

纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展

吴 权^{1,2,3} 樊仲维^{1,3} 余 锦¹ 石朝辉³ 张 雪¹ 刘 洋¹

(¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)
³ 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192)

摘要 脉冲光纤激光器作为当前国内外激光领域研究的热点之一,其应用越来越广泛。介绍了获取纳秒量级脉冲激光输出的两种典型结构,并基于相应原理分析了各自的关键性技术。概括了国内外该方向的研究进展,提出了有待于解决的若干问题,最后对脉冲光纤激光器的应用和发展前景进行展望。

关键词 激光器;脉冲光纤激光器;调 Q;种子源;主振荡功率放大

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060004

Research Progress of Nanosecond Regime Pulsed Fiber Lasers

Wu Quan^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Yu Jin¹ Shi Zhaohui³ Zhang Xue¹ Liu Yang¹

(¹ Academy of Opto-Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract As one of the research hot spots at home and abroad in the laser field nowadays, the applications of pulsed fiber lasers are becoming more and more extensive. Two typical configurations by which can obtain laser with nanosecond regime pulse duration are introduced and the key technologies of them are analyzed respectively based on the corresponding principles. Research progress at home and abroad in the field is summarized, then some problems to be resolved are put forward. At last the applications and develop prospect of pulsed fiber lasers are also presented.

Key words lasers; pulsed fiber lasers; Q-switched; seed; master oscillator power amplifier

OCIS codes 060.2320; 140.3510; 140.3538; 140.3540; 140.3615

1 引言

近年来随着半导体包层抽运技术的改进和新型大模场面积双包层光纤以及光纤光子晶体光纤(PCF)的不断出现^[1,2],加上光纤激光器结构紧凑、转换效率高、易于热管理和高光束质量等固有优势^[3,4],脉冲光纤激光器在诸如切割、焊接和打孔等激光材料加工领域的应用已经逐步取代了部分的全固态脉冲激光器。2010年国外已能实现飞秒量级平均功率近千瓦的脉冲输出^[5],利用啁啾脉冲放大技术,在兆赫兹重复频率下单脉冲能量达毫焦量级的研究成果也已见报道^[6]。国内利用国产大模场面积双包层光纤也取得了许多研究进展^[7~11]。可见,相比于传统全固态激光器和连续光纤激光器,脉冲光纤激光器的发展潜力是巨大的。

而作为脉冲光纤激光器的一个分支,高重复频率、高平均功率、毫焦量级的调 Q 双包层光纤激光器的出现使得大型激光加工系统得以高性能稳定集成,并且随着光纤光栅制作技术以及各种带尾纤光纤器件产品趋于成熟,光纤激光器正向全光纤方向发展,很可能带动新一代激光产业向前发展^[12]。另外,高重复频率、高平均功率、脉宽为纳秒量级的光纤激光器在遥感、相干雷达系统以及精密加工领域的应用价值也逐渐地被人们发现并加以利用,国内在这一方向的研究近两年也取得了一些进展^[13~17],所以纳秒量级的脉冲光纤激

收稿日期: 2011-12-15; 收到修改稿日期: 2012-01-05; 网络出版日期: 2012-04-01

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)和中国科学院光电研究院创新基金(AOE2009-002, Y12413A01Y)资助课题。

作者简介: 吴 权(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器及光纤非线性效应等方面的研究。

E-mail: wuquan10@mails.gucas.ac.cn

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士,研究员,主要从事衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制等方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

光器已经并将继续成为国内外一个热门的研究方向^[18]。

本文简要介绍声光调 Q 方式和种子源主振荡功率放大(MOPA)结构这两种获取纳秒量级脉冲激光输出的典型结构,并基于相应原理分析各自的关键性技术。重点概括并对国内外在该方向的研究进展,以归纳目前限制脉冲光纤激光器发展的若干问题,并提出一些有效可行的解决方法,其中最重要的就是光纤热损伤管理和非线性效应的抑制,最后对脉冲光纤激光器的应用和发展前景进行展望。

2 纳秒量级脉冲光纤激光器产生机理

2.1 调 Q 脉冲光纤激光器典型装置及原理

纳秒量级的脉冲通常由调 Q 方式获取,是在连续输出的光纤激光器腔内加入调 Q 器件,周期性改变腔内损耗(Q 值)实现脉冲输出^[19]。由于调 Q 脉冲能量主要取决于模场面积、激活离子上能级寿命和 Q 开关的调制深度,所以为了得到高的单脉冲能量,常常采用具有高衍射损耗的声光调制器(AOM),即为声光调 Q 机制,主动调 Q 的一种^[20,21]。利用声光调 Q 而成的脉冲光纤激光器典型装置如图 1 所示。

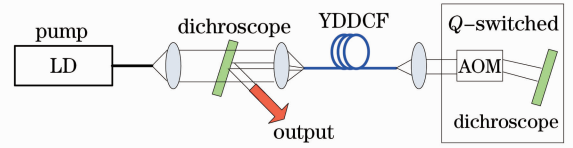


图 1 声光调 Q 脉冲光纤激光器典型装置
Fig. 1 Typical setup of AOM Q-switched pulsed fiber lasers

调 Q 光纤激光器的抽运源一般采用激光二极管(LD)。对于工作介质,光纤激光器与传统全固态激光器的根本区别在于前者是利用具有独特波导特性的光纤作为增益介质,这就直接决定了光纤激光器在热管理、模式和效率上的优势。所以,光纤激光器的发展离不开光纤本身的发展,由最初的普通光纤到双包层光纤,再经由大模场面积双包层光纤到光子晶体光纤,乃至推动脉冲光纤激光器的发展。而就现在调 Q 光纤激光器在突破单脉冲能量达到毫焦量级上的报道来看,增益介质多采用掺镱大模场面积双包层光纤(YDDCF)和光子晶体光纤。声光调 Q 的优势是可人为控制脉冲的重复频率从而获得较为稳定的脉冲序列,调 Q 脉冲宽度下限约为 L/c 数量级(L 为腔长, c 为光速),一般就是纳秒量级。

