

## 基于多通单元的高能量耗散孤子锁模光纤振荡器\*

谢辰 胡明列<sup>†</sup> 张大鹏 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)

(2012年7月22日收到; 2012年10月12日收到修改稿)

为了在有限抽运功率条件下探索基于大模场面积光子晶体光纤的耗散孤子锁模振荡器的能量提升潜力, 本文利用多通单元将基于掺镱大模场面积光子晶体光纤锁模振荡器的腔长延展, 消除了有限抽运功率的限制, 使得该系统能够在较低平均功率水平下获得更高的单脉冲能量. 实验上构建了重复频率低至 15.58 MHz 的高能量光子晶体光纤锁模脉冲振荡器, 并通过分别使用 6 nm 带宽和 12 nm 带宽的两种不同带宽的光谱滤光片, 能够直接输出平均功率分别为 3.73 W 和 4.9 W 的啁啾脉冲, 对应单脉冲能量分别为 239 nJ 和 314 nJ. 经过光栅对去啁啾后, 最窄脉冲宽度分别为 56 fs 和 75 fs, 对应峰值功率均超过 3 MW.

关键词: 多通单元, 耗散孤子, 飞秒, 光纤激光器

PACS: 42.65.Re, 42.55.Wd, 42.65.Tg, 07.60.Vg

DOI: 10.7498/aps.62.054203

## 1 引言

飞秒激光器现已广泛应用于研究化学反应中的超快过程、超短脉冲微纳加工、生命科学以及超精密测距等诸多前沿科学技术领域, 目前最为广泛使用的高能量飞秒激光系统大多仍是基于固体激光技术的钛宝石锁模激光放大系统. 而由于该系统对环境的要求较高、操作维护复杂, 同时钛宝石 Kerr 透镜锁模需要昂贵高质量的抽运源以及复杂的振荡-放大系统进一步推高了系统的成本, 极大阻碍了超短脉冲技术的普及. 而光纤锁模激光系统的出现能够大大缓解甚至完全解决上述问题, 但起初光纤激光系统输出的功率与能量一直无法很高. 随着科技的进步, 各种研究结果指出: 光纤内过大的非线性是对光纤锁模振荡器直接输出脉冲能量的一个基本限制, 如果能够成功解决该问题, 甚至仅利用光纤振荡系统即可输出以往振荡-放大系统才能达到的高功率高能量脉冲指标, 这就进一步降低了系统的复杂性和成本, 同时也能够大大提高系统的稳定性, 为超短脉冲技术的进一步普及和推广铺

平了道路.

为了探索光纤锁模振荡器脉冲能量提升的潜力, Frank Wise 小组从增大脉冲在激光腔内的时间宽度进而降低高峰值功率带来的过高非线性这一方案入手开展了广泛而深入的研究. 首先由 Chong 等人于 2006 年基于普通单模光纤 (SMF) 在全正色散域 (ANDi) 利用非线性偏振旋转 (NPR) 锁模机理研制成功耗散孤子锁模光纤激光器<sup>[1]</sup>. 到了 2007 年, 他们甚至将基于 SMF 的 ANDi 激光器输出的单脉冲能量提升到了 26 nJ 的水平<sup>[2]</sup>. 深入的研究表明, 基于全正色散域的耗散孤子锁模光纤振荡器是迄今为止由光纤振荡器直接输出单脉冲能量最高的一种锁模方案. 到了 2010 年, Wise 小组又使用了模场直径更大 (33  $\mu\text{m}$ ) 的大模场面积光子晶体光纤, 从而将输出的单脉冲能量水平提高至百纳焦耳量级<sup>[3]</sup>. 而 Baumgartl 等随后从提高单模场面积这一方案入手降低光纤内非线性对脉冲能量的限制, 利用两种特殊设计的超大模场直径 (分别为 41  $\mu\text{m}$  和 70  $\mu\text{m}$ ) 的大气孔间隙光子晶体光纤, 先后于 2011 年和 2012 年构建了两台工作于全正色散域的耗散孤子锁模振荡器, 更是将基于 NPR 锁模方案

