

输出近百纳焦耳脉冲能量的光子 晶体光纤锁模激光器*

宋有建 胡明列[†] 谢 辰 柴 路 王清月

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

(2009 年 11 月 10 日收到; 2010 年 1 月 5 日收到修改稿)

设计并搭建了一种支持百纳焦耳量级的单脉冲能量输出的锁模光纤激光器. 激光器基于 σ 型腔结构, 采用掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤作为增益介质, 利用半导体可饱和吸收镜实现自启动锁模. 激光器内没有色散补偿机理, 使其工作在全正色散锁模状态. 通过在谐振腔内引入多通长腔使激光器的重复频率降低至 11.1 MHz, 直接获得了平均功率为 1.08 W, 单脉冲能量为 97 nJ, 脉冲宽度为 4.17 ps 的稳定锁模脉冲输出, 经腔外色散补偿, 脉冲宽度压缩至 740 fs.

关键词: 光子晶体光纤, 光纤激光器, 全正色散锁模, 多通长腔

PACC: 4281W, 4280W, 4260D

1. 引 言

高能量的超短激光脉冲源在高次谐波产生、波导直写及玻璃材料的微纳加工等诸多基础研究和工业领域有着重要的应用价值. 传统的固体超快激光光源结构复杂, 成本高昂, 并且很难脱离实验室的超净环境运转, 严重地限制了这种超快激光技术的应用范围. 光纤增益介质由于具有很好的热光特性, 并具有很高的单次通过增益, 可以提供最佳的抽运光-激光转换效率. 而且, 光场在纤芯中封闭地传输, 可以将光纤激光器从超净、恒温 and 防震的高级实验室中解放出来, 使其成为真正可普及化的超短脉冲激光技术. 特别是掺 Yb^{3+} 的石英光纤具有小于 10% 的量子缺陷, 从而支持超过 80% 的光-光转换效率, 而日益成熟的双包层技术允许光纤利用大功率多模 LD 直接抽运, 使得 Yb^{3+} 光纤尤其适合开发实用化的高能量激光系统.

超短激光脉冲在 μm 量级的光纤纤芯中的长距离束缚传输会积累非线性相移^[1-3], 从而引起脉冲

畸变, 使得超短脉冲光纤激光器的输出能量限制在几个纳焦耳量级. 近年来, 一种全正色散锁模机理可以打破光纤非线性对激光器内单脉冲能量提高的限制, 受到了广泛的关注. 由于正常色散光纤激光器中传输的脉冲具有强烈的线性啁啾, 在没有任何腔内色散补偿的情况下, 通过在谐振腔内插入一片窄带滤波片, 或利用有限增益带宽形成的滤波窗口, 可以将光谱调制转化为自振幅调制, 实现高能量超短激光脉冲输出. 最近的一篇报道中, 以双包层光纤作为增益介质, 利用全正色散锁模, 得到了 31 nJ ($1 \text{ nJ} = 10^{-9} \text{ J}$) 的单脉冲能量输出, 经腔外色散补偿, 脉冲宽度压缩至 80 fs ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)^[4].

新型大模场面积光子晶体光纤^[5]具有极低的非线性系数和很高的抽运光数值孔径, 这使得进一步提高掺 Yb^{3+} 光纤激光器的脉冲能量成为可能. 国际上, Ortac 等^[6]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, 光纤的单模场面积为 $660 \mu\text{m}^2$, 从振荡级直接获得了重复频率为 47 MHz, 脉冲宽度为 500 fs, 单脉冲能量为 16 nJ 的超短激光脉冲输出. 天津大学超快激光实验室^[7-11]也同步开展了

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604, 2006CB806002)、国家自然科学基金 (批准号: 60838004, 60978022)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070056083, 20070056073) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0597) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

高能光子晶体光纤超短脉冲技术的研究,并将这种新型的光纤激光源用于超短太赫兹 (THz) 波的产生^[10].