考虑到稳定性和系统集成问题,调 Q 光纤激光器的发展趋于全光纤化,这得益于各种尾纤输出器件的出现。区别于以上装置,全光纤调 Q 光纤激光器中抽运耦合是将 LD 尾纤与增益光纤直接熔接起来,还有的是利用波分复用(WDM)耦合器;谐振腔则是由一对具有等同功能的光纤布拉格光栅(FBG)构成,有尾纤熔接和直接在光纤上写入两种方式,AOM 也是通过尾纤熔接;为防止背向散射激光和剩余抽运光反向传输而损坏抽运源,常常还加入隔离器进行单向隔离。这种装置整体结构更为紧凑,稳定性较好。其典型装置如图 2 所示。



图 2 全光纤型声光调 Q 脉冲光纤激光器典型装置
Fig. 2 Typical setup of all-fiber AOM Q-switched pulsed fiber lasers

2.2 MOPA 结构装置

目前获取高光束质量、高单能量的脉冲激光输出普遍是采用 MOPA 结构,该结构由种子源和功率放大两部分组成。其中,种子源可以是调 Q 固体激光器、脉冲调制的半导体激光器、调 Q 光纤激光器等,基本装置如图 3 所示。

MOPA 结构最终输出的脉冲光束质量取决于种子源,所以其优势还在于可以选取具有高斜效率和良好脉冲输出特性的种子源进行后端功率放大,利用不同纤芯模场的增益光纤逐级放大功率也是有效缓解光纤内非线性效应以及热损伤的一种方法^[22,23]。

2.3 关键技术

以上三种获取纳秒量级脉冲的结构,归纳起来其共同关键技术可从以下几方面考虑:

1) 脉冲控制。影响脉冲能量的因素有 AOM 的衍射损耗、纤芯模场面积、掺杂激活离子的上能级寿命和 Q 开关的调制深度。其中激活离子上能级寿命对振荡过程中要采用多大的重复频率的影响,需要视脉冲能量而选定。

2) 抽运方式的选择。有侧面和端面抽运两种方法^[24,25],侧面抽运对工艺要求较高,效率往往很高。端面抽运效率,在图 1 装置中取决于耦合系统,一般采用非球面镜,图 2 装置中取决于熔接损耗的控制。端面抽运又有前向、后向和双向抽运三种方式,不同方式对激光器最终的输出特性产生影响,实际实验中采用哪种还依赖于不同的脉冲重复频率^[26]。

3) 熔接技术。装置 2 和 3 中各器件均采用尾纤与增益光纤熔接而成,全光纤型固然有优势,但熔接是一个难题,尤其是不同形状、尺寸的双包层光纤或者光子晶体光纤的熔接,必须保证工艺精度控制其损耗,否则抽运效率大大降低。

4) 模式控制。对于采用大模场面积光纤的激光器,改善激光光束质量需要对横模进行控制。国内外用于进行模式选择的方法有光纤弯曲^[27~29]、拉锥^[30,31]、增益控制^[32,33]和腔镜选模^[34,35]。其中直接可行的办法是光纤弯曲法,相对于基模,高阶模对弯曲更为敏感,将光纤弯曲在半径不至太小的范围内,高阶模的损耗随着弯曲半径的减小而增大,故此可以抑制高阶模进而优化光束质量。所以选取合适的弯曲半径是关键^[36],但光纤的弯曲对于激光波长也可能存在影响^[37]。

5) 非线性效应的抑制。非线性效应的产生不仅影响脉冲的光束质量,还可能降低输出功率。这些年,一些新的技术相继提出,分别从几何结构、材料成分、制作工艺、工作条件等方面对增益光纤进行了改进^[38]。

3 国内外研究进展综述

脉冲激光器主要方向之一是向高平均功率方向发展,许多应用要求激光器在高重复频率下能够实现高平均功率输出,这在于加工中可以提高加工速度。图 4 显示了几种超短脉冲固体激光器平均功率的研究进展^[39],足见脉冲光纤激光器较传统固体激光器的优势所在。

用于产生纳秒量级的调 Q 脉冲光纤激光器,是 1986 年 I. P. Alcock 等^[40]首次将调 Q 技术引入光纤激光器后才逐步发展起来的。当时采用掺 Nd³⁺ 光纤作为增益介质,使用声光 Q 开关在重复频率 100 Hz 下获得了脉宽为 200 ns、峰值功率为 8.8 W 的脉冲输出。之后随着 YDDCF 的出现,国内外研究人员在调 Q 光纤激光器和 MOPA 结构脉冲光纤激光器上,先后在脉冲平均功率、能量和光束质量上取得了突破性研究,整理国内外一些典型的研究成果来综述纳秒量级脉冲光纤激光器的发展历程,所选用光纤参数及脉冲输出参数如表 1^[40~49]和表 2^[50~59]所示。

