

# 980 nm 掺镱光纤激光器综述

李平雪, 张月

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 980 nm 掺镱光纤激光器不仅可以抽运掺铒、掺镱光纤实现高功率激光输出, 还可通过晶体倍频获得 490 nm 波段的蓝绿光, 因此受到了广泛关注并成为研究热点。从 980 nm 掺镱光纤激光器 3 种工作模式(连续光纤振荡器、脉冲光纤振荡器和光纤放大器)出发, 对国内外相关研究成果进行综述, 简单介绍其实验进展, 并对 980 nm 光纤激光器的发展进行展望。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 掺镱光纤; 光纤放大器

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.070004

## Review of 980 nm Yb-Doped Fiber Laser

Li Pingxue, Zhang Yue

*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** 980 nm Yb-doped fiber laser can be used to pump Er-doped and Yb-doped fiber lasers to achieve high power laser output. Besides, it can be used to obtain the blue-green light at 490 nm by frequency doubling technique. As a result, it has drawn wide attention and become research hotspots. This review focuses on the related research achievements and experimental progress at home and abroad based on three operating modes (continuous fiber oscillator, pulsed fiber oscillator and fiber amplifier), and gives an outlook of the potential development of 980 nm Yb-doped fiber laser.

**Key words** lasers; fiber laser; Yb-doped fiber; fiber amplifier

**OCIS codes** 140.3510; 140.3615; 140.3280

## 1 引言

光纤激光器由于具有光束质量好、效率高、体积小、无水冷、可实现全纤化结构等优点, 在光通信、光传感、激光加工和医疗等领域有着广泛应用, 近几年来发展迅速。与其他掺杂光纤激光器相比, 掺镱光纤(YDF)激光器不存在激发态吸收、浓度淬灭效应、多声子跃迁等激发过程<sup>[1]</sup>, 发展最为迅速。由于掺镱光纤激光器输出功率高、光束质量好、效率高, 在工业加工、医疗和国防等领域具有很好的应用前景, 是目前国际上激光技术研究热点之一。随着带尾纤耦合输出高功率、高亮度多模半导体激光器的发展, 以及掺镱光纤结构设计和制造工艺的提高, 在连续激光器方面, 掺镱光纤激光器输出功率已达到千瓦量级<sup>[2]</sup>; 在脉冲激光器方面, 也已实现了超短脉冲输出。在掺镱光纤激光器中, 980 nm 波段引人关注。首先, 980 nm 光纤激光器是掺铒、掺镱光纤激光器和放大器的重要抽运源; 其次, 980 nm 波段激光通过晶体倍频可获得 480~490 nm 蓝绿光输出, 是现有半导体蓝光激光器和氩离子激光器很好的替代品, 是蓝绿光源发展的新趋势。因此, 980 nm 掺镱光纤激光器具有很高的研究价值。

**收稿日期:** 2017-02-10; **收到修改稿日期:** 2017-03-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(61675009)

**作者简介:** 李平雪(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事超短脉冲光纤激光及放大技术方面的研究。

E-mail: pxli@bjut.edu.cn

## 2 980 nm 掺镱光纤激光器面临的问题

由于掺镱光纤激光器发展迅速,应用广泛,国内外多家研究单位对其深入研究,并取得了一定的成果。与其他掺杂光纤激光器相比,掺镱光纤激光器不存在激发态吸收和浓度淬灭效应,量子转换效率高。但是,受限于掺镱光纤的能级结构,980 nm 波段激光输出较为困难。由镱离子的能级结构分布及其发射谱的两个发射峰可知,其激发存在两个不同能级的跃迁,即产生波长 980 nm 波段的三能级系统和产生 1010~1080 nm 波段范围的四能级系统,如图 1 所示。若要使掺镱光纤激光器运转在三能级系统产生 980 nm 波段激光,则需要激励大约 50% 镱离子到上能级实现粒子数反转;而四能级系统起振时,只需要抽运 5% 镱离子到上能级就可以实现激光输出,可以看出其抽运阈值要远小于 980 nm 波段抽运阈值<sup>[3]</sup>。其次,由于掺镱光纤中的镱离子在 980 nm 波段具有高发射峰和高吸收峰,所以由三能级系统产生的 980 nm 激光可作为四能级系统的抽运激光而被吸收。由此可知在掺镱光纤中要实现 980 nm 波段激光输出,需要同时抑制四能级起振和三能级重吸收。为了解决这两大问题,除了使用高功率、高亮度的抽运光源外,还需要选择合适参数的光纤,例如使用环形掺杂光纤<sup>[4]</sup>、空气外包层光纤<sup>[3,5]</sup>,以及包比大芯、长度较短的光纤,可以有效抑制杂散光发射,获得更高功率的 980 nm 光纤振荡器及放大器。

