

文章编号: 0258-7025(2009)01-0087-05

基于相干合成的可调全光纤脉冲激光源

王小林 许晓军 周 朴 陈子伦 刘泽金* 赵伊君

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 基于光束相干合成的原理,提出了脉冲激光产生的新方法,设计并构造了相应的全光纤实验系统。该方法通过对光纤耦合器中相干合成的两束相干光的相位差进行有效地控制,实现重复频率、脉宽、占空比均可调的脉冲激光输出。实验中利用闭环工作点控制法进行噪声相位补偿,以得到稳定的脉冲光输出。实验分别利用矩形波、三角波、正弦波进行相位调制,得到了相应波形的激光输出;利用不同参量矩形波进行相位调制,可以得到重复频率从 1~500 kHz,占空比从 20%~80% 可调的脉冲光输出,在重复频率为 500 kHz 时,脉宽可达 300 ns。这种脉冲激光产生技术为大功率、可调脉冲激光的产生提供了一种新的途径。

关键词 激光器;脉冲光纤激光;相干合成;可调脉冲激光;相位调制;噪声补偿

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0087

Adjustable All Fiber Pulse Laser Based on Coherent Combination

Wang Xiaolin Xu Xiaojun Zhou Pu Chen Zilun Liu Zejin Zhao Yijun

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A novel adjustable pulse laser based on phase control of the coherent beam combination is proposed. Corresponding experiment setup with all fiber-based components is designed and manufactured. By controlling the phase difference of the two coherent beams which are coherently combined in a fiber coupler, pulse laser with adjustable repetition rate, pulse duration and duty cycle can be generated. In order to generate stable pulse, the close-loop control method is induced to compensate the phase difference noise. Different wave signals such as rectangular wave, sine wave, triangular wave have been used to modulate the phase difference in experiments, and corresponding pulse lasers are demonstrated. Rectangular wave signal with different parameters is used to modulate the phase difference in experiments, corresponding pulse laser with repetition rate from 1 kHz to 500 kHz and duty cycle from 20% to 80% can be generated. Pulse with 300 ns pulse duration can be demonstrated with repetition rate of 500 kHz. This pulse laser generate technique provides a new approach for the generation of high power, multi-parameter adjustable pulse laser.

Key words lasers; pulse fiber laser; coherent combination; adjustable pulse laser; phase modulate; noise compensate

1 引 言

脉冲激光有许多独特的优点,在工业制造、材料处理、生物医学、遥感遥测等领域有着广泛的应用^[1~5]。由于光纤激光器具有体积小、结构紧凑、光束质量好等特点^[6],光纤激光器脉冲光技术的研究

十分活跃。在传统的电光声光调 Q、锁模、倒腔,抽运电流调制等脉冲技术基础上,人们积极探索新型脉冲光产生技术^[4~10]。半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模技术^[7]、单偏振光纤偏振态调节锁模技术^[6]、声光调制光纤 Bragg 光栅调 Q 技术^[4,9]、单

收稿日期:2008-02-22;收到修改稿日期:2008-05-04

基金项目:国防科技大学优秀研究生创新资助项目。

作者简介:王小林(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器等方面的研究。E-mail:chinawxllin@163.com

导师简介:许晓军(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事高能固体激光器、大气光学与自适应光学等领域的研究。

E-mail:xuxj@21cn.com

通信联系人。E-mail:zejinliu@vip.sina.com

电光晶体调 Q 技术^[5]、基于背向 Raman 散射的脉冲技术^[8]、基于相位调制器和线性啁啾光纤 Bragg 光栅的脉冲技术^[10]等,相继提出并得以实现。

考虑到马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)型光纤水听器的结构特点^[11],本文提出一种新型的基于相干合成相位调制的全光纤脉冲光产生技术。该技术通过对进入光纤耦合器进行相干合成的两束光的相位差进行有效的控制,产生重复频率、脉宽、占空比等多参量可调的脉冲激光,具有普通脉冲激光器不可兼得的优点。