由表 1 数据可以看出,正是不同掺杂离子、不同类型光纤的出现,促使了脉冲光纤激光器向高重复频率、高平均功率、高单脉冲能量和窄脉宽方向发展。从早期的掺 Nd³⁺^[40]到后来的掺 Yb³⁺,调 Q 脉冲光纤激光器在峰值功率和单脉冲能量上已分别能实现千瓦量级和毫焦量级的突破。2001 年的数据显示,脉冲能量虽能高达 7.7 mJ,但重复频率较低,仅为 500 Hz^[41]。为解决模场面积和单模输出之间的矛盾,不同类型光子晶体光纤相继出现,2007 年耶拿大学利用 70 μm 纤芯 PCF 实现了 100 kHz 的高重复频率下 100 W 的高平均功率输出,其 2 mJ 的单脉冲能量和 7.3 ns 的脉宽使得峰值功率高达 275 kW^[44]。

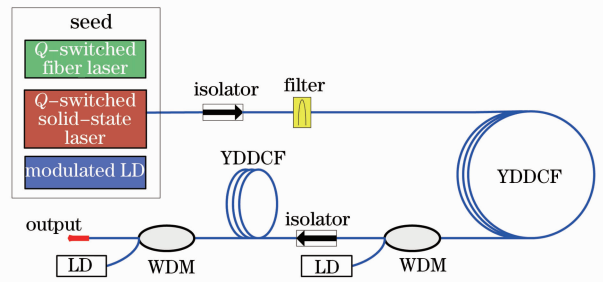


图 3 MOPA 结构声光调 Q 脉冲光纤激光器典型装置
Fig. 3 Typical setup of MOPA configuration AOM Q-switched pulsed fiber lasers

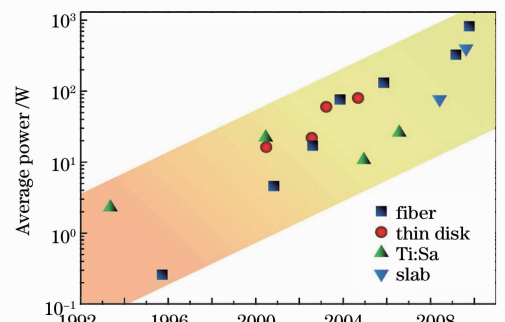


图 4 几种超短脉冲固体激光器平均功率输出的研究进展

Fig. 4 Average power evolution of several ultrafast solid-state lasers

表1 声光调Q光纤激光器研究进展
Table 1 Research progress of AOM Q-switched fiber lasers

| Institute | Doped ion | Core diameter /NA | Inner cladding size /NA | Wavelength / nm | Repetition rate /kHz | Average power /W | Pulse energy /mJ | Pulse duration / ns | Peak power / kW | M^2 |
|--|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------|------------------|---------------------|-----------------|--------|
| Southampton university ^[40] | Nd ³⁺ | — | — | 1080 | 0.1 | — | — | 200 | 0.0088 | — |
| Southampton university ^[41] | Yb ³⁺ | 60 $\mu\text{m}/0.05$ | 300 $\mu\text{m}/0.4$ | 1037 | 0.5 | 10.2 | 7.7 | 250 | 30 | 31 |
| Southampton university ^[42] | Yb ³⁺ | 30 $\mu\text{m}/0.07$ | D 350 $\mu\text{m}/0.49$ | 1060 | 200 | 120 | 0.6 | 460 | — | — |
| Jena university ^[43] | Yb ³⁺ | PCF/60 μm | 180 $\mu\text{m}/0.6$ | >1010 | 100 2 | 100 5 | 1 2.5 | 13 8 | — — | — — |
| Jena university ^[44] | Yb ³⁺ | PCF/70 μm | 200 $\mu\text{m}/0.6$ | 1030 | 100 | 100 | 2 | 7.3 | 275 | — |
| ISL/University of sydney ^[45] | Tm ³⁺ :Ho ³⁺ | 20 $\mu\text{m}/0.08$ | Hexagonal 300 $\mu\text{m}/0.4$ | 2072.7 | 10~100 | 12.3 | — | 45 | — | — |
| SIOM ^[46] | Tm ³⁺ | 25 $\mu\text{m}/0.1$ | 400 $\mu\text{m}/0.46$ | $\sim 2.02 \times 10^3$ | 0.5~50.0 | 100 | 10 | 75~10 ³ | 138 | 1.01 |
| Kyoto university ^[47] | Er:ZBLAN | 35 $\mu\text{m}/0.12$ | 350 $\mu\text{m}/>0.5$ | 2.8×10^3 | 120 | 12 | 0.1 | 90 | 0.9 | — |
| Tech. Uni. of denmark ^[48] | Yb ³⁺ | PCF/85 $\mu\text{m}/0.01$ | 267 $\mu\text{m}/0.6$ | 515/343 | 10 | 110 | 1/0.5 | 13 | — | — |
| IPG ^[49] | Yb ³⁺ | — | — | — | — | 200 | 10 | 400 | — | ~10 |

注：“—”表示文献中该结果未报道，理论上可根据以下关系式换算求得：Pulse energy = Average power/Repeat frequency；Peak power = pulse energy/pulse duration.

表2 MOPA结构纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展
Table 2 Research progress of MOPA configuration nanosecond regime pulsed fiber lasers

