布结构的主动相干合成存在激光输出器排布的占空比问题,导致远场光束能量向旁瓣分散,在一定程度上降低了合成光束的亮度和光束质量,影响系统的相位控制精度和锁相效果。为了克服这一缺点,最近人们提出了主动相干偏振合成技术^[8],来实现多路激光的共孔径输出。基于锁相技术的相干偏振合成通过将两路正交偏振态的光进行合束和相位锁定,保证相对相位差为 $n\pi$ (n 为整数),来达到合束激光的偏振稳定,使输出的激光仍为线偏振态,从而可以进行多路的级联合成^[9]。随后许多研究小组利用自适应主动锁相技术实现了更高功率的光纤激光偏振合成^[10],锁相带宽均在 $\sim 100 \text{ Hz}$ 量级;从理论上分析了偏振合束器分光比、合束功率不平

衡、光束空间非一致性、指向和波前误差、退偏振以及阵列元素的相位失配对锁相性能的影响^[11]。更深入的研究表明锁相系统的相位噪声、光束的空间模式匹配程度、光束方向稳定度都会严重降低合束激光的偏振消光比^[12-13]。利用该合成技术的高功率窄线宽光源能有效地应用于先进激光干涉引力波探测中,再结合高精度的稳频技术,能获得超窄线宽低相噪的高功率激光^[14]。

然而目前在相干偏振合束的主动相位控制技术上主要采用单抖动、LOCSET、SPGD^[15]等自适应控制算法进行锁相控制。基于这些自适应算法的反馈控制系统,由于算法收敛速度的问题,反馈控制带宽相对于线性控制较窄,锁相控制效果一般体现在百赫兹左右^[10],因此锁相控制后剩余相位噪声依然较大,尤其是光纤放大过程产生的高频相位噪声很难被抑制。

文中研究了一种基于光零差偏振检测和线性锁相技术的合束激光偏振控制系统,建立了光零差偏振检测物理模型,分析并设计了比例积分微分(PID)反馈控制系统的频率响应。利用高精度的零差探测技术,结合快速的线性 PID 控制技术实现了两路激光的偏振合束,同时分析了限制偏振消光比的重要因素,并提出了相应的解决方案。激光锁相后能获得线偏振度为 19.3 dB 的激光,输出功率为 279 mW,锁相带宽达 39.6 kHz,相位噪声 $< 10^{-3} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。通过该技术获得的高功率低相噪光纤激光是很多精密科学实验十分关键的激光光源,还能应用于激光光谱合成,进一步提升激光功率。

1 实验装置

基于光零差偏振相位探测系统,文中发展了一种线性伺服反馈系统,控制并稳定合束激光的偏振态,用于实现窄线宽光纤激光的相干偏振合束,在保证激光输出光谱特性的同时提升激光功率。图 1 给出了偏振控制系统的原理框图,种子源为 1 064 nm

的单频窄线宽激光,输出功率约为 40 mW,线宽小于 100 kHz,其经过一级掺 Yb 光纤放大后再分为两路。两路子光束分别经过声光调制器(AOM)移频后再经过二级光纤放大,准直输出后两路激光功率分别为 135.3 mW 和 144.4 mW。两路准直输出的激光线偏振度均大于 28 dB,经过二分之一波片调整偏振态后使用偏振分光棱镜(PBS)进行激光合束输出。通过精细调节二分之一波片的角度,分离较小功率的激光用于激光偏振相位控制,使合束后大部分激光经过偏振器件(二分之一波片和四分之一波片)的偏振调节后能保持线偏振态输出。

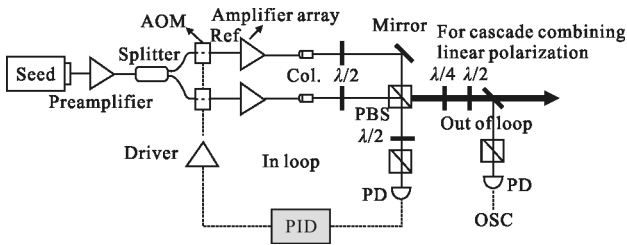


图 1 合束激光偏振控制与相干偏振合成原理图

Fig.1 Schematic for polarization control of combined lasers and coherent polarization beam combining

