

文章编号: 0258-7025(2008)06-0830-05

呼吸脉冲锁模的光子晶体光纤飞秒激光器

宋有建 胡明列* 张弛 刘博文 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了一种掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)飞秒激光器。作为增益介质的光子晶体光纤的单模场面积比传统光纤高一个数量级,有效地降低了非线性系数,使激光器获得高能量输出。激光器基于线性腔结构,利用半导体可饱和吸收镜实现自启动锁模。光纤激光器利用光栅对进行腔内色散补偿,使其运转在呼吸脉冲锁模状态,即在谐振腔的零色散点附近实现锁模。当腔内净色散呈反常色散时,激光器获得了平均功率为 400 mW,重复频率为 47 MHz(对应于 8.5 nJ 的单脉冲能量),脉冲宽度为 500 fs 的稳定的锁模脉冲输出,经腔外色散补偿,脉冲压缩至 98 fs。当腔内净色散呈正常色散时,激光器输出的单脉冲能量为 10.6 nJ,脉冲宽度为 1.76 ps,经腔外色散补偿,脉冲压缩至 160 fs。

关键词 光纤激光器;光子晶体光纤;呼吸脉冲锁模;大模场面积光纤

中图分类号 TN 248.3⁺5 **文献标识码** A

Stretched-Pulse Femtosecond Photonic Crystal Fiber Laser

Song Youjian Hu Minglie Zhang Chi Liu Bowen Chai Lu Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A femtosecond fiber laser based on Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber (LMA-PCF) is demonstrated. The photonic crystal fiber acts as laser gain medium. Since the single mode area of the fiber is an order higher than that of conventional fibers, the fiber nonlinearity is effectively scaled down, and much higher energy laser pulse output is achieved. The laser is based on a linear cavity design, and a piece of semiconductor saturable absorber mirror is used to initiate mode-locking operation. A pair of gratings are used as intracavity dispersion compensation, and the fiber laser operates in the stretched-pulse regime where the amount of net cavity dispersion is in the vicinity of zero. For negative net cavity dispersion, the laser generates 500 fs pulses with an average power of 400 mW at a repetition rate of 47 MHz (corresponding to a single pulse energy of 8.5 nJ), and the pulses are dechirped to 98 fs after extracavity dispersion compensation. For positive net cavity dispersion, the laser generates 1.76 ps pulses with a single pulse energy of 10.6 nJ, and the pulses are extracavity dechirped to 160 fs.

Key words fiber laser; photonic crystal fiber; stretched-pulse mode-locking; large mode area fiber

1 引 言

掺镱(Yb)石英光纤具有增益谱线宽,抽运光转

换效率高及散热效果好等特点,非常适合于作为锁模激光器的增益介质,产生高能量飞秒激光脉冲。

收稿日期:2008-04-09;收到修改稿日期:2008-05-07

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314904,2006CB806002),国家 863 计划(2007AA03Z447),国家自然科学基金(60678012),高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083,20070056073),教育部科学技术研究重点项目(108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 宋有建(1981—),男,天津人,博士研究生,主要从事光子晶体光纤及飞秒激光器的实验研究。

E-mail: yjsong@tju.edu.cn

导师简介: 王清月(1938—),男,河北人,教授,博士生导师,目前研究方向为光子晶体光纤及超短脉冲激光技术。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

近年来,随着对锁模光纤激光器的脉冲动力学机制的深入探索及新型低非线性光纤的开发,掺 Yb 飞秒光纤激光器的平均功率、单脉冲能量等输出指标不断提高,并已经接近于传统固体飞秒激光器的水平。

