

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: CAO Xue, LI Feng, ZHAO Hualong, et al. High Power Single Crystal Fiber Ultrashort Pulse Amplification Technology (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8):0851513

曹雪,李峰,赵华龙,等. 高功率单晶光纤超短脉冲放大技术研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(8):0851513

# 高功率单晶光纤超短脉冲放大技术研究进展 (特邀)

曹雪<sup>1,2,3,4</sup>, 李峰<sup>1</sup>, 赵华龙<sup>1</sup>, 王屹山<sup>1</sup>, 周伟<sup>4</sup>, 沈德元<sup>4</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 西安交通大学 电子科学与工程学院 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 江苏师范大学 物理与电子工程学院 江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**单晶光纤具有细长的晶体结构以及对泵浦光的波导传输特性,使其兼具晶体以及光纤的激光放大介质优点,其细长的晶体结构可以有效地进行散热,保证了在高功率运转下依然可以保证高光束质量,与传统的晶体棒相比,对泵浦光的波导特性使其具有更大的能量提取效率和放大增益,简单的行波放大结构使得系统易于集成。单晶光纤作为放大增益介质已广泛应用于高功率高能量超短脉冲激光放大技术中,并在科研、工业加工等领域具有重要的应用前景。本文重点介绍了单晶光纤的结构和制备方法,以及近年来 $1\ \mu\text{m}$ 波段基于单晶光纤的超短脉冲放大技术研究的主要方法及结果,包括本课题组取得的主要进展,探讨和展望了单晶光纤放大技术的前景和发展方向。

**关键词:**单晶光纤;超短脉冲;大能量;高功率;啁啾脉冲放大

中图分类号:TN248

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225108.0851513

## 0 引言

高重复频率、高功率的飞秒光源,可作为阿秒脉冲产生的驱动光源,能够有效地提升光子通量并快速获取足够实验数据,并克服现存的空间电荷效应难题,因而在高次谐波及阿秒脉冲产生方面具有重要应用价值<sup>[1-3]</sup>。同时,高重复、高功率飞秒脉冲在超快激光精密微加工领域也具有重要的应用前景,可以解决目前航空、航天领域的硬、脆、柔材料加工难的技术难题,实现高精度、高质量的“冷加工”效果<sup>[4-6]</sup>。同时,随着超快激光加工市场的快速打开,具有高的性价比的高功率飞秒激光系统也成为了工业界关注的重要因素。

超快激光放大器按照增益介质的形状结构可分为光纤放大器、棒状(块状)晶体放大器、板条晶体(或陶瓷)放大器、碟片晶体放大器和单晶光纤放大器等,各种放大器具有不同的优势,在超快激光领域都有重要的应用前景。

在固体放大领域的碟片放大器和板条放大器,由于其有效的散热封装结构,在高功率大能量放大方面也具有广泛的应用前景,取得了非常出色的参数输出。RUSSBUELDT P等<sup>[7]</sup>基于Yb:KGW的振荡器,结合两级Yb:YAG板条放大器,所用板条尺寸为 $1\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ ,其放大过程中并未采用啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)技术,实现了 $1\ 100\ \text{W}$ 、 $20\ \text{MHz}$ ( $55\ \mu\text{J}$ )、 $615\ \text{fs}$ 的直接飞秒放大输出,是当时基于板条放大获得的最高功率。而在碟片超短脉冲激光研究方面,SALTARELLI F等<sup>[8]</sup>采用

**基金项目:**陕西省双链融合专项,国家自然科学基金重大项目(No. 61690222),中国科学院西部之光项目(No. XAB2021YN12),陕西省科技新星项目(No. 2022KJXX-98),中国科学院西安光机所级青促会项目(No. XIOPMQCH2021007)

**第一作者:**曹雪(1996—),女,博士研究生,主要研究方向为光场调控及其应用。Email: caoxue0115@163.com

**通讯作者:**李峰(1987—),男,副研究员,博士,主要研究方向为高功率大能量超快激光产生、放大以及传输技术研究。Email: lifeng@opt.ac.cn

王屹山(1970—),男,研究员,博士,主要研究方向为高功率飞秒激光技术,阿秒激光技术,光频梳技术。Email: yshwang@opt.ac.cn

收稿日期:2022-06-10;录用日期:2022-07-11

<http://www.photon.ac.cn>

100  $\mu\text{m}$  厚,掺杂原子浓度 10% 的 Yb:YAG 碟片增益介质和半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) 锁模获得了振荡器输出平均功率 350 W、脉宽 940 fs、脉冲重频 8.88 MHz 的超短脉冲。采用碟片克尔透镜锁模,注入碟片再生放大器,碟片为厚度 100  $\mu\text{m}$ 、直径 9 mm 的 Yb:YAG 水冷薄片掺杂浓度为 7%,FATTAHI H 等<sup>[9]</sup>获得了脉冲能量 20 mJ,脉宽 1 ps,重频 5 kHz 的超短脉冲激光。相较于传统的固体激光器,光纤放大器具有操作方便、全光纤熔接、易于集成、散热性能优越、光束质量优异等特征,在超短脉冲放大领域备受关注。但是受限于普通单模或者近单模光纤的有限模场面积,在高功率大能量脉冲放大过程中,受到受激拉曼散射、受激布里渊散射、自相位调制、交叉相位调制等多种非线性效应的影响,使得基于光纤结构的超短脉冲放大系统的输出能量受到限制<sup>[10]</sup>。为了实现高功率大能量的飞秒脉冲放大输出,目前光纤放大系统主要采取的结构为 CPA 系统,在放大前将脉冲在时域上进行展宽,同时,在空间域上,采用具有大模场的特种光纤实现高能量输出。目前,大模场光纤包括手性耦合纤芯光纤 (Chirally-Coupled Core, CCC),柔性光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 以及棒状光子晶体光纤 (Rod-type PCF) 等特种光纤。

单晶光纤 (Single Crystal Fiber, SCF) 作为一种介于光纤和传统体块材料的新型激光放大器增益介质,放大特征结合了固体和光纤放大器的优势,在超快激光放大领域具有重要应用价值。SCF 的直径大小一般从几十微米到一毫米,其长度大多为几十厘米,因此 SCF 的表面体积比较大,高功率泵浦时,其散热能力较好,可以提升其光束质量。SCF 的特征是信号光能够在其内部自由传输,其具有细长的几何结构,较高的侧面光洁度,因此泵浦光能够在其内部波导式传输,有效提高信号光和泵浦光的重叠率,作为超短脉冲放大器,实现了传统体块材料放大数倍的单通增益。与此同时,SCF 的模场面积得到了提升,模场直径可达数百微米,因此放大时非线性积累小,较为简单的结构就可以产生高功率大能量的飞秒输出。

本文重点从单晶光纤的制备、Yb:YAG 单晶光纤的放大特点、Yb:YAG 单晶光纤在高功率大能量超短脉冲放大方面的国内外研究进展等方面进行了介绍,同时对本课题组在高功率超短脉冲掺镱单晶光纤啁啾脉冲放大系统等方面的工作进行介绍,对单晶光纤在超短脉冲放大领域的发展方向做了总结和展望。

## 1 单晶光纤制备方法与进展

单晶光纤主要有两种形式:1)带包层的柔性可弯曲 SCF,直径低至几十  $\mu\text{m}$ ,通常采用激光加热基座法生长。这种超细单晶光纤目标是实现与用于高平均功率激光系统的经典光纤类似的纤芯/包层结构。突破单晶熔体熔点对流形成的“毁损”芯-包层界面,实现芯和包层全区域大面积光学均匀性是难点。2)泵浦光波导空气包层 SCF,直径 400  $\mu\text{m}$ ~1 mm,生长方式一般为微下拉法<sup>[11]</sup>。泵浦光在内部全反射式传输,信号光则自由传输。SCF 的几何结构与激光传输形式在激光放大时具有优势<sup>[12]</sup>。相较于石英光纤激光器,单晶光纤激光器的损伤阈值高、热导性能好以及较低的非线性效应,能够有效替代复杂结构的晶体和陶瓷碟片激光器,YAG 单晶光纤的激光输出功率是传统石英光纤的 50 倍<sup>[13]</sup>。图 1 为两种单晶光纤概念的原理示意图对比。总而言之,为了实现高功率强激光的稳定发展,单晶光纤是继碟片和玻璃光纤器件之后的首选材料,并且得到了广泛研究。美国陆军武器研究室于 2015 年就以激光单晶光纤为主题开展科研项目研究,奠定其在定向能激光武器领域的科研价值及意义<sup>[10]</sup>。法国 Fibercryst 公司与国家科学院光学研究所在 2016 年联合开发了基于单晶光纤的高功率超短脉冲放大器,打开了微加工工业领域的市场<sup>[14]</sup>。国内基于单晶光纤的研究起步较晚,但在国内各高校和研究所的不断发展下,已经得到了快速发展并形成研究特色。

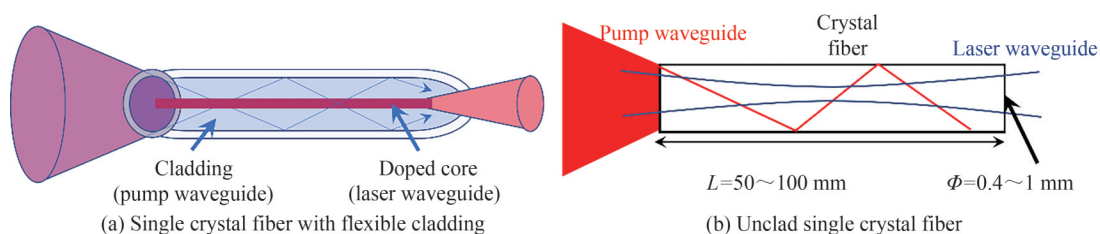


图 1 两种单晶光纤的激光原理示意图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of laser principle of two kinds of single crystal fiber<sup>[11]</sup>

尤其是山东大学、浙江大学、江苏师范大学、国防科技大学、同济大学、中科院上海硅酸盐研究所等单位在单晶光纤的制备、基于单晶光纤的高温传感器和LED光源以及放大器等方面进展迅速<sup>[15-17]</sup>。

20世纪20年代,CZOCHRALSKI J等通过提拉法首次制备出金属单晶光纤<sup>[18]</sup>,自此掀起了单晶光纤研制的热潮。直到20世纪80年代,FEJER M等首次采用激光加热基座法拉制单晶光纤,在激光加热浮区设备中引入反射锥面镜对(Refluxicon)元件,使得激光光源调制成圆形加热环,奠定了激光加热基座法晶体生长技术的基础<sup>[19, 20]</sup>;1993年,YOON D H等发明了微下拉法晶体生长技术<sup>[21, 22]</sup>,并且不断扩展至其他材料体系,单晶光纤的发展迎来了春天。目前,微下拉法和激光加热基座法仍然是最重要的两种单晶光纤制备技术。另外,导模法由于具有高通量制备、截面形状可控的优势,也持续得到了发展。

### 1.1 激光加热基座法

激光加热基座法(Laser Heated Pedestal Growth, LHPG)技术是一种小型的浮区法(Float-Zone, FZ),将环形CO<sub>2</sub>激光光源聚焦在原料棒的顶端形成微熔区,然后将籽晶引入熔体并向上牵引进行晶体生长。此技术可以保持生长的晶体具有较大的长径比。由于生长过程无需使用坩埚,因此其光纤直径不受坩埚及微孔尺寸的限制,仅与原料尺寸和拉送比有关,最小直径可达10 μm量级。可以减少坩埚挥发氧化和相互作用导致的生长难题<sup>[23]</sup>。图2为LHPG法的装置示意图。

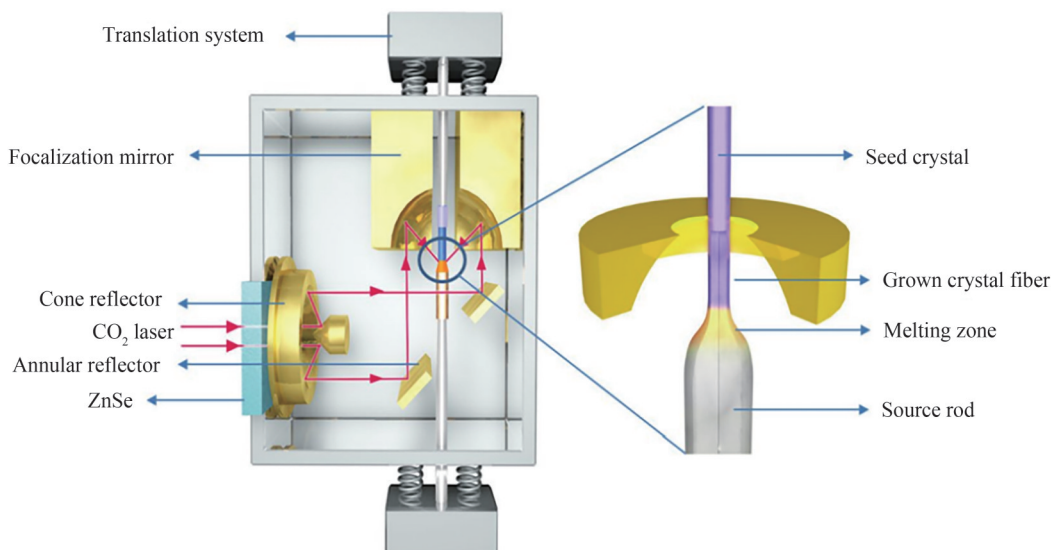


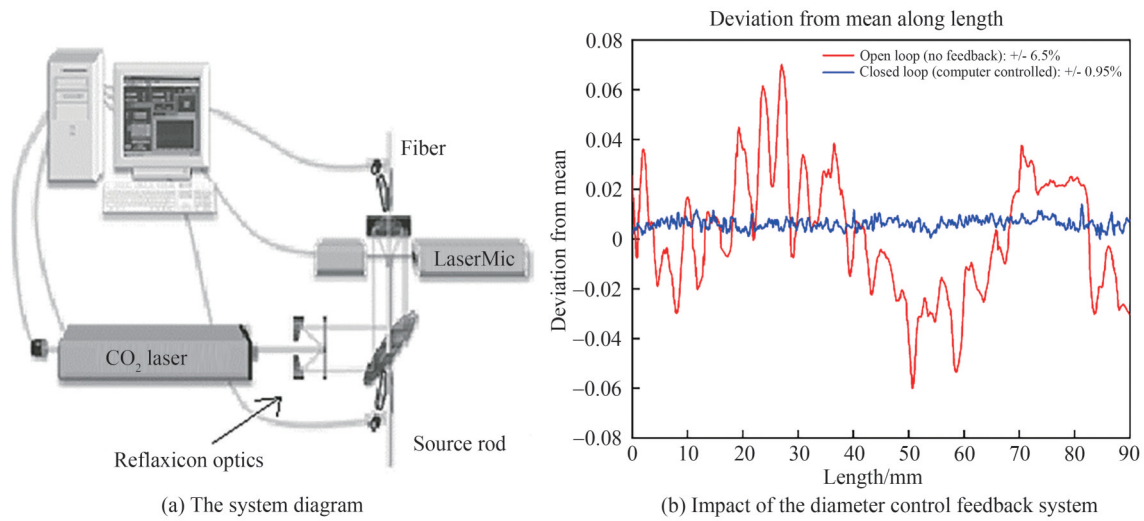
图2 LHPG法示意图<sup>[13]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of LHPG method<sup>[13]</sup>