合束激光偏振控制系统由光零差偏振相位探测器、线性 PID 伺服电路和声光调制器驱动执行部分构成。两路激光经 AOM 的移频量近似相等,均为 ~150 MHz,其中一路使用高稳定度信号源驱动,作为参考光束;另一路使用压控振荡器驱动,能够实时精密调节移频量,作为激光锁相的相位执行器。通过零差探测系统检测到的合束激光的偏振相位信号,经过 PID 电路放大并滤波,形成反馈执行信号用于驱动压控振荡器,实时改变 AOM 的移频量。由于相位为频率对时间的积分,通过反馈控制激光的频率能到达两路激光锁相。当两路正交偏振的激光相位差严格锁定后,合束输出的激光为偏振光,偏振态唯一确定;特别是当相位差精确锁定到 $n\pi$ (n 为整数)时,合束光束为线偏振态,可以用于多束激光的级联偏振合成,大幅度提高单频窄线宽光纤激光的功率。

1.1 光零差偏振相位检测

用于激光锁相的小功率合束激光经过 PBS 和二分之一波片检偏后,被高速低噪声光电探测器(PD)接收(如图 1 所示),用于正交偏振态相位探测。假设

经过两 AOM 移频后激光频率分别为 ω_0 和 $\omega_0 + \Delta\omega$ ($\Delta\omega$ 为微小移频量之差),入射到 PBS 的激光光场可以分别表示为 $E_x e^{i\omega_0 t}$ 和 $E_y e^{i[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi]}$, φ 为由两激光路径不同引入的相位差噪声。该相位差取决于两激光所经历的光程差的变化,与激光频率噪声、空间光路长度、光纤长度和折射率有关,容易受到外界环境比如震动、温度等的影响,因此合束后的激光呈现随机偏振态,无法用于级联偏振合束。

当转动二分之一波片使 E_x 与 PBS 的光轴的夹角为 θ 时,如图 2 所示,则光电探测器探测到的光强为:

$$I_{PD} = \left| E_x e^{i\omega_0 t} \cos\theta + E_y e^{i[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi]} \sin\theta \right|^2 \quad (1)$$

经过光电转换后光电探测器输出的信号为:

$$V_{PD} = A_{PD} \left[I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta + \sqrt{I_x I_y} \sin 2\theta \cos(\Delta\omega t + \varphi) \right]^2 \quad (2)$$

式中: A_{PD} 为光电探测器的响应,直流增益为 5 000 V/W (<150 MHz)。公式(2)中前两项 $I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta$ 为激光功率信号;第三项 $\sqrt{I_x I_y} \sin 2\theta \cos(\Delta\omega t + \varphi)$ 为拍频信号。

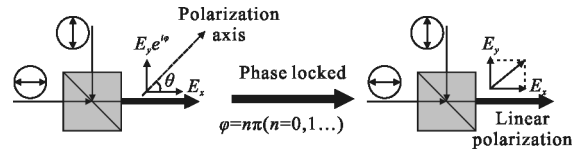


图 2 合束激光偏振控制的原理

Fig.2 Principle of polarization control for combined lasers

当 E_x 与 PBS 的光轴的夹角调节至 45° 时,探测器检测到的偏振相位信号(第三项)达到最大值,此时系统检测到的用于锁相的误差信号为:

$$V_{err} = A_{PD} \sqrt{I_x I_y} \cos(\Delta\omega t + \varphi) \quad (3)$$

基于公式(3),反馈控制系统通过检测该误差信号,然后实时反馈给 AOM 来快速改变 $\Delta\omega$,从而主动补偿激光相位噪声 φ ,达到激光锁相的目的。通过精确调节 $\Delta\omega=0$,在环路闭合相位锁定后误差信号为 0,此时两光束相位差为 $\varphi=90^\circ$ 。因此实验中合束激光需要使用四分之一波片来补偿该固定相位差,从而获得线偏振态激光。此外,在实际情况中可以通过引入固定的 $\Delta\omega$ 来观察误差信号的变化规律,确定锁相的鉴相斜率 $S=A_{PD} \sqrt{I_x I_y}$,用于精确分析和设计环