飞秒激光脉冲在光纤纤芯中的长距离受限传输会积累非线性相移,引起脉冲畸变,限制光纤激光器能量提高。尤其是传统的孤子锁模激光器,由于受到孤子面积理论的限制,一般情况下仅可以获得几十皮焦耳、数百飞秒的激光脉冲^[1]。而利用两段长度相近,色散符号相反的光纤构成的谐振腔可以工作在呼吸脉冲锁模状态^[2]。基于激光脉冲传输时周期性地展宽、压缩,有效地降低脉冲的峰值功率,使得这种激光器支持的单脉冲能量比孤子锁模激光器高一个数量级。光纤激光器还可以在自相似锁模状态下运转^[3]。此时,飞秒激光在光纤中传输时会演化成抛物线型的脉冲形状并获得线性啁啾,能够有效地避免脉冲分裂。文献[4]报道了从基于普通掺 Yb 光纤的自相似锁模激光器中获得超过 10 nJ 的单脉冲能量的飞秒激光脉冲输出。文献[5,6]研究表明,在不引入任何腔内色散补偿的情况下,激光介质的增益滤波作用可以支持脉冲形成,使光纤激光器工作于全正色散锁模状态,并支持超过 20 nJ 的单脉冲能量输出。

新型大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)^[7~9]具有极低的非线性系数及很高的抽运光数值孔径,使得进一步提高掺 Yb 光纤激光器的平均功率和单脉冲能量成为可能。国际上,B. Ortac 等^[10]利用掺 Yb 大模场面积光子晶体光纤率先实现了孤子锁模运转,从振荡级直接获得了脉冲宽度为 500 fs,单脉冲能量为 16 nJ 的超短激光脉冲输出。在随后的全正色散锁模实验中,获得了 256 nJ 的单脉冲能量,经腔外色散补偿,脉冲宽度达 400 fs^[11]。我们也同步开展了这一领域的实验研究^[12~14],并利用偏振型大模场面积光子晶体光纤实现了孤子锁模及全正色散锁模运转,分别得到 19 nJ 和 50 nJ 的单脉冲能量输出。

本文基于掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤实现了呼吸脉冲锁模运转,系统研究了谐振腔的净色散量在零色散附近的锁模特性,并在实验中获得了小于 100 fs 的超短激光脉冲输出。

2 实验装置

激光器采用线型腔结构,其实验装置如图 1 所

示。选用一段 1.5 m 长的掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤(Crystal Fibre A/S, 丹麦)作为激光增益介质。光纤端面如图 2 所示,为双包层结构。光纤的增益纤芯的单模场直径为 29 μm (对应的单模场面积为 660 μm^2),数值孔径为 0.03。光纤内包层直径为 200 μm ,同时作为抽运光的纤芯。光纤的外包层又称为“空气包层”,它具有非常高的空气比,使内包层获得高达 0.55 的数值孔径。这种抽运结构具有 9 dB/m 的抽运光吸收系数。在光纤纤芯附近引入与包层折射率匹配的应力产生元,从而引起足够的双折射,使基模的两个简并的正交偏振态分离,且其中一个偏振态的折射率低于内包层等效折射率而不满足光纤内传输的弱导条件被损耗掉,使光纤达到偏振保持的效果^[15]。实验中选用光纤的偏振消光比为 10 dB,1060 nm 附近的单一偏振带宽大于 100 nm。光纤的偏振性能对弯曲半径很敏感,实验中把光纤弯曲成直径为 30 cm 的环以保证单偏振运转。为了防止端面反馈形成自激振荡,影响稳定锁模运转,光纤的两端面均打磨成 8°。

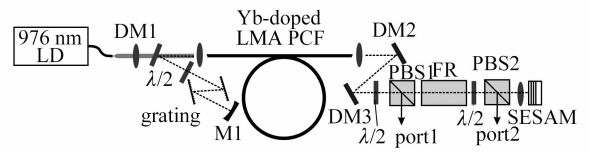


图 1 激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the fiber laser. LD: laser diode; DM: dichroic mirrors; FR: Faraday rotator; PBS: polarization-beam-splitter

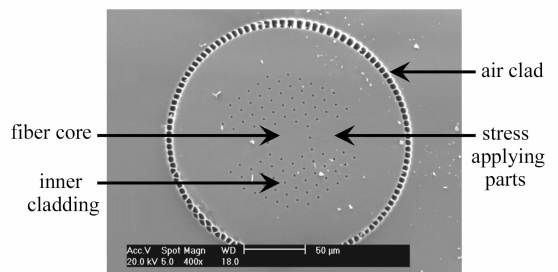


图 2 掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤端面图
Fig. 2 End face of the Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber

