

单晶光纤放大器研究进展

王雅兰, 王庆*

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 单晶光纤处于光纤和晶体介质之间的特殊结构使其同时具备光纤和晶体介质的优点。单晶光纤的增益高, 热管理简单, 非线性效应对其影响小, 在超短脉冲放大中得到了广泛应用。对单晶光纤放大器在超短脉冲放大中的研究进展进行了综述。介绍了单晶光经常用的两种制备方法, 微拉伸法和激光加热基座法; 以提升单晶光纤放大器放大效率的各种方法作为主线, 分别介绍了 Nd:YAG 和 Yb:YAG 掺杂下的单晶光纤放大器以及一些具有特殊结构的新型单晶光纤放大器在超短脉冲放大中的研究进展; 对单晶光纤放大器的应用前景以及未来发展趋势进行了展望。

关键词 光纤光学; 单晶光纤; 放大器; 微拉伸法; 激光加热基座法; 超短脉冲

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.100006

Research Progress in Single-Crystal Fiber Amplifiers

Wang Yalan, Wang Qing*

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Owing to the special structure between fiber and crystal, single-crystal fiber has the merits of both fiber and crystal medium. For its advantages of high gain, simple thermal management, and small nonlinear effect, single-crystal fiber is widely used in ultrashort pulse amplification. The experimental research progress in single-crystal fiber amplifiers is reviewed. Firstly, two kinds of single-crystal fiber preparation methods including micro-pulling down technique and laser heated pedestal growth technique are introduced. Then along the principal clue of various means to improve the amplification performance of single-crystal fiber amplifiers, we summarize the research progress in Nd:YAG and Yb:YAG doped single-crystal fiber amplifiers and some new amplifiers with special structures in ultrashort pulse amplification. Finally, the applications and future development trends of single-crystal fiber amplifiers are prospected.

Key words fiber optics; single-crystal fiber; amplifier; micro-pulling down technique; laser heated pedestal growth technique; ultrashort pulse

OCIS codes 060.2280; 140.3280; 230.2285

1 引言

近些年, 工业领域和科学研究对超短脉冲激光器产品在高平均功率、高重复频率、高稳定性以及低成本等方面的要求逐渐提高。高平均功率、高重复频率、高稳定性和极窄脉冲宽度的激光器可以提高加工物品的表面质量, 使图案深度更精确, 没有凹槽、轮圈或可见的熔化损伤^[1-4], 也可以提高科学实验测量系统的信噪比。在超精细加工、高精度测距以及成像等应用中, 需要超短脉冲激光的重复频率

在千赫兹以上, 峰值功率达到兆瓦量级, 平均功率达到瓦量级, 单脉冲能量达到毫焦量级^[5]。常见的光纤和晶体放大器在多年的发展中陆续到了放大能力的瓶颈阶段。单晶光纤(SCF)兼具晶体和光纤在结构上的优点, 可以在简单紧凑的结构中得到较高的平均功率和单脉冲能量, 使得采用单晶光纤放大的技术方案得到了广泛关注。

光纤是实现高平均功率和高重复频率超短脉冲放大的一种常见增益介质, 由于其高表面体积比, 光纤具有良好的热管理能力和很高的功率输出潜力。

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-20; 录用日期: 2018-05-25

基金项目: 北京市自然科学基金(4172056)、国家自然科学基金(61405010)

* E-mail: qingwang@bit.edu.cn

Eidam 等^[6-7]报导的光纤放大器,在重复频率为 78 MHz 时得到平均功率 830 W 的飞秒脉冲,随后又在重复频率为 5 kHz 时得到能量为 2.2 mJ、峰值功率为 3.8 GW 的飞秒脉冲输出,然而光纤介质中产生的放大自发辐射(ASE)噪声以及自相位调制和自聚焦等非线性效应使功率和脉冲能量的进一步放大受到限制。在常见的双包层光纤放大器中,为得到高功率的激光输出,常用主振荡器功率放大(MOPA)技术放大高质量种子光,而随着种子光的放大 ASE 也被逐级放大,过大的 ASE 不仅限制了能量和功率的进一步放大,严重时甚至会诱发寄生振荡,损坏放大器^[8-9]。光纤的非线性效应与光纤的模场面积成反比,为了减小非线性效应带来的影响,可以增大纤芯直径,但随着纤芯直径的不断增加,输出激光的光束质量越来越差^[10]。目前常用插入滤波器 and 引入同步抽运等方法来滤除 ASE,通过引入啁啾脉冲放大技术来降低光纤放大器中的非线性效应,但是这些器件和技术的引入也使光纤放大器结构更为复杂^[11]。

激光晶体具有很高的增益,并且已经应用于很多领域。采用掺镱薄片或块状体作为增益介质的再生放大器可以将脉冲激光放大到几十毫焦,重复频率为几千赫兹^[12-13]。基于板条结构的放大器,可以在高重复频率下得到较高的平均功率。2010 年, Russbueldt 等^[14]应用 Yb:YAG 板条晶体在重复频率 20 MHz 时得到了平均功率 1.1 kW、脉宽 615 fs 的光脉冲,实验为得到高功率放大采用了 7+1 程放大结构,放大器结构相对比较复杂。用晶体进行光放大时,光斑直径比较大,存在的非线性效应较弱。在端面抽运情况下,棒状晶体由于较强的热透镜效应很难得到高功率输出,薄片、板条等形状作为增益介质虽效果较好,但放大器的结构比较复杂,对工艺要求也比较高^[15]。

SCF 可以看作长度小的大模场光纤或者细而长的晶体,既有光纤热管理简单的优点,又有晶体良好的光谱性能和热机械性能。典型 SCF 的直径小于 1 mm,长度则为几十毫米,抽运光在其中以全反射的方式传输,信号光则自由传播^[5]。这种几何形状和光传播模式使 SCF 在超短脉冲放大中有以下优点:高导热系数和高表面积与体积的比值,使散热更便利,减小了温度提升带来的增益损耗^[16];相对较短的相互作用长度和较大的信号光束直径,使非线性效应最小化;在 SCF 中抽运光的全反射引导增加了抽运光与信号光间的重叠,高增益可通过单程

放大或双程放大来实现,避免了再生放大技术的使用,使放大器结构简化,可以实现更高重复频率的脉冲输出^[5]。结构简单紧凑,成本低,稳定性强,增益高,使得单晶光纤放大器成为研究热点。