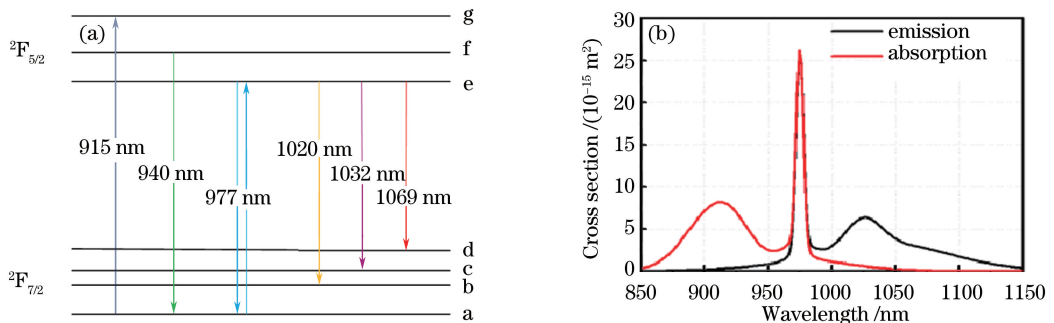


图 1 (a)石英基质中  $\text{Yb}^{3+}$  能级结构;(b)石英基质中  $\text{Yb}^{3+}$  吸收发射截面图

Fig. 1 (a) Schematic energy-level diagram of  $\text{Yb}^{3+}$  in silica; (b) absorption and emission cross sections of  $\text{Yb}^{3+}$  in silica

## 3 980 nm 掺镱光纤激光器研究进展概况

掺镱光纤在 980 nm 波段具有高发射截面,因此其在抑制四能级系统起振和三能级系统重吸收进而产生 980 nm 激光方面十分具有研究潜力。从 20 世纪 90 年代开始,国内外就有科研组对 980 nm 掺镱光纤激光器进行广泛而深入的研究,目前已有了一定的进展和突破。按照工作模式,980 nm 掺镱光纤激光器可分为以下几类:980 nm 连续光纤振荡器、980 nm 脉冲光纤振荡器和 980 nm 光纤放大器。

### 3.1 980 nm 连续光纤振荡器

对于 980 nm 掺镱光纤激光器的报道,常见的是以连续方式工作的 980 nm 光纤激光器。2000 年,Zenteno 等<sup>[6]</sup>采用功率为 1.1 W 的 946 nm Nd:YAG 固体激光器抽运单模光纤(SMF),获得最大功率为 655 mW,斜效率为 59% 的 979.8 nm 单模激光输出。该实验用两个布拉格光栅作为高反射率腔镜(BR)和输出腔镜(OC),在增益光纤和 OC 之间又引入另一个布拉格光栅(PR)来 2 次吸收抽运光,同时抑制了 1012 nm 波段的输出,从而提高了 980 nm 激光输出功率。

虽然单模光纤输出光束近衍射极限,但是由于纤芯直径特别小,一般的抽运光很难注入到纤芯中,导致抽运光吸收效率极低,所以初期的 980 nm 光纤激光器输出功率还只是毫瓦量级。后来出现双包层(DC)光纤,抽运光源也发展改用半导体激光器(LD),将抽运光耦合进入双包层光纤的内包层中,大幅度提高了激光器的输出功率。2001 年,Zenteno 等<sup>[7]</sup>采用功率为 4 W 的 915 nm 半导体激光器抽运掺镱双包层光纤,获得 978 nm 激光输出,其输出功率超过 1 W,光束质量因子  $M^2$  小于 1.2。该实验发现减小双包层光纤中的内包层直径,可有效阻止高阶模式振荡,但是更易在 1015 nm 处产生四能级系统振荡。通过分析,最终使用多分子层薄膜介质镜,以及选用长为 30 cm 的增益光纤,有效地抑制了四能级起振,最后实现斜效率大于 80% 的基模激光输出。