在单晶光纤制备领域,直径100 μm是一个分界线。直径大于100 μm的单晶光纤,并不具备典型的光纤结构,并且外观仍然保持体块材料的特点,然而直径达到10 μm量级的单晶光纤兼具了晶体与光纤的优点,将达到理论输出极限。由于微下拉法和导模法都要采用坩埚,并且微米级的孔道,其生长加工较难,因此多采用LHPG法制备超细单晶光纤。

LHPG法凭借上下拉速差生长不同直径的单晶光纤,并且生长过程无需采用坩埚,因此理论上更易生长10 μm量级的超细SCF,但还需解决很多技术问题。其热源为CO<sub>2</sub>激光,商业化的CO<sub>2</sub>激光器功率波动约为5%,功率波动影响着超细单晶光纤生长界面的稳定,较大的功率波动会影响生长晶体的连续性及其直径偏差。目前,美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL)和罗格斯(Rutgers)大学两家研究机构增添了功率稳定系统,控制CO<sub>2</sub>光源的功率波动小于0.5%,有效保持其生长界面的稳定;通过增添直径实时观测系统,观测直径变化并组成反馈系统来调节功率,最终实现光纤的直径偏差小于1%<sup>[24, 25]</sup>,如图3所示。

LHPG法生长晶体时,由单晶或者陶瓷构成的原料棒(简称“料棒”)不断向上馈送,弥补结晶原料。假设料棒为方形晶体,忽略熔体挥发,其横截面边长 $D_s$ 、单晶光纤直径 $D_c$ 、料棒馈送速率 $V_s$ 与单晶光纤提拉速度 $V_c$ 的关系式为

图3 激光加热基座直径反馈系统<sup>[24]</sup>Fig. 3 Diameter control feedback system of laser heated pedestal<sup>[24]</sup>

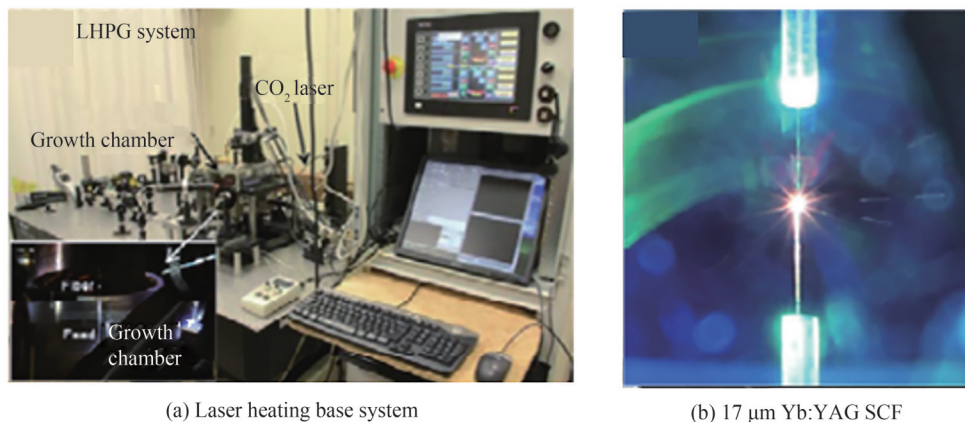
$$\frac{D_c^2}{D_s^2} = \frac{4V_s}{\pi V_c} \quad (1)$$

一般单晶光纤的直径为料棒尺寸的1/2~1/3,可以保证晶体平稳生长。为实现更小直径的SCF,可将生长得到的单晶光纤作为料棒,再进行二次至多次LHPG生长,不断缩小其尺寸。此时的料棒为圆柱形,式(1)中的关系变为

$$\frac{D_c^2}{D_s^2} = \frac{V_s}{V_c} \quad (2)$$

目前,罗特斯大学(Rutgers University)<sup>[26]</sup>、美国陆军研究实验室(US Army Research Laboratory)<sup>[27]</sup>、美国海军研究实验室(US NRL)<sup>[28]</sup>等研究机构也都对LHPG技术生长单晶光纤展开研究并且制备的YAG单晶光纤,直径均小于100 μm。其中,US NRL可稳定生长YAG单晶光纤的直径在40 μm以下,如图4所示。该单晶光纤有一定的韧性,弯曲半径可达4 mm,通过将直径100 μm的光纤为源棒进行二次生长,制备出了直径17 μm的Yb:YAG单晶光纤<sup>[29]</sup>,体现了LHPG技术生长超细单晶光纤的显著优势。

国内研究单位中,山东大学是率先展开单晶光纤生长的高校机构之一,并且自主研发了国内第一台微下拉生长炉,并且购买了商业化激光加热基座生长炉,如图5所示。



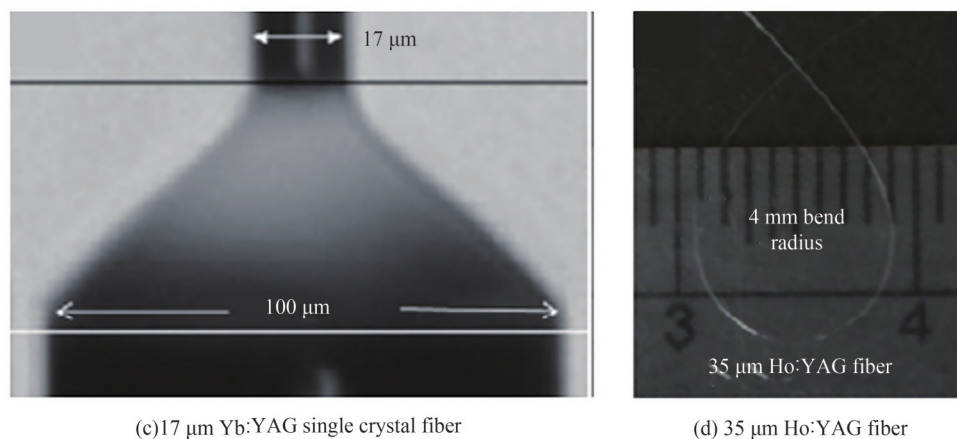


图4 NRL研究机构生长的单晶光纤<sup>[28]</sup>  
Fig.4 Single crystal fiber grown at NRL research institute<sup>[28]</sup>

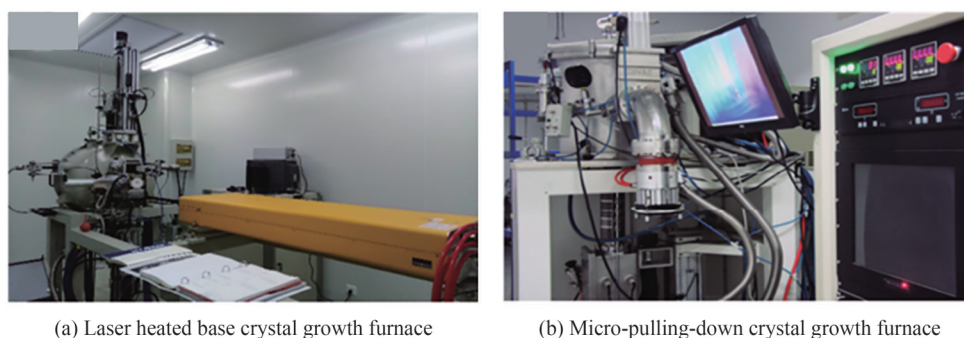


图5 山东大学单晶光纤生长设备  
Fig.5 Single crystal fiber growing equipments of Shandong University

## 1.2 微下拉法

微下拉法(Micro-Pulling-Down,  $\mu$ -PD)的技术特点是通过电阻加热或射频加热熔体,熔体在微重力与坩埚底部微通道的毛细作用下与籽晶接触并下拉成晶,该方法被认为是导模法的一种变体,这两种方法可以通过控制坩埚或模具的形状来实现多晶生长并产生具有特定形状的单晶<sup>[30]</sup>。由于其下拉生长系统, $\mu$ -PD方法具有较大的有效偏析系数,并且在熔体中形成的任何气泡都容易去除,这有利于获得具有高掺杂浓度和较少缺陷的单晶光纤。此外,与导模法(Edge-defined Film-fed Growth, EFG)相比,连续进料也适用于 $\mu$ -PD,因为它具有自由熔体表面,可以利用重力作为驱动力供给送料,并且可以生长长度达1 m,直径0.4到1 mm的单晶光纤。另外,有部分单位报道过采用 $\mu$ -PD法生长直径小于100  $\mu$ m的光纤。 $\mu$ -PD法生长示意图如图6所示。操作步骤为:首先,将籽晶安装在连接杆的装置上固定并调整居中。接着,在外层套入一层石英护套,称取生长原料放置于坩埚中,选用相匹配的后热器用以观察坩埚口,调节籽晶杆与坩埚口对中,然后依次按顺序放置氧化铝保温筒、保温盖板、最后封炉。通过分子泵抽气系统抽到最大真空后通入氮气或其他保护气体,避免贵金属坩埚氧化。待原料熔化过程完成后,将籽晶种缓慢地接触坩埚底部,进行单晶光纤的生长。

目前采用微下拉法可以生长各种晶体,下面列举部分可生长单晶,如石榴石、倍半氧化物、蓝宝石、氟化物、各种硅酸盐化合物、闪烁晶体、非线性晶体和比较少见的有机晶体。如表1所示。

由于 $\mu$ -PD法适用于较多材料体系,因此得到广泛推广。日本东北大学和法国里昂第一大学(Claude Bernard Lyon 1 University)采用 $\mu$ -PD法生长了高长径比氧化物单晶光纤以及其他稀土掺杂YAG<sup>[31]</sup>、LuAG<sup>[32-33]</sup>单晶光纤。此外,意大利比萨大学(Pisa University)、巴西圣保罗核能研究所(Instituto de Pesquisas Energeticas'e Nucleares, IPEN)和日本东北大学制备了LiYF<sub>4</sub><sup>[39, 45]</sup>、LiLuF<sub>4</sub><sup>[38, 46-47]</sup>单晶光纤。山东

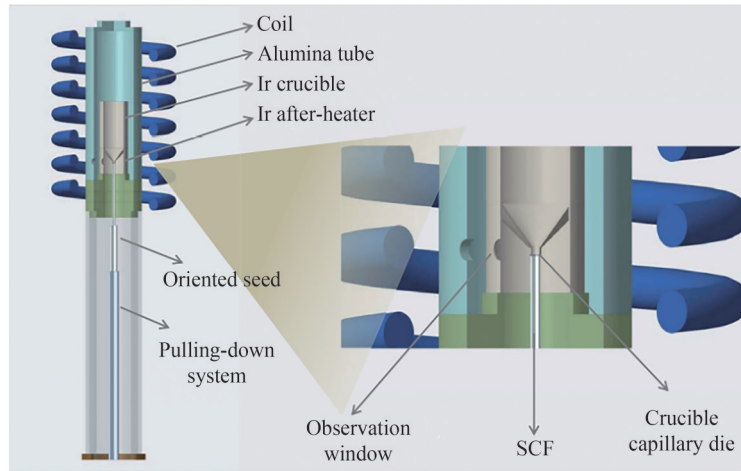


图6 微下拉法生长示意图

Fig.6 Growth diagram of  $\mu$ -PD method

表1 可用微下拉法制备的晶体

Table 1 Crystals prepared by  $\mu$ -PD

Crystals	Examples
Garnet	YAG <sup>[31]</sup> , LuAG <sup>[32, 33]</sup> , GGG <sup>[34]</sup>
Sesquioxide	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>[35]</sup> , Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>[36]</sup>
Sapphire	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>[37]</sup>
Fluoride	LiLuF <sub>4</sub> <sup>[38]</sup> , LiYF <sub>4</sub> <sup>[39]</sup>
Silicate	Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> <sup>[40]</sup>
Scintillation crystal	Ce:YAlO <sub>3</sub> <sup>[41]</sup> , BGO <sup>[42]</sup>
Nonlinear crystal	SrB <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>[43]</sup>
Organic crystal	BNA <sup>[44]</sup>

大学于2014年在国内首先报道了 $\mu$ -PD法单晶光纤生长设备的研制<sup>[48]</sup>,并针对氧化物单晶光纤的制备与性能展开研究。随后,江苏师范大学、中国电子科技集团重庆26所等单位也开展了 $\mu$ -PD法晶体生长的研究<sup>[49-50]</sup>。众多的晶体实验也证实了微下拉法在单晶光纤生长领域具有很大发展潜力,国内外科研单位采用 $\mu$ -PD法制备的SCF如图7所示。