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 61078028, 60838004)、全国优秀博士学位论文作者专项资金 (批准号: 2007B34) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20110032110056) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

光纤振荡器输出的单脉冲能量水平提升至 534 nJ 和 867 nJ 的世界纪录<sup>[4,5]</sup>. 值得注意的是, 虽然目前基于 NPR 方案锁模振荡器的最高单脉冲能量水平 (867 nJ) 还未超过 Baumgartt 等于 2009 年基于棒状大模场面积光子晶体光纤和半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 构建的振荡器所输出的 927 nJ 水平, 但其亚百飞秒的去啁啾脉宽远窄于基于 SESAM 锁模方案的百飞秒量级脉宽<sup>[6,7]</sup>, 脉冲质量也远明显优于基于 SESAM 方案的脉冲<sup>[8]</sup>, 对应的峰值功率高达 7MW, 数倍于只能压缩到 711 fs 的基于 SESAM 锁模光纤激光器输出的最高峰值功率水平<sup>[9]</sup>. 至此, 超短脉冲光纤振荡器的单脉冲能量指标已经达到部分放大系统的水平, 完全可以基于此高能量、高峰值功率超短脉冲系统构建结构更加简单, 成本更为低廉的飞秒加工、超连续光源及太赫兹系统.

首个使用 NPR 方案并基于约 33  $\mu\text{m}$  模场直径大模场面积光子晶体光纤的锁模振荡器输出了 142 nJ 的单脉冲能量<sup>[3]</sup>, 本小组之前基于 30  $\mu\text{m}$  模场直径光子晶体光纤的工作报道了 202 nJ 单脉冲能量的输出<sup>[10]</sup>, 这些系统的输出能量指标均被有限泵浦功率所限制. 为充分探索该方案输出能量的潜力, 本文利用一个多通单元基于模场直径 30  $\mu\text{m}$  的商用掺镱大模场面积光子晶体光纤构建了两台重复频率低至 15.58 MHz 的锁模激光脉冲振荡器. 实验中分别探索了使用两种带宽滤光片的系统输出特性: 在使用 6 nm 滤光片的情况下获得了最高 239 nJ 的单脉冲能量 (平均功率 3.73 W), 而使用带宽更宽的 12 nm 滤光片能够将直接输出的单脉冲能量提高至 314 nJ (平均功率 4.9 W); 经过腔外光栅对压缩后, 输出峰值功率均超过了 3MW. 该输出指标可以替代一些放大系统构成结构简单、低成本且高稳定性的高能量高峰值功率超短脉冲光源.

## 2 实验装置

基于之前的工作<sup>[10]</sup>改进成的基于多通单元的激光振荡器实验装置如图 1 所示. 整个系统基于环形腔结构, 以一段 1.1m 长的掺镱双包层大模场面积光子晶体光纤 (Yb-LMA-PCF) 作为增益介质, 作为抽运光波导的内包层直径为 170  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.62; 直径 40  $\mu\text{m}$  的单模纤芯对 976 nm 抽运光的吸收系数为 13 dB/m. 实验中利用了一个最高输出功率 35 W 的 976 nm 激光二极管 (LD) 提供抽运光, 通过两个非球面透镜将抽运光准直并耦合入

Yb-LMA-PCF. 为防止光纤端面形成的寄生振荡, 将两个端面分别进行了气孔塌陷并打磨成 8° 角. 由于本文工作所采用的大功率激光二极管抽运源的输出功率有限, 为了探索该方案的脉冲能量提升潜力, 因此以一对相距 0.81 m、曲率半径为 2 m 的高反球面镜构成一个多通单元 (MPC) 放置于激光腔内延展腔长以降低重复频率, 这样能够充分利用有限抽运功率, 从而在相同的输出平均功率水平下得到对应更高单脉冲能量的锁模脉冲序列. 而仅由高反射球面镜构成的多通单元不会引入任何脉冲能量提升机理, 因此可以用其在实验室现有条件下研究腔内其他物理机理对脉冲能量提升的影响. 此外, 低重复频率对于超短脉冲的后续应用也是一种优势, 尤其在超短脉冲加工领域能够有效减少高重复频率脉冲带来的热量累积效应.