2003年, Ylä-Jarkko等<sup>[8]</sup>通过对光纤结构的特殊设计, 采用自行研制外包层为空气孔的JAC(jacketed air-clad)掺镱光纤(纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$ , 内包层直径为 $28\ \mu\text{m}$ , 数值孔径为0.5)作为增益介质, 2个 $915\ \text{nm}$  LD采用包层抽运方式来抽运长为 $40\ \text{cm}$ 的增益光纤, 获得斜效率为 $42\%$ , 最大输出功率为 $3.5\ \text{W}$ 的近衍射极限 $977\ \text{nm}$ 激光。当输出功率为 $1\ \text{W}$ 时, 光束质量因子仅为1.2。实验装置如图2所示。在振荡腔内插入一个双色镜, 对 $915\ \text{nm}$ 抽运光和 $977\ \text{nm}$ 处信号光高反射, 同时使 $1030\ \text{nm}$ 波段透射出振荡腔, 有效抑制了四能级振荡。插图图为JAC掺镱光纤实物图。插图为JAC掺镱光纤实物图。

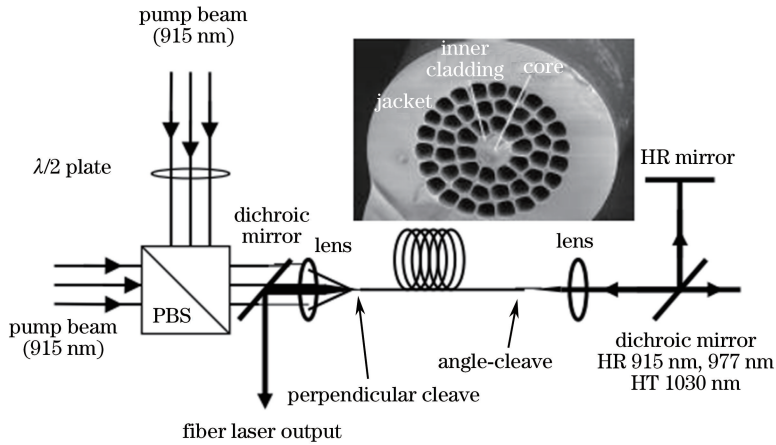


图2 JAC掺镱光纤激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the JAC Yb-doped fiber laser

2005年, Bouchier等<sup>[9]</sup>用自主研发的输出功率为 $4\ \text{W}$ 的 $914\ \text{nm}$  Nd:YVO<sub>4</sub>固体激光器来抽运单模掺镱光纤, 获得输出功率为 $2\ \text{W}$ 的 $978\ \text{nm}$ 连续激光。在分析光纤长度分别为 $30\ \text{cm}$ 、 $40\ \text{cm}$ 和 $50\ \text{cm}$ 时的光-光转换斜效率时, 得出结论: 当光纤长度太短时, 对抽运光不能充分吸收, 导致输出功率较低; 当光纤长度太长时, 放大自发辐射(ASE)开始出现。通过对比选用长度 $40\ \text{cm}$ 的增益光纤, 输出激光斜效率高达 $72\%$ 。由于得到的 $978\ \text{nm}$ 激光有 $0.02\ \text{nm}$ 的窄线宽以及 $6\ \text{nm}$ 的可调谐能力, 又利用周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体倍频得到 $83\ \text{mW}$ 的 $489\ \text{nm}$ 蓝光, 晶体转化效率为 $26\%$ 。实验装置如图3所示。实验表明, 选择合适长度的增益光纤对得到高功率 $980\ \text{nm}$ 波段激光至关重要。