为了进一步提高单脉冲能量,需要降低激光器的重复频率,从而避免引入过高的平均功率.这可以有效地避免热效应对谐振腔的稳定性造成的不利影响,同时节约抽运光资源.2009年,Ortac等利用单模场面积达 $4000\ \mu\text{m}^2$ 的棒状光子晶体光纤作为增益介质实现了全正色散锁模,在 $9.7\ \text{MHz}$ 的重复频率下,得到了 $927\ \text{nJ}$ 的单脉冲能量^[12].棒状光子晶体光纤虽然极大地降低了光纤的非线性,然而光纤的外径接近 $2\ \text{mm}$,不能弯曲且容易折断,影响了其实用性.本文基于普通的偏振型掺 Yb^{3+} 大模场面积光子晶体光纤,在激光器内插入多通长腔 (multi-pass cavity, MPC),将谐振腔的重复频率降至 $11.1\ \text{MHz}$,利用全正色散锁模,得到了 $97\ \text{nJ}$ 的单脉冲能量.这是基于相近单模场面积的光纤由振荡级得到的最高脉冲能量,而且光纤的单偏振结构极大地增强了环境稳定性,使其更接近于实用化的高能量超短激光脉冲源.

2. 实验装置

激光器采用 σ 型腔结构,其实验装置如图1(a)所示.选用一段 $0.9\ \text{m}$ 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1(b)所示,为双包层结构.光纤的增益纤芯的单模场直径为 $29\ \mu\text{m}$ (对应的单模场面积为 $660\ \mu\text{m}^2$),数值孔径为 0.03 .光纤内包层直径为 $200\ \mu\text{m}$,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 $10\ \text{dB/m}$ 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.并且,其中一个偏振态的折射率低于内包层等效折射率,不满足光纤内传输的弱导条件,被损耗掉,从而使光纤达到偏振保持的效果.实验中选用光纤的偏振消光比为 $15\ \text{dB}$, $1060\ \text{nm}$ 附近的单一偏振带宽大于 $100\ \text{nm}$.光纤的偏振性能对弯曲半径很敏感,实验中采用 $15\ \text{cm}$ 的光纤弯曲半径,以保证