掺 Yb 光纤采用波长为 976 nm 的大功率激光二极管(LD)直接抽运,抽运光通过纤芯直径为 200 μm ,数值孔径为 0.22 的尾纤输出,并通过非球面透镜耦合进大模场面积光子晶体光纤。利用对波长为 976 nm 的抽运光高透,对波长为 1.04 μm 的激光高反的双色镜(DM)分离激光与抽运光。全反镜(M_1)和半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为两个腔

镜。全反镜采用曲率半径为750 mm的凹面反射镜,这一曲率有利于提高激光反馈至光纤纤芯的效率。SESAM 基于 GaAs/AlAs 布拉格反射镜上低温分子束外延技术生长的 InGaAs 量子阱结构,用于启动锁模。它在1.04 μm 附近的线性吸收率为65%,调制深度为35%,饱和通量为20 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,吸收恢复时间小于500 fs。利用焦距为11 mm的非球面透镜聚焦,通过改变会聚光斑的尺寸获得启动锁模所需的能量密度。利用一对600 line/mm的表面镀金的闪耀光栅作为色散补偿,通过调整光栅对的间距改变反常色散量。光栅的衍射效率对偏振敏感,需要通过调整半波片使得入射光的偏振态与光栅衍射效率最高的偏振方向一致。谐振腔另一端的双色镜后面依次插入半波片及偏振分束器(PBS),通过旋转半波片确保只激发沿光纤慢轴偏振的模式。利用另一对半波片和偏振分束器调整激光器的耦合输出率,偏振分束器的导出端作为激光器的输出。实验中通过旋转半波片,使激光器的输出率保持在90%,既能最大限度地导出腔内功率,又能把 SESAM 上的平均功率控制在比较低的水平,有效避免对 SESAM 的热损伤。由于线形腔内同时存在沿两个方向传播的脉冲,需要在两个偏振分束器之间加入法拉第旋光器(FR),从而保证仅在单一方向存在高耦合输出率,使激光器高效率运转。激光器的有效腔长约为3 m,获得的锁模脉冲序列重复频率为47 MHz。利用上升时间为200 ps的高速响应光电二极管和采样频率为4 GHz的示波器探测锁模脉冲序列,同时可以监测激光器的多脉冲运转。

3 实验结果

光栅对的间隔取为4.3 cm,入射角度为30°,激光脉冲经光栅对两次反射共产生 -0.064 ps^2 的色散量。大模场面积光纤的色散为 $0.019 \text{ ps}^2/\text{m}$,两次通过光纤共产生 0.057 ps^2 的色散量。因此,激光脉冲在一个腔循环周期内共获得 -0.007 ps^2 的反常色散,光纤激光器运转在呼吸脉冲锁模状态。激光器在抽运功率为4.6 W时实现自启动锁模,输出功率为250 mW。锁模运转非常稳定,触碰光纤及敲击光学平台都不会对其造成影响,体现了偏振光纤优良的环境稳定性。重新打开激光器,只需要恢复抽运功率就可以获得稳定锁模运转。输出平均功率最高达到400 mW,其单脉冲能量为8.5 nJ。测量得到的激光输出光谱如图3(a)所示,插图给出对数坐标下的对应光谱。光谱的中心频率为1045 nm,谱宽为

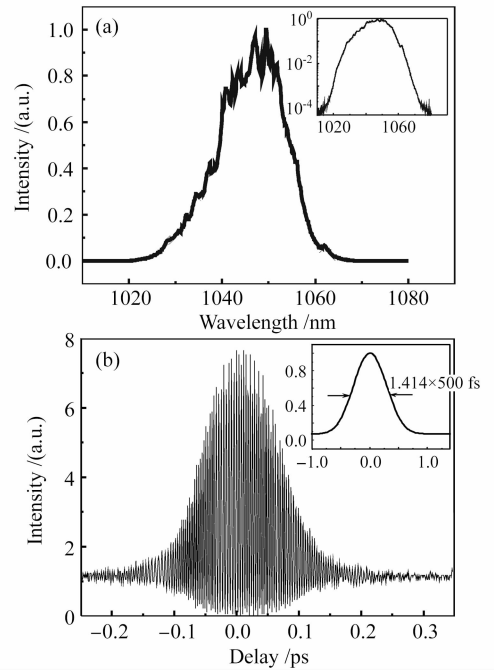


图3 锁模光纤激光器在谐振腔净色散为 -0.007 ps^2 时的输出脉冲特性。(a) 输出激光光谱,插图为对应的对数坐标下的激光光谱;(b) 腔外压缩后的脉冲干涉自相关曲线,插图为从激光器直接输出的脉冲自相关曲线