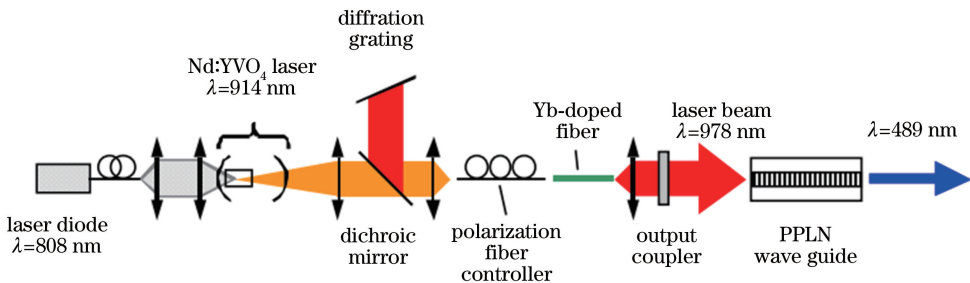


图3 红外激光器以及倍频实验图

Fig. 3 Experimental setup of the infrared laser source and its frequency doubling stage

为保证光纤激光器中更多的抽运光可以被增益光纤所吸收, 一些单位开始研制并使用超大芯径的光子晶体光纤(PCF)作为增益介质。在提高数值孔径和大模场面积的同时, 又保证了单模输出, 可承受更高功率的抽运光源, 而且也可以抑制不必要的非线性效应, 推动了高功率光纤激光器的发展。

2008年, Röser等<sup>[10]</sup>利用高功率 $915\ \text{nm}$  LD抽运长度为 $1.2\ \text{m}$ , 纤芯和内包层直径分别为 $80\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 的大模场棒状掺镱PCF, 利用大芯包比光纤提高了抽运光的吸收系数, 而短的增益光纤长度又降低了ASE增益。此外, 该实验还通过在谐振腔内加入双色镜, 进一步增加ASE的损耗。最后获得输出功率为 $94\ \text{W}$ , 光束质量因子接近衍射极限( $M^2 \approx 2.2$ )的 $980\ \text{nm}$ 连续激光。实验装置如图4所示。这是迄今为止输出功率最高的 $980\ \text{nm}$ 掺镱光纤振荡器。

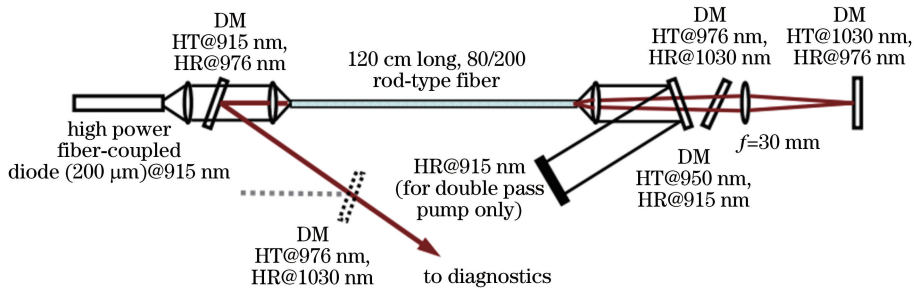


图 4 980 nm 掺镱激光器实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of 980 nm Yb-doped laser

2015年, Aleshkina等<sup>[11]</sup>报道了一台全光纤977 nm激光器,增益介质采用基于改进的化学汽相沉积(MCVD)方法制作的阶跃折射率掺镱光纤(纤芯数值孔径为0.04),实验时完全抑制光暗化效应,最终获得输出功率为5.5 W的977 nm激光,光-光转换效率为25%。这是目前为止在980 nm波段输出功率最大的全光纤单模激光器。该实验虽然通过使用自制的光纤在977 nm处得到较高输出功率,但是光谱图表明其输出光谱中含有剩余的抽运光以及ASE效应,如何抑制ASE以及剥除剩余的抽运光是其需解决的问题。