| Institute | Seed | Amplifier parameters | | | Wavelength/ nm | Repetition rate/ kHz | Average power/ W | Pulse energy/ mJ | Pulse duration/ ns | Peak power/ kW | M^2 |
|--|------------------------------|---|--|---|----------------|----------------------|------------------|------------------|--------------------|----------------|-----------|
| | | Fiber type | Core diameter /NA | Inner cladding size /NA | | | | | | | |
| Jena university ^[50] | Q-switched Nd:YAG laser | Yb ³⁺ DCF | 30 $\mu\text{m}/0.06$ 55 $\mu\text{m}/0.19$ | D400 $\mu\text{m}/0.38$ | 1064 | 50 3/5 | 100 24/40 | 4 8 | 90 50 | — 80/160 | 1.1 10 |
| Southampton university ^[51] | Q-switched solid-state laser | Er:Yb DCF | 50 $\mu\text{m}/0.2$ | D360/400 $\mu\text{m}/0.48$ | 1500 | — | — | 0.29 | 100 | 2 | 2.1 |
| University of michigan ^[52] | Electric-pulse-driven LD | Yb ³⁺ DCF | 50 $\mu\text{m}/0.06$ 200 $\mu\text{m}/0.062$ | 350 $\mu\text{m}/0.45$ 6000 $\mu\text{m}/0.46$ | 1064 | 0.1 <0.1 | — | 82 9.6 | 500 4 | 164 2400 | 6.5 |
| SIOM ^[53] | Q-switched solid-state laser | Yb ³⁺ DCF | 43 $\mu\text{m}/0.08$ | D650/600 $\mu\text{m}/0.37$ | 1064 | 100 | 133.8 | 1.34 | 400 | — | 3.2 |
| Aculight corporation ^[54] | Q-switched microchip laser | Yb ³⁺ PCF | 100 $\mu\text{m}/—$ | 290 $\mu\text{m}/—$ | 1062 | 9.6 | 42 | >4.3 | 1 | ~4500 | ~1.3 |
| IPG ^[55] | — | — | — | — | — | 50 | 500 | 10 | 100 | — | — |
| Xian. IOM ^[56] | Electric-pulse-driven LD | Er:Yb DCF | 7.5 $\mu\text{m}/—$ | 125 $\mu\text{m}/—$ | 1548 | 30 | — | 0.025 | 3.3 | 7.5 | — |
| Université de bordeaux ^[57] | Q-switched fiber laser | Yb ³⁺ PCF | 80 $\mu\text{m}/—$ | 200 $\mu\text{m}/0.6$ | 977 | 10 | 9.7 | 0.97 | 12 | 63 | — |
| NP Photonics Inc. ^[58] | Q-switched fiber laser | Er:Yb DCF | 15 $\mu\text{m}/—$ 25 $\mu\text{m}/—$ | 125 $\mu\text{m}/—$ 400 $\mu\text{m}/—$ | 1530 | 8 | — | 0.126 | 105 | 1.2 | — |
| Tsinghua university ^[59] | Q-switched solid-state laser | Yb ³⁺ PCF Nd:YVO ₄ | 41 $\mu\text{m}/0.03$ | 200 $\mu\text{m}/0.55$ | 532 | 80 | 30 | 0.3 | 5 | 82 | <1.6 |

注：“—”表示文献中该结果未报道，理论上可根据以下关系式换算求得：Pulse energy = Average power/Repeat frequency；Peak power = pulse energy/pulse duration.

之后的发展为寻求新波段,逐渐涉及掺 Tm^{3+} 以及 $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ 共掺等研究热点^[45~47]。2011年日本京都大学研究人员首次在近 $3\ \mu\text{m}$ 波段实现平均功率突破 $10\ \text{W}$ 量级^[47]。短波方向,丹麦工业大学利用二次谐波产生三次谐波,将波长拓展至 $515\ \text{nm}$ 和 $343\ \text{nm}$,且单脉冲能量仍可达毫焦量级^[48]。另外,2010年中国科学院上海光学精密机械研究所掺 Tm^{3+} 双包层光纤实现 $2.02\ \mu\text{m}$ 波长处 $100\ \text{W}$ 平均功率的输出,光束质量接近衍射极限^[46]。2011年美国的 IPG 公司调 Q 掺镱脉冲光纤激光器最大输出 $200\ \text{W}$ 的高平均功率,能量可达 $10\ \text{mJ}$ ^[49]。

表 1 中各数据可以看出调 Q 脉冲光纤激光器平均功率还只是在 $100\ \text{W}$ 附近, $10\ \text{mJ}$ 的单脉冲能量已是瓶颈,且光束质量并未见较为优良报道,所以为提高这几个重要参数,研究人员早在 20 世纪 20 年代开始,逐渐地将研究的重点放在了 MOPA 结构上。表 2 为 MOPA 结构纳秒量级脉冲光纤激光器的研究进展,与表 1 同年作对比来看,采用 MOPA 明显比单纯调 Q 更有利于能量的提高。

单脉冲能量方面,MOPA 结构在 2002 年首次在数 $10\ \text{kHz}$ 高重复频率下实现 $4\ \text{mJ}$ 能量、 $100\ \text{W}$ 平均功率单模输出的突破,其多模输出可达 $8\ \text{mJ}$ ^[50]。另外,2005 年密歇根大学的一项研究成果至今仍保持着最高单脉冲能量记录。其研究人员利用电脉冲调制的半导体激光器作为种子源,经过纤芯分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 的大模场增益光纤的两级放大,得到了 $100\ \text{Hz}$ 下单脉冲能量高达 $82\ \text{mJ}$ 的脉冲输出,这无疑是一大突破^[52]。

峰值功率方面,2005 年密歇根大学将脉宽压缩至 $4\ \text{ns}$,其峰值功率高达 $2.4\ \text{MW}$,能量也接近 $10\ \text{mJ}$,但其光束质量因子 M^2 较大为 6.5 ^[52]。可见,获取高峰值功率的同时还不能保证高的单脉冲能量和高的光束质量。这一矛盾在 2006 年美国 Aculight 公司的研究报道中得以解决,其研究人员以 $\text{Nd}:\text{LSB}$ 被动调 Q 激光器作为种子源,采用 $100\ \mu\text{m}$ 纤芯的光子晶体光纤放大得到单脉冲能量大于 $4.3\ \text{mJ}$ 、峰值功率高达 $4.5\ \text{MW}$ 的脉冲输出,且 $M^2 \approx 1.3$ ^[54]。相对于之前的研究成果,这一项报道也是具有突破意义的。