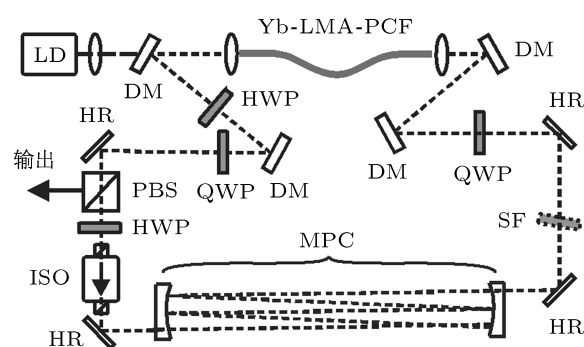


图 1 实验装置图 (LD, 大功率激光二极管; DM, 双色镜; Yb-LMA-PCF, 掺镱大模场面积光子晶体光纤; HWP, 1/2 波片; QWP, 1/4 波片; PBS, 偏振分束器; ISO, 光学隔离器; HR, 高反镜; MPC, 多通单元; SF, 滤光片)

由光纤纤芯输出的激光经过非球面透镜准直后, 在自由光路内经过两个双色镜 (DM) 和两个高反镜 (HR) 耦合进入多通单元 (MPC), 期间由 1/2 波片 (HWP)、1/4 波片 (QWP) 和偏振分束器 (PBS) 构成的装置用以将脉冲在光纤内的非线性偏振旋转转化成等效快速可饱和吸收体的振幅调制, PBS 的反射端口作为振荡器的输出端口, 而另一部分的透射脉冲能量经过一个 1/2 波片和一个保证脉冲在激光腔内单向运转的 40 dB 光学隔离器 (ISO) 后, 由一个高反镜注入多通单元; 脉冲在多通单元内经过 18 次反射后输出至后续自由光路, 再经过一个带宽有限的滤光片和 1/4 波片后由若干高反镜、双色镜以及非球面透镜注入回光纤纤芯, 构成闭环反馈.

### 3 实验结果与分析

由于激光腔内没有任何引入负色散的器件,并且在腔内引入了一个提供耗散作用的滤光片,因此该激光器是一台工作于全正色散域内的耗散孤子锁模光纤振荡器.在一定的抽运功率下,通过仔细调节各个波片的取向,能够获得稳定的锁模脉冲序列.而引入了多通单元后,锁模脉冲序列的重复频率低至 15.58 MHz.此时提高抽运功率能够增加输出锁模激光脉冲的功率,对于使用 6 nm 滤光片的情况,最高输出功率可达 3.73 W,对应单脉冲能量 239 nJ,这已经突破之前工作中有限抽运功率对能量指标的限制<sup>[10]</sup>;当使用 12 nm 滤光片时,最高输出功率更是达到了 4.9 W (单脉冲能量 314 nJ);实验中还尝试使用了 20 nm 带宽的滤光片以及不使用任何滤光片的情况,但这两种情况下均难以获得稳定的锁模状态,且对应锁模瞬间输出的脉冲光谱形状及宽度相似,其原因是引入过宽带宽的滤光片(比如 20 nm)甚至不引入滤光片时,腔内脉冲没有遇到任何滤波耗散的作用,因此在由全正色散分布的激光腔内难以获得稳定的自洽循环.分别使用两种带宽的滤光片所获得的稳定最高能量