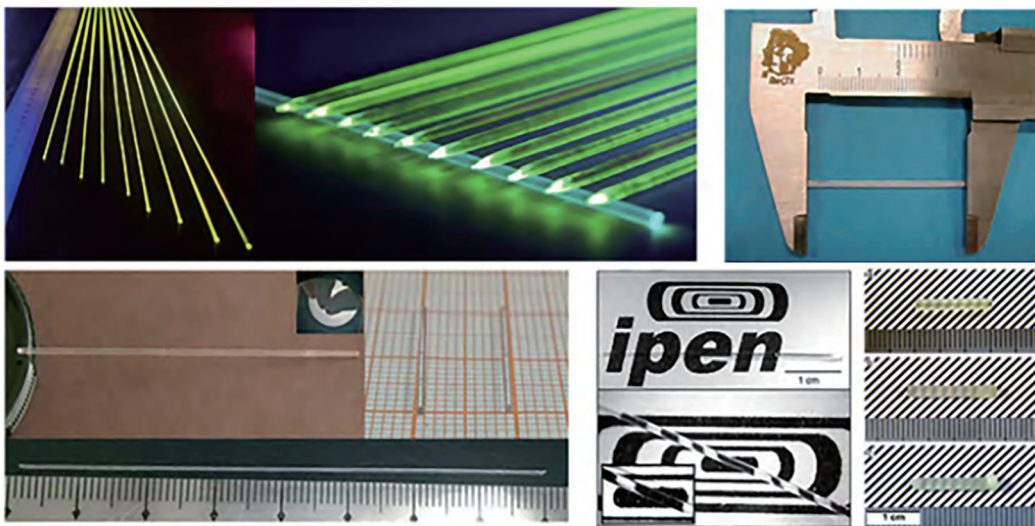


图7 微下拉法所生长的各种晶体

Fig.7 Various crystals grown by  $\mu$ -PD method

### 1.3 导模法

从晶体成核角度来看,导模法与提拉法(Czochralski, CZ)比较相似,都是向上提拉,但不同的是前者在生长单晶光纤时使用了模具。方法就是把模具的一部分插入熔体中,熔体在模具的毛细作用下被引至上表面,然后在籽晶向上缓慢提拉下实现单晶光纤生长。导模法的优势之一就是高效,通过设计合适的模具,可以实现多根单晶光纤的同时定向生长。如图8所示,利用导模法生长单晶光纤,可以看出固-液界面位置在整个单晶生长过程中保持恒定,这将利于单晶光纤的高质量生长。

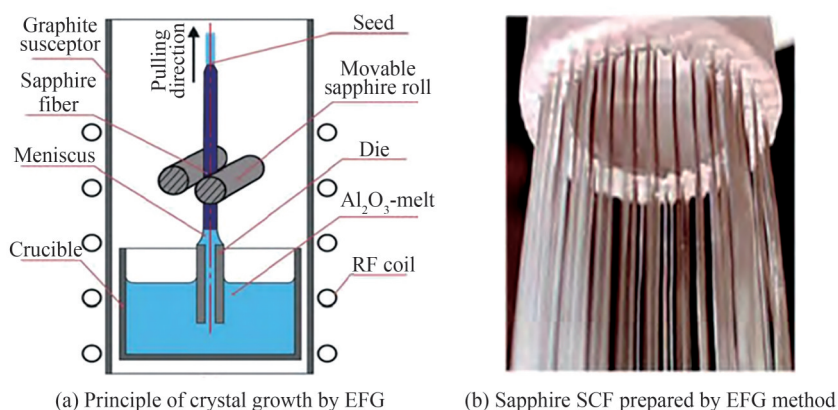


图8 导模法示意图<sup>[51]</sup>

Fig.8 Schematic diagram of EFG method<sup>[51]</sup>

近年来,KURLOV V N等<sup>[51]</sup>对导模法进行了改良,他们提出利用称重传感器来优化拉制光纤的设备,这样有利于控制直径大小,从而提高直径均匀性,降低表面粗糙度。采用该技术生长直径超细单晶光纤时,最重要的就是模具的设计与加工质量,这决定了单晶光纤的最终光学质量。这是因为在生长过程中,生长的光纤直径越细,坩埚内的残渣、污物等,流入单晶光纤内的概率就越大。另外,利用导模法生长单晶光纤,可以发现单晶光纤内部在生长过程中有一定几率出现气泡、杂质等各种缺陷。目前使用EFG技术所生产的单晶光纤,大部分集中在用于高温传感器与成像的蓝宝石单晶光纤,其中俄罗斯Kurlov晶体材料研究团队<sup>[51]</sup>与同济大学晶体材料课题组<sup>[52]</sup>主要集中研究蓝宝石SCF。蓝宝石光纤具有较宽的透过波段、较高的损伤阈值,能够有效传导 $\sim 3\ \mu\text{m}$ 中红外激光,可以广泛应用于激光医疗领域;此外,其热稳定性高,可用于高温传感器。EFG技术原理如图8(a)所示,图8(b)为采用EFG法制备的100根直径 $150\sim 300\ \mu\text{m}$ 的蓝宝石SCF。

### 1.4 单晶光纤的包层研究

目前,激光单晶光纤通常通过微下拉法( $\mu$ -PD)和激光加热基座法(LHPG)制备。前者生长的单晶光纤,泵浦光可以在其内形成光波导,在单晶光纤两端加反射腔镜,可以实现激光振荡输出。目前生长工艺比较成熟,可以稳定生长直径 $0.3\sim 1\ \text{mm}$ ,有效长度大于 $500\ \text{mm}$ 的单晶光纤;另外一种技术所制备的单晶光纤一般作为包层单晶光纤的纤芯,包层可直接制备,也可通过后加工处理来获得。由于包层光纤具有更高的抗损伤性与更优良的环境适应性,并且被认为可实现更高的功率输出,这也使得研究包层生长技术与研究高质量单晶纤芯生长具有同等重要的地位。包层制备方法多种多样:主要有共拉伸激光加热基座法(Co-drawing Laser-heated Pedestal Growth, CDLHPG)、溶胶-凝胶法、液相外延法(Liquid Phase Epitaxial, LPE)等。

2008年,HUANG K Y等采用共拉伸激光加热基座法成功制备 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 包层单晶光纤<sup>[53]</sup>。如图9所示,制备方法是将一定直径的单晶光纤插入玻璃毛细管内形成套管,然后使用 $\text{CO}_2$ 激光加热外层的玻璃毛细管,加热温度超过了玻璃的软化温度但低于单晶光纤熔点,这样玻璃毛细管在加热的作用下软化,然后紧密的贴合在单晶纤芯表面,最后把套管于单晶光纤整体向上实现共拉伸生长。使用此种方法有两点优势:1)CDLHPG技术所用包层材料多为玻璃材料,目前玻璃材料种类丰富多样,且折射率调节范围较大,可为单晶光纤的包层提供多种选择;2)CDLHPG技术制备单晶光纤包层比较高效,生长周期短。

但是由于玻璃与单晶光纤的热膨胀系数相差较大,在高功率激光输出过程中极易导致包层与纤芯接触

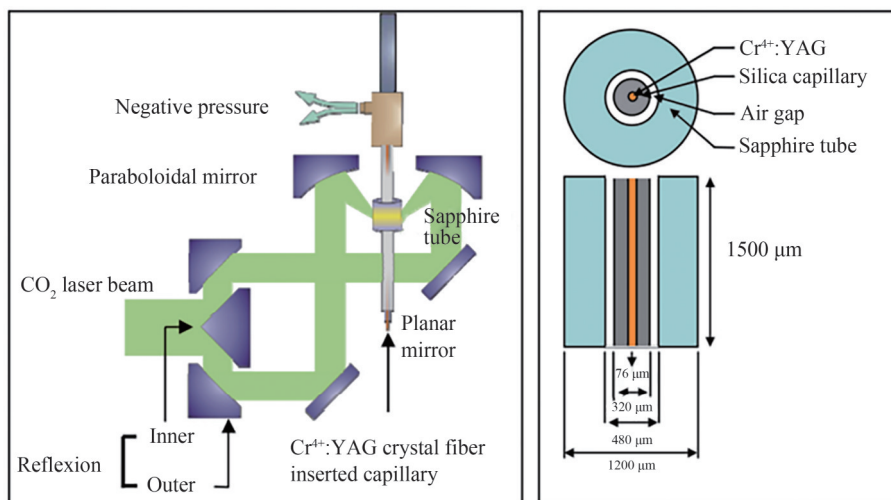


图9 CDLHPG系统原理图<sup>[53]</sup>  
Fig.9 Schematic diagram of CDLHPG system<sup>[53]</sup>

界面脱离,并且如果折射率差特别大时,还可能引起激光多模传输,造成激光光束质量下降。因此,研究者近年来采用其他包层制备方法在已经生长好的单晶光纤表面涂覆多晶或单晶包层,以此获得良好的热膨胀匹配度并且提高单晶光纤的散热能力。

2014年,LAIC C等<sup>[54]</sup>利用LHPG制备了40 μm的Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶光纤并采用溶胶-凝胶法制备了相应的包层。第一步,将纳米氧化铝粉末等原料按比例混合。然后,将制备好的混合浆料均匀浸涂在Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶光纤的表面上。干燥后放入烧结炉中,在1650℃下烧结2 h。图10(a)为溶胶-凝胶法示意图,最终得到的致密氧化铝陶瓷包层截面如图10(b)和(c)。浸渍速度和入射角影响固液界面的形状,从而改变陶瓷包层的厚度。较高的浸渍速度和较大的入射角可提供较厚的包层,但由于表面张力不平衡,会产生大量气泡,降低致密性。垂直浸渍被认为是控制界面粘附性能和实现无孔多晶熔覆的最佳方法,其他浸渍方向得到的包层总是会出现分层现象。图10(c)中,外层是由致密的氧化铝颗粒组成的陶瓷层。细长晶粒的发展,称为异常晶粒生长(Abnormal Grain Growth, AGG),通常与大量液相和杂质偏析的存在有关。内层是在Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶光纤的影响下形成的均匀的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶体层。

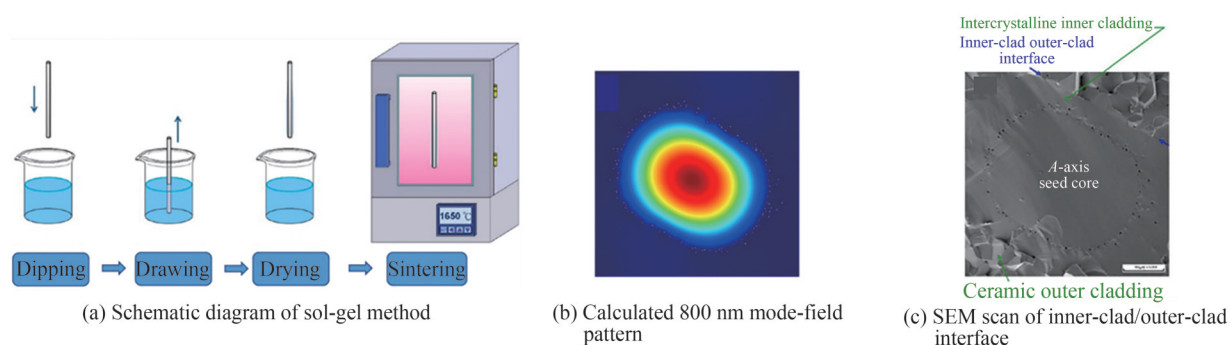


图10 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶光纤<sup>[54]</sup>  
Fig.10 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystal fiber<sup>[54]</sup>

2018年,美国陆军实验室的研究人员<sup>[27]</sup>开发了带包层的柔性可弯曲“C4”(crystalline-core/crystalline-cladding, C4)Yb:YAG单晶光纤。首先利用LHPG生长直径在30到100 μm之间的掺杂单晶,通过液相外延法生长单晶包层,生长了厚度在1到150 μm之间的未掺杂YAG包层。图11(a)是制备包层所开发的先进LPE晶体生长系统的配置,该系统主要组件包括:1)加热炉,2)Pt坩埚,3)稳定装置和提拉装置。在包层生长过程中,单晶纤芯浸入熔融助溶剂中。助溶剂的组成和生长温度取决于要生长的包层材料。实验时为了生长未掺杂的YAG晶体包层,在助溶剂中添加氧化钇(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)粉末,包层生长温度保持在



900和1150°C之间。如图11(c)所示,光纤纤芯和包层都呈现出清晰的六边形横截面。“C4”型单晶包层光纤的内部纤芯为1 at.%的Yb<sup>3+</sup>:YAG单晶光纤,外部包层为纯YAG晶体,其光学透射图像和横截面反射图像如图11(b)和11(c)所示。此外,由于1% at.Yb:YAG单晶纤芯的折射率比纯YAG包层的折射率高约 $1.6 \times 10^{-4}$ ,因此在图11(b)中可以清楚看出纤芯区域的亮度比包层区域更高。

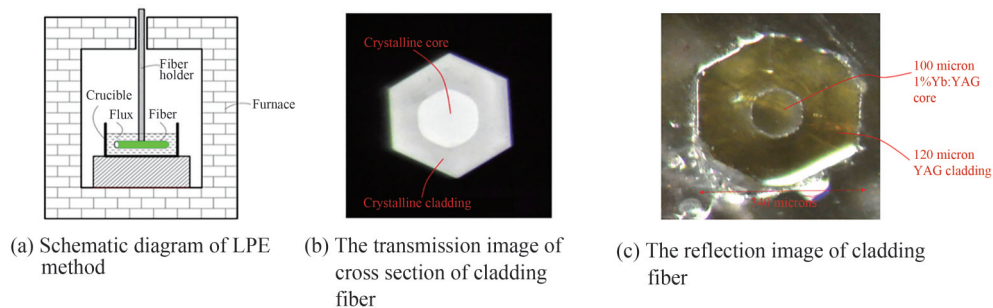


图11 带包层柔性可弯曲“C4”Yb:YAG单晶光纤<sup>[27]</sup>  
Fig.11 Cladding flexible "C4" Yb:YAG single crystal fiber<sup>[27]</sup>

2018年美国NRL的工作人员报道了使用磁控溅射法制备YAG包层<sup>[55]</sup>。使用射频磁控溅射从多个高纯度YAG靶材上生长单晶包层,在这个过程中通入氩气与氧气的混合气体,来提高沉积速率和包层均匀性。整个过程持续了数百小时,得到的包层是均匀的,厚度为20~30 μm。如图12(b)所示,当溅射包层光纤用He-Ne激光照射时,光纤没有可见的散射发射。