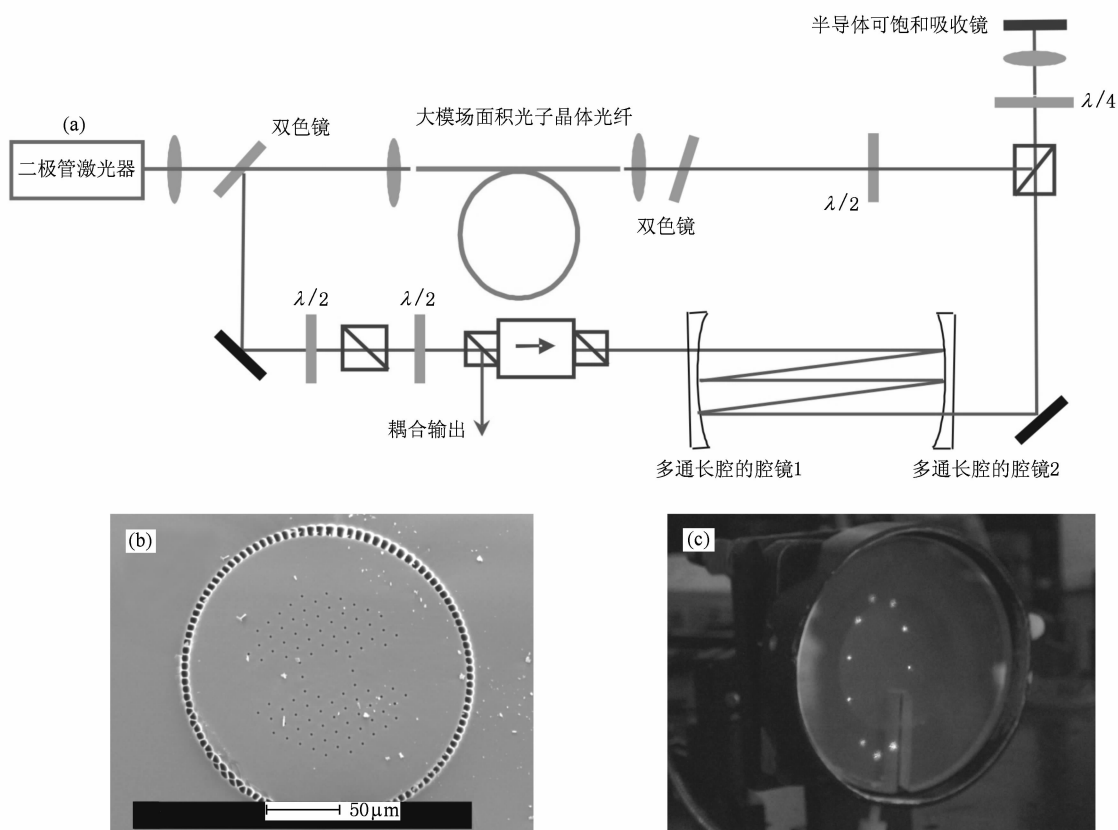


图1 多通长腔激光器实验装置图及部分实物照片 (a) 多通长腔激光器实验装置图, (b) 掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤端面图, (c) 多通长腔的一个腔镜上的光斑分布照片

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° .

掺 Yb 光纤采用波长为 976 nm 的大功率激光二极管直接抽运, 抽运光通过纤芯直径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的尾纤输出, 由非球面透镜 ($f = 11$ mm, NA = 0.25) 准直, 透过双色镜 (HT@ 980 nm, HR@ 1.04 μm), 并由另一非球面透镜 ($f = 8$ mm, NA = 0.5) 耦合进大模场面积光子晶体光纤. 未被吸收的抽运光由另一双色镜 (HT@ 1.04 μm , HR@ 980 nm) 反射出腔外. 通过在谐振腔内插入光学隔离器 (隔离度 > 45 dB) 保持激光脉冲的单向运转, 隔离器的导出端作为耦合输出. 根据隔离器限定的传输方向, 激光相对于抽运光反向传输. 激光光场首先经光子晶体光纤放大, 从抽运光注入端准直输出至自由空间. 由于单偏振光子晶体光纤的偏振度有限, 从光纤中出射, 并被双色镜反射之后的激光需要经过一对半波片和偏振分束器 (PBS), 以损耗掉在光纤放大过程中耦合到错误偏振态的能量, 从而获得高质量的单偏振脉冲. 利用另一半波片调节该脉冲入射至隔离器的偏振方向, 从而调节耦合输出率. 本实验中, 输出率固定在 90%. 脉冲经过隔离器后, 在多通长腔中往复传输, 出射脉冲透过 PBS, 由焦距为 11 mm 的非球面透镜聚焦至半导体可饱和吸收镜 (SESAM), 实现自启动锁模. SESAM 基于 GaAs/AlAs Bragg 反射镜上低温分子束外延技术生长的 InGaAs 量子阱结构, 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. 在 SESAM 的光路中插入 1/4 波片, 这样被 SESAM 反射的激光偏振态旋转 90° , 从 PBS 的反射端导出. 最后, 由半波片把激光偏振态旋转至光子晶体光纤慢轴方向, 利用非球面透镜耦合至光子晶体光纤, 形成一个腔循环周期. 考虑到光纤信号纤芯的数值孔径只有 0.03, 因此在激光耦合端采用了焦距为 18.4 mm 的非球面透镜, 这可以保证激光以小角度耦合至信号纤芯, 从而提高耦合效率.

3. 多通长腔

脉冲在多通长腔中的往返多次传输, 可以增加渡越时间, 从而有效地降低谐振腔的重复频率. 多通长腔在延长脉冲的几何光程的同时, 可以使输出端的 Gauss 光束 q 参数与输入端相同, 从而使激光

器的运转状态与短腔时完全相同.

多通长腔具有稳定的双反射镜谐振腔结构, 每一个镜面上有一个开槽, 用于导入和导出激光. 光线的多次反射会使两个镜面上的光斑形成椭圆分布, 如图 1 (c) 所示. 在特定的条件下, 多通长腔可以实现 Gauss 光束的 q 参数单位变换. 也就是说, 光场在传输过程中的衍射发散会完全被多通长腔的周期性聚焦所补偿. 多通长腔实现 q 参数单位变换需要满足的条件在文献 [13] 中已详细推导, 这里仅简要介绍并给出结论.