锁模脉冲在腔外经过一个光栅对进行时域压缩,得到去啁啾后的脉冲自相关曲线如图 2(a) 和 (b) 所示.使用 6 nm 滤光片时,根据图 2(c) 中实际测量的光谱可以得到变换极限脉冲的半高全宽 (FWHM) 约为 56 fs;而使用 12 nm 滤光片时,由相应光谱得到的变换极限脉冲宽度约为 75 fs.该激光系统使用较窄滤光片时的光谱更宽,即对应的去啁啾脉宽更窄,这一特性是全正色散域内的耗散孤子锁模激光器的固有属性<sup>[11]</sup>.由测量光谱得到的变换极限脉冲自相关曲线与相应实际测量得到的去啁啾脉冲自相关曲线非常符合,仅在曲线的旁瓣处有微小的差异.这是由于光栅对和光纤分别引入的高阶位相不匹配造成的,但该高阶不匹配对脉冲半高全宽的影响可以忽略,这说明经过光栅对去啁啾后的脉冲基本达到了对应光谱的变换极限脉冲.考虑到光栅对压缩器约 80% 的系统透过率以及脉冲旁瓣部分残留的能量,两种情况下去啁啾后对应的峰值功率均超过了 3 MW.图 2(d) 中给出了使用 6 nm 滤光片下进一步增加抽运功率至输出功率达 4.61 W 时的光谱演化.进一步提高抽运功率会导致脉冲序列中的直流成分变高,并且仔细调节波片取向无法将直

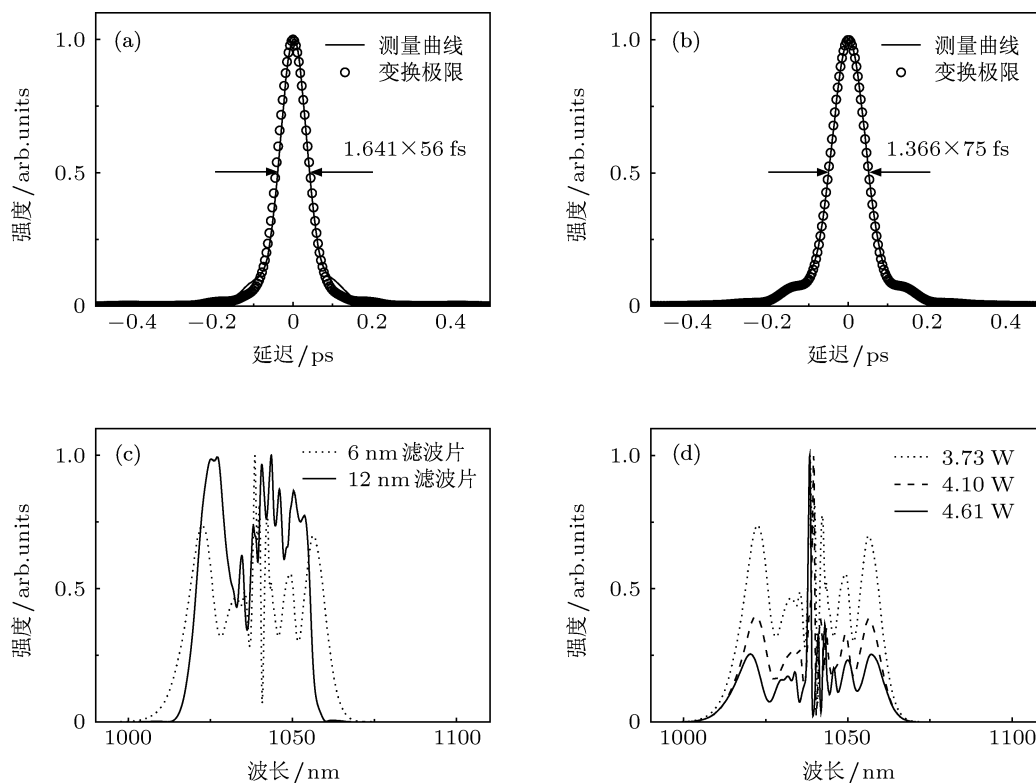


图 2 振荡器输出: 使用 (a) 6 nm 和 (b) 12 nm 带宽滤光片时, 经光栅对去啁啾后脉冲及由 (c) 相应光谱得到变换极限脉冲的自相关曲线; (d) 使用 6 nm 滤光片时, 不同输出功率水平下的光谱

流成分抑制. 虽然这种情况下还能够提高输出功率, 但由于较高的直流成分占据了大量的能量, 无法正确计算单脉冲能量, 并且直流成分还会和脉冲成分竞争增益, 导致锁模状态不稳定, 因此这样的指标毫无意义. 使用 12 nm 滤光片的情况类似, 因此并未列出.