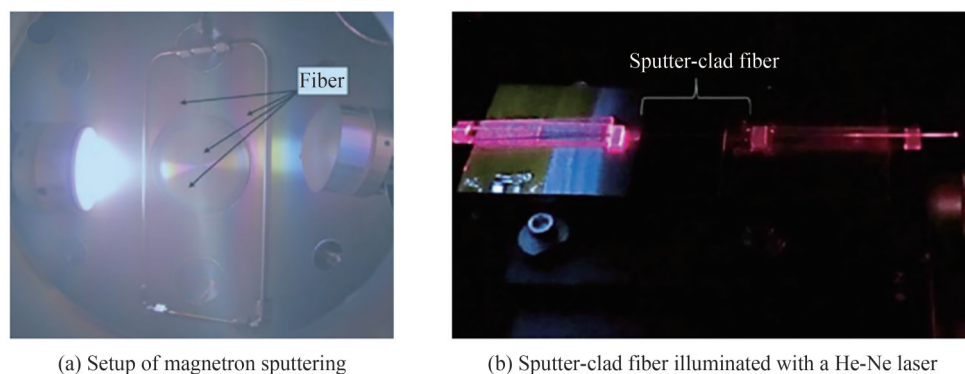


图12 磁控溅射法包层制备<sup>[55]</sup>  
Fig.12 Preparation of claddings by magnetron sputtering<sup>[55]</sup>

单晶包层制备方法多种多样,结晶态包层通常采用与纤芯相同的基质,包层与纤芯的热学、力学性能一致,折射率差异小,有利于实现光波导传输,这类“单晶纤芯/单晶包层”结构简称为C4单晶光纤。制备C4单晶光纤的晶体生长技术中,以LPE法最具代表性。LPE技术的设备基本构造与助溶剂提拉法相近,但能采用更高的速度旋转转晶杆。此外,由于采用了助溶剂,液相外延的生长温度通常远低于材料熔点。溶胶-凝胶法,液相外延法(LPE)与磁控溅射法制备出的单晶光纤包层属于多晶和单晶包层,相较于共拉伸加热基座法(CDLHPG)使用的玻璃材料,可以有效避免使用玻璃材质的一些缺点,但这些后处理方法也面临着制作周期长、难达到涂覆均匀等问题。CDLHPG法在纤芯包层制备过程中均经过一次“熔化-结晶”过程,有利于实现纤芯与包层的紧密结合,但纤芯及包层的直径均匀性也由于这一间接控制的“熔化-结晶”过程而难以得到保证。通过调节包层材料与内部晶体材料的折射率差值能够实现全反射,进而提高激光的输出效率。目前应用最多的包层材料为特种玻璃,其优势在于折射率调节范围较大,可满足多种材料的需求。虽然可以高效的制备单晶包层,但多用于玻璃包层的制备,而由于玻璃材料与晶体材料的物化性能差异,想要实现与纯玻璃光纤相同的高功率激光输出目前还难以实现。如果单晶光纤包层制备关键技术取得重大突破,采用具有包层结构的小直径单晶光纤有望实现更高效和功率的激光输出。

## 2 单晶光纤超短脉冲放大技术研究进展

### 2.1 单晶光纤的发射、吸收谱特性

Yb:YAG单晶光纤在超短脉冲放大领域具有很大的应用前景,其晶体特性与Yb:YAG晶体相同。Yb:YAG单晶光纤吸收谱带宽,从图13可以看出,Yb:YAG的吸收谱主要有两个吸收峰,分别为940 nm和969 nm,同时,可以看出在940 nm的吸收峰处其吸收带宽大,对泵浦源的中心波长飘移不是很敏感,因此目前超快放大系统主要采用940 nm的LD进行泵浦。而且可以发现,温度越低,其吸收截面和发射截面越大,因此低温Yb:YAG也成为了一个重要的高功率放大方式。969 nm处的吸收峰,吸收谱宽窄,但是吸收波长(969 nm)与发射波长(1 030 nm)近,量子亏损小,产热少。目前随着体布拉格稳频技术在半导体泵浦源中的应用,锁波长的窄线宽969 nm LD已经成熟,因此在高功率泵浦的情况下,969 nm LD也逐渐引起了科研人员的重视<sup>[56]</sup>。

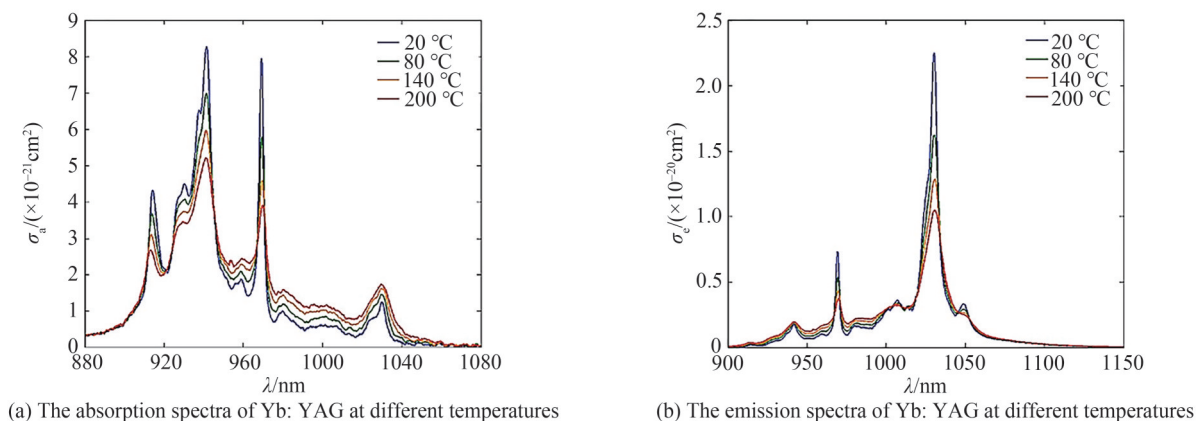


图13 Yb:YAG晶体的吸收谱和发射谱<sup>[57]</sup>

Fig.13 The absorption spectrum and emission spectrum of Yb:YAG crystal<sup>[57]</sup>

### 2.2 Yb:YAG单晶光纤超短脉冲放大技术主要进展

基于SCF的超短脉冲放大技术在高功率、高能量超快放大方面取得了一定的进展。2011年,ZAOUTER Y等<sup>[58]</sup>基于Yb:YAG单晶光纤,采用双通放大结构对飞秒振荡器输出的400 MW,30 MHz,230 fs的超短脉冲进行了直接放大,主要的放大结构如图14所示,双通放大结构利用法拉第反射镜构成,由于放大过程中光学器件本身引入了色散,直接放大输出的脉冲宽度达到700 fs,放大后采用了GTI镜进行进一步的色散补偿,实现了12 W,330 fs的超快激光输出。

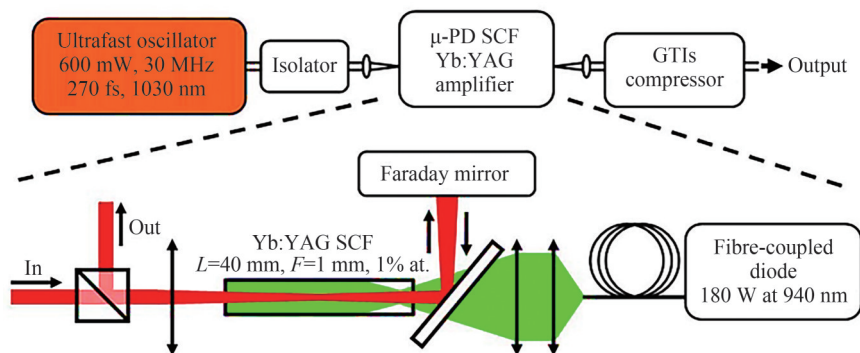


图14 双通结构的单晶光纤飞秒直接放大结构图<sup>[58]</sup>

Fig. 14 Direct Femtosecond amplification structure of double-pass single crystal fiber<sup>[58]</sup>

2012年,DÉLEN X等<sup>[59]</sup>重点研究了单晶光纤的高功率输出能力,采用一个40 mm长,直径1 mm,掺杂浓度为1%的Yb:YAG单晶光纤作为增益介质,600 W的940 nm LD作为泵浦源进行端面泵浦,以及一对曲

率半径分别为 50 mm 的腔镜和 100 mm 的输出耦合镜,输出了 251 W 的连续激光,光光转换效率高达 44%,验证了单晶光纤百瓦级高功率放大输出的潜力,其结构如图 15。

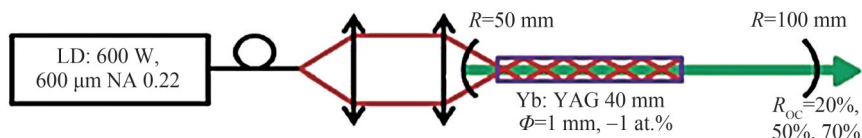


图 15 基于 Yb:YAG 单晶光纤的高功率振荡器结构图<sup>[59]</sup>

Fig.15 The structure of high power oscillator based on Yb:YAG single crystal fiber<sup>[59]</sup>

直接放大的飞秒激光器的能量都比较低,百微焦以上的高功率大能量飞秒直接放大输出,需要考虑单晶光纤中的非线性效应以及晶体自身的端面损伤问题,单晶光纤放大器应用到 CPA 系统可以实现高能超短脉冲放大输出。2013 年, DÉLEN X 等<sup>[60]</sup>采用直径 1 mm,长度 40 mm,掺杂 1% @at. 的单晶光纤,利用 CPA 技术以及 SCF 双通放大的结构,采用重频 10 kHz, 150 μJ 的高能种子源,最终获得了 1 mJ, 380 fs, 10 W 的超快激光输出,主要的放大结构如图 16 所示,其放大结果证实了基于 SCF 实现高能飞秒脉冲放大的能力。

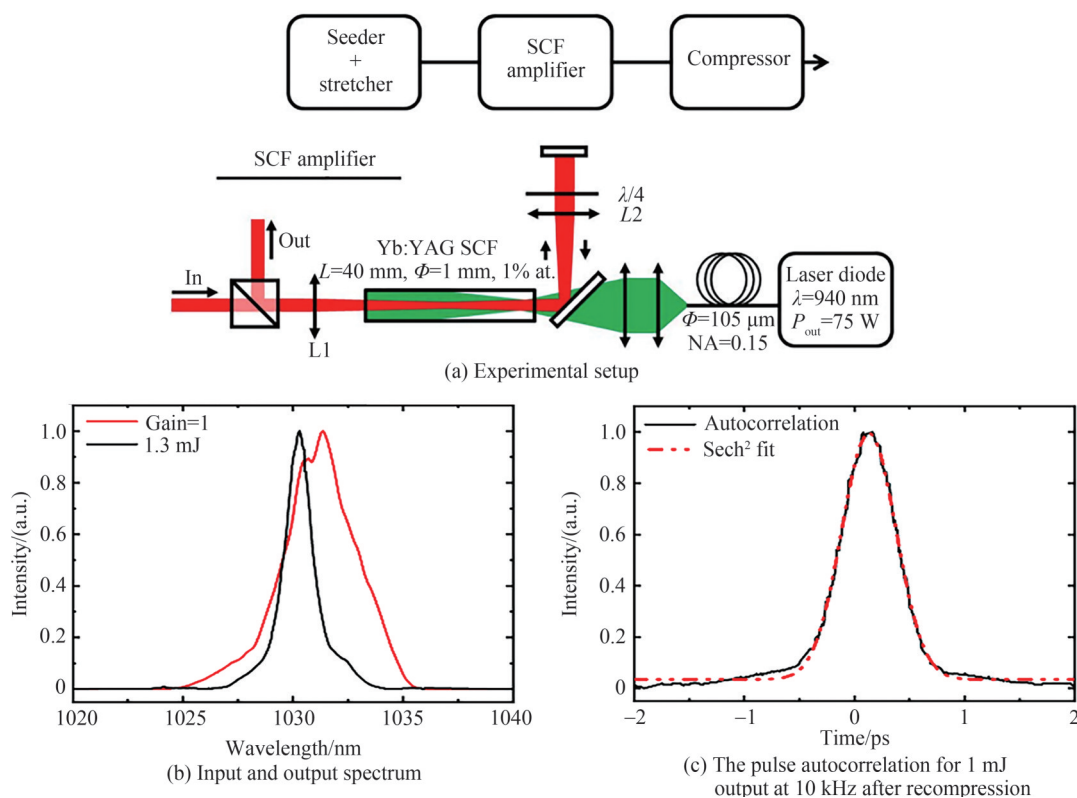


图 16 单晶光纤双通放大啁啾脉冲放大系统<sup>[60]</sup>

Fig.16 Double pass chirped pulse amplification system of single crystal fiber<sup>[60]</sup>

但是,随着峰值功率的进一步增大,单晶光纤的自聚焦效应以及单晶端面的镀膜很容易造成晶体的损伤。因此,为了进一步增加超短脉冲激光的能量输出,相干合束技术是一个非常有效的技术手段。德国耶拿大学的 KIENEL M 等<sup>[61]</sup>采用基于光纤 CPA 的预放大器,最大输出能量 600 μJ @ 6 kHz,脉冲展宽达到 2 ns 的 1 030 nm 作为信号,通过偏振分光,获得两路信号分别注入两路的单晶光纤进行双通放大,晶体直径 1 mm,长度 40 mm,掺杂浓度 1%,两路 SCF 独立双通放大后进行相干合束,其中一路采用压电陶瓷控制光程差保证高效率的相干合束,整体合束效率达到 94%。合束后进入光栅压缩器压缩,压缩后获得了脉冲能量 3 mJ,脉宽 695 fs,峰值功率 3.7 GW,相干合束的放大结构如图 17 所示。相干合束技术为进一步提升单晶光纤放大器的输出能量提供一种新的技术思路。