Fig. 3 Output characteristics of the mode-locking fiber laser when the net cavity dispersion is -0.007 ps^2 . (a) output laser spectrum, the inset shows the corresponding laser spectrum on a logarithmic scale; (b) interferometric autocorrelation trace of the output pulses after extracavity dispersion compensation, the inset shows the autocorrelation trace of the direct output pulses

15 nm。输出脉冲在腔外利用光栅对补偿色散,压缩至98 fs,获得了变换极限的脉冲,其干涉自相关曲线如图3(b)所示,插图给出直接输出激光脉冲的自相关曲线。如图所示,激光器直接输出脉冲宽度为500 fs(假设高斯脉冲形状)。减小光栅对的间距至4.1 cm,腔净色散为 -0.004 ps^2 ,此时激光器依然保持稳定锁模。当进一步减小腔内净色散量时,锁模开始变得不稳定,并容易形成多脉冲及出现束缚态锁模^[16]。在谐振腔的零色散点处,无法获得稳定锁模。继续减小光栅对的间距,激光器过渡到正色散域,并重新实现稳定的锁模运转。此时,光栅对的间距为3.6 cm,产生 -0.054 ps^2 的反常色散,一个腔循环周期的净色散为 0.003 ps^2 。测量得到的激光输出光谱如图4(a)所示,插图给出对数坐标下的对应光谱。光谱宽度仍为15 nm,不过光谱形状与负

色散域明显不同,光谱形成陡峭的两沿,这是正色散域锁模的显著特征。输出脉冲同样在腔外利用光栅对补偿色散,压缩至160 fs,其自相关曲线如图4(b)所示,插图给出直接输出激光脉冲的自相关曲线。如图所示,激光器直接输出脉冲宽度为1.76 ps(假设高斯脉冲形状)。可以看出,正色散域的脉冲在腔内传输时,脉冲宽度的展宽-压缩率比负色散域高一倍,因此有效降低了峰值功率,可以实现更高的单脉冲能量输出。实验中获得了500 mW的平均功率输出,对应的单脉冲能量为10.6 nJ。继续减小光栅对的间距,激光器由呼吸脉冲锁模域过渡到全正色散锁模域,并可以获得更高的单脉冲能量,但是由于脉冲前后沿具有非线性啁啾,压缩后的脉冲宽度比呼吸脉冲锁模域宽得多。

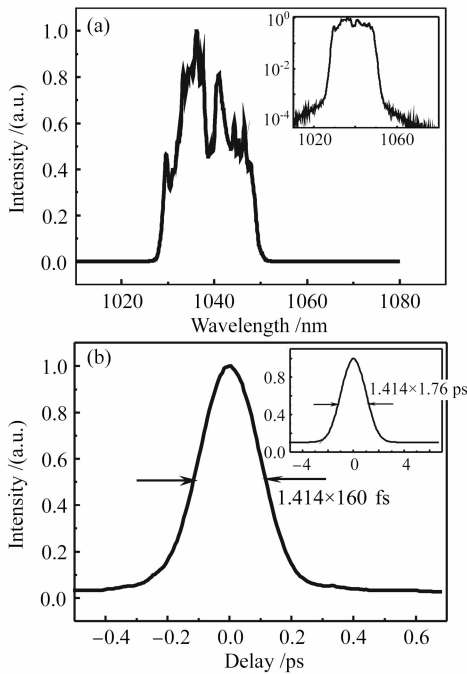


图4 锁模光纤激光器在谐振腔净色散为 0.003 ps^2 时的输出脉冲特性。(a) 输出激光光谱,插图为对应的对数坐标下的激光光谱;(b) 腔外压缩后的脉冲自相关曲线,插图为从激光器直接输出的脉冲自相关曲线