实验中使用了最大延迟为 50 ps 的自相关器与一个响应时间小于 35 ps 的快速探测器以及两个不同带宽 (400 MHz 和 20 GHz) 的示波器确定系统的

单脉冲运转. 在使用两种不同带宽滤光片并输出各自最高单脉冲能量的情况下, 在 50ps 延迟的自相关器上以及 400 MHz 和 20 GHz 示波器 (图 3(a) 和 (b)), 由于两种滤光片下的示波器图像几乎无差别, 仅列出 12 nm 滤光片最高输出功率下的示波器时域序列图像) 上均未看到任何子脉冲. 更为详细的稳定性可以通过频谱仪测量, 图 3(c) 和 (d) 分别为使用两种滤光片时脉冲时域序列的射频噪声谱, 二者的信噪比均超过了 70 dB.

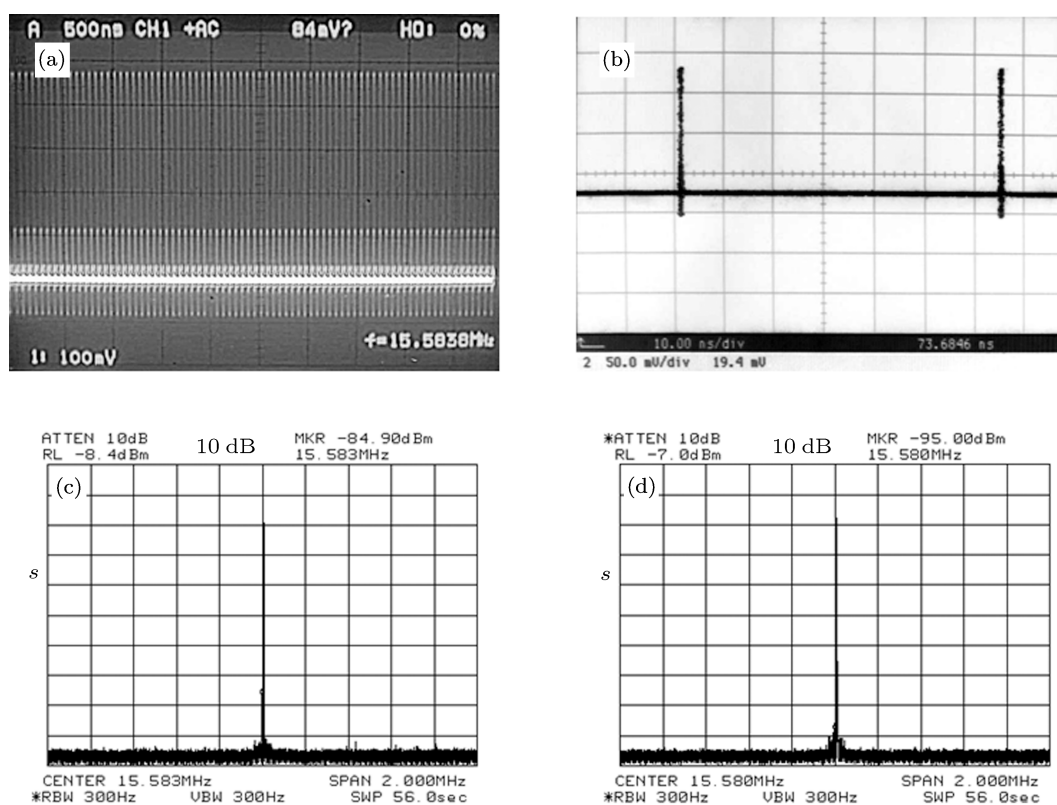


图3 脉冲的稳定性: 使用 12 nm 滤光片时, 以 (a) 400 MHz 示波器 (500 ns/格) 和 (b) 20 GHz 示波器 (10 ns/格) 测得的输出 4.9 W 平均功率下的脉冲时间序列; 使用 (c) 6 nm 和 (d) 12 nm 滤光片时的最高输出功率下的射频谱