国内对980 nm掺镱光纤激光器的研究起步较晚,主要研究机构有北京工业大学、国防科学技术大学等。2008年,本课题组<sup>[12]</sup>对980 nm光纤激光器进行了理论分析和数值模拟,通过分析掺镱光纤准三能级与四能级系统增益的关系,为抑制四能级系统起振提供充足理论依据;合理设计谐振腔和光纤长度,在实验中采用自行研制、输出功率4.23 W近衍射极限光的946 nm Nd:YAG固体激光器作为抽运源,抽运一段长为28 cm的单模掺镱光纤,选用后向输出方式,最终获得最大输出功率为372 mW的980 nm单模激光,斜效率为21.2%,实验装置如图5所示。2009年,本课题组<sup>[13]</sup>又采用相同的腔结构,双端输出方式,获得了输出功率为1.32 W的980 nm单模激光,其斜效率为75.3%,激光线宽为4 nm。然后使用硼酸铋(BIBO)晶体倍频获得功率为15 mW的490.8 nm蓝光输出。这也是国内首次在980 nm波段的激光输出功率突破瓦级。由于实验中使用单模掺镱光纤作为增益光纤,且该系统空间结构光传播系数较低,所以对实验输出功率有所限制。

2011年,本课题组<sup>[14]</sup>将抽运源由之前的固体激光器改为光纤耦合输出为30 W的915 nm LD抽运源,将增益光纤从单模掺镱光纤改为内包层直径分别为170 μm和200 μm的掺镱光子晶体光纤,其对915 nm波段的吸收系数为4.5 dB/m和3 dB/m。但是由于采用空间耦合方式,耦合效率比较低,最终获得的980 nm激光输出功率分别为1.24 W和1.1 W,斜效率分别为7.8%和6.8%。该实验装置如图6所示。

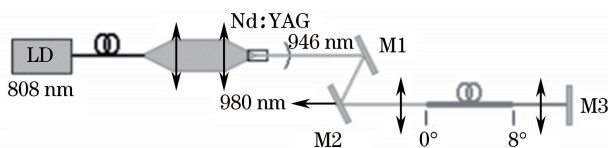


图 5 980 nm 掺镱单模光纤激光器原理图

Fig. 5 Experimental setup of the 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser

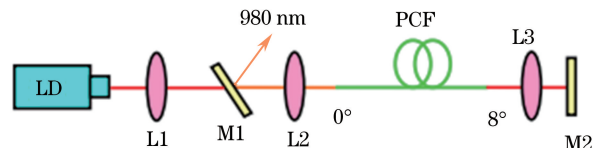


图 6 980 nm 光子晶体光纤激光器实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of photonic crystal fiber laser at 980 nm

2013年, Wang等<sup>[15]</sup>报道了一台连续980 nm掺镱全光纤激光器。实验采用功率为24.5 W的915 nm LD抽运双包层掺镱光纤(纤芯直径为15 μm,内包层直径为130 μm)。尽管整个系统实现了全纤化结构,但由于增益光纤的纤芯与包层直径比值较小,限制了输出激光功率,最终只获得1.73 W的977.4 nm连续激光输出,光-光转换效率仅为7%。如果将增益光纤的芯包比值提高至20%,则光-光转换效率将超过50%,实验装置如图7所示。图中FBG为光纤布拉格光栅。

高功率抽运激光器以及大芯包比的增益光纤有利于获得980 nm激光输出。2015年,中国工程物理研究院<sup>[16]</sup>在实验中使用双包层掺镱光纤(纤芯直径为20 μm,包层直径为130 μm)作为增益介质,2个FBG作为谐振腔的腔镜,OC作为耦合输出端,腔外在OC之后熔接一段双包层掺镱光纤(纤芯直径为60 μm,包层直径为130 μm),实验装置如图8所示。当抽运功率为51.6 W时,获得最大输出功率为16.7 W的981.7 nm

激光,光-光转换效率为 32.4%。当实验用 20/130  $\mu\text{m}$  掺镱光纤代替 60/130  $\mu\text{m}$  光纤后,并没有再次出现 980 nm 激光,而是在 1030 nm 处出现放大自发辐射光,表明通过增加芯包比可以有效地抑制 ASE,确保 980 nm 激光正常运转。