在基于单晶光纤的高功率输出方向,科研人员也进行了突破。LESPARRE F 等<sup>[62]</sup>利用两级的双通单

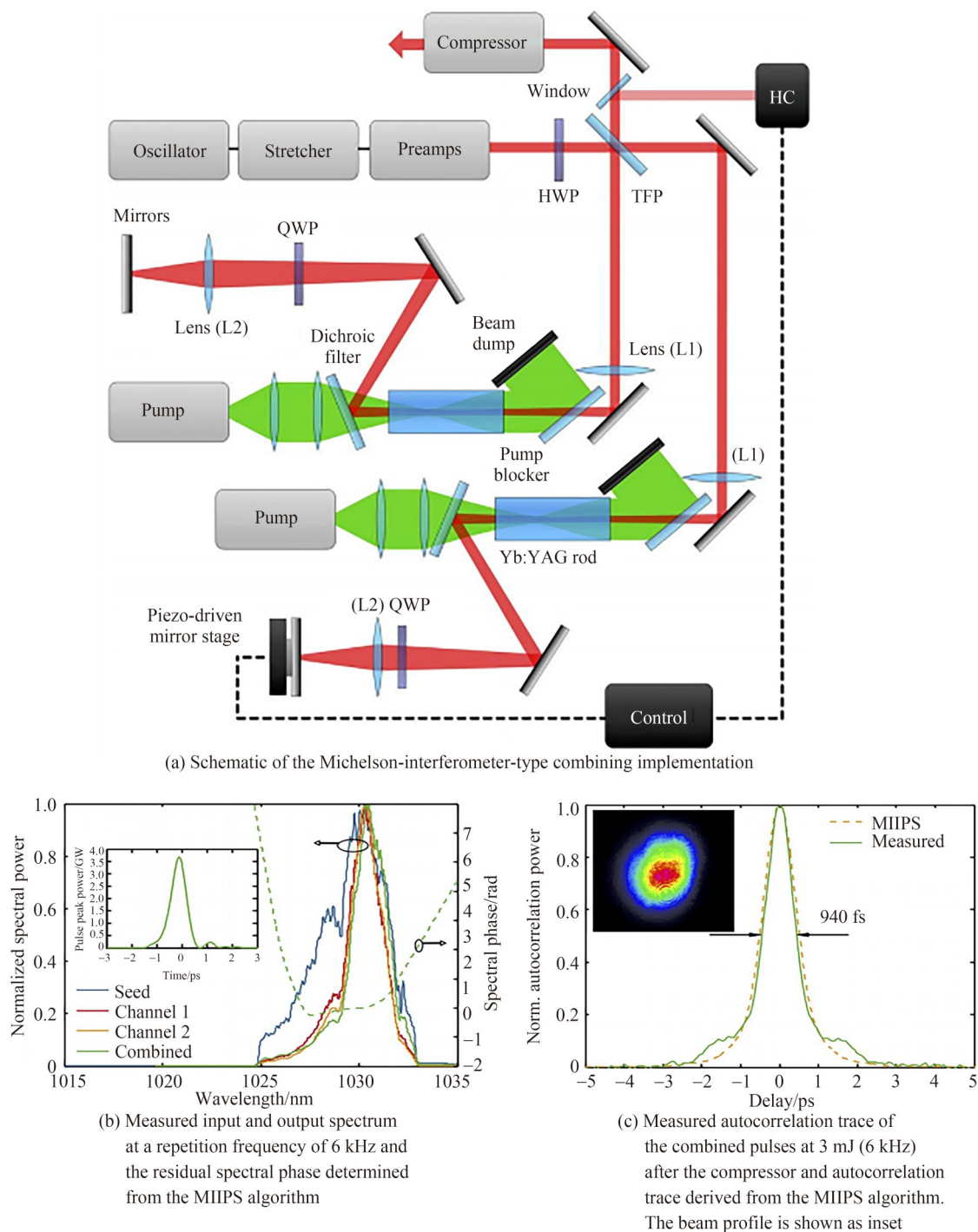
图 17 采用两路单晶光纤相干合束的高能超短脉冲放大系统<sup>[61]</sup>

Fig.17 High energy ultra-short pulse amplification system by coherent beam combination of two single crystal fibers<sup>[61]</sup>

晶光纤放大结构级联一级的单通放大结构,通过直接飞秒放大,输出了 86 W, 738 fs, 20 MHz 的高功率超快激光,如图 18 所示。MARKOVIC V 等<sup>[63]</sup>利用一个重复频率 83.4 MHz,平均功率 2.8 W 的锁模种子源作为信号注入,利用一级的双通单晶光纤放大器和一级的单通单晶光纤放大器直接进行飞秒放大,实现了 160 W, 800 fs, 83.4 MHz 的飞秒激光输出。

2022 年,北京工业大学王璞课题组采用基于掺镱光纤和 Yb:YAG 细棒的混合 CPA 激光系统。如图 19 所示,该激光系统在室温下使用 Yb:YAG 细棒,无需泵浦引导,即可产生高达 100 W 以上的放大输出功率<sup>[64]</sup>。将输出功率为 7 W,重复频率为 1 MHz 的掺 Yb 全光纤激光器由单晶光纤和 Yb:YAG 细棒组成的简单、紧凑的两级放大器,其输出功率放大到 126.2 W,这是室温下在无泵浦导向的情况下基于 Yb:YAG 细

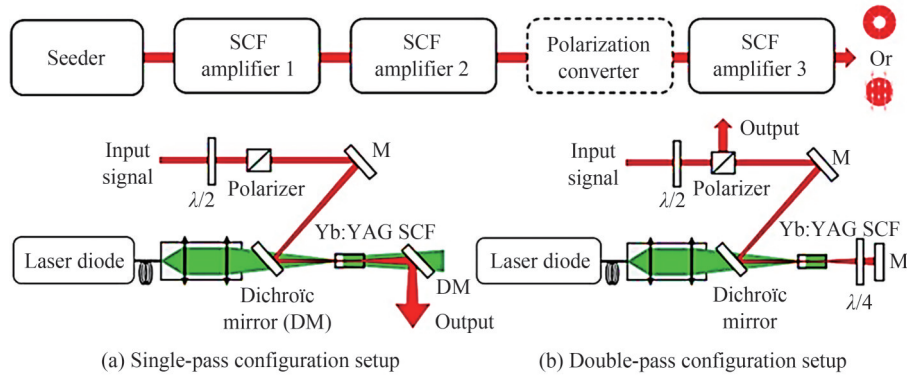
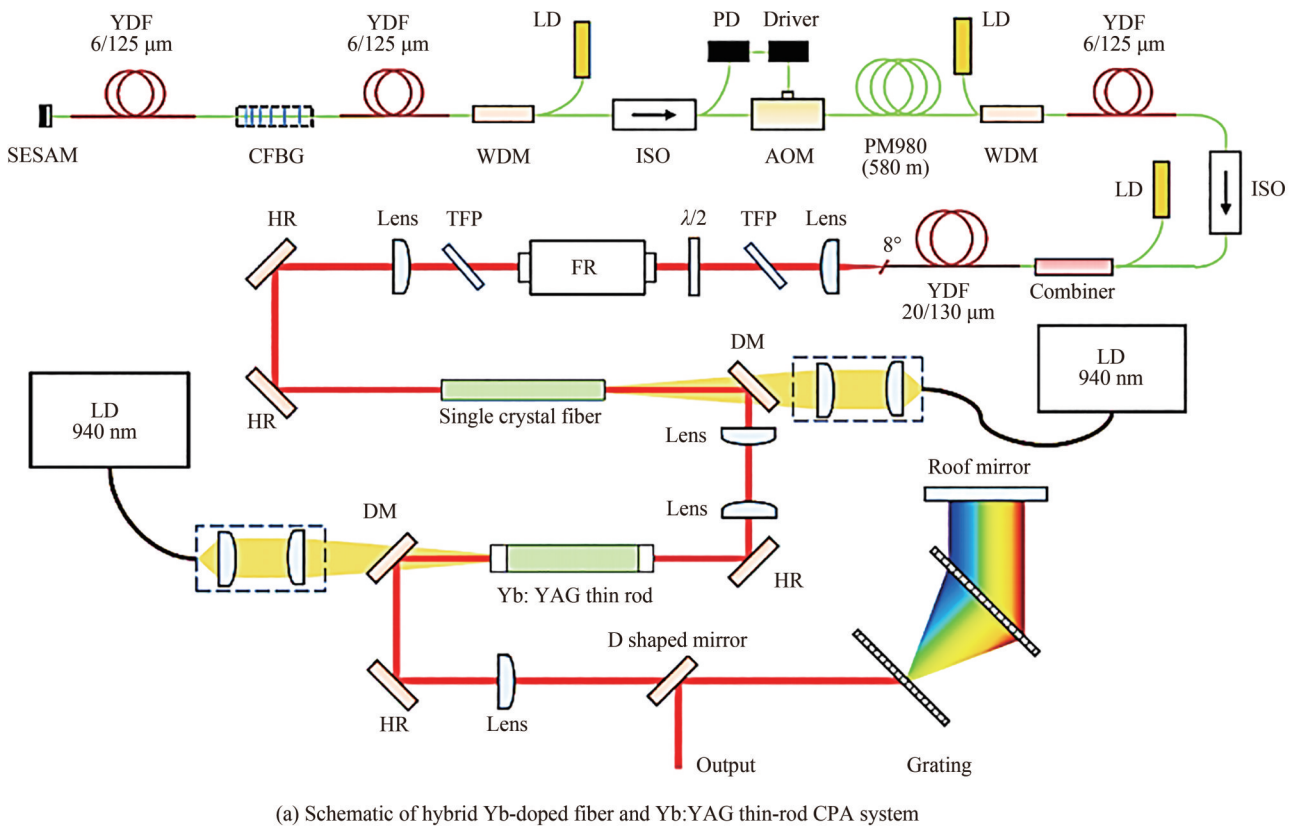


图 18 基于单晶光纤的高功率直接飞秒放大系统<sup>[62]</sup>  
 Fig.18 Direct high power femtosecond amplification system based on single crystal fiber<sup>[62]</sup>



(a) Schematic of hybrid Yb-doped fiber and Yb:YAG thin-rod CPA system

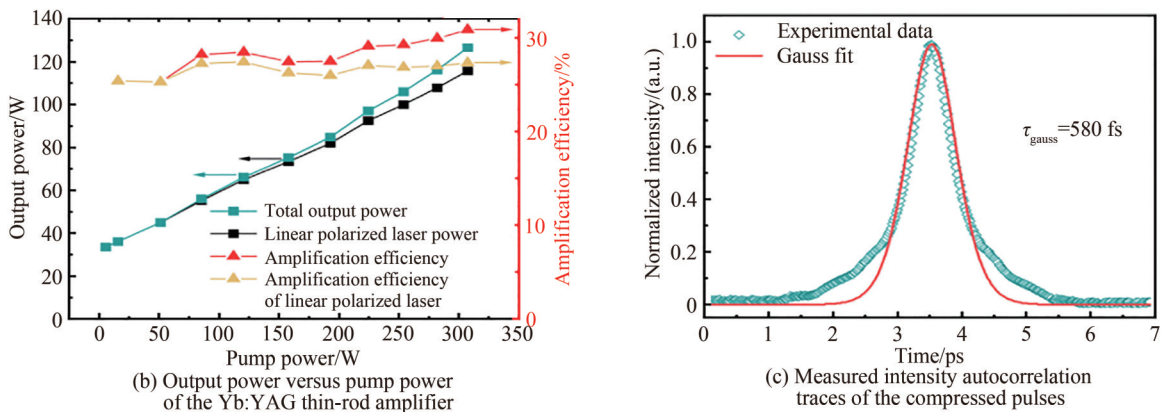


图 19 单晶光纤(SCF)和 Yb:YAG 细棒组成的两级放大系统结果<sup>[64]</sup>

Fig. 19 Schematic of hybrid single crystal fiber and Yb:YAG thin-rod two-stage amplification system<sup>[64]</sup>

棒放大器获得的最高输出功率。利用薄膜偏振器 (Thin Film Polarizers, TFP) 去除热退偏后, 得到了平均功率为 115.2 W 的线偏振超短脉冲激光输出。脉冲压缩后的输出功率为 80.6 W, 脉宽为 580 fs。中心脉冲占脉冲总能量的 84.1%, 脉冲峰值功率为 116.9 MW。

2022年, 山东大学刘兆军、赵智刚课题组<sup>[65]</sup>采用光纤预放大器作为注入源, 在 1 MHz 重复频率下, 注入信号 4.5 W 的情况下, 采用了三级级联的单晶光纤放大器, 获得了最大 240 W 的放大输出, 最后一级采用 969 nm 和 940 nm 的两个高亮度半导体激光器合束泵浦, 获得了~51% 的功率提取效率, 其水平和垂直方向上的光束质量分别为 1.72 和 1.12, 如图 20 所示。同时, 初步采用 80 W 的信号注入体光栅压缩器进行了压缩, 获得了平均功率 66.5 W, 脉宽 744 fs 的超快激光。