平均功率方面,2006 年中国科学院上海光学精密机械研究所楼祺洪等^[53] 研究人员实现的 $100\ \text{kHz}$ 下 $133.8\ \text{W}$ 的报道,至今仍是国内的最高水平。2007 年 IPG 公司报道了 $50\ \text{kHz}$ 高重复频率下 $500\ \text{W}$ 的高平均功率脉冲输出,其单脉冲能量达到 $10\ \text{mJ}$,这仍旧是至今为止已见报道的最高水平^[55]。可见国内与国外差距还很大。

波长拓宽方面,2004 年南安普顿大学的突破主要是采用 $\text{Er}:\text{Yb}$ 共掺的大模场光纤放大级获得了可用于相干雷达的波长在 $1500\ \text{nm}$ 的激光输出,为全光纤结构,单脉冲能量达 $0.29\ \text{mJ}$ ^[51],2009 年中国科学院西安光学精密机械研究所也实现了 $1548\ \text{nm}$ 下 $7.5\ \text{kW}$ 峰值功率输出^[56]。2010 年亚利桑那大学采用 $\text{Er}:\text{Yb}$ 共掺的大模场面积双包层光纤也实现了 C 波段的 $1530\ \text{nm}$ 输出^[58]。另外,2010 年国外首次实现了 $977\ \text{nm}$ 处突破毫焦量级的脉冲输出,在 $190\ \text{kHz}$ 高重复频率下平均功率可达 $78\ \text{W}$ ^[57]。利用非线性倍频效应,清华大学采用掺镱光子晶体光纤和两级 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 固体介质进行放大实现了 $532\ \text{nm}$ 的绿光输出^[59]。

4 纳秒脉冲光纤激光器中待解决的问题及展望

4.1 光纤非线性效应的影响及抑制方法

随着功率尤其是脉冲激光器中峰值功率的提高,光纤中光的功率密度很高,与光纤的相互作用随着光纤长度的增加而变得明显,当光纤内峰值功率超过非线性效应的阈值,就会产生受激布里渊散射(SBS)或者受激拉曼散射(SRS)等非线性现象,从而限制了光纤激光器输出功率的提高,对脉冲光束质量也有较大的影响。所以,如何有效地抑制 SBS 或者 SRS,仍然是目前高功率光纤激光技术研究的重点和难点^[60]。

当光纤内峰值功率超过 SBS 或者 SRS 的阈值,会产生频率下移的斯托克斯光,导致了输出激光功率的下降。故此,需要清楚 SRS 和 SBS 阈值的大小,其产生机制在连续抽运和脉冲抽运下是不同的,由于本文讨论的脉冲宽度只在纳秒量级,这里只讨论入射到光纤中的抽运光是连续光或者准连续光的情形。可以从抽运光和斯托克斯光的耦合方程得到 SRS 和 SBS 的阈值抽运功率分别为^[61]

$$P_{\text{SRS}}^{\text{th}} = \frac{16A_{\text{eff}}}{g_{\text{R}}L_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{SBS}}^{\text{th}} = \frac{21A_{\text{eff}}}{g_{\text{B}}L_{\text{eff}}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_{\text{p}}}{\Delta\nu_{\text{B}}} \right), \quad (2)$$

式中 g_{R} 、 g_{B} 分别为受激拉曼增益系数峰值和受激布里渊增益系数峰值, A_{eff} 为纤芯有效模场面积, L_{eff} 为光纤有效长度, $\Delta\nu_{\text{B}}$ 为布里渊增益谱宽, $\Delta\nu_{\text{p}}$ 为信号光谱宽。这些参量关系到 SBS 和 SRS 阈值的大小, 有几个较为直接的方法可用于抑制 SRS 或者 SBS。

1) 从阈值可以初步看出, 增大纤芯有效模场面积, 减小光纤有效长度, 阈值就变大, 可用于抑制 SBS 和 SRS 的产生。国外采用 MOPA 结构实现的 100 W 量级平均功率、10 mJ 单脉冲能量输出中, 几乎是采用大模场面积双包层光纤和光子晶体光纤。

2) 通过增加信号光的谱宽也是提高 SBS 阈值一个有效方法。从阈值表达(2)式可知, 让 $\Delta\nu_{\text{p}}$ 尽可能地大于 $\Delta\nu_{\text{B}}$, 使得功率只有一部分处在 SBS 增益带宽内, 这样分去的功率就变得少些, 有利于所要激光的功率输出。

3) 还有一个可变的因素, 需从光纤材料本身来考虑对 SBS 和 SRS 的影响, 比如光纤中不同的掺杂离子改变了折射率分布进而影响模场面积, 这部分国内的研究报道较少, 国外的研究主要集中在光纤几何结构、材料成分、制作工艺、工作环境等方面来分析光纤激光器、放大器中几种非线性效应的产生机理和功率阈值特点, 通过改进光纤掺杂技术(纳米粒子直接掺杂技术等)、控制光纤内应力和温度场调制等新方法设计新型光纤以达到抑制非线性效应对脉冲特性和输出功率的影响^[62~66]。

4.2 热管理问题

对非线性的抑制要求尽量短的光纤, 虽然光纤激光器中光纤具有大的散热面积, 但当峰值功率足够大, 短光纤内的热负荷超过所能承受的功率密度, 就必须考虑热效应问题对激光输出的影响。比如基质材料热扩散引起应力和折射率的变化, 从而导致了诸如自聚焦热透镜效应, 这可能会损伤甚至熔化石英光纤, 纤芯内温度的升高还会导致输出波长的变化^[3]。