2 理论分析

2.1 基本原理

根据干涉原理,两束光强分别为 I_1, I_2 的单色线偏振光的干涉光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \cos \theta, \quad (1)$$

式中 $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 为两束光的相位差; θ 为两光束的偏振态夹角。

考虑到实验中所有器件都是保偏器件,两光束的偏振态夹角 θ 为 0 。为了得到与调制信号同相的脉冲光输出,在相位调制过程中,将初始相位差稳定在 $2n\pi - \frac{\pi}{2}$ (n 为整数);同时,控制调制信号引起的相位差 $\varphi_M(t)$: $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_M(t) \leq \frac{\pi}{2}$;根据(1)式,忽略噪声相位差,干涉光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[-\frac{\pi}{2} + \varphi_M(t) \right] = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin \varphi_M(t). \quad (2)$$

可见,在不考虑噪声相位情况下,干涉光强的变化由调制信号的正弦函数完全决定。要得到相应波形的脉冲光,只需要计算出其反正弦函数的波形,并用此波形作为相位调制信号即可。下面假设调制信号频率为 ν_m ,周期为 T ,在忽略噪声相位的情况下,分别讨论调制信号频率、脉宽、占空比等性质对输出激光波形的影响。

2.1.1 重复频率

根据(2)式,由于 $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_M(t) \leq \frac{\pi}{2}$,干涉光强变化频率(即脉冲光重复频率)与调制信号频率相同,即 $\nu = \nu_m$ 。

2.1.2 脉宽

在正弦波、锯齿波调制时,增加调制频率可以压缩光脉宽;在矩形波调制时,通过增加调制频率和占

空比都能压缩脉宽。

2.1.3 占空比

对于占空比为 β ($0 < \beta < 1$) 的矩形调制波,调制相位差为

$$\varphi_M(t) = \begin{cases} A & nT \leq t < (n+\beta)T \\ -A & (n+\beta)T \leq t < (n+1)T \end{cases},$$

代入(2)式,并考虑 $I_1 = I_2 = I_0, A = \frac{\pi}{2}$ 时,得到干涉光强为

$$I = \begin{cases} 4I_0 & nT \leq t < (n+\beta)T \\ 0 & (n+\beta)T \leq t < (n+1)T \end{cases}, \quad (3)$$

可见,输出光波是最大值为 $4I_0$,最小值为 0 ,占空比为 β 的矩形波,即输出脉冲光的占空比由矩形调制波的占空比完全决定。

理论上,只要器件响应足够快,调制频率足够高,调制信号占空比足够小,就能够实现任意重复频率、任意脉宽、任意占空比的脉冲光输出。

2.2 噪声相位补偿

理论分析表明,本文的方法能够得到多参量可调的脉冲光输出。但是由于噪声相位 $\varphi_N(t)$ 的存在,输出光脉冲并不稳定。为了得到稳定的脉冲光输出,必须采取相应措施进行噪声相位补偿。文中利用闭环工作点控制法^[11,12]来补偿相位噪声。

考虑调制相位项 φ_M 和噪声相位项 $\varphi_N(t)$,在 $I_1 = I_2 = I_0$ 时,输出光强为 $I = 2I_0 \{1 + \cos[\varphi_M(t) + \varphi_N(t)]\}$ 。其中噪声相位 $\varphi_N(t)$ 包括光纤放大器工作噪声 φ_{NA} ,光纤两臂固有长度差和外界干扰引入的噪声 φ_{NO} 。为了进行噪声补偿,引入反馈相位项 $\varphi_F(t)$,相位差变为 $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_M(t) + \varphi_N(t) + \varphi_F(t)$,并令相位项 $\varphi_P = \varphi_N(t) + \varphi_F(t)$,则

$$I = 2I_0 \{1 + \cos[\varphi_M(t) + \varphi_P(t)]\}, \quad (4)$$

由(4)式可知,要得到稳定的脉冲光输出,只需将相位项 φ_P 稳定在某一固定相位值(即工作点)即可。为了得到与调制信号同相的脉冲光输出,实验中将 φ_P 稳定在 $2n\pi - \frac{\pi}{2}$ 处,输出光强为

$$I = 2I_0 [1 + \sin \varphi_M(t)], \quad (5)$$

实验中利用探测器对输出光强进行探测,将光信号转换为电信号 $V = 2R_p \kappa I_0 [1 + \sin \varphi_M(t)]$,并利用高速 A/D 采样。其中 R_p 为探测器响应度, κ 为电路放大倍数。