2 单晶光纤的制备

相比于当前广泛应用的玻璃光纤来说,单晶光纤的制备工艺更加复杂。制备单晶光纤的氧化物熔体黏度比玻璃形成的熔体小很多,这使小直径单晶光纤的制备比较困难^[17-18]。现在常用的制备单晶光纤的方法为微拉伸法和激光加热基座法,这两种方法建立在区熔法和浮区法的基础上,通过对拉制过程的精确控制得到表面平坦、直径浮动小的单晶光纤^[19]。

此处以 YAG 基底的单晶光纤为例介绍微拉伸法生长单晶光纤的过程。首先将 YAG 单相粉末原料仔细混合均匀后在空气中 1400 °C 下烧结 20 h,随后在坩埚中熔融,熔体对流提高了熔融物的均匀性,由射频(RF)加热系统控制坩埚内部的温度,坩埚内部过热的均匀单相融化物最后由坩埚底部的微型喷嘴喷出,通过调节射频功率和拉制速度来控制喷出融化物的凝结以进行单晶光纤制备。固/液接触面处的温度和晶体凝固温度相同,在最初生长单晶光纤时,依靠的驱动力完全是从融化物到固体物之间的重力作用,光纤晶体一经拉出立刻凝固。随着重力效果逐渐减弱,无法抵消接触面处的表面张力和毛细管效应,则需要在坩埚底部向下拉制。图 1 所示为微拉伸法制备光纤晶体的装置,图 2 为坩埚熔融区的细节放大图。研究表明拉制速度和射频功率

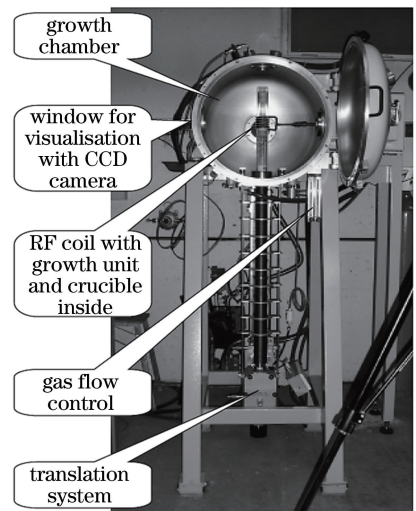


图 1 微拉伸法制备光纤晶体装置图^[20]

Fig. 1 Image of the micro-pulling-down machine used for pulling fiber crystals^[20]

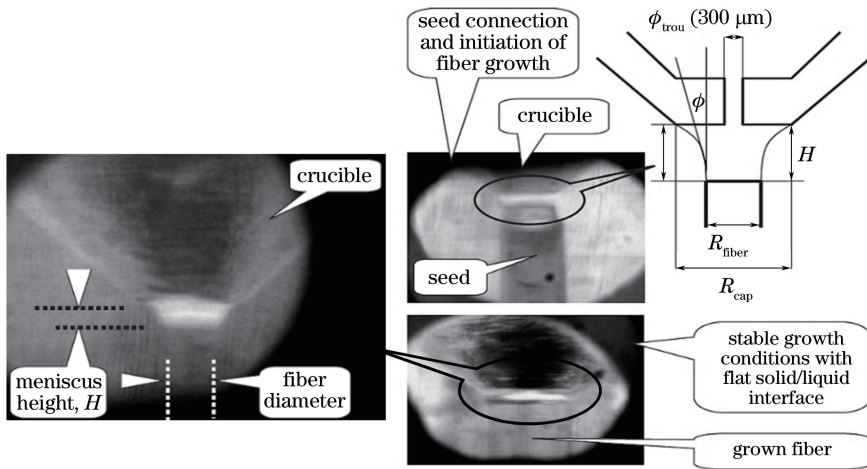


图2 通过控制半月面高度和固/液接触面位置达到稳定制备^[20]

Fig. 2 Optimization of the growth conditions by controlling the meniscus height (H) and the solid/liquid interface^[20]

是光纤晶体能够稳定生长的两个重要条件,单晶光纤的生长速度一般为 $0.2\sim 0.3$ mm/min,射频功率则依据高空间分辨率的数字高温计测量的熔融区温度来进行调整^[20]。

以掺杂浓度为 0.5% (原子数分数)的 Ho:YAG 单晶光纤为例介绍激光加热基座法(LHPG)制备单晶光纤的过程。首先使用 CO_2 激光器熔化直径 1 mm左右、Ho 离子掺杂浓度为 0.5% 的固体棒,随后通过种子棒引导光纤缓慢向上拉制,拉制速度大约为 1 mm/min。图3所示为 LHPG 的结构和熔融区示意图。由于拉制过程中熔区质量是守恒的,要拉制的单晶光纤直径可以通过控制晶纤的拉速与源棒的送速比例来决定,单晶光纤、源棒的直径与其移动速度之间的关系表达式为

$$D_f = D_s \sqrt{v_s/v_f}, \quad (1)$$

式中: D_f 为光纤直径; D_s 为源棒直径; v_s 为源棒的送速; v_f 为晶纤的拉速^[21]。为了得到优质的单晶光纤,晶纤和源棒的直径比例一般为 $1/3\sim 1/2$ 。此处生长的 Ho:YAG 单晶光纤直径为 330 μm ,晶纤直径和源棒直径之比接近 $1/3$ ^[22-23]。

空气涡流、振动、电动机运行和激光功率的变化都会使制备的单晶光纤直径发生波动,光纤直径和晶体表面的平坦度很难精确控制,因此引入标准比例-积分-微分(PID)控制器来反馈 CO_2 激光器所加电压,使激光器功率稳定在 $\pm 0.5\%$;引入激光测微计来显示熔融带的光纤直径,同时反馈信号给控制固体棒和种子棒的电机以同步控制固体棒填充和种子棒拉制的速度,目前制备的单晶光纤直径的浮动误差约为 $\pm 2\%$ ^[23]。