路频率响应,评估锁相后的剩余相位噪声。

1.2 锁相环路设计与激光偏振控制

基于 1.1 节的零差偏振相位检测的原理,观测了系统误差信号,即光电探测的输出信号,如图 3 所示,环内(实线)和环外(虚线)误差信号均呈现正弦振荡。通过调节激光准直后的二分之一波片可以优化环内误差信号的幅度,提高鉴相斜率;在环外激光经过衰减片衰减后聚到光电探测器上进行探测。通过对环内误差信号进行正弦拟合,来计算零点处的斜率,得到优化后的鉴相斜率为 $S=0.23 \text{ V/rad}$ 。两信号的振荡频率为两路 AOM 驱动信号的频率差 Δf 为 12.27 kHz ,相位差可以通过调节环外四分之一波片进行连续扫描,扫描范围为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 。由于线偏振态可以分解为两个相位差为 $n\pi$ (n 为整数)的正交偏振光,而使用 PID 反馈控制锁相后相位处于 90° 附近,即误差信号的零点附近。因此需要将环内外信号相位差调节至 $\Delta\phi \sim 90^\circ$,来确保锁相后环外信号处于线偏振态,即最值附近。

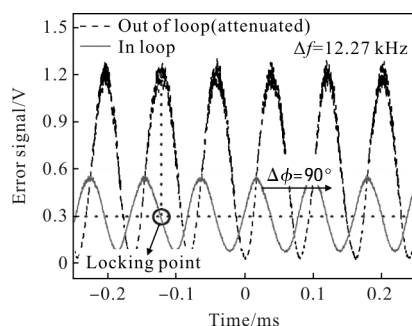


图 3 系统偏振鉴相误差信号

Fig.3 Error signal for discriminating phase difference of polarization state

利用精确测量的误差信号鉴相斜率,建立系统反馈环路模型,系统开环响应为:

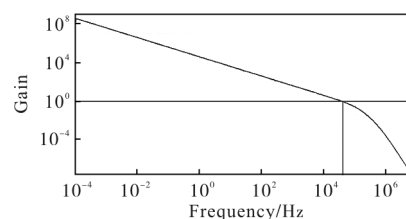
$$A_{open} = \frac{A_{servo} A_{vco} S}{s} \quad (4)$$

式中: $s=j\omega$, ω 为角频率; A_{vco} 为压控振荡器的响应; $1/s$ 表示激光相位为 AOM 瞬时移频量的积分; A_{servo} 为环路滤波器的响应。压控振荡器的频率响应为:

$$A_{vco} = \frac{Dev}{1+s/\omega_1} \quad (5)$$

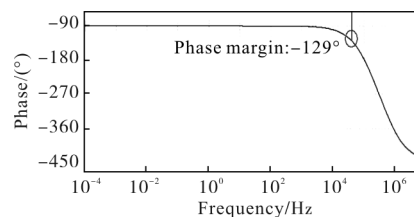
其中,压控振荡器的灵敏度为 $Dev=7 \text{ MHz/V}$,转角频率为 $\omega_1=2\pi \cdot 100 \text{ kHz}$ 。环路滤波器由前置放大器和 PID 电路组成,对信号进行放大滤波,其直

流增益为 0.143 ,转角频率为 282 kHz 。图 4 为系统的开环响应曲线,在低于 100 kHz 区域环路响应以 -6 dB/oct 的斜率下降,相应的相移为 -90° ;在高于 282 kHz 区域由于压控振荡器和环路滤波器的滤波特性,以较大的斜率急速下降,对高频噪声进行滤波。系统的单位增益点为 39.6 kHz ,对应的相位裕度 (phase margin) 为 -129° ,环路能稳定工作。依据系统环路模型,当环路闭合后,锁相的带宽为 39.6 kHz ,能对该范围内的相位噪声进行有效压制。