相位噪声补偿的实质是工作点控制,具体方法如下。首先通过长时间采样输出光电信号,得到光电信号最大值 V_{\max} ,同时采样相位调制信号 $V_m(t)$,根

据调制器的半波电压 V_0 构造出理想无干扰情况下, 输出脉冲光的光电特性函数 $V_i(t) = V_{\max} \left\{ 1 + \sin \left[\frac{V_m(t)}{V_0} \pi \right] \right\}$, 并计算出均值电压 $\bar{V} = \int_0^T V_i(t) dt$, 然后利用高速 A/D 实时采样输出脉冲光电信号 $V(t)$, 计算其均值电压 $\bar{V}' = \int_0^T V(t) dt$, 并与 \bar{V} 比较, 当二者偏离较大时, 表明实际工作点偏离理想工作点 $2n\pi - \frac{\pi}{2}$ 较大, 通过相应的控制算法, 输出相位控制信号 $V_f(t)$ 使得 \bar{V}' 趋于 \bar{V} , 从而稳定工作点, 实现噪声相位的补偿, 得到稳定的脉冲光输出。

3 实验与结果分析

3.1 实验装置

根据光纤激光器主振-功率放大系统(MOPA)相干合成的原理^[13], 设计全光纤实验系统如图 1 所示。主振荡激光器输出的种子光通过隔离器后分为两束, 它们分别先后通过光纤相位调制器和光纤放大器。两个相位调制器分别用于周期性相位调制和

噪声相位补偿。两个放大器输出光各分为两束, 将不同放大器输出的其中两束进入光纤耦合器进行相干合成, 并利用光电探测器和数字示波器 TDS7154 观察输出激光波形; 为了观察干涉效果, 将另两束光经过准直后, 通过透镜成像后用 CCD 观察远场干涉图样。

实验中利用的种子源为 Keopsys 公司的 1083 nm 窄线宽单横模线偏振激光器, 其最大输出功率为 100 mW, 光束质量 $M^2 < 1.1$, 线宽为 25 kHz, 在实验室中两臂光程差远小于相干长度 (12 km), 满足 (1) 式中要求的单色条件。两个 LiNbO₃ 相位调制器在 1083 nm 处半波电压为 3 V, 如图 1 所示, 其中 PM 为相位调制器, 用于周期性相位调制, PC 为相位控制器, 用于噪声相位补偿。两个光纤放大器均为 IPG 公司的瓦级保偏光纤放大器, 其工作波长为 1075~1088 nm, 最小输入光功率为 1 mW, 最大输出功率为 1 W。由于实验中所有器件均为保偏器件, 保证两相干光的偏振态夹角为 0, 因此能够得到理论分析的脉冲光输出。

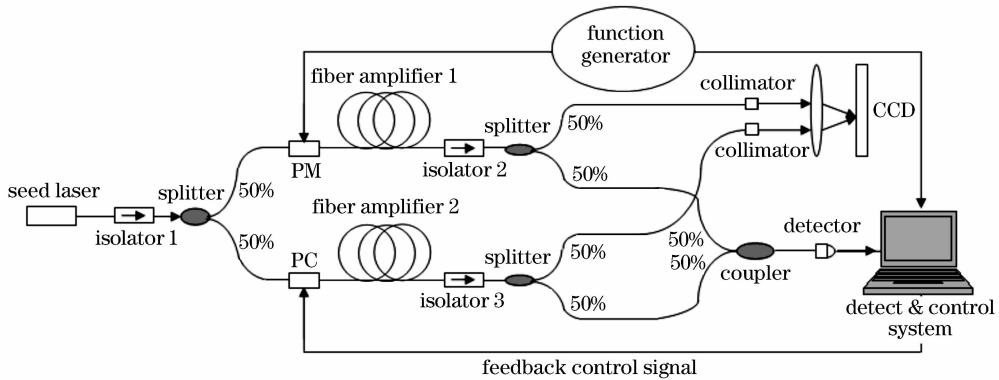


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Scheme of the experiment setup