对于双包层光纤, 其外包层是采用低折射率的聚合物, 它对光纤的热效应更为敏感。而外包层除了保护光纤的作用外, 更重要的是导引抽运光, 所以一旦光纤内温度过高导致外包层损伤甚至熔化, 就直接影响到激光输出。国外曾采用聚硅酮和聚四氟乙烯作为外包层, 但前者数值孔径(NA)限制在 0.4, 后者太过昂贵而逐渐被淘汰。现在主要是采用氟化丙烯酸盐^[67]。从热扩散上看, 外包层表面的温度分布取决于内包层尺寸和厚度, 薄的包层有利于热扩散, 但不利于导引抽运光。

另一个用于减缓光纤内热负荷的方法是采用带内抽运。由于量子亏损导致了剩余热量的残留, 如果降低量子亏损, 光纤内剩余的热量也就降低, 途径就是让抽运光的波长尽量和输出波长靠近, 这样亏损量就减少。IPG 公司 2009 年实现的 10 kW 连续输出, 就是利用 1018 nm 波长的掺镱光纤激光器作为(LD 经过光纤级联抽运获取)抽运源, 获得了 1070 nm 的激光输出, 斜率效率超过 80%, 电光转换效率高达 40%^[39]。

所以对于光纤内的热管理问题, 未来发展的关键在于如何采用合适的材料和设计方法来平衡薄的包层和良好的导引作用, 使得热扩散性能好, 且又不降低抽运光的耦合效率。另外, 对于高功率脉冲光纤激光器, 需要寻求新型抽运光源以求降低量子亏损。

4.3 光学损伤问题

对于高能量纳秒量级的脉冲光纤激光器, 由于纤芯介质击穿导致的严重的光学损伤也是必须考虑的一大问题。纳秒量级脉冲下光纤的损伤阈值为 $1.5 \text{ kW}\cdot\text{ns}^{1/2}/\mu\text{m}^2$, 与脉宽的平方根成反比^[68]。目前解决这一问题的方法局限在材料上, 由于比石英具有更高损伤阈值的材料不多, 加上光纤中其他掺杂离子降低了纯石英的阈值^[69], 所以究竟损伤阈值可达到多高, 目前仍旧是光纤激光器的诸多难点之一。近几年最新的研究数据显示, 先后出现了损伤阈值为 $50 \text{ kW}/\mu\text{m}^2$ (即 $0.5 \text{ TW}/\text{cm}^2$)^[70] 和 $0.6 \text{ MW}/\mu\text{m}^2$ (即 $6 \text{ TW}/\text{cm}^2$)^[71]。

现在用来避免光学损伤最直接的方法就是采用大模场面积双包层光纤, 还有用的比较多的处理方式是将光纤输出端面切成斜面并抛光, 或者采用封端技术, 以减小端面的功率密度^[70]。所以未来的发展除了研究新型高阈值材料外, 通过 MOPA 结构缓解各放大级承受的功率密度, 将继续是脉冲光纤激光器追求高功率、高能量输出的发展方向之一。

5 结束语

目前工业上用的超快激光系统多数是利用调 Q 或者锁模的掺钛蓝宝石激光器,其体积较大,热管理要求高,在平均功率输出为数瓦量级时运行不稳定,还是存在一些缺陷。光纤激光器系统由于具有高效率输出,光束质量较好,易于热管理,再加上其抽运源可以采用带尾纤的激光二极管,所以结构紧凑,性能稳定,成本也相对低,已在国内外逐步走向产业化,在光通信、激光加工、激光医疗以及国防安全等领域得到了广泛应用。而纳秒量级的光纤激光器不仅朝着高重复频率、高平均功率、窄脉宽方向发展,近些年来利用 MOPA 结构逐步在掺杂 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 等不同离子中实现了新波段的脉冲激光输出,这拓宽了遥感、相干雷达系统以及精密加工领域的应用。随着光纤激光器中非线性效应、热管理和光学损伤等问题不断得到解决,脉冲光纤激光器在向更高功率、更高能量的发展将继续是国内外研究的热点。