(a) 幅频响应

(a) Amplitude-frequency response



(b) 相频响应

(b) Phase-frequency response

图 4 激光锁相环路响应曲线

Fig.4 Response of laser phase-locking loop

2 实验结果

当环路闭合后,理想情况下两路激光的相位锁定至固定值 90° 。然而激光功率引入的直流分量(见公式(2))和电路的微小偏置会导致系统锁定后会存在一定的偏差,因而需要对环外四分之一波片进行优化,用于抵消该微小偏差,使得锁定后环外合束激光的相位差为 0° ,从而输出激光呈现线偏振态。

为了评估激光锁相的情况,采用低噪声动态信号分析仪测量了锁相后环内误差信号的噪声谱,再转换为激光的相位噪声谱。图 5 给出了环内两路激光拍频相位噪声谱密度,鉴相斜率为 $S=0.23 \text{ V/rad}$,锁相控制后的相位噪声在 1 Hz 处为 $7 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,大于 10 Hz 区域,噪声谱密度 $\sim 3 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。根据 1.2 节的环路模型,系统对相位噪声的抑制带宽为 39.6 kHz 。

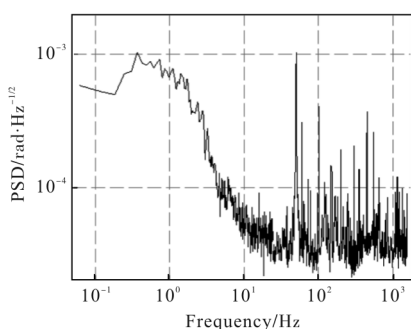


图 5 相位锁定后的相位噪声谱密度

Fig.5 Power spectral density of phase noise with phase locked

两路激光相位锁定后，输出的线偏振激光的偏振消光比(PER)容易受到光纤传输的退偏振、输出光束的空间模式以及空间方向误差等的影响^[11-13]。为了获得更好的偏振消光比，首先整个系统的光纤光路设计需要尽可能消除光纤应力并固定好，降低由环境因素引起的激光偏振态变化。为了保证合束激光的空间模式匹配，需要对激光输出的准直器进行精细的调节。通过 CCD 观测光束近场和远场的光斑强度分布情况，优化准直器参数，使两路输出光斑大小相等，强度分布均呈现高斯分布，并在至少 2 m 的传输距离能完全重合，重合后的光斑依然呈现近高斯分布。

为了精确测量光束的偏振消光比，使用偏振不敏感的分束镜分离~0.1%的合束激光，经过检偏器(二分之一波片和 PBS)后再经过非球面透镜聚焦到光电探测器。通过旋转二分之一波片来测量输出光的最大光强和最小光强的变化情况。图 6 给出了测量到的合束激光的最大和最小光功率的时域曲线，在一段测量时间内的平均值分别为 0.282 9(8) mW 和 0.003 29(6) mW，因而输出合束激光的偏振消光比为 19.3 dB，此时激光总功率为 279 mW。进一步提高放大器的驱动电流获得更高功率的激光输出，当输出总功率达到~1 W 时测量到的偏振消光比有所下降，约为 15 dB。通过相位噪声分析和观测输出激光的光斑发现系统中限制偏振消光比的主要因素是残余的光功率波动引入的剩余相位噪声和光斑空间模式的不匹配，包括光束方向误差和空间波前失配。

由于实验中采用零差探测技术，激光功率噪声会叠加到相位探测的误差信号中，当控制环路闭合

后，该功率噪声会写入剩余相位噪声之中，降低相位控制的精度。通过旋转监测端二分之一波片对光束进行检偏，同时使用 CCD 观察合束激光的光斑情况，发现合束激光的光斑在功率较弱时出现不规则的强度分布(光斑的不同区域明暗存在差异)。这是由于合成激光的波前相位差在整个光斑上分布不一致，通过锁相可以使大部分区域内的相位差为锁定至 0，而剩余部分的相位与该区域相位不同，锁相后不能严格为 0，从而降低这一区域的偏振消光比，导致整体合束激光的消光比下降。综合分析发现系统中限制偏振消光比的主要因素是残余的光功率波动引入的剩余相位噪声和光斑空间模式的不匹配，包括光束方向误差和空间波前失配。