实验时, 首先调节两个放大器的增益, 使得在无调制信号时两路光强相等; 然后在光路的调制臂上施加周期性的相位调制信号, 利用两路 A/D 转换器分别采样调制信号和耦合器输出光电信号; 采样的电信号经过相应的算法处理后, 产生反馈控制信号, 通过 D/A 加到相位控制器上进行噪声补偿, 以获得稳定的脉冲光输出。同时, 用示波器记录激光波形, 用 CCD 观察光束的远场干涉光强分布。

3.2 结果分析

实验中, 通过闭环工作点控制将两光束相位差控制在 $2n\pi - (\pi/2)$ 。分别利用相位调制范围为 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 的正弦波、三角波、方波进行相位调制,

记录的激光波形如图 2 所示。图 2 中三个调制信号的频率均为 500 kHz。结果表明, 利用不同波形进行相位调制时, 得到了对应波形的同频激光输出, 考虑到器件和电路的响应等因素, 实验得到了与理论分析一致的结果, 表明通过改变相位调制信号的波形来实现激光波形的调节是可行的。

调节方波占空比, 实验得到了与调制信号具有相同占空比的脉冲光输出。图 3 给出了调制频率为 200 kHz 和 500 kHz, 占空比为 20%, 50%, 80% 的矩形波调制时得到的激光时域波形图。图 3 表明, 在较低频率调制时, 能够得到与调制波形对应很好的脉冲激光输出(图 3(a)~(c)); 但是在频率较高时, 输出脉冲波形较调制信号有一定的失真, 这主要是

由于调制器件的响应频带较窄引起的。由图 3(d) 可知,在调制频率为 500 kHz,占空比为 20%时,得

到了重复频率为 500 kHz,脉宽为 300 ns 的脉冲光输出。

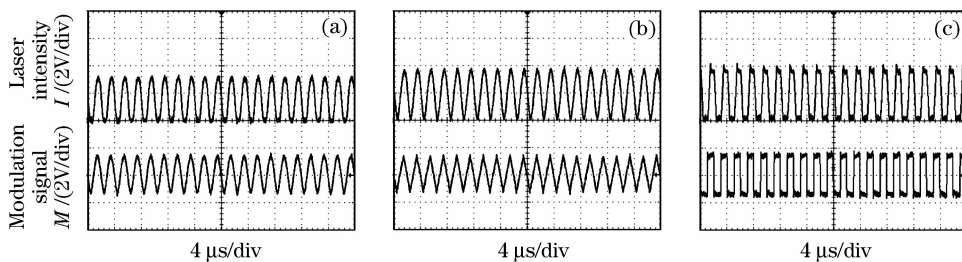


图 2 调制频率为 500 kHz 不同调制波形下的输出激光波形。(a) 正弦波;(b) 三角波;(c) 矩形波 ($\beta=50\%$)

Fig. 2 Different laser wave-forms when different signals were used as modulation signals under 500 kHz modulation frequency. (a) sine wave; (b) triangular wave; (c) rectangular wave ($\beta=50\%$)