Fig. 4 Output characteristics of the mode-locking fiber laser when the net cavity dispersion is 0.003 ps^2 . (a) output laser spectrum, the inset shows the corresponding laser spectrum on a logarithmic scale; (b) autocorrelation trace of the output pulses after extracavity dispersion compensation, the inset shows the autocorrelation trace of the direct output pulses

4 结 论

实验研究了谐振腔的净色散接近于零的情况下,基于掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤的飞秒激光器的锁模运转。激光器工作在呼吸脉冲锁模状态,利用 SESAM 实现自启动锁模。在腔内净色散为 -0.007 ps^2 的情况下,获得了平均功率为 400 mW,单脉冲能量为 8.5 nJ,脉冲宽度为 500 fs 的稳定的锁模脉冲输出,经腔外色散补偿,脉冲压缩至 98 fs,得到傅里叶变换极限的脉冲。在腔内净色散为 0.003 ps^2 的情况下,输出脉冲的单脉冲能量为 10.6 nJ,脉冲宽度为 1.76 ps,经腔外色散补偿,脉冲压缩至 160 fs。通过选用更长的光纤,可以进一步提高腔内脉冲的展宽-压缩率,并降低其峰值功率,使激光器获得更高的单脉冲能量输出。

参 考 文 献

- 1 K. Tamura, L. E. Nelson, H. A. Haus *et al.*. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2):149~151
- 2 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus. Pulse dynamics in stretched-pulse fiber lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(2):158~160
- 3 F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21):213902
- 4 J. R. Buckley, F. W. Wise, F. Ö. Ilday *et al.*. Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14):1888~1890
- 5 A. Chong, J. Buckley, W. Renninger *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21):10095~10100
- 6 J. An, D. Kim, J. W. Dawson *et al.*. Grating-less, fiber-based oscillator that generates 25 nJ pulses at 80 MHz, compressible to 150 fs [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(14):2010~2012
- 7 J. Limpert, A. Liem, M. Reich *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(7):1313~1319
- 8 Wang Chingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
王清月,胡明列,柴路.光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J].中国激光,2006,**33**(1):57~66
- 9 Ni Yi, Peng Jiande, Ke Yajie *et al.*. Single-mode photonic crystal fiber with a large core [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):901~903
倪屹,彭江得,柯亚杰等.大芯区的单模光子晶体光纤[J].中国激光,2003,**30**(10):901~903
- 10 B. Ortac, J. Limpert, A. Tünnermann. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15):2149~2151
- 11 B. Ortac, O. Schmidt, T. Schreiber *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17):10725~10732
- 12 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. High energy femtosecond Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser works in soliton regime [J]. *Acta*

Physica Sinica (to be published)

宋有建,胡明列,刘博文等. 高能量掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤孤子锁模飞秒激光器[J]. 物理学报(待发表)

13 Y. J. Song, M. L. Hu, C. L. Wang *et al.*. Environmentally stable, high energy Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser operating in the soliton-like regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* (to be published)

14 Wang Chingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1603

~1606

王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. 中国激光, 2007, **34**(12):1603~1606

15 T. Schreiber, F. Röser, O. Schmidt *et al.*. Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19):7621~7630

16 Ph. Grelu, F. Belhache, F. Gutty *et al.*. Phase-locked soliton pairs in a stretched-pulse fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11):966~968

大功率人眼安全波长 KTA 光学参量振荡器激光器

1.5 μm 波段激光具有良好的人眼安全性能,在激光预警、激光测距、激光跟踪等领域有巨大的应用潜力。光学参量振荡器 (Optical Parametric Oscillator, OPO) 是获得 1.5 μm 相干光源的一种有效技术手段,采用合适的非线性晶体可将 1.06 μm 激光高效地转换为 1.5 μm 人眼安全波段。

最近我们采用高质量的 KTA 晶体,利用腔内光学参量振荡 (IOPO) 技术获得了 13.5 W 的 1.534 μm 激光和 3.1 W 的 3.473 μm 输出,实验装置如图 1 所示。