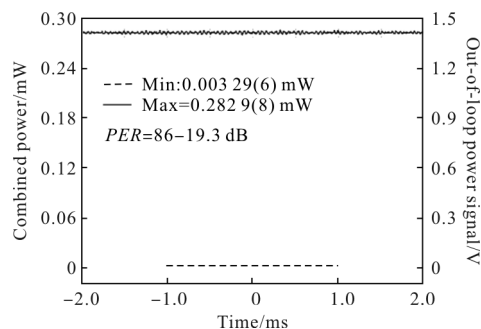


图 6 偏振控制后合束激光的偏振消光比测量，激光输出功率为 279 mW

Fig.6 Polarization extinction ratio of combined beams with polarization control when laser power is 279 mW

3 结论

文中发展了一种基于线性 PID 高精度宽带宽反馈控制的合束激光偏振控制系统，用于激光偏振合束，来提高窄线宽线偏振光纤激光的输出功率。通过分析和建立光零差偏振相位检测物理模型和反馈系统环路响应方程，设计并优化了 PID 伺服控制系统，实现了高抑制比、宽带宽的两路激光锁相。锁相控制带宽高达 39.6 kHz，锁相后剩余相位噪声为 $7 \times 10^{-4} \text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 Hz) 和 $3 \times 10^{-4} \text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ (>10 Hz)。利用偏振控制器件调节合束输出激光的偏振态，获得了偏振消光比为 19.3 dB 的线偏振激光，输出功率 279 mW。当提高合束输出激光总功率达到 1 W 时，激光偏振消光比仍维持在~15 dB。偏振消光比主要受限于两路激光功率波动引入的剩余相位噪声和空间模式不匹配。

利用这种光零差锁相技术的合束激光偏振控制有潜力实现更多路激光的宽带宽激光锁相和偏振合成。通过进一步优化光束的空间模式,能获得低相位噪声、高的光束质量和线偏振度的高功率窄线宽光纤激光,从而应用于很多精密科学实验,如大型激光干涉仪引力波探测、大气光谱探测、激光雷达等;同时还能用于高功率激光偏振控制和激光光谱合成,进一步提升激光功率。

参考文献:

- [1] Apollonov V V. Optics for high power lasers (Invited) [J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 1-8. (in Chinese)
Apollonov V V. 用于高功率激光器的光学元件(特邀) [J]. 中国光学, 2013, 6(1): 1-8.
- [2] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. Chinese Optics, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)
安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术 [J]. 中国光学, 2017, 10(3): 321-330.
- [3] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [4] Wang Huisheng, Liu Yang. Phase-locking of two fiber lasers based on a beam splitter [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1845-1850. (in Chinese)
王会升, 刘洋. 基于分束镜的两路光纤激光器相干合成研究 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1845-1850.
- [5] Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and its coherent beam combination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 155-159. (in Chinese)
楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干组束 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 155-159.
- [6] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining [J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [7] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Experimental research of tilt-tip wavefront and phase-locking control in fiber lasers coherent beam combining [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1443-1447. (in Chinese)
王雄, 王小林, 周朴, 等. 光纤激光相干合成中倾斜和锁相同时控制的实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1443-1447.
- [8] Liu Z, Ma P, Su, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect (Invited) [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A7-A14.
- [9] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [10] 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.
- [11] Goodno G D, Shih C C, Rothenberg J E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers [J]. Optics Express, 2010, 18(24): 25403-25414.
- [12] Ma P F, Zhou P, Wang X L, et al. Influence of perturbative phase noise on active coherent polarization beam combining system [J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29666-29678.
- [13] Ma P F, Lu Y, Zhou P, et al. Investigation of the influence of mode-mismatch errors on active coherent polarization beam combining system [J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27321-27338.
- [14] Wei L W, Cleva F, Man C N. Coherently combined master oscillator fiber power amplifiers for Advanced Virgo [J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5817-5820.
- [15] Su R, Liu Y, Yang B, et al. Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm [J]. Journal of Optics, 2017, 19(4): 045802.