考虑光线在多通长腔内往返一次所完成的一个腔循环周期, 其传输矩阵表示为:

$$\mathbf{M}_T = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}. \quad (1)$$

经过 n 次腔循环, 对于入射的 Gauss 光束, 为了使得光束通过多通长腔之后 q 参数保持不变, \mathbf{M}_T^n 必须为 $\pm \mathbf{I}$, 这里 \mathbf{I} 是单位矩阵. 满足 $\mathbf{M}_T^n = (-1)^m \mathbf{I}$ 的条件为

$$n\theta = m\pi, \quad (2)$$

这里, n 与 m 为整数, θ 为镜面上相邻两个腔循环周期形成的光斑的夹角. 如果考虑半径为 R 的两面相同的凹面反射镜, 其距离为 d , 则

$$\theta = 2\cos^{-1}(1 - d/R). \quad (3)$$

(2) 式给出了设计 q 参数再现的多通长腔的最根本的条件, 即光线在一个镜面上经过 n 次反射所积累的偏移角度等于 π 的整数倍. 当 m 为奇数时, 第 n 次反射的光斑与第 1 次反射的光斑分处于镜子的两端, 相差 π 弧度. 当 m 为偶数时, 第 n 次反射的光斑与第 1 次反射的光斑重合, 光路恰好闭合. 实现 q 参数再现只由反射镜的曲率半径与两面镜子的距离决定, 而与入射光线无关, 入射光线仅决定形成椭圆光斑分布的形状.

实验中设计了一对曲率半径为 2 m 的凹面反射镜 M1 和 M2, 表面镀高反膜, 其对 1.04 μm 波长的单次反射率大于 99%. 两凹面镜之间的距离选为 1.17 m, 由 (2) 和 (3) 式得到的 q 参数再现所对应的每面镜子上面有 11 个光点, $n = 11$, 相邻两个腔循环周期形成的夹角为 144° , $m = 8$. 由于每一个凹面镜上留有一个切槽, 用于导入和导出光线, 因此镜面上只有 10 个光点, 其镜面上的光场分布如图 1 (c) 所示, 光线没有经过 q 参数再现就被直接导出多通长腔了. 实际上, 光纤激光器并不需要严格地保持 q 参数. 对于环形腔的光纤激光器, 只需要使从多通腔出射的光斑不要因为长距离传输而过分发散即

可. 在实验过程中, 通过进一步调节两个凹面镜的距离, 使其间距固定为 1.07 m. 此时从多通长腔出射的激光是逐渐会聚的, 并很容易透过有限孔径的非球面透镜聚焦至 SESAM.

4. 实验结果

全正色散锁模实验中, 在 6.5 W 的抽运功率下, 得到了 1.08 W 的平均功率输出, 单脉冲能量为 97 nJ. 进一步增加抽运功率会由于过强的非线性效应激发多脉冲. 利用上升时间为 200 ps 的高速响应光电二极管和 400 MHz 带宽的模拟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.

测得的锁模脉冲序列如图 2(a) 所示, 稳定锁模的重复频率为 11.1 MHz.

由于锁模脉冲序列的重复频率在兆赫兹量级, 由射频波段的频谱分析仪测量其功率谱, 可以直观地反映脉冲序列的稳定性及噪声特性. 利用频谱分析仪 (Agilent 8560E) 测量的脉冲序列一次谐波的功率谱如图 2(b) 所示, 测量过程中选取 1 MHz 的频率窗口和 1 kHz 的分辨率带宽. 锁模的噪声抑制比达到 70 dB, 中心频率附近 500 Hz 之内噪声功率谱较强, 说明激光器存在一定的振幅噪声. 这一频率范围内的噪声主要归因于空气扰动和机械调整架的振动, 这在自由空间光路很长的长腔激光器内是很难避免的.

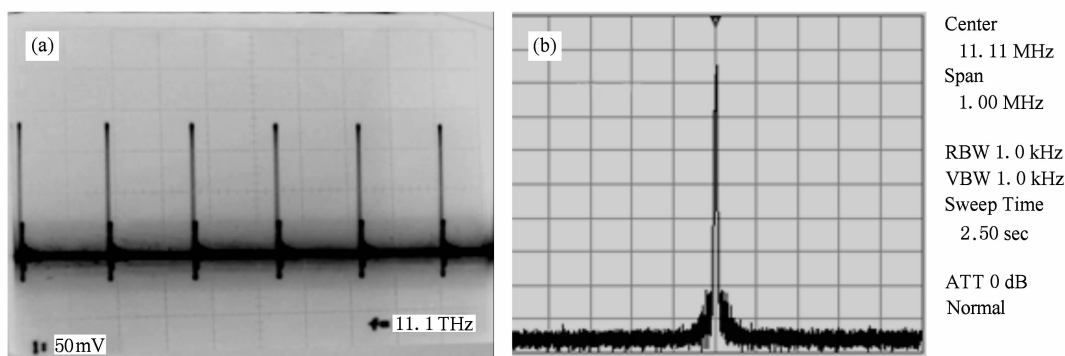


图 2 脉冲序列及功率谱 (a) 激光器输出的脉冲序列, (b) 频谱分析仪测得的脉冲序列一次谐波的功率谱 (频率窗口为 1 MHz, 分辨率为 1 kHz)