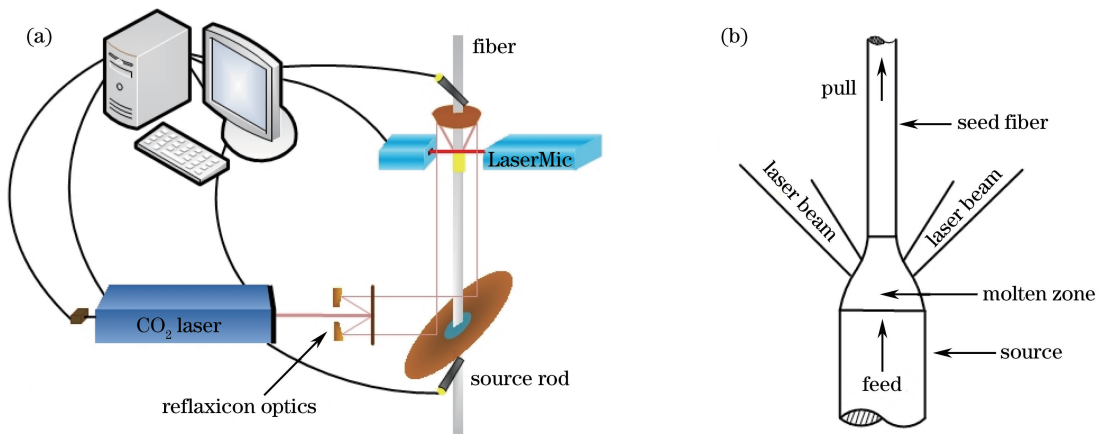


图3 (a) LHPG 的结构;(b)熔融区示意图^[23]

Fig. 3 (a) Overview of the LHPG apparatus; (b) schematic of the molten zone^[23]

3 单晶光纤放大器研究进展

3.1 Nd:YAG 单晶光纤放大器

将低掺杂的 Nd:YAG 单晶光纤应用到放大器中是获得高功率超短脉冲的有效手段。目前应用到放大器中的 Nd:YAG 单晶光纤掺杂浓度(原子数分数,下同)一般在 0.2% 左右,较低的掺杂浓度有效抑制了上转换效应和升温带来的频谱移动^[24],几倍于普通晶体的长度则弥补了低掺杂情况下的抽运光吸收效率,同时抽运光在单晶光纤内部以全反射形式传输,信号光则自由传输,较长的单晶光纤使抽运光和信号光的重叠面积大大增加,增益得到提升。单晶光纤内抽运光和信号光的传输机制如图 4 所示^[25]。与普通晶体及晶体棒相比,在高功率抽运情况下单晶光纤的增益仍能呈近似线性增长,证明了单晶光纤优异的放大能力,不同参数增益介质的放大效果如图 5 所示^[5]。

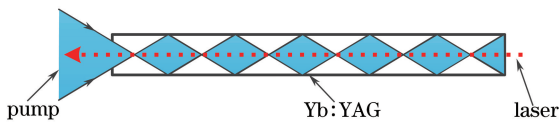


图 4 单晶光纤中的光传输机制,蓝色区域为抽运光,红线为信号光^[25]

Fig. 4 Optical transmission mechanism in SCF. Blue area is pump radiation, red line is signal laser^[25]

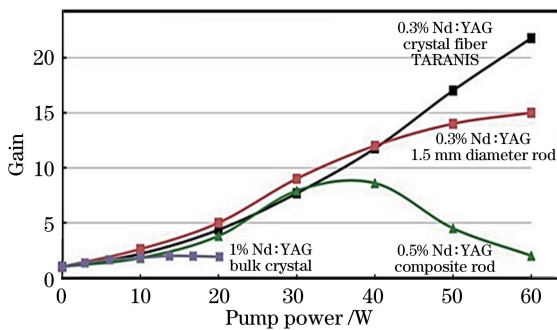


图 5 不同抽运光功率下不同晶体获得的增益^[5]

Fig. 5 Gain of different crystals under different pump powers^[5]

2010 年 Charles Fabry 光学研究所第一次提到 Nd:YAG 单晶光纤超短脉冲放大系统, Martial 等^[26]在 Nd:YAG 单晶光纤末端插入全反镜构成了简单的双程放大结构。实验用中心波长 808 nm、输出功率 60 W 的激光二极管对直径为 1 mm、长度为 50 mm、掺杂浓度为 0.25% 的 Nd:YAG 单晶光纤进行抽运,种子光的最大单脉冲能量为 18.5 μ J,注入单晶光纤中的平均功率为 360 mW,重复频率

29 kHz 时得到最大输出单脉冲能量 250 μ J、平均功率 7 W、脉宽 5.5 ns 的信号光,双程能量增益 22.5 倍,功率增益 19.4 倍,且脉宽基本没有发生变化。

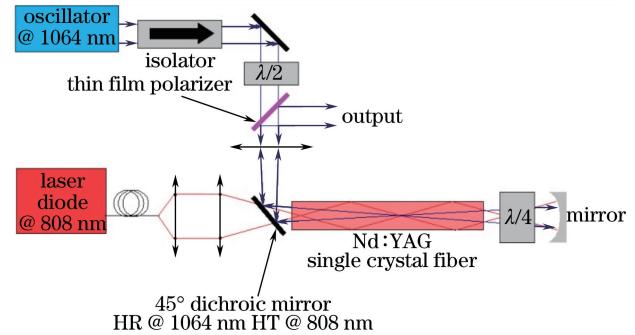


图 6 单晶光纤中被动调 Q 激光放大结构图^[26]

Fig. 6 Structure of amplification for passively Q-switched microlaser in a crystal fiber^[26]

2011 年, Charles Fabry 光学研究所在相似的双程放大结构中引入单脉冲能量更高、脉宽更窄的种子光进行光放大,放大器结构如图 7 所示。脉宽 400 ps、重复频率 1 kHz、单脉冲能量 80 μ J 的种子光在长度 50 mm、直径 1 mm、掺杂浓度 0.2% 的 Nd:YAG 单晶光纤中进行双程光放大,抽运光功率为 60 W 时得到单脉冲能量 2.5 mJ、最大峰值功率 6.3 MW 的放大光输出^[27]。随后 Charles Fabry 光学研究所继续利用图 7 所示双程放大器结构和相同晶体,引入不同种子光进行了一系列放大实验,在种子光重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 80 μ J 时先后得到双程放大能量 2.61 mJ 和 2.7 mJ;在种子光重复频率为 42 kHz、平均功率为 5 W 时得到放大光功率 20.5 W,提取效率高于 25%^[5,28]。从图 8 所示抽运光功率和输出能量的关系可以看出,随着抽运光功率升高,脉冲输出能量并没有饱和的迹象,说明在较低的 Nd 掺杂浓度下,上转换和热透镜效应等寄生效应没有对放大过程产生很大影响,更高功率的抽运光可以应用到放大器中^[27]。