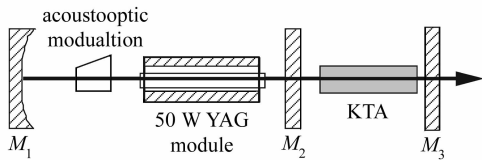


图 1 1.534 μm KTA 腔内光学参量振荡器装置示意图

Fig. 1 Experimental configuration of the KTA-IOPO

OPO 抽运光源采用激光二极管 (LD) 抽运的 1.064 μm YAG 激光模块,由北京希图尼光电公司生产,其中激光二极管模块由 12 个阵列组成,每个阵列的最大功率为 20 W。M₁ 和 M₃ 构成 1.06 μm 的谐振腔,腔长为 200 mm。其中 M₁ 为凹面镜,曲率半径 R = 800 mm,对 1.06 μm 高反; M₃ 为平面镜,对 1.06 μm 高反,同时兼作 OPO 输出镜。通过对实验结果对比,我们选择对 1.53 μm 的最佳透过率为 15% 的输出镜。M₂ 和 M₃ 构成 OPO 腔,腔长为 30 mm,其中平面镜 M₂ 为输入镜,对 1.06 μm 高透,对 1.53 μm 高反。KTA 晶体由青岛海泰光电技术有限公司提供,通光面 4 mm × 4 mm,通光长度为 25 mm。采用 II 类非临界相位匹配 (θ = 90°, φ = 0°),有效非线性系数为 3.23 pm/V。为了降低阈值,尽量缩短 OPO 腔长。

当抽运电流为 24 A (对应的 LD 功率为 240 W),重复频率为 18 kHz 时,得到了参量光总平均功率 16.6 W。其中信号光 1.534 μm 输出功率为 13.5 W,图 2 给出了信号光的脉宽为 5.45 ns,峰值功率高达 136 kW,1 h 内功率稳定度优于 1.42%;休闲光 3.473 μm 输出功率 3.1 W。如果取走 KTA 晶体,将 OPO 输出镜换成 1.064 μm 输出镜,在同样的抽运条件下对应的 1.064 μm 激光功率约为 45 W。按此计算,则 1.064 μm 抽运光到参量光的转换效率为 36.8%。由于

1.534 μm 信号光的波段超出了实验室已有的光束质量分析仪 (SPIRICON, IEEE-1394 Digital Camera 04620) 的测量范围,我们利用测量 1.064 μm 和 1.534 μm 和频产生的 628 nm 红光来评估 1.534 μm 光束质量。红光光束如图 3 所示,为近 TEM₀₀ 模,没有出现高阶模,对其进行拟合,与 TEM₀₀ 模高斯光束的拟合程度 (Gaussian-fit Correlation) 为 89%。

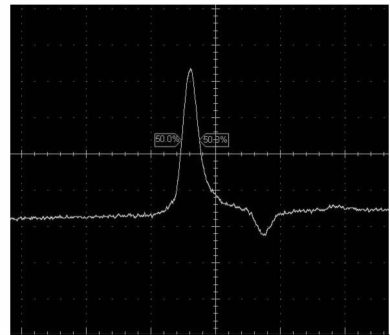


图 2 信号光 1.534 μm 的输出脉冲波形,脉宽 5.45 ns

Fig. 2 Typical pulse shape at 1.534 μm with the pulse width of 5.45 ns

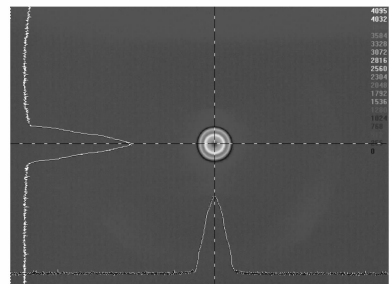


图 3 红光的光强空间二维、三维远场分布

Fig. 3 Two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) beam quality of the red light observed in the far-field

山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100
董晓龙 张百涛 何京良 王瑞华 左春华
黄海涛 徐金龙 邱 港 刘宗楷
收稿日期:2008-05-04;收到修改稿日期:2008-05-13