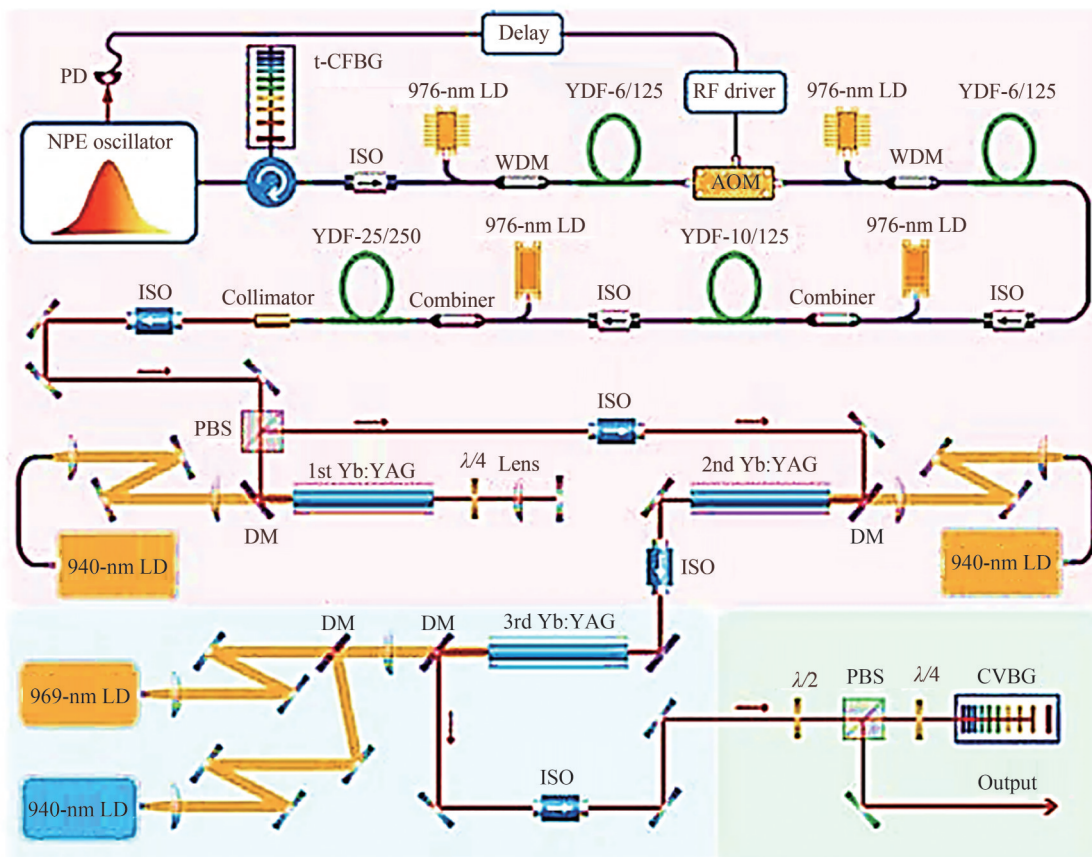
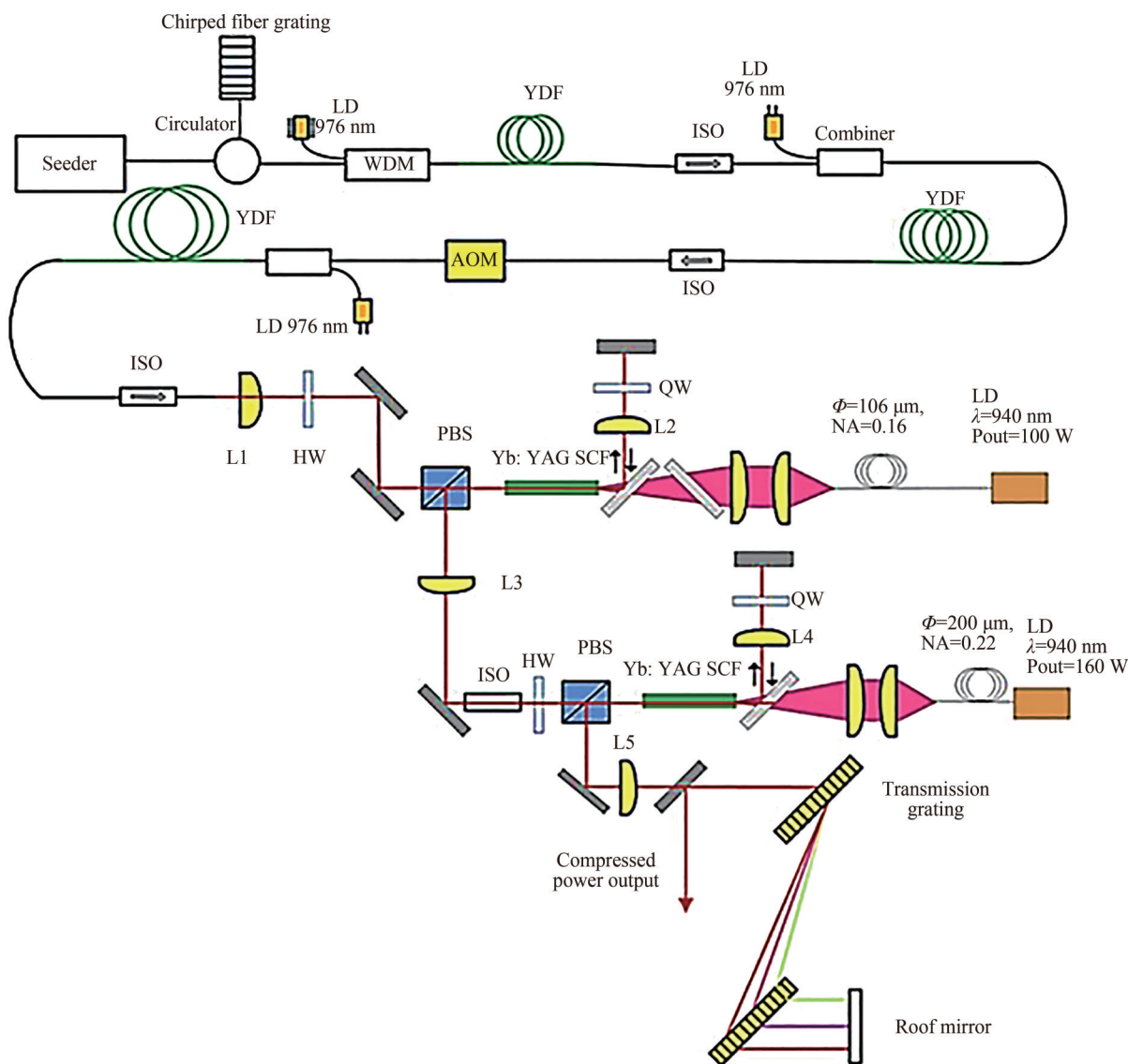


图 20 基于三级单晶光纤的高功率超短脉冲放大系统<sup>[65]</sup>

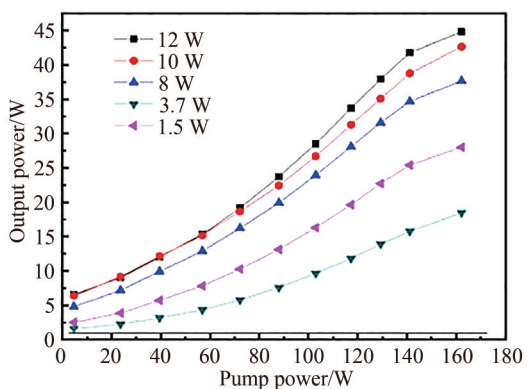
Fig. 20 High power ultra-short pulse amplification system based on three-stage single crystal fiber<sup>[65]</sup>

本课题组在单晶光纤放大方面, 主要瞄准高通量阿秒驱动源以及高功率大能量超快激光加工用飞秒光源, 研究的主要重复频率范围为 100 kHz~1 MHz 范围, 采用全光纤系统前端和单晶光纤主放大器组合, 实现输出功率数十瓦到百瓦的高功率、高光束质量超短脉冲输出。2017年, 采用 25/250 双包层光纤, 在 200 kHz 的重频下, 输出 1.4 W 的展宽啁啾脉冲, 注入到两级的级联双通 SCF 放大器, 实现了功率 44 W 的放大输出, 但是光斑圆度欠佳, 第二级采用单通放大, 输出了 34 W 的高光束质量脉冲激光, 测试得到水平方向和垂直方向的光束质量分别为 1.241 和 1.220, 压缩后脉冲宽度达到 715 fs<sup>[66]</sup>, 如图 21 所示。

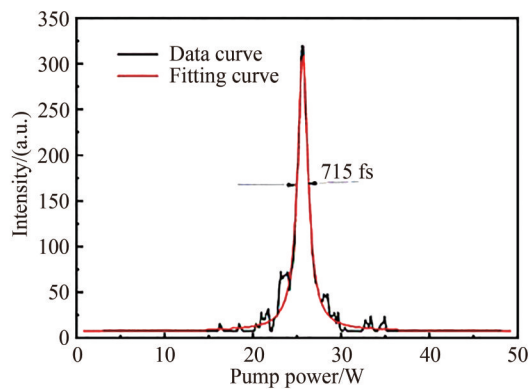
2020年, 本课题组对全光纤预放大系统进行非线性优化, 采用大模场的 35/250 双包层增益光纤作为预放大系统, 在非线形脉冲畸变可控的前提下, 获得了 200 kHz 下~7 W 的放大输出, 通过两级的简单的单通级联放大, 获得了 52.2 W 的高光束质量放大输出, 光束质量优于 1.3, 并通过啁啾体布拉格光栅 (Chirped-Volume Bragg Grating, CVBG) 压缩器进行压缩, 获得了 31.4 W, 740 fs 的压缩脉冲输出, 并验证了在 100 kHz 下的高能量输出能力, 压缩后获得了平均功率 28.4 W 的脉冲输出, 其单脉冲能量为 284  $\mu\text{J}$ <sup>[67]</sup>。同年, 本课题组采用全光纤激光器作为种子源, 首先采用 3 mm Yb:YAG 棒双通放大作为第一级放大, 然后级



(a) Schematic diagram of the high energy chirped-pulse amplification system



(b) Amplification performance of double-pass configuration with different seeding power

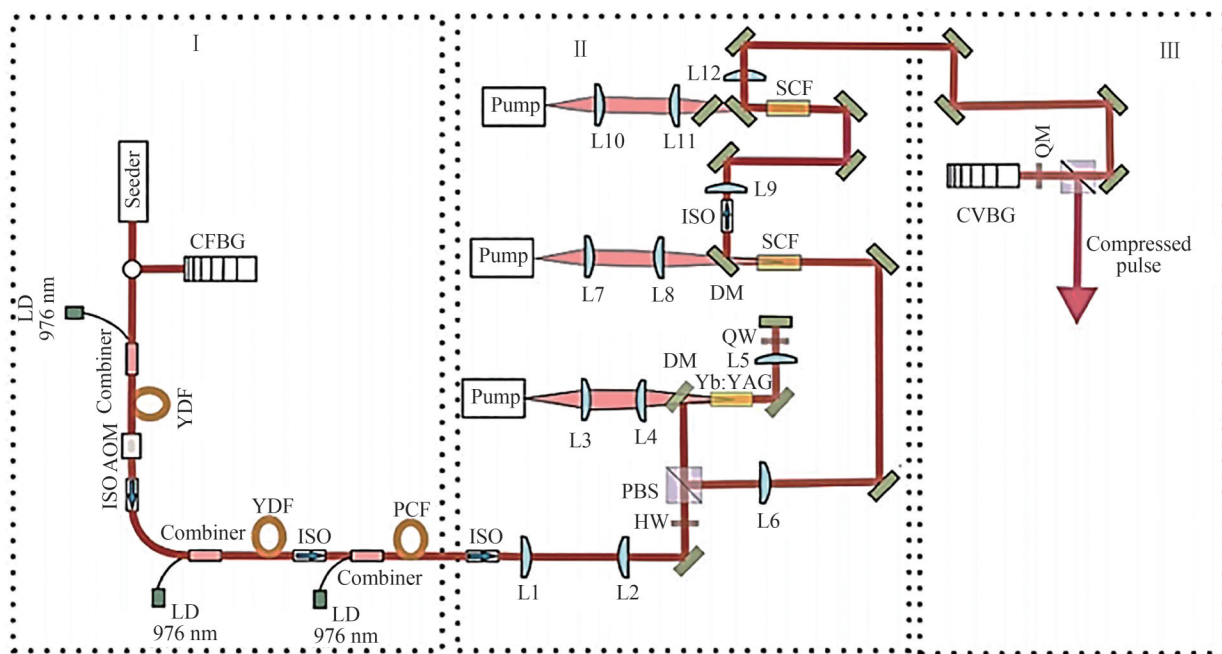


(c) Autocorrelation curves of the pulse

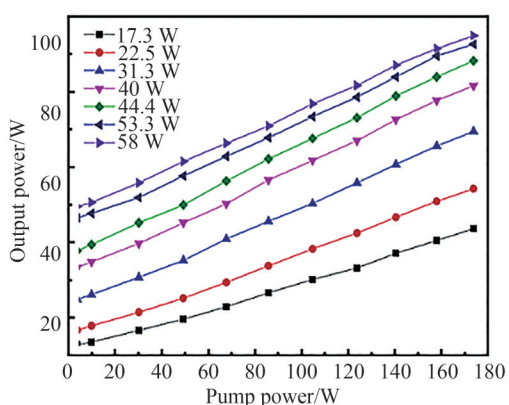
图 21 基于两级级联的单晶光纤放大系统<sup>[66]</sup>

Fig.21 Single-crystal fiber amplification system based on two cascades<sup>[66]</sup>

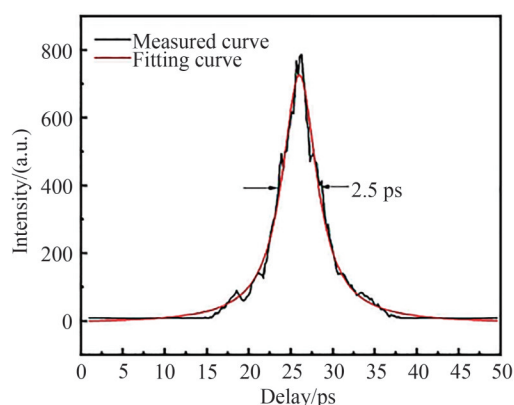
联两级的单晶光纤放大器单通放大,重频 200 kHz 下实现功率 96 W 的脉冲输出,单脉冲能量 0.48 mJ,在 92 W 的放大输出条件下,测试  $M^2$  小于 1.55,通过体啁啾布拉格光栅进行压缩,获得 67.8 W 的脉冲输出,由于体光栅色散和全光纤预放大部分的失配,获得的脉冲宽度为 2.5 ps<sup>[68]</sup>,如图 22 所示。