2015 年, Rodin 等^[29]采用简单的双程放大结构分别研究了脉宽为纳秒级、亚纳秒级和皮秒级的种子光源下 Nd:YAG 单晶光纤放大器的放大效果。采用脉宽为 5~18 ns、重复频率为 10~100 kHz 可调、平均功率为 0~14 W 的 NL20100 作为种子光时,实现了优异的能量和功率放大,重复频率为 10 kHz 时,最大能量输出达到 3.2 mJ,重复频率为 100 kHz 时,最大平均功率达到 44 W,提取效率 28%。用脉宽为 0.7 ns、重复频率为 10 kHz、平均

功率为 2.7 W 的 MOPA29 作为种子光时,得到放大光功率 20 W,提取效率 19%。当种子光为脉宽 6 ps、重复频率 29 MHz、平均功率 1.5 mW 的 FP10

时,得到功率 110 mW 的放大光,增益达到 80 倍,放大后光脉冲的光束质量因子为 1.21~1.24,仍具有较好的光束质量。

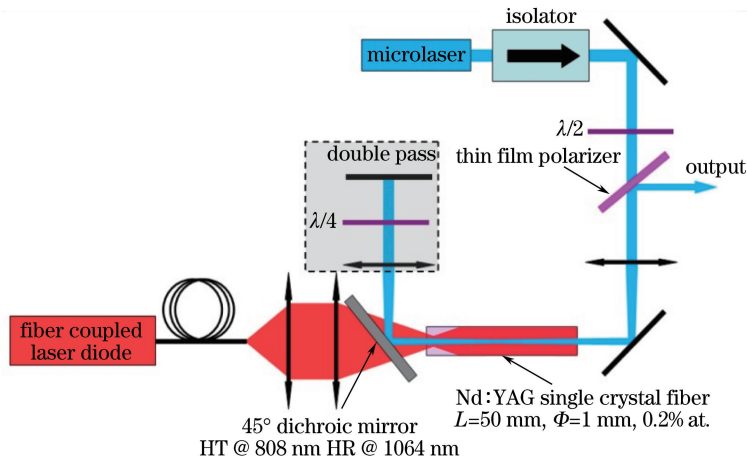


图 7 单/双程放大系统结构示意图^[28]

Fig. 7 Experimental setup for single- or double-pass configuration^[28]

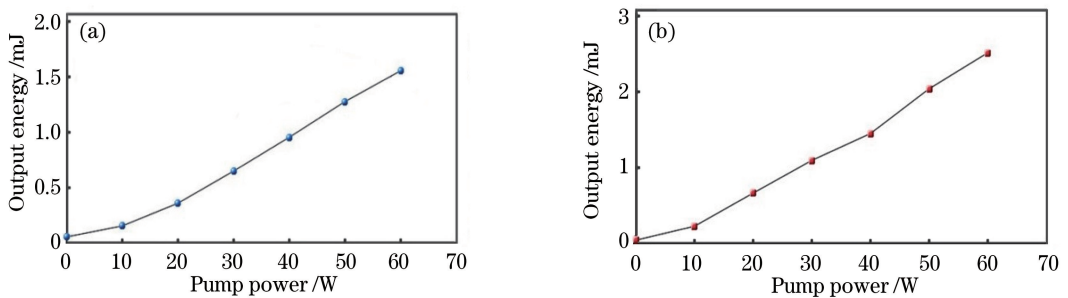


图 8 (a)单程放大时抽运光功率和输出光能量的关系;(b)双程放大时抽运光功率和输出光能量的关系^[27]

Fig. 8 (a) Output signal pulse energy versus pump power in single pass;

(b) output signal pulse energy versus pump power in double passes^[27]

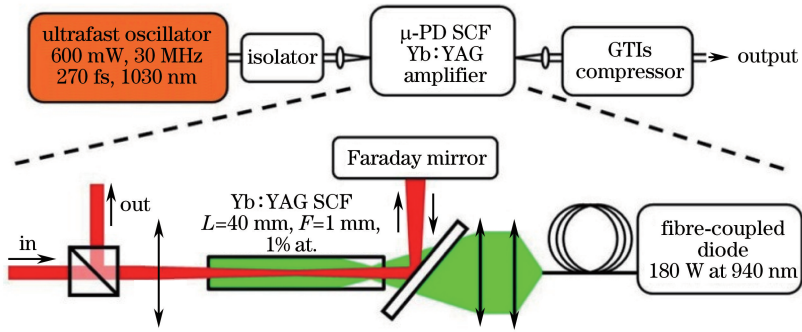
3.2 Yb:YAG 单晶光纤放大器

随着近些年微拉伸晶体制备技术的发展,制备的 Yb:YAG 单晶光纤不仅长度达到 1 m,直径达到 300 μm ,放大光也有了很好的光束质量,单晶光纤相对较大的模场面积减小了非线性效应,应用到放大器中可以直接省略啁啾脉冲放大过程,使得放大器结构更为简单紧凑^[23]。近年来,法国 Charles Fabry 光学研究所、德国耶拿大学、瑞士 JDSU 超快激光研究所、立陶宛的固体激光实验室等先后报道了以 Yb:YAG 单晶光纤为增益介质的放大器研究成果。

2011 年,法国 Charles Fabry 光学研究所 Zaouter 等^[30]首次将 Yb:YAG 单晶光纤应用于超短脉冲放大,实验结构如图 9 所示。实验采用直径 1 mm、长度 40 mm 的 Yb:YAG 单晶光纤作为增益

介质,在中心波长 940 nm、功率 180 W 的激光二极管抽运下,对平均功率 600 mW、重复频率 30 MHz、脉宽 270 fs 的种子光进行放大。实验得到了单脉冲能量 400 nJ、平均输出功率 12 W 的激光输出,出射光脉宽仅 330 fs,然而实验中光光效率仅有 7%,光束质量也相对较差。