图 3 给出了锁模的光谱. 光谱在线性坐标与对数坐标下均呈现矩形, 这是全正色散锁模的典型特征. 图 4 给出了锁模的自相关曲线及经腔外压缩后的相关曲线. 直接输出的脉冲宽度为 4.17 ps, 可以很好地用 Gauss 函数拟合. 测量自相关曲线时, 故意使主脉冲偏移中心, 从而在更大的时间窗口内监视子脉冲的

产生. 由相关曲线可以看出, 激光输出在 35 ps 的时间范围内没有出现多脉冲. 在谐振腔外利用一对 1200 线的反射光栅进行色散补偿, 可以得到 740 fs 的变换极限脉冲, 其基底代表积累在脉冲两沿的不能被压缩的非线性啁啾. 光栅对的压缩会带来 30% 的能量损耗, 压缩后的脉冲峰值功率为 93 kW.

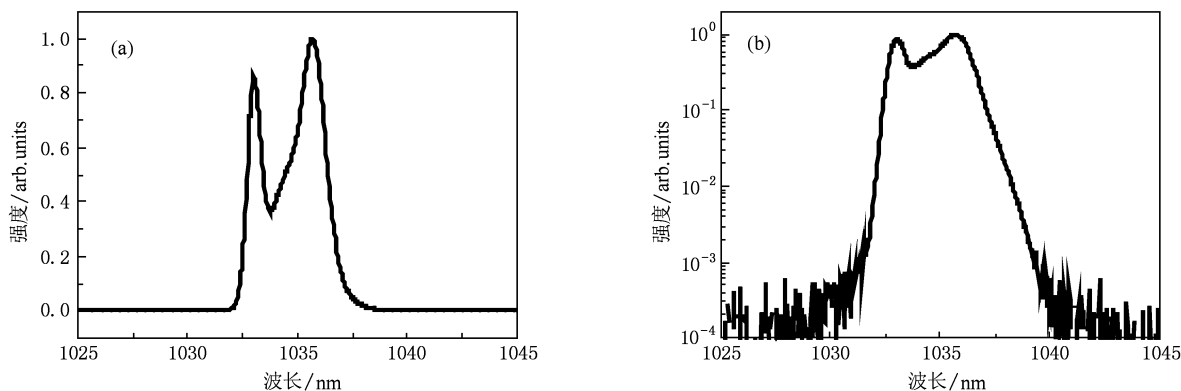


图 3 锁模光纤激光器输出脉冲的光谱 (b) 为对 (a) 的强度 (纵轴) 取对数的结果

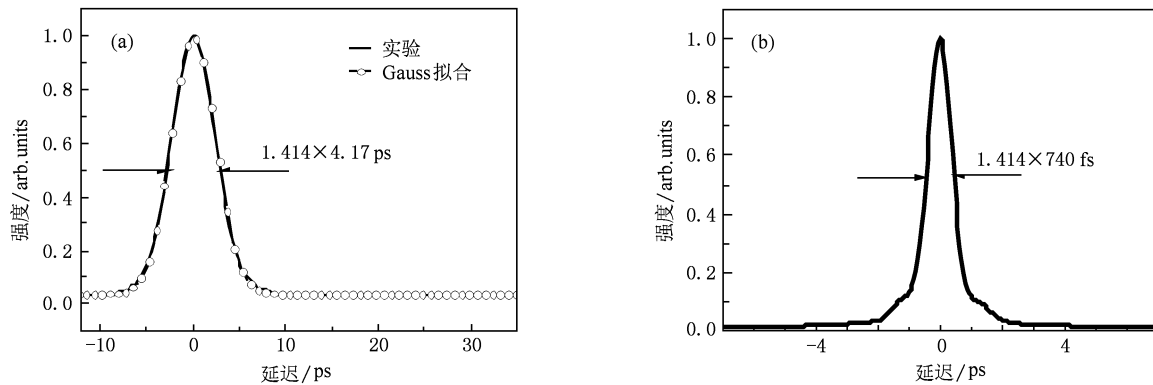


图4 脉冲的自相关曲线 (a) 从激光器直接输出的脉冲, (b) 腔外压缩后的脉冲

5. 结 论

利用掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤作为增益介质, 通过在谐振腔内引入多通长腔降低重复频率, 基于 SESAM 的被动调制, 实现了全正色散锁模. 在 11.1 MHz 的重复频率下, 直接获得了平均

功率为 1.08 W, 单脉冲能量为 97 nJ, 脉冲宽度为 4.17 ps 的稳定锁模脉冲输出. 经腔外色散补偿, 脉冲宽度压缩至 740 fs. 激光器能量的进一步提高受到光纤非线性的限制. 这种低重复频率、高脉冲能量的激光振荡级在激光高速微纳加工领域有广泛的应用前景.

- [1] Kelly S M J, Smith K, Blow K J, Doran N J 1991 *Opt. Lett.* **16** 1337
- [2] Tang Y, Han Y H 2000 *Chin. Phys.* **9** 565
- [3] Luo Z C, Xu W C, Song C X, Luo A P, Chen W C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2328
- [4] Kieu K, Renninger W H, Chong A, Wise F W 2009 *Opt. Lett.* **34** 593
- [5] Schreiber T, Rösler F, Schmidt O, Limpert J, Iliew R, Lederer F, Petersson A, Jacobsen C, Hansen K P, Broeng J, Tümmerrmann A 2005 *Opt. Express* **13** 7621
- [6] Ortac B, Limpert J, Tümmerrmann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 2149
- [7] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese) [刘博文、胡明列、宋有建、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 6921]
- [8] Hu M L, Song Y J, Liu B W, Fang X H, Zhang C, Liu H G, Liu F, Wang C L, Chai L, Xing Q R, Wang Q Y 2009 *Chin. J. Laser.* **36** 1660 (in Chinese) [胡明列、宋有建、刘博文、方晓惠、张弛、刘华刚、刘丰、王昌雷、柴路、邢岐荣、王清月 2009 中国激光 **36** 1660]
- [9] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建、胡明列、刘博文、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
- [10] Song Y J, Hu M L, Wang C L, Tian Z, Xing Q R, Chai L, Wang C Y 2008 *IEEE Photo. Technol. Lett.* **20** 1088