(a) Schematic diagram of the CPA system



(b) Amplification performance of SCF with different seed power



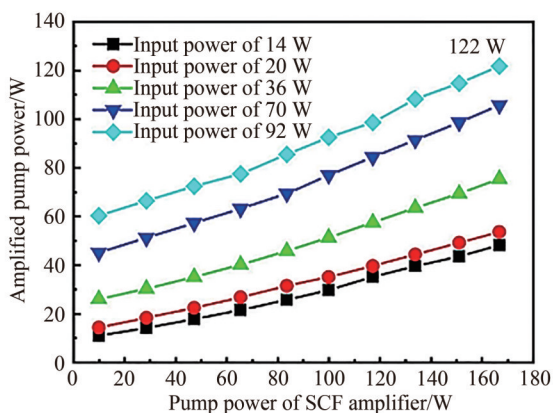
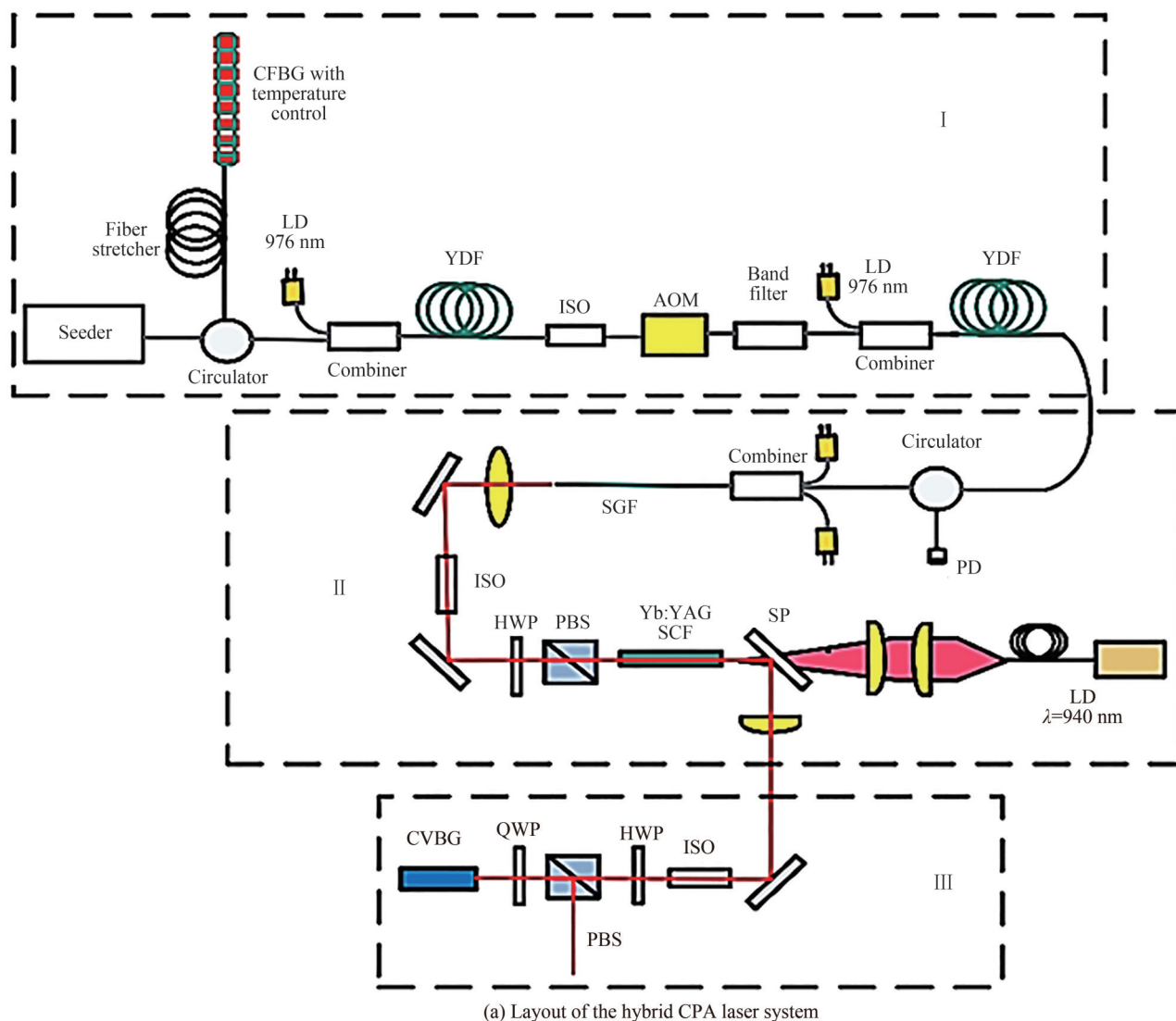
(c) Pulse duration after compression

图22 高能啁啾脉冲放大系统原理图<sup>[68]</sup>Fig.22 The schematic diagram of high energy chirped pulse amplification system<sup>[68]</sup>

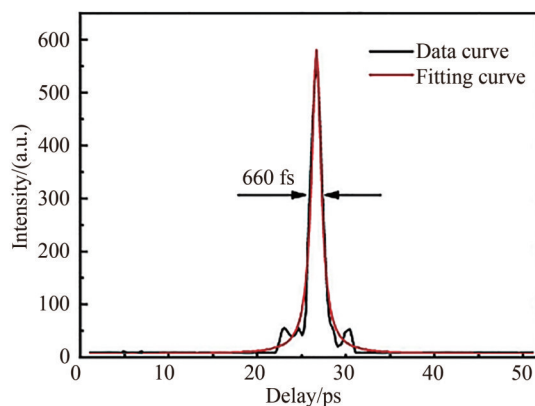
为了进一步降低系统的非线性积累,本课题组在光纤预放大器部分采用了高增益、低非线性的硅酸盐玻璃光纤放大器作为预放大器最后一级的功率提升,由于该放大器增益介质通过重掺杂实现了在很短的增益光纤长度上( $\sim 20$  cm)高增益的放大输出,因而放大器积累的非线性小,有利于提高注入 SCF 的信号功率,实现大信号注入,简化后级放大结构,实现更加易于集成的高功率飞秒输出。采用石英玻璃光纤-单晶光纤放大器组成的高功率啁啾脉冲放大系统,在 1 MHz,注入功率为 400 mW 时,硅酸盐放大器获得了 92 W 以上的放大功率,对应的放大增益高达 23.6 dB。级联一级的单通结构的单晶光纤放大,在 1 MHz 的重复频率下获得了 122 W 的放大功率输出,对应的脉冲能量为 122  $\mu$ J。放大后,激光脉冲被 CVBG 压缩。为了提高压缩效率,通过在光纤放大器中设置一个通带为 5 nm 的光纤滤波器来匹配 CVBG 压缩器的反射带宽,实现了总的压缩效率大于 73%。另外,为了实现啁啾光纤光栅展宽器与压缩器色散的精确匹配,利用自制的温度调谐啁啾光纤光栅装置实现了啁啾光纤光栅展宽器与压缩器色散的精确匹配,在压缩输出功率为 90 W 的情况下,脉冲宽度优化到 660 fs<sup>[69]</sup>,如图 23 所示。

基于单晶光纤的放大器在超快激光放大领域极具科研及工业微加工价值,是获得高功率大能量飞秒激光的有效技术路线。相比于光纤放大器,单晶光纤放大器的非线性积累更小,更有利于能量的提升,同时,





(b) Output performance of the SCF amplifier versus the pump power



(c) The autocorrelation curve of the compressed pulse

图 23 基于石英玻璃纤维-单晶光纤放大器组成的混合式高功率啁啾脉冲放大系统<sup>[69]</sup>

Fig.23 Hybrid high power chirped pulse amplification system based on silicate glass fiber-single crystal fiber amplifier<sup>[69]</sup>

其放大结构主要集中为单通双通的行波放大结构,相比板条、碟片等放大系统的高复杂性,单晶光纤具有更好的集成性和稳定性。单晶光纤放大器其波导结构可以将多模泵浦光和自由空间传播的信号光很好地匹配,可获得优于传统晶体棒的更高的放大效率和更优的光束质量;优良的热管理性能也使该结构能获得百瓦级别的中高功率的超短脉冲输出。基于光纤-单晶光纤的混合超短脉冲放大技术能够有效的结合光纤放

大器的高增益以及晶体放大器的高峰值功率、高脉冲能量的优势,为了进一步提高平均功率和脉冲能量,简单的时域展宽脉冲和扩大光纤纤芯方案已经不那么有效,通过采用相干合束等技术,光纤-单晶光纤的混合放大技术可以获得简单经济、稳定可靠的高功率、大能量超短脉冲激光输出。单晶光纤作为一种新的增益介质,能够提供很高的脉冲能量,但是功率提取效率较低,光束质量的保证需要通过精密的泵浦耦合和信号耦合保证。包层光纤具有更高的抗损伤性与更优良的环境适应性,并且被认为可实现更高的功率输出。与传统玻璃光纤相似的带包层的“C4”型单晶光纤,纤芯通常直径为几十微米,此类单晶光纤目前处于研究初期阶段,所报道的激光功率与玻璃光纤依然有着较大的差距。采用包层结构的晶体光纤可增大单晶光纤表面积和体积之比,提高包层的传热性能和光纤的热管理能力,实现长距离基模波导,最终实现更高效率和功率的激光输出,这也是未来发展的重要方向。这种放大技术不仅可以直接用于工业应用,还可以作为板条或碟片放大器的前级,大幅降低系统的复杂程度和成本。利用单晶光纤的技术优势,开发能够应用于阿秒驱动、超快激光微加工应用领域的飞秒激光器具有重要的科研价值和现实意义。

### 3 结论

掺镱光纤激光器由于其结构紧凑、稳定性好、易于维护等优势得到广泛应用,但是有限的模场面积使得放大过程中的非线性效应限制了超短光纤脉冲放大系统的输出能量。而板条、碟片等固体放大介质,封装难度大,放大结构相对复杂,不利于国产激光器的批量化生产。单晶光纤作为一种新型放大增益介质,其放大结构相对简单,放大增益高,实现高功率输出条件下仍然兼具高光束质量的优点,基于光纤-单晶光纤的混合超短脉冲放大技术可以实现光纤放大器的高增益以及晶体放大器的高峰值功率、高脉冲能量的优势结合。激光器输出功率小于 200 W 时能够取代固体放大领域的激光器,并且可以为碟片等高功率放大器提供参数优良、稳定可靠且成本更低的放大前级。在未来的激光器发展中,用于泵浦源的合适波长的光纤激光器的研发和光纤耦合激光二极管亮度的不断优化,能够有效提升掺镱单晶光纤的放大效率,实现在超快激光器领域的更广泛应用。

#### 参考文献

- [1] HENTSCHEL M, KIENBERGER R, SPIELMANN C, et al. Attosecond metrology [J]. *Nature*, 2001, 414(6863): 509-513.
- [2] GOHLE C, UDEM T, HERRMANN M, et al. A frequency comb in the extreme ultraviolet [J]. *Nature*, 2005, 436(7048): 234-237.
- [3] MIAO J, ISHIKAWA T, ROBINSON I K, et al. Beyond crystallography: diffractive imaging using coherent X-ray light sources [J]. *Science*, 2015, 348(6234): 530-535.
- [4] DUMITRU G, ROMANO V, WEBER H P, et al. Femtosecond ablation of ultrahard materials [J]. *Applied Physics A*, 2002, 74(6): 729-739.
- [5] LUTEY A H A, GEMINI L, ROMOLI L, et al. Towards laser-textured antibacterial surfaces [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10112.
- [6] VOROBYEV A Y, GUO C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 385-407.
- [7] RUSSBUELDT P, MANS T, WEITENBERG J, et al. Compact diode-pumped 1.1 kW Yb:YAG Innoslab femtosecond amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4169-4171.
- [8] SALTARELLI F, GRAUMANN I, LANG L, et al. 350 W average-power SESAM-mode locked ultrafast thin-disk laser [C]. *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, Optical Society of America, 2019.
- [9] FATTAHI H, ALISMAIL A, WANG H, et al. High-power, 1 ps, all-Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1126-1129.
- [10] LI Feng. Chirped pulse amplification and transmission technology of high energy femtosecond fiber for industrial Processing applications [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.  
李峰. 面向工业加工应用的大能量飞秒光纤啁啾脉冲放大与传输技术 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [11] SANGLA D, MARTIAL I, AUBRY N, et al. High power laser operation with crystal fibers [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 263-273.
- [12] XU Xiaodong. Single crystal fiber-material of choice for high power lasers [J]. *Journal of Artificial Crystal*, 2020, 49: 1952.  
徐晓东, 单晶光纤——高功率激光的优选材料 [J]. *人工晶体学报*, 2020, 49: 1952.
- [13] WANG T, ZHANG J, ZHANG N, et al. Single crystal fibers: diversified functional crystal material [J]. *Advanced Fiber*