2013 年,同研究所 Délen 等^[31]引入数值孔径为 0.15、光纤芯径仅为 105 μm 的高亮度二极管作为抽运光来提升抽运光提取效率,并对重复频率 10 kHz~10 MHz 可调、最大单脉冲能量 150 μJ 、最大平均功率 10 W 的种子光进行放大。高亮度的二极管大大提升了抽运光吸收效率,实验的光光效率达到 28.5%,斜效率随抽运光功率的提升可接近 50%,输出光的单脉冲能量在重复频率为 10 kHz 时可达 1 mJ,同时脉宽仅为 380 fs。

图9 双程 Yb:YAG 单晶光纤放大系统^[30]Fig. 9 Experimental setup of Yb:YAG single crystal fiber amplifier with double-pass configuration^[30]

上述实验中随着抽运光功率增加到最大,输出光功率都没有达到饱和的迹象,说明可以将更高的抽运功率引入单晶光纤放大器中。2013年,Piehler等^[32]将功率515 W的激光二极管引入单程放大结构中,实验结构如图10(a)所示。实验采用二极管端面抽运,利用直径1 mm、长度40 mm、0.5%掺杂浓度的Yb:YAG单晶光纤对平均功率30~40 W、光束质量因子小于1.5的种子光进行放大。如图10

(b)所示,在抽运光最大功率515 W下,种子光功率1 W时的增益为23倍,光束质量因子仅从1.1升到1.2;种子光功率40 W时,得到140 W放大功率输出。2014年,Saby等^[33]报道了相似结构的单晶光纤无啁啾放大技术皮秒激光放大器,实验用140 W抽运光对重复频率为1 MHz时单脉冲能量为40 μJ的HEGOA IR40激光器进行单程放大,重复频率超过2 MHz时,输出的平均功率总是大于100 W。

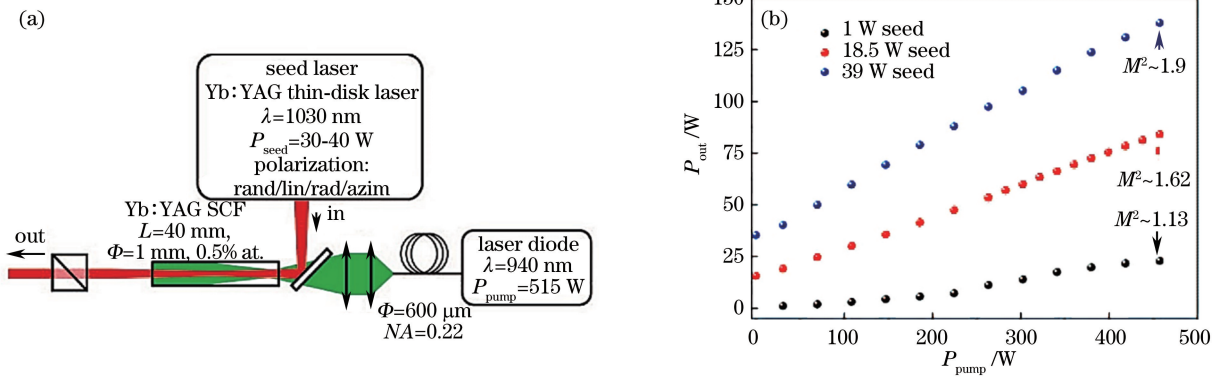
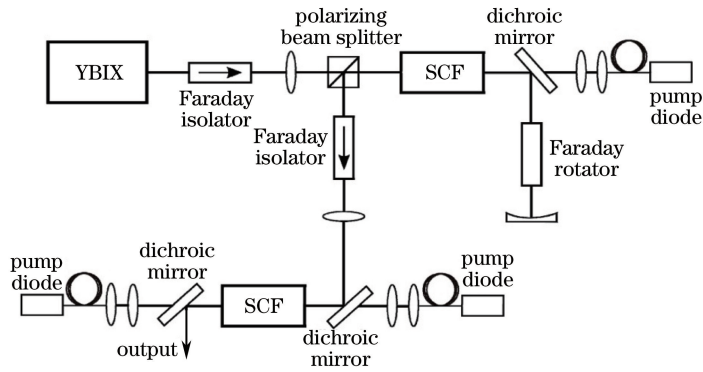
图10 (a)高功率二极管抽运单程放大结构;(b)不同种子光功率下抽运光和输出光功率的关系^[32]

Fig. 10 (a) Structure of high power diode single-pass amplification;

(b) output power versus pump power at different seed powers^[32]

在高功率抽运情况下,输出的信号光功率依然没有达到饱和,但对晶体进行单端抽运时,过高功率的抽运光容易对晶体端面造成损伤。与单端抽运相比,双端抽运使抽运光从增益介质的两个端面同时抽运,进入介质的抽运光功率分布比较均匀,使增益离子对抽运功率的吸收更加充分,能够有效提升放大器的光光效率和斜效率,同时明显减小增益介质的温升和温度梯度从而减轻端面损伤^[34-35]。2015年,Markovic等^[36]首次将双端抽运结构引入单晶光纤放大器中,实验结构如图11所示。先由中心波长940 nm、功率140 W的抽运光抽运增益晶体,经过

双程放大的信号光通过选偏器和法拉第旋转器后入射到第二根单晶光纤中进行第三程放大,在第二根单晶光纤处分别由功率为140 W和200 W的抽运光进行双端抽运。种子光功率为1.8 mW时得到了3 W激光输出,增益近2000倍,这是目前为止实现的最高增益倍率,当实验总抽运功率为300 W时,三程放大后输出光的功率为160 W,提取效率高达42%。2016年,Rodin等^[37]也对Yb:YAG单晶光纤进行了双端抽运,得到了0.42 mJ的能量输出和最大30 W的平均功率输出,输出光的光束质量因子仅为1.13。

图 11 双端抽运放大器结构^[36]Fig. 11 Structure of the dual-end pumped amplifier^[36]