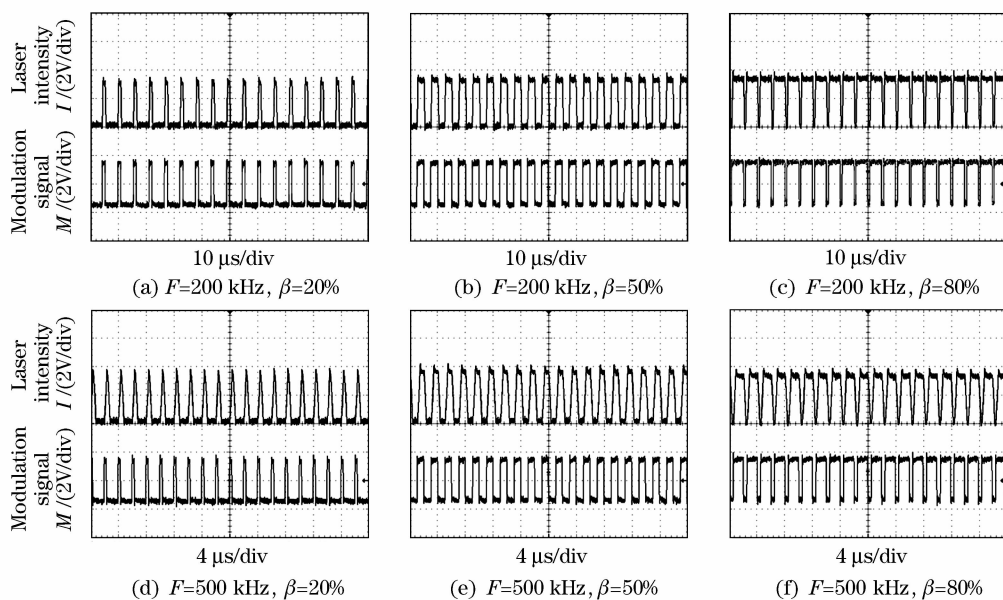


图 3 不同占空比矩形波调制时输出的激光波形

Fig. 3 Different laser wave-forms when rectangular wave with different duty cycles were used as modulation signals

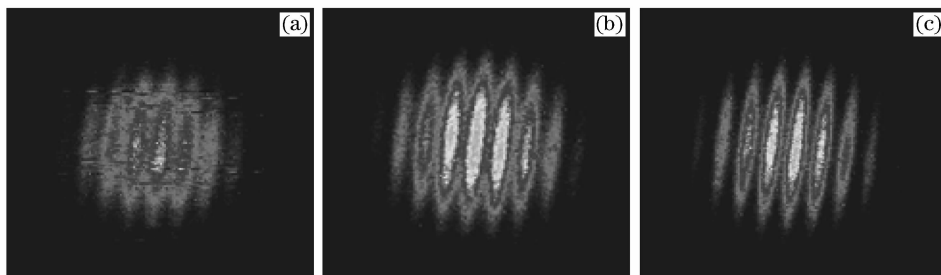


图 4 相干合成的远场干涉图样。(a) 无闭环工作点控制, $F=100$ kHz;(b) 有闭环工作点控制, $F=100$ kHz;(c) 无调制,闭环工作点控制时干涉图样

Fig. 4 Intensity distribution of the two light interference in the far fields. (a) without close-loop control, $F=100$ kHz; (b) with close-loop control, $F=100$ kHz; (c) close-loop controlled without modulation

图 4 给出了调制频率为 100 kHz 的方波进行相位调制时,无有闭环工作点控制时的远场干涉图样(图 4(a),(b))和无调制时闭环控制时的干涉图样(图 4(c))。在没有闭环噪声相位控制时,由于两路

相干光中存在一个随机的相位噪声差,干涉图样较为模糊,图 4(a)所示;在施加闭环噪声控制时,两路相干光的相差是由调制信号决定的周期性相位差,能够得到稳定的干涉图样,如图 4(b)所示。由于调

制时两束光的干涉相位差存在变化,干涉图样的对比度不如两束光相位差恒定时干涉图样(图 4(c))的对比度高。

观察图 2,3,考虑到调制器件和系统电路的延时导致输出脉冲光与调制信号的相位滞后等因素,输出激光与调制信号同相。由于正弦函数在 $(2n\pi - \frac{\pi}{2}, 2n\pi + \frac{\pi}{2})$ 区间内为增函数,而根据(4)