参 考 文 献

- 1 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhang Haibo *et al.*. Recent progress of large core fiber lasers (invited paper)[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2235~2241
楼祺洪,周 军,张海波等.大芯径光纤激光器的新进展(邀请论文)[J].中国激光,2010,**37**(9):2235~2241
- 2 Liao Suying, Gong Mali. New progress of large mode area fibers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 455~462
廖素英,巩马理.大模场光纤研究的新进展[J].红外与激光工程,2011,**40**(3):455~462
- 3 Liu Songhao. New progress of fiber lasers[J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2003, **16**(1): 1~8
刘颂豪.光纤激光器的新进展[J].光电子技术与信息,2003,**16**(1):1~8
- 4 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 135~138
楼祺洪,周 军,朱健强等.高功率光纤激光器研究进展[J].红外与激光工程,2006,**35**(2):135~138
- 5 T. Eidam, S. Hanf, T. V. Andersen *et al.*. 830 W average power femtosecond fiber CPA system[J]. *ASSP*, 2010, AWA2
- 6 B. Oktem, H. Kalaycioglu, F. Ö. Ilday. MicroJoule pulse energies at 1 MHz repetition rate from an all fiber nonlinear chirped pulse amplifier[J]. *ASSP*, 2010, AWA4
- 7 Zhang Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900130
张志刚.高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J].光学学报,2011,**31**(9):0900130
- 8 Duan Yunfeng, Huang Bangcai, Zhang Peng *et al.*. All-fiber laser pulse amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1379~1382
段云峰,黄榜才,张 鹏等.全光纤结构的脉冲光纤放大器[J].中国激光,2007,**34**(10):1379~1382
- 9 Du Songtao, Zhou Jun, Zhang Fangpei *et al.*. 20-W average power, high repetition rate, nanosecond pulse with diffraction limit from an all-fiber MOPA system[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(10): 2546~2549
- 10 Liu Xia, Du Songtao, Xue Yuhao *et al.*. High repetition rate nanosecond pulse fiber amplifier based on China-made large-mode-area fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1876~1879
刘 侠,杜松涛,薛宇豪等.基于国产大模场面积双包层光纤的高重复频率纳秒脉冲光纤放大器[J].中国激光,2009,**36**(7):1876~1879
- 11 Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan *et al.*. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1932~1936
冯宇桐,杜松涛,杨 燕等.基于LD脉冲调制的全光纤MOPA结构激光器[J].中国激光,2009,**36**(8):1932~1936
- 12 J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson *et al.*. High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 37~39
- 13 Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Du Songtao *et al.*. 1030 nm high repetition rate nanosecond pulse all fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802010
周翠芸,刘 源,杜松涛等.1030 nm高重复频率纳秒脉冲全光纤放大器[J].中国激光,2011,**38**(8):0802010
- 14 Liu Wei, Chen Tao, Dai Jianning *et al.*. All-fiberized Yb fiber laser with passively generated sub-nanosecond pulse output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1214003
刘 伟,陈 滔,戴建宁等.全光纤化的被动式亚纳秒脉冲 Yb 光纤激光器研究[J].光学学报,2011,**31**(12):1214003
- 15 Xu Lin, Tang Yulong, Zhang Shuaiyi *et al.*. High power pulsed 2 μm fiber main-oscillator power-amplifier system[J].

- Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2384~2388
- 徐林, 唐玉龙, 张帅一等. 高功率脉冲 $2\ \mu\text{m}$ 光纤主振荡功率放大器系统[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2384~2388
- 16 Su Rongtao, Zhou Pu, Xiao Hu *et al.*. MOPA structured single-frequency nanosecond pulsed laser in all fiber format[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102013
- 栗荣涛, 周朴, 肖虎等. MOPA结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1102013
- 17 Xiong Huiping, Chen Tao, Shen Yonghang *et al.*. All fiberized linearly polarized pulsed Yb fiber laser with high repetition rate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100201
- 熊慧萍, 陈滔, 沈永行等. 全光纤结构线偏振高重复频率掺 Yb 脉冲光纤激光器[J]. 光学学报, 2011, **31**(s1): s100201
- 18 Lou Qihong. High-Power Fiber Laser and its Applications[M]. Hefei: Press of University of Science and Thechnology of China, 2010
- 楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2010
- 19 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. The Principles of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 222~223
- 周炳坤, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理(第6版)[M]. 北京:国防工业出版社, 2010. 222~223
- 20 Z. J. Chen, A. B. Grudinin, J. Porta *et al.*. Enhanced Q-switching in double-clad fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6): 454~456
- 21 Fan Yaxian, Lu Fuyun, Hu Shuling *et al.*. Tunable high-peak-power, high-energy hybrid Q-switched double-clad fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 724~726
- 22 F. D. Teodoro, C. D. Brooks, Multistage. Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3299~3301
- 23 Li Mingjun, Chen Xin, Wang Ji *et al.*. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **15**(13): 8290~8299
- 24 Wu Zhonglin, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Research progress of pumping methods for fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **42**(4): 30~34
- 吴中林, 楼祺洪, 周军等. 光纤激光器的抽运方法研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **42**(4): 30~34
- 25 Zhang Fan, Wan Chunchan, Tong Zhi. A new effective couple technology of side-pump[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1447~1452
- 张帆, 王春灿, 童治. 一种新型有效的侧面抽运耦合技术[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1447~1452
- 26 Huang Lin, Dai Zhiyong, Liu Yongzhi. Influences of pumping manners on characteristics of all-fiber acousto-optic Q-switched lasers under different pulse repetition rates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 6992~6999
- 黄琳, 代志勇, 刘永智. 不同脉冲重复频率下抽运方式对全光纤声光调 Q 激光器性能的影响 [J]. 物理学报, 2009, **58**(10): 6992~6999
- 27 J. P. Koplrow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 422~444
- 28 D. A. V. Kliner, J. P. Koplrow. Power scaling of diffraction limited fiber sources[C]. *SPIE*, 2005, **5647**: 550~556
- 29 Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power low-order modes operation of a multimode fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 221~222
- 30 J. A. Alvarez-Chavez, B. J. Gruding, J. Nilsson *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fiber lasers with tapered section[C]. *CLEO'99*, 1999: 247~248
- 31 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1652~1658
- 李立波, 楼祺洪, 周军等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1652~1658
- 32 J. Limpert, H. Zellmer, A. Tunnermann *et al.*. Suppression of high order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM)[J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2002, 68: MB20
- 33 M. Hotoleanu, M. Soderlund, D. Kliner *et al.*. High order modes suppression in large mode area active fibers by controlling the radial distribution of the rare earth dopant[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61021T
- 34 U. Griebner, R. Koch, H. Schonagel *et al.*. Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diode-pumped heavily Nd-doped multimode fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(4): 266~268
- 35 U. Griebner, H. Schonagel. Laser operation with nearly diffraction-limited output from a Yb:YAG multimode channel waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 750~752
- 36 Liao Suying, Gong Mali, Zhang Haitao. Selection of doping radius for part-doped fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009,