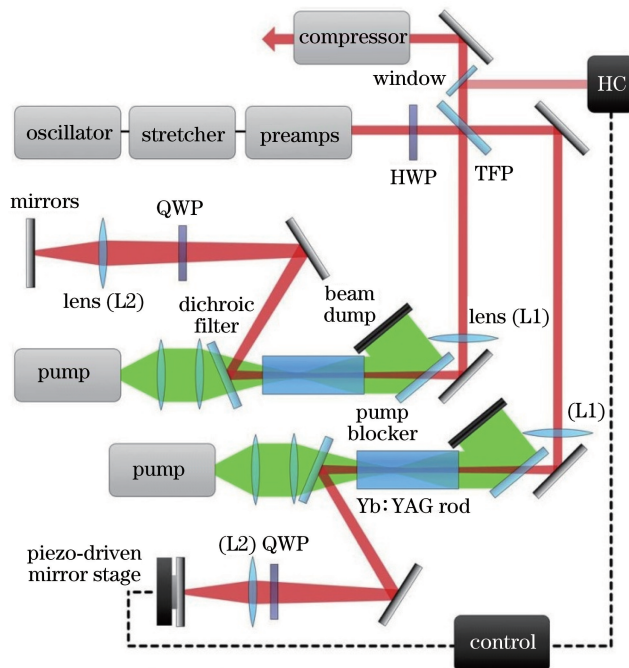
3.3 采用 SCF 的新型激光放大器

超高峰值功率和能量的放大,对放大器中晶体等器件的热损伤阈值提出了很高的要求。为得到更好的放大效果,需要在放大器中引入能够在放大过程中控制峰值功率和能量的放大结构,相干合束和脉冲分离放大就是突破激光放大系统固有限制很好的方法。

在相干合束过程中,放大光被分散到 N 个光束中,并在 N 个空间分开的通道中被分别放大,随后这些光束被叠加在一起输出,理想情况下输出光束的功率和能量均能放大 N 倍。光纤具有效率高、结构紧凑、允许直接应用于空间多路波分复用等优点,是一种很适合用于相干光束耦合系统的增益介质,

因此可将单晶光纤应用于相干光束耦合系统^[38]。

2014年,德国耶拿大学 Kienel 等^[39]提出了基于 Yb:YAG 单晶光纤的相干光束放大方法,实验结构如图 12 所示。振荡器输出光通过展宽器将脉宽展宽到 2 ns,随后进入双通道中分别进行放大,相干系统通过控制压电陶瓷来精确控制两个通道间的光程差,合束后的放大光经过光栅压缩器压缩后输出。实验用直径 1 mm、长度 40 mm、1% 的 Yb:YAG 单晶光纤作为增益介质,在种子光平均功率 6 W、重复频率 6 kHz 时,输出信号光的平均功率为 18 W,峰值功率为 3.7 GW,脉宽为 695 fs,单脉冲能量达到 3 mJ,相干光的合束效率达到了 94%。

图 12 相干光束耦合放大结构^[39]Fig. 12 Structure of the amplifier with coherent beam combination^[39]

脉冲分离放大(DPA)是一种在大于初始脉冲宽度的时间间隔内重新分配脉冲能量以减小峰值功率的方法,初始脉冲被分成 N 个在时间上被附加了不同延迟的脉冲, N 个脉冲被分别放大,然后重新组合最终产生一个强脉冲。DPA 能够减少或避免短波脉冲放大的非线性效应,脉冲之间的时间延迟可达几皮秒,是提升放大器损伤阈值并进一步放大短波脉冲很好的方法^[40]。2016年,Pouysegur等^[41]首次将脉冲分离放大技术引入单晶光纤放大器中,实验结构如图13所示。图中上部虚线包围部分为脉冲分离放大系统,它将光脉冲平均分为 p 光和 s

光两束,并对其中一束引入一段光程差从而将两束光在时间上分开以先后进行双程放大,在全反镜(HR3)之前放入法拉第旋转片,使得双程光之间偏振态旋转 90° ,随后放大光又一次入射到 DPA 中,补偿了两束光之间的光程差,两束光合束后经压缩输出。实验中的 SCF 直径 1 mm,长 15 mm,掺杂浓度 3%,且镀有对抽运光和信号光的全透膜,在抽运光功率为 170 W 时,不同重复频率下的能量放大如图 14 所示。脉冲分离放大技术的应用将镀膜晶体的损伤阈值提升至原来的 $\sqrt{2}$ 倍,从 2.9 mJ 提升至 4.1 mJ。

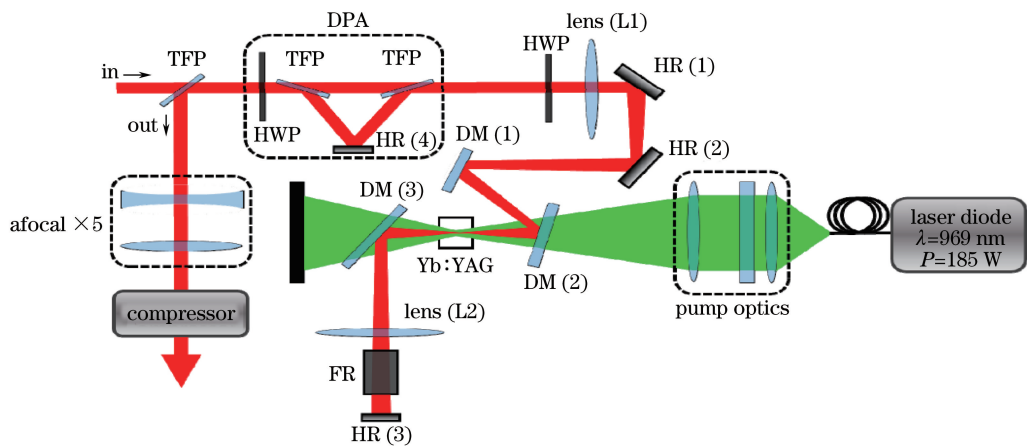


图 13 脉冲分离放大器结构图^[41]

Fig. 13 Structure of the amplifier using divided-pulse amplification technique^[41]

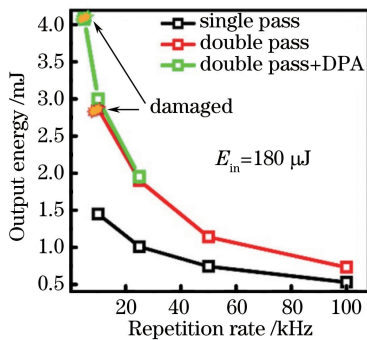


图 14 抽运功率为 170 W 时不同重复频率下的输出能量^[41]