## 4 结论

本文利用多通单元延展腔长降低重复频率, 克服了以往工作中有限功率抽运源对振荡器输出单脉冲能量指标的限制, 构建了基于掺镱大模场面积光子晶体光纤的低重复频率耗散孤子锁模振荡器. 该系统工作于全正色散域内, 重复频率为 15.58 MHz. 探索了使用两种不同带宽滤光片时的系统输出特性, 使用 6 nm 滤光片能够获得单脉冲能量较低 (239 nJ) 而去啁啾后时域宽度较窄 (56 fs) 的脉冲; 使用 12 nm 滤光片能够获得单脉冲能量较高

(314 nJ) 而去啁啾后时域宽度较宽 (75 fs) 的脉冲. 两种情况下对应去啁啾后的峰值功率相当, 均超过 3 MW, 且均可实现信噪比超过 70 dB 的稳定锁模运转. 输出如此高能量、高峰值功率的窄脉冲振荡器可以替代一些输出指标较低的放大系统, 同时降低了系统的复杂性及成本, 能够进一步实现低成本、小型化、高稳定性的高能量超连续光源、太赫兹系统以及飞秒加工系统.

感谢天津大学电子信息工程学院于晋龙教授和王菊博士在高速示波器测量上的协助.

- [1] Chong A, Buckley J, Renninger W, Wise F 2006 *Opt. Express* **14** 10095
- [2] Chong A, Renninger W H, Wise F W 2007 *Opt. Lett.* **32** 2408
- [3] Lefrançois S, Kieu K, Deng Y, Kafka J D, Wise F W 2010 *Opt. Lett.* **35** 1569
- [4] Baumgartl M, Jansen F, Stutzki F, Jauregui C, Ortaç B, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Lett.* **36** 244
- [5] Baumgartl M, Lecaplain C, Hideur A, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Lett.* **37** 1640
- [6] Song Y J, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7105 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2010 物理学报 **59** 7105]
- [7] Fang X H, Hu M L, Song Y J, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064208 (in Chinese) [方晓惠, 胡明列, 宋有建, 谢辰, 柴路, 王清月 2011 物理学报 **60** 064208]
- [8] Baumgartl M, Ortaç B, Lecaplain C, Hideur A, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 2311
- [9] Ortaç B, Baumgartl M, Limpert J, Tünnermann A 2009 *Opt. Lett.* **34** 1585.
- [10] Zhang D P, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044206 (in Chinese) [张大鹏, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 044206]
- [11] Chong A, Renninger W H, Wise F W 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 140

# High energy dissipative soliton mode-locked fiber oscillator based on a multipass cell\*

Xie Chen Hu Ming-Lie<sup>†</sup> Zhang Da-Peng Chai Lu Wang Qing-Yue

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

(Received 22 July 2012; revised manuscript received 12 October 2012)

## Abstract

To investigate the energy scaling level of large-mode-area photonic crystal fiber-based dissipative soliton mode-locked fiber oscillators under limited pump power, a multipass cell is inserted in the cavity to lower the repetition rate of the system, and thus higher single energy level can be mapped under the same average power level. High energy mode-locked fiber lasers based on two spectral filters with different bandwidths are demonstrated both working in the all-normal dispersion regime at a repetition rate of 15.58 MHz. Employment of filters with FWHMs of 6nm and 12 nm can achieve stable mode-locked pulses with average powers of 3.73 W and 4.9 W, corresponding to single pulse energies as high as 239 nJ and 314 nJ, respectively. The FWHM durations of the dechirped pulses by a transmission grating pair can reach 56 fs and 75 fs, which can generate pulses with peak powers exceeding 3MW in both cases.

**Keywords:** multipass cell, dissipative soliton, femtosecond, fiber laser

**PACS:** 42.65.Re, 42.55.Wd, 42.65.Tg, 07.60.Vg

**DOI:** 10.7498/aps.62.054203

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101, 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61078028, 60838004), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation (FANEDD) (Grant No. 2007B34), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110032110056).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: huminglie@tju.edu.cn