- [11] Zhang C, Hu M L, Song Y J, Zhang X, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7727 (in Chinese) [张弛、胡明列、宋有建、张鑫、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 7727]
- [12] Ortac B, Baumgartl M, Limpert J, Tümmerrmann A 2009 *Opt. Lett.* **34** 1585
- [13] Sennaroglu A, Fujimoto J G 2003 *Opt. Express* **11** 1106

Approaching 100 nJ pulse energy output from a mode-locked photonic crystal fiber laser*

Song You-Jian Hu Ming-Lie[†] Xie Chen Chai Lu Wang Qing-Yue

(*Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 10 November 2009; revised manuscript received 5 January 2010)

Abstract

Pulse energy directly output from a mode-locked fiber laser approaching one hundred nanojoule is demonstrated. The fiber laser is based on a σ -shaped cavity design. A segment of single polarization Yb-doped large mode area photonic crystal fiber acts as gain medium. A semiconductor saturable absorber mirror is used for self-starting mode-locking operation. The fiber laser works in an all normal dispersion mode-locking regime with no intracavity dispersion compensation introduced in the laser. A long multi-pass cavity is used to reduce the repetition rate of the fiber laser. Direct output pulse energy of 97 nJ with an average power of 1.08 W is achieved at a low repetition rate of 11.1 MHz. The pulse duration is 4.17 ps, which can be extracavity dechirped to 740 fs.

Keywords: photonic crystal fiber, fiber laser, all normal dispersion mode-locking, multi-pass cavity

PACC: 4281W, 4280W, 4260D

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2010CB327604, 2006CB806002), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60838004, 60978022), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant Nos. 20070056083, 20070056073) and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-07-0597).

[†] Corresponding author. E-mail: huminglie@tju.edu.cn