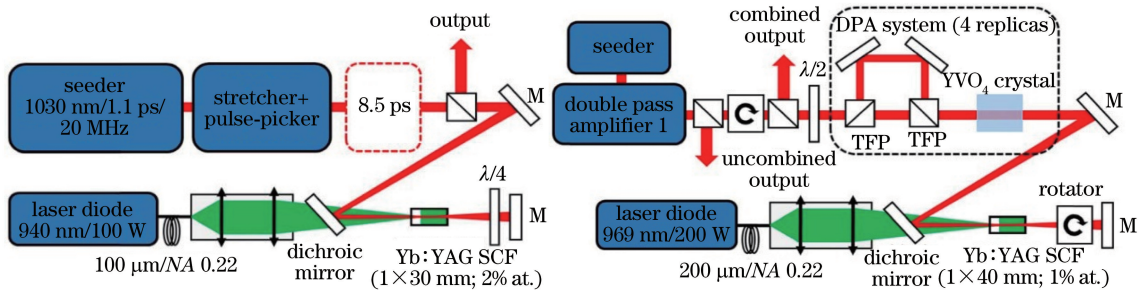
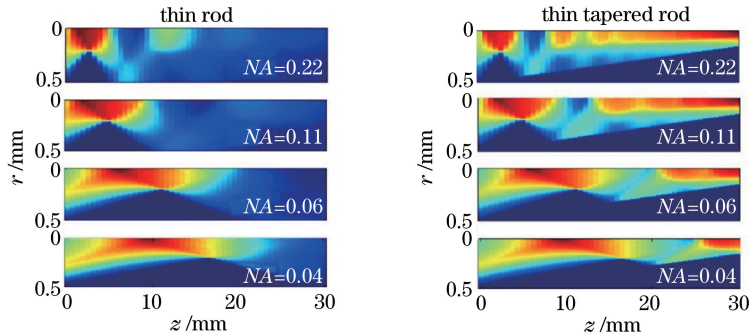
Fig. 14 Output energy versus repetition rate at the pump power of 170 W^[41]

同年,Lesparre等^[42]在二级放大结构中引入了脉冲分离放大技术,实验结构如图15所示。初始脉冲在重复频率 12.5 kHz~2 MHz 时平均功率仅为 78 MW~400 μ W,脉宽为 8.5 ps,在一级放大中得到了 32 dB 的超高增益,在二级放大中,重复频率为 12.5 kHz 时得到平均功率 25 W、单脉冲能量 2 mJ、峰值功率 320 MW 的放大光输出,重复频率为 500 kHz 时平均功率达到 55 W。

为了进一步提高单晶光纤的放大能力,Kuznetsov等^[25]进一步优化了单晶光纤的结构,提出了薄锥形单晶光纤结构。薄锥型单晶光纤一端直径仍为 1 mm,直径均匀减小,到另一端仅为 0.3 mm 左右,薄锥形结构使抽运光在晶体中的传播距离更长,吸收效率更高,晶体中反转粒子数的分布更均匀。薄锥形棒和棒状单晶光纤在相同抽运情况下的反转粒子数分布如图 16 所示。薄锥形单晶光纤在相同抽运情况下获得的增益几乎为普通单晶光纤的两倍,而且其增益大小和抽运光数值孔径(NA)无关^[25]。目前关于薄锥形单晶光纤放大器的资料还比较少,光纤制备也相对困难,相信随着未来制备工艺的发展和进步,这种薄锥型单晶光纤在超短脉冲的放大中会得到更好的功率和能量放大效果。

4 结束语

提出单晶光纤的概念已经几十年,但是由于早期制作工艺的制约,放大光无法得到很好的光束质量,因此单晶光纤应用于超短脉冲放大中仅在近几年才出现。围绕不同掺杂离子的单晶光纤在放大器

图 15 应用脉冲分离放大技术的二级放大结构^[42]Fig. 15 Structure of two-stage amplifier with divided-pulse amplification technique^[42]图 16 不同数值孔径条件下棒状和薄锥形单晶光纤内归一化粒子反转数密度(抽运光从左向右传播)^[25]Fig. 16 Normalized population inversion density in the thin rod and the thin tapered rod pumped by the sources with different numerical apertures (pump radiation propagates from left to right)^[25]

中的应用,综述了提高放大器性能的各种方法和最新研究进展。单晶光纤既有光纤增益高、热管理简单的优点,又有非线性效应小、热力学性能良好的优点,应用于放大器时采用行波放大结构,拓宽了放大过程中脉冲重复频率的范围。单晶光纤放大器结构简单,稳定性强,成本低,已经成为超短脉冲放大的一种重要手段。目前单晶光纤放大器输出光的单脉冲能量能够达到几毫焦,平均功率能够达到100 W以上,峰值功率可达吉瓦量级,最高增益近2000倍。相信采用单晶光纤的超短脉冲激光放大器会被广泛应用于超精细激光加工、航天工业、精确测距以及科学研究等领域。

参 考 文 献

- [1] Raciukaitis G, Brikas M, Gečys P, *et al.* Use of high repetition rate and high power lasers in microfabrication: how to keep the efficiency high? [J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2009, 4(3): 186-191.
- [2] Neuenschwander B, Bucher G F, Nussbaum C, *et al.* Processing of metals and dielectric materials with ps-laser pulses: results, strategies, limitations and needs [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7584:

75840R.

- [3] Yang D D, Cai J H. Research progress of micro-nano fabrication by picosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010004. 杨冬冬,蔡京辉.皮秒激光微纳加工研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010004.
- [4] Bian X W, Chen M, Li G. Study on machining of sapphire by 355 nm nanosecond and 1064 nm picosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051404. 边晓微,陈檬,李港.355 nm纳秒和1064 nm皮秒激光加工蓝宝石研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051404.
- [5] Martial I, Balembois F, Didierjean J, *et al.* Nd:YAG single-crystal fiber as high peak power amplifier of pulses below one nanosecond [J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11667-11679.
- [6] Eidam T, Hanf S, Andersen T V, *et al.* 830 W average power femtosecond fiber CPA system [J]. *Advanced Solid*, 2010, 35(2): 94-96.
- [7] Jansen F, Stutzki F, Eidam T, *et al.* Yb-doped large pitch fiber with 105 μm mode field diameter [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, OSA, 2011: OTuC5.
- [8] Han Q, Ning J P, Zhou L, *et al.* Impact of ASE on