式,仅当 φ_P 为 $2n\pi - \frac{\pi}{2}$ 时,(4) 式为正弦函数形式,

这说明实验对应相位项 φ_P 为 $2n\pi - \frac{\pi}{2}$ 时的情况,即工作点得到了有效的控制,噪声相位得到了有效的补偿。

在低频(小于 1 kHz)和高频(大于 500 kHz)调制时,也得到了占空比在 20%~80%可调的稳定脉冲光输出。但由于周期性调制的引入和实验器件的限制,频率太低时工作点控制有一定困难,频率太高则由于调制器件响应较慢而使得到的脉冲激光波形变差,因此实际上在调制频率为 1~500 kHz 范围内有较好的脉冲光输出。

4 结 论

基于相干合成相位控制的脉冲光纤激光技术,可以调节脉冲光波形、重复频率、脉宽、占空比等参数;实验实现了重复频率 1~500 kHz,占空比 20%~80%可调的脉冲光输出,在重复频率为 500 kHz 时,脉宽可达 300 ns。与普通脉冲激光器相比,具有脉宽、波形可调,重复频率高等优点。同时,全光纤器件的使用,使得设备的组装和系统的调节相当容易。

理论上,只要调制信号的频率足够高,占空比足够小,调制器件响应足够快,就能得到高频的较短脉冲光;如果将输出光通过可饱和吸收体,可以进一步压缩脉宽。如果将此方法产生的脉冲光利用 MOPA 结构进行后级放大,能够得到大功率脉冲光输出。因此,此方法为大功率可调脉冲光的产生提供了一种崭新的途径,相关的研究正在进行中。

参 考 文 献

- Zhang Xiaomei, Shen Baifei. Neutron source from thin foil target compressed by shaped laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1594~1597
张晓梅,沈百飞. 利用整形激光脉冲压缩薄膜靶得到中子源[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1594~1597
- Liu Yaodong, Zhao Lei. Preparation of ZnO thin films by pulsed laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):534~537
刘耀东,赵磊. 脉冲激光沉积法制备氧化锌薄膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):534~537
- Fengchao Wang, Baifei Shen, Xiaomei Zhang *et al.*. Electron acceleration by a propagating laser pulse in low-density plasma [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.):S194~S197
- C. Cuadrado-Laborde, M. Delgado-Pinar, S. Torres-Peiro *et al.*. Q-switched all-fiber laser using a fibre-optic resonant acousto-optic modulator [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**:407~411
- Ferdinand Bammer, Rok Petkovsek. Q-switching of a fiber laser with a single crystal photo-elastic modulator [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10):6177~6182
- Shenping Li, Xin Chen, Dmitri V. Kuksenkov *et al.*. Wavelength tunable stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium ring laser with single polarization fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13):6098~9102
- R. Fluck, B. Braun, E. Gini *et al.*. Passively Q-switched 1.34- μm Nd:YVO₄ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):991~993
- Zhenhuan Ye, Qihong Lou, Jingxing Dong *et al.*. Subnanosecond strong pulse generated by backward Raman scattering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7):406~407
- M. Delgado-Pinar, D. Zalvidea, A. Diez *et al.*. Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3):1106~1112
- Hao Hu, Jinlong Yu, Litai Zhang *et al.*. Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14):8931~8937
- Ni Ming, Zhang Renhe, Hu Yongming *et al.*. Implement of controlling the working point of an interferometric fiber-optic hydrophone by closed loop and pick-up of the signal [J]. *Apply Acoustics*, 2001, **20**(7):13~18
倪明,张仁和,胡永明等. 干涉型光纤水听器闭环工作点控制的实现与信号的获取[J]. *应用声学*, 2001, **20**(7):13~18
- He Shuiyan. Implement of controlling the working point of fiber interferometer by closed loop with LabVIEW [J]. *Journal of Lingling University*, 2004, **25**(3):33~35
贺水燕. 基于 LabVIEW 光纤干涉仪闭环工作点控制系统[J]. *零陵学院学报*, 2004, **25**(3):33~35
- Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61020U