- Materials, 2019, 1(3): 163-187.
- [14] LESPARRE F, GOMES J T, DÉLEN X, et al. Yb: YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1628-1631.
- [15] SHEN Y H. Sapphire fiber thermometer ranging from the room temperature to 1 800 °C[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(1):83-87.  
沈永行. 从室温到1 800 °C全程测温的蓝宝石单晶光纤温度传感器[J]. 光学学报, 2000, 20(1):83-87.
- [16] YE Linhua, ZHOU Xiaofen, SONG Li, et al. Preparation and properties of Pr<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>: YAG fiber for LED white light source[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 2059-2062.  
叶林华, 周小芬, 宋丽, 等. LED白光光源用Pr<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>: YAG光纤制备与特性[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2059-2062.
- [17] WANG Yalan, WANG Qing. Research progress in single-crystal fiber amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10):100006.  
王雅兰, 王庆. 单晶光纤放大器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100006.
- [18] CZOCHRALSKI J. Ein neues verfahren zur messung der kristallisationsgeschwindigkeit der metalle [J]. Zeitschrift für physikalische Chemie, 1918, 92(1): 219-221.
- [19] FEJER M, BYER R, FEIGELSON R, et al. Growth and characterization of single crystal refractory oxide fibers [C]. Advances in infrared fibers II. SPIE, 1982, 320: 50-55.
- [20] ANDREETA M, HERNANDES A C. Laser-heated pedestal growth of oxide fibers[M]. Springer Handbook of Crystal Growth. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 393-432.
- [21] YOON D H, YONENAGA I, FUKUDA T, et al. Crystal growth of dislocation-free LiNbO<sub>3</sub> single crystals by micro pulling down method[J]. Journal of Crystal Growth, 1994, 142(3-4): 339-343.
- [22] FUKUDA T, CHANI V I. Crystals Shaped: growth by micro-pulling-down technique[M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [23] WANG T, ZHANG J, ZHANG N, et al. The characteristics of high-quality Yb: YAG single crystal fibers grown by a LHPG method and the effects of their discoloration[J]. RSC advances, 2019, 9(39): 22567-22575.
- [24] SOLEIMANI N, PONTING B, GEBREMICHAEL E, et al. Coilable single crystals fibers of doped-YAG for high power laser applications[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 393: 18-22.
- [25] MAXWELL G, SOLEIMANI N, PONTING B, et al. Coilable single crystal fibers of doped-YAG for high power laser applications[M]. Laser Technology for Defense and Security IX. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8733: 87330T.
- [26] NIE C D, BERA S, HARRINGTON J A. Growth of single-crystal YAG fiber optics [J]. Optics Express, 2016, 24 (14): 15522-15527.
- [27] DUBINSKII M, ZHANG J, FROMZEL V, et al. Low-loss 'crystalline-core/crystalline-clad' (C4) fibers for highly power scalable high efficiency fiber lasers[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 5092-5101.
- [28] KIM W, SHAW B, BAYYA S, et al. Cladded single crystal fibers for high power fiber lasers [C]. Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications X, SPIE, 2016, 9958: 117-124.
- [29] SHAW L B, BAYYA S, KIM W, et al. Fabrication of cladded single crystal fibers for all-crystalline fiber lasers [C]. Specialty Optical Fibers, Optical Society of America, 2018: SoW2H. 3.
- [30] VERONESI S, ZHANG Y, TONELLI M, et al. Spectroscopy and efficient laser emission of Yb<sup>3+</sup>: LuAG single crystal grown by  $\mu$ -PD[J]. Optics Communications, 2012, 285(3): 315-321.
- [31] LEBBOU K, PERRODIN D, CHANI V I, et al. Fiber single-crystal growth from the melt for optical applications [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(1): 75-80.
- [32] PAUWELS K, DUJARDIN C, GUNDACKER S, et al. Single crystalline LuAG fibers for homogeneous dual-readout calorimeters [J]. Journal of Instrumentation, 2013, 8(9): P09019.
- [33] XU X, LEBBOU K, MORETTI F, et al. Ce-doped LuAG single-crystal fibers grown from the melt for high-energy physics [J]. Acta Materialia, 2014, 67: 232-238.
- [34] NOVOSELOV A, KAGAMITANI Y, KASAMOTO T, et al. Crystal growth and characterization of Yb<sup>3+</sup>-doped Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. Materials Research Bulletin, 2007, 42(1): 27-32.
- [35] LEE J, YOSHIKAWA A, KAIDEN H, et al. Microstructure of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> eutectic fibers grown by the micro-pulling-down method [J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 231(1-2): 179-185.
- [36] FUKABORI A, CHANI V, KAMADA K, et al. Growth of Yb-doped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals by the micro-pulling-down technique and their optical and scintillation characterization [J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 352(1): 124-128.
- [37] YOSHIKAWA A, HASEGAWA K, LEE J, et al. Phase identification of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/RE<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/REAlO<sub>3</sub> (RE= Sm-Lu, Y) eutectics [J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 218(1): 67-73.

- [38] SOTTILE A, ZHANG Z, VERONESI S, et al. Visible laser operation in a  $\text{Pr}^{3+}$ :  $\text{LiLuF}_4$  monocrystalline fiber grown by the micro-pulling-down method[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(6): 1964-1972.
- [39] SANTO A, RANIERI I, BRITO G, et al. Growth of  $\text{LiYF}_4$  single-crystalline fibres by micro-pulling-down technique[J]. *Journal of crystal growth*, 2005, 275(3-4): 528-533.
- [40] TOTSKA D, YANAGIDA T, FUJIMOTO Y, et al. Study on scintillation properties of rare earth (Pr, Nd and Tm) activated  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5$ [C]. *IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference*, IEEE, 2010: 1292-1295.
- [41] FUJIMOTO Y, YANAGIDA T, WAKAHARA S, et al. Growth and scintillation properties of  $\text{Ce}^{3+}$ -doped ( $\text{Y}_{1-x}\text{Gd}_x$ )  $\text{AlO}_3$  crystals[J]. *Physica Status Solidi C*, 2012, 9(12): 2259-2262.
- [42] FARHI H, BELKAHLA S, LEBBOU K, et al. BGO fibers growth by  $\mu$ -pulling down technique and study of light propagation[J]. *Physics Procedia*, 2009, 2(3): 819-825.
- [43] INABA S, MACHIDA T, ASAKAWA H, et al. Effects of temperature gradient on growth of  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  crystals by the micro-pulling-down method[J]. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 2017, 42(5): 123-126.
- [44] KAMADA K, TAKIDA Y, MINAMIDE H, et al. Growth of N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline (BNA) single crystal fibers by micro-pulling down method[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 452: 162-165.
- [45] LELII F D, JUN S, PIRZIO F, et al. Laser investigation of Yb: YLF crystals fabricated with the micro-pulling-down technique[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2223-2226.
- [46] VERONESI S, ZHANG Y, TONELLI M, et al. Efficient laser emission in  $\text{Ho}^{3+}$ : $\text{LiLuF}_4$  grown by micro-Pulling Down method[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18723-18731.
- [47] PIRZIO F, JUN S, TACCHINI S, et al. Multi-watt amplification in a birefringent Yb:  $\text{LiLuF}_4$  single crystal fiber grown by micro-pulling-down [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4095-4098.
- [48] YUAN Dongsheng, JIA Zhitai, SHU Jun, et al. Development of micro-pulling-down equipment for crystal fiber growth and YAG single crystal growth[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43: 1317-1322.  
原东升, 贾志泰, 舒骏, 等. 微下拉晶体光纤生长设备研制及 YAG 单晶生长[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(6): 1317-1322.
- [49] XU J, SONG Q, LIU J, et al. The micro-pulling-down growth of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  and  $\text{Y}_3\text{ScAl}_4\text{O}_{12}$  crystals for red luminescence[J]. *Optical Materials*, 2020, 109: 110388.
- [50] ZHAO Y, WANG L, CHEN W, et al. 35 W continuous-wave Ho: YAG single-crystal fiber laser[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8(2): 02000e25.
- [51] KURLOV V N, STRYULOV D O, SHIKUNOVA I A. Growth of sapphire and oxide eutectic fibers by the EFG technique[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2016, 673(1): 012017.
- [52] TIAN X, WANG Z, DING M, et al. Recent progress in cerium-based nanomaterials for electrochemical biosensors[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15(10): 330-310.
- [53] HUANG K Y, HSU K Y, JHENG D Y, et al. Low-loss propagation in  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG double-clad crystal fiber fabricated by sapphire tube assisted CDLHPG technique[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12264-12271.
- [54] LAI C C, GAO W T, NGUYEN D H, et al. Toward single-mode active crystal fibers for next-generation high-power fiber devices[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(16): 13928-13936.
- [55] MYERS J D, KIM W, SHAW L B, et al. Development of thin film claddings for single crystal optical fiber[C]. *Novel Optical Materials and Applications*, Optical Society of America, 2018.
- [56] DE VIDO M, WOJTUSIAK A, ERTEL K. High resolution absorption measurements at the zero-phonon line of Yb: YAG at low temperatures[C]. *Laser Applications Conference*, Optical Society of America, 2020.
- [57] KOERNER J, VORHOLT C, LIEBETRAU H, et al. Measurement of temperature-dependent absorption and emission spectra of Yb: YAG, Yb: LuAG, and Yb:  $\text{CaF}_2$  between 20 °C and 200 °C and predictions on their influence on laser performance[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(9): 2493-2502.
- [58] ZAOUTER Y, MARTIAL I, AUBRY N, et al. Direct amplification of ultrashort pulses in  $\mu$ -pulling-down Yb: YAG single crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 748-750.
- [59] DÉLEN X, PIEHLER S, DIDIERJEAN J, et al. 250 W single-crystal fiber Yb: YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2898-2900.
- [60] DÉLEN X, ZAOUTER Y, MARTIAL I, et al. Yb: YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 109-111.
- [61] KIENEL M, MÜLLER M, DEMMLER S, et al. Coherent beam combination of Yb: YAG single-crystal rod amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3278-3281.
- [62] LESPARRE F, GOMES J T, DÉLEN X, et al. High-power Yb: YAG single-crystal fiber amplifiers for femtosecond lasers in cylindrical polarization[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2517-2520.
- [63] MARKOVIC V, ROHRBACHER A, HOFMANN P, et al. 160 W 800 fs Yb: YAG single crystal fiber amplifier without CPA[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25883-25888.

- [64] XU Y, PENG Z, SHI Y, et al. Compact 80 W, 1 MHz femtosecond chirped pulse amplification laser system based on a Yb-doped fiber and a Yb: YAG thin Rod[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 1-6.
- [65] WANG S, CONG Z, LIU J, et al. High-efficiency 940-and 969-nm brightness-maintaining wavelength-multiplexed LD-pumped 240-W thin-rod Yb: YAG amplifier[J]. Optics Letters, 2022, 47(8): 2113-2116.
- [66] LI F, YANG Z, LV Z, et al. Hundred micro-joules level high power chirped pulse amplification of femtosecond laser based on single crystal fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-7.
- [67] LI F, WANG N, YANG Z, et al. High-energy femtosecond laser system based on a fiber laser seeder, Yb: YAG single crystal fiber and chirped volume Bragg grating[J]. Laser Physics Letters, 2020, 17(6): 065103.
- [68] WANG N N, LI F, WANG X L, et al. Development of a 67.8 W, 2.5 ps ultrafast chirped-pulse amplification system based on single-crystal fiber amplifiers[J]. Applied Optics, 2020, 59(27): 8106-8110.
- [69] LI F, YANG Z, LV Z, et al. Hybrid CPA system comprised by fiber-silicate glass fiber-single crystal fiber with femtosecond laser power more than 90 W at 1 MHz[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106291.

## High Power Single Crystal Fiber Ultrashort Pulse Amplification Technology (Invited)

CAO Xue<sup>1,2,3,4</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, ZHAO Hualong<sup>1</sup>, WANG Yishan<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>4</sup>, SHEN Deyuan<sup>4</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Shaanxi Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, College of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Femtosecond laser with high repetition rate and high output power can be used as the driving light source of attosecond pulse generation, which can effectively increase photon flux, obtain enough experimental data quickly, and overcome the existing problem of space charge effect. Therefore, it has important application value in high order harmonics and attosecond pulse generation. At the same time, high repetition rate and high output power femtosecond pulses also have important application prospects in ultrafast laser precision micro-machining field, which can solve the technical problems of hard, brittle and soft materials processing with high-precision and high-quality "cold machining" in aviation and aerospace field. With the rapid development of ultra-fast laser processing market, high power femtosecond laser system with higher cost performance has become the major factor of concern in the industry.

Compared with traditional solid-state lasers, fiber amplifiers have many characteristics, such as easy operation, all-fiber fusion, easy integration, excellent heat dissipation performance, excellent beam quality, etc., which have attracted much attention in the field of ultra-short pulse amplification. However, limited by the mode field area of ordinary single-mode or nearly single-mode fiber, the output energy of the ultrashort pulse based on the structure of optical fiber amplifier system is limited due to the Raman scattering and stimulated Brillouin scattering, the self-phase modulation, cross phase modulation and other nonlinear effect in the process of high power pulse amplification. In order to achieve high energy femtosecond pulse amplification, the current fiber amplification system mainly adopts the structure of CPA system. Before amplification, the pulse is stretched in the time domain and the special fiber with large mode area is used to achieve high energy output in the space domain.

Slab, disc and other solid amplifying media can output higher pulse energy, however, they are difficult to package, and the amplification structure is relatively complex, which is not conducive to the mass production of domestic lasers. Single crystal fiber as a new type of amplifier gain medium, it has a slender crystal structure and waveguide transmission characteristics for pump beam, which makes it have the advantages of both crystal and fiber laser amplification media. Its slender crystal structure can effectively dissipate heat, ensuring high beam quality under high-power operation. The waveguide characteristics of pump beam make it have greater energy extraction efficiency and higher amplification gain than traditional

crystal rods. Compared with the fiber amplifier, the nonlinear accumulation of the single crystal fiber amplifier is much smaller, which is more conducive to the improvement of pulse energy. Meanwhile, the amplification structure of the single-crystal fiber amplifier mainly focuses on the single-pass or double-pass traveling wave amplification structure. Compared with the high complexity of the slab and thin-disk amplification system, the single-crystal fiber has better integration and stability. The waveguide structure of single-crystal fiber amplifier can match the multi-mode pump beam with the signal beam propagating in free space, which can obtain higher amplification efficiency and better beam quality than the traditional crystal rods. Excellent thermal management performance also enables the structure to achieve hundred-watt level ultra-short pulse output with good optical parameters. The hybrid fiber-single crystal fiber ultrashort pulse amplification system combined the high gain property of fiber laser and high peak power property of crystal gain medium. In order to further improve the average power and pulse energy, it has been less effective by simply stretching the pulse duration in time domain and increasing the optical fiber mode area in the space domain, technologies such as coherent beam combination can obtain much higher power and larger energy.

When the output power of the laser is less than 200 W, the single crystal fiber can constitute a simple and reliable amplification setup. For higher power output, it can also be used as a stable, cost-effective seeder with good optical parameters for solid state amplifier, such as thin-disk lasers. In the future development of lasers, the research and development of fiber laser with appropriate wavelength for pump source and the continuous optimization of brightness of fiber coupled laser diode can effectively improve the amplification efficiency of ytterbium-doped single crystal fiber, and achieve a wider application in the field of ultrafast laser. The cladding structure of crystal fiber can increase the ratio of surface area to volume of single crystal fiber, by improving the heat transfer performance of cladding and the thermal management ability of fiber can realize the long distance fundamental mode waveguide, and finally realize the high power laser with higher efficiency, which is also an important direction of future development. Therefore, single crystal fiber as amplification gain medium has been widely used in ultrashort pulse amplification and has important application prospects in scientific research, national defense, industrial processing and other fields.

This paper mainly introduces the structure and preparation methods of single crystal fiber, and the main research methods and results of ultrashort pulse amplification technology based on single crystal fiber in 1  $\mu\text{m}$  waveband, including the main progress made by our research group, the prospect and development direction of single crystal fiber amplification technology are also discussed and prospected.

**Key words:** Singel crystal fiber; Ultrashort pulse; High energy; High power; Chirped pulse amplification

**OCIS Codes:** 140.3280; 140.7090; 140.3615