- high power Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(5): 541-544.
- [9] Luo Y, Wang X L, Zhang H W, *et al.* Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(23): 234206.
罗亿, 王小林, 张汉伟, 等. 光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置 [J]. *物理学报*, 2017, 23(66): 234206.
- [10] Mortensen N A. Effective area of photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2002, 10(7): 341-348.
- [11] He Y, Han Q, Ning J P, *et al.* Suppressing amplified spontaneous emission in high-power pulsed Er-Yb codoped fiber amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 1002004.
何洋, 韩群, 宁继平, 等. 高功率脉冲 Er-Yb 共掺光纤放大器中放大自发辐射的抑制方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1002004.
- [12] Okishev A V. Highly efficient room-temperature Yb:YAG ceramic laser and regenerative amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1199-1201.
- [13] Metzger T, Schwarz A, Teisset C Y, *et al.* High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb:YAG disk amplifier for optical parametric amplification [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2123-2125.
- [14] Schulz M, Riedel R, Willner A, *et al.* Yb:YAG InnoSlab amplifier: efficient high repetition rate subpicosecond pumping system for optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2456-2458.
- [15] Xu L. LD-pumped InnoSlab laser oscillators and amplifiers [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
徐浏. LD 泵浦 InnoSlab 激光振荡器和放大器研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [16] Jarman R H, Wallenberg A J, Thrash R J. Growth and fabrication of single-crystal Yb, Tm:BaY₂F₈ fibers for upconversion visible laser operation [J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1863: 106-113.
- [17] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(1): 36-39.
- [18] Hou Y C. Single-crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1988, 25(7): 23-26.
侯印春. 单晶光纤 [J]. *激光与光电子学进展*, 1988, 25(7): 23-26.
- [19] Boulon G. Combinatorial chemistry to grow single crystals and analysis of concentration quenching processes: application to Yb³⁺-doped laser crystals [M] // *Frontiers of optical spectroscopy*. Netherlands: Springer, 2005: 689-714.
- [20] 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.
- [21] Gu Y G, Shen Y X, Chen S Y, *et al.* Molten zone controlling technique of single crystal fiber by means of LHPG growth [J]. *Materials Science & Engineering*, 2001, 19(4): 20-23.
顾菊观, 沈永行, 陈曙英, 等. LHPG 法单晶光纤生长中的熔区控制技术 [J]. *材料科学与工程学报*, 2001, 19(4): 20-23.
- [22] Ye L H, Song L, Li G, *et al.* Growth and characteristics of Ce³⁺ ions-doped YAG single-crystal optical fibers for LED white light sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 169-171.
叶林华, 宋丽, 李刚, 等. LED 白光源用 Ce³⁺:YAG 单晶光纤制备与特性 [J]. *光学学报*, 2009, 29(s1): 169-171.
- [23] Li Y, Johnson E G, Nie C D, *et al.* Ho:YAG single crystal fiber: fabrication and optical characterization [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14896-14903.
- [24] Rapaport A, Zhao S Z, Xiao G H, *et al.* Temperature dependence of the 106- μ m stimulated emission cross section of neodymium in YAG and in GSGG [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(33): 7052-7057.
- [25] Kuznetsov I, Mukhin I B, Palashov O V, *et al.* Thin-tapered-rod Yb:YAG laser amplifier [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5361-5364.
- [26] Martial I, Ferguson H, Douri N, *et al.* Amplification of a passively Q-switched Nd:YAG microlaser in a crystal fiber [C] // *Advanced Solid-State Photonics*, OSA, 2010: AMB11.
- [27] Martial I, Balembos F, Didierjean J, *et al.* 2.5 mJ, sub-nanosecond pulses from single-crystal fiber amplifier in a kHz MOPA system [C] // *Advanced Solid-State Photonics*, OSA, 2011: ATuB6.
- [28] Martial I, Balembos F, Didierjean J, *et al.* High energy, high peak power (2.6 mJ/5.6 MW) or high average power (20 W) Nd:YAG single-crystal fiber amplifier in a sub-ns kHz system [C] // *Lasers and Electro-Optics Europe*, IEEE, 2011: CA7_2.
- [29] Rodin A, Aleknavicius A, Michailovas A, *et al.* Beam quality investigation in Nd:YAG crystal fiber

- amplifier pumped at > 110 W [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 934207.
- [30] Zaouter Y, Martial I, Delen X, *et al.* 12 W, 350 fs ultrashort pulses from a micro-pulling down Yb:YAG single crystal fiber amplifier [C] // Lasers and Electro-Optics Europe, IEEE, 2011: CA6_3.
- [31] 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.
- [32] Piehler S, Delen X, Didierjean J, *et al.* High power amplification in Yb:YAG single crystal fibers [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2013: CA4_4.
- [33] Saby J, Sangla D, Deslandes P, *et al.* Non-CPA high energy picosecond laser based on single-crystal fiber amplifier [C] // Advanced Solid-State Lasers, OSA, 2014: ATh2A.28.
- [34] Zhao Z G, Dong Y T, Pan S Q, *et al.* 50 W class double-end-pumped Nd:YVO₄ TEM₀₀ mode solid state laser oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 0902001.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO₄ 基模固体激光振荡器 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902001.
- [35] Wang J T, Wang D, Su H, *et al.* Influence factors on efficiency of Nd:YAG planar waveguide laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1201005.
王君涛, 汪丹, 苏华, 等. Nd:YAG 平面波导激光放大器效率的影响因素 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201005.
- [36] Markovic V, Rohrbacher A, Hofmann P, *et al.* 100 W class compact Yb:YAG single crystal fiber amplifier for femtosecond lasers without CPA [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9726: 972609.
- [37] Rodin A, Rusteika N, Slavinskis N. 30 W thin Yb:YAG rod chirped pulse amplifier with high output beam quality [J]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2016, 70(1): 257-263.
- [38] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [39] Kienel M, Muller M, Demmler S, *et al.* Coherent beam combination of Yb:YAG single-crystal rod amplifiers [J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3278-3281.
- [40] Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, *et al.* Power and energy scaling of ultrafast fiber systems using chirped and divided pulse amplification for high end applications [C] // International Quantum Electronics Conference, 2013: CTu1K.2.
- [41] Pouysegur J, Weichelt B, Guichard F, *et al.* Simple Yb:YAG femtosecond booster amplifier using divided-pulse amplification [J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9896-9904.
- [42] Lesparre F, Gomes J T, Delen 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.