- 36(11): 2836~2841
廖素英, 巩马理, 张海涛. 部分掺杂光纤掺杂半径的选择[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2836~2841
- 37 Song Xiaoyan, Zhang Wentao, Li Fang *et al.*. Experimental investigation of bending characteristics of distributed feed back fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 807~810
宋晓燕, 张文涛, 李芳等. 分布反馈光纤激光器弯曲特性的实验研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 807~810
- 38 Liao Suying, Gong Mali. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 27~33
廖素英, 巩马理. 高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(6): 27~33
- 39 A. Tünnermann, T. Schreiber, J. Limpert. Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(25): F71~F78
- 40 I. P. Alcock, A. C. Tropper, A. I. Ferguson *et al.*. Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(2): 84~85
- 41 C. C. Renaud, J. A. Alvarez-Chavez, J. K. Sahu *et al.*. 7.7 mJ pulses from a large core Yb-doped cladding pumped Q-switched fibre laser[C]. Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO), Technical Digest, Optical Society of America, Washington, DC, 2001, **56**: 219
- 42 Yoonchan Jeong, J. K. Sahu, M. Laroche *et al.*. 120-W Q-switched cladding-pumped Yb-doped fiber laser[C]. CLEO/Europe- EQEc 2003, 2003, 27E, CL5-4
- 43 O. Schmidt, F. Roser, S. Linke *et al.*. High energy and high average power Q-switched photonic crystal fiber laser[J]. *OSA/ASSP*, 2006, WA5
- 44 O. Schmidt, J. Rothhardt, F. Röser *et al.*. Millijoule pulse energy Q-switched short-length fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1551~1553
- 45 M. Eichhorn, S. D. Jackson. High-pulse-energy, actively Q-switched Tm³⁺, Ho³⁺-codoped silica 2 μm fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(10): 1044~1046
- 46 Tang Yulong, Xu Liu, Yang Yi. High-power gain-switched Tm³⁺-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 22964~22972
- 47 S. Tokita, M. Murakami, S. Shimizu. 12 W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(15): 2812~2814
- 48 M. Laurila, J. Saby, T. T. Alkeskjold *et al.*. Q-switching and efficient harmonic generation from a single mode LMA photonic bandgap rod fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **19**(11): 10824~10833
- 49 IPG, YLP senes 1 to 10 mJ pulsed ytterbium fiber laser [EB/OL]. http://www.ipgphotonics.com/apps_mat_q_YPL_Series_10mj.htm
- 50 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(4): 477~479
- 51 V. Philippov, C. Codemard, Y. Jeong *et al.*. High-energy in fiber pulse amplification for coherent lidar applications[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2590~2592
- 52 M. Cheng, Y. Chang, A. Galvanauskas *et al.*. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200 μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 358~360
- 53 Kong Linfeng, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. 133-W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(1): 010502
- 54 F. D. Teodoro, C. D. Brooks. Multi-MW peak power, single transverse mode operation of a 100 micron core diameter, Yb-doped photonic crystal rod amplifier[C]. *SPIE*, 2006, **6453**: 645318
- 55 IPG photonics announces major expansion of ytterbium pulsed fiber laser offerings[R]. 2007, <http://investor.ipgphotonics.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=250035>
- 56 Cunxiao Gao, Shaolan Zhu, Wei Zhao. Eye-safe, high-energy, single-mode all-fiber laser with widely tunable repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 611~613
- 57 J. Boulet, R. Dubrasquet, C. Medina. Millijoule-class Yb-doped pulsed fiber laser operating at 977 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **25**(10): 1650~1652
- 58 W. Shi, E. B. Petersen, Z. D. Yao *et al.*. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering -threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14): 2418~2420
- 59 J. He, P. Yan, Q. Liu *et al.*. 30 W output of short pulse duration nanosecond green laser generated by a hybrid fiber-bulk MOPA system[J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(4): 708~711

- 60 Gavind P. Agrawal. Principles of Nonlinear Fiber Optics & Applications[M]. Jia dongfang, Yu zhenhong et al. , Transl. . Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2010
Gavind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方,余震虹 等 译. 北京:电子工业出版社,2010
- 61 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated raman and Brillouin scattering[J]. *Appl. Opt.* , 1972, **11**(11): 2489~2494
- 62 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt et al.. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Opt. Express* , 2006, **14**(7): 2715~2720
- 63 L. Lavoute, P. Roy, A. D. Berthelemot et al.. Design of microstructured single-mode fiber combining large mode area and high rare earth ion concentration[J]. *Opt. Express* , 2006, **14**(7): 2994~2999
- 64 S. Tammela, M. Soderlund, J. Koponen et al.. The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers[C]. *SPIE* , 2006, **6116**: 61160G
- 65 Liu Anping. Novel SBS suppression scheme for high power fiber amplifiers[C]. *SPIE* , 2006, **6102**: 61021R
- 66 S. Gray, D. T. Walton, X. Chen et al.. Optical fibers with tailored acoustic speed profiles for suppressing stimulated Brillouin scattering in high-power, single-frequency sources[J]. *IEEE. J. of Sel. Top. Quantum Electron.* , 2009, **15**(1): 37~45
- 67 M. A. Lapointe, S. Chatigny, M. Piché et al.. Thermal effects in high-power CW fiber lasers[C]. *SPIE* , 2009, **7195**: 71951U
- 68 B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik et al.. Laser induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.* , 1995, **74**(12): 2248~2251
- 69 W. Torruellas, Y. Chen, B. McIntosh et al.. High peak power ytterbium-doped fiber amplifiers[C]. *SPIE* , 2006, **6102**: 61020N
- 70 A. V. Smith, B. T. Do. Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm[J]. *Appl. Opt.* , 2008, **47**(26): 4812~4832
- 71 M. Efimov. Intrinsic laser-induced damage in bulk transparent dielectrics[C]. in Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, 2010 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2010), 2010, CFG1