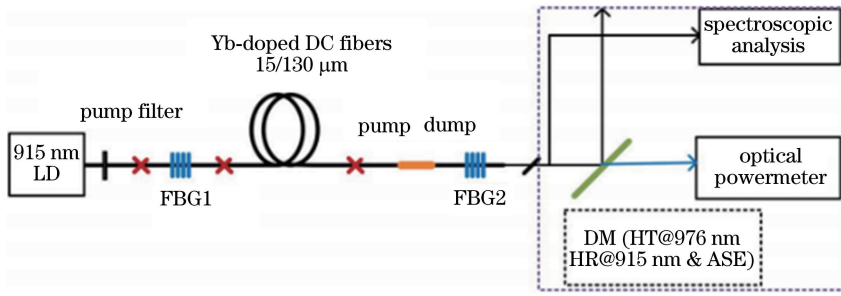


图 7 980 nm 掺镱全光纤激光器实验图

Fig. 7 Experimental setup of 980 nm Yb-doped all-fiber laser

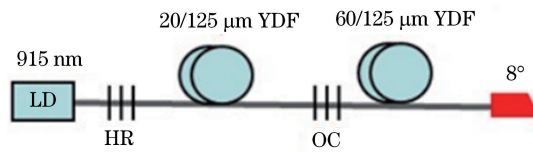


图 8 980 nm 光纤激光器实验装置图

Fig. 8 Experimental setup of 980 nm fiber laser

通过上述工作可知,在掺镱光纤中,通过选择合适长度、合适芯包比的增益光纤可有效地抑制四能级系统起振,保证三能级系统正常运转。而且随着光纤耦合输出的抽运激光器、光纤光栅、带通滤波器等实验器件的出现,使 980 nm 光纤激光器结构实现了全纤化结构,耦合形式从空间变成了光纤熔接,提高了抽运光的吸收效率,降低了耦合损耗,也可以更好地抑制四能级起振。但是国内在连续 980 nm 光纤振荡器方面所获输出功率较低,提高输出激光功率是 980 nm 光纤振荡器发展中需要解决的难题。

### 3.2 980 nm 脉冲光纤振荡器

与连续光纤激光器相比,脉冲光纤激光器能将振荡腔内存储的能量在短时间内释放出来,峰值功率与连续激光相比,提高几个数量级,更能满足在生物成像、高速光纤通信、微机械加工等领域的应用需求。调 Q 和锁模是获得 980 nm 脉冲激光两种最常用的技术。调 Q 技术也叫作 Q 开关技术,是一种获得高功率、窄脉宽激光脉冲的技术,通常可以将脉冲宽度压缩至纳秒量级,峰值功率可达到  $10^6$  W 以上。锁模作为一种新的压缩脉宽的途径,又被称为超短脉冲技术,通常可以将激光输出脉冲的宽度压缩至皮秒甚至飞秒量级,峰值功率可达到  $10^{12}$  W 以上<sup>[17]</sup>。按照工作原理,锁模分为主动锁模、被动锁模等多种形式。近年来,采用被动锁模技术研发的光纤激光器因为价格低廉、结构紧凑等优势,性能也可以和固体激光器相媲美,在皮秒级和飞秒级光源上都得到了广泛的应用。

#### 3.2.1 掺镱光纤调 Q 振荡器

自 1986 年 Alcock 等<sup>[18]</sup>首次将调 Q 技术应用到光纤激光器以来,调 Q 光纤激光器就引起了广泛关注。国内外对 980 nm 调 Q 光纤激光器的报道比较少。2002 年, Selvas 等<sup>[19]</sup>采用声光调 Q 的方式获得了 980 nm 激光脉冲输出。实验中使用输出功率为 2.6 W 的 915 nm LD 抽运 JAC 掺镱光纤(内包层直径为 28  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.5,纤芯直径为 6.5  $\mu\text{m}$ ,数值孔径约为 0.11),最终获得 980 nm 激光脉冲输出。当脉宽为 20 ns 时,峰值功率为 100 W,单脉冲能量为 1.2  $\mu\text{J}$ ,重复频率在 0.2~0.65 MHz 之间,平均输出功率为 250 mW,实验装置如图 9 所示。

对于 980 nm 波段调 Q 光纤激光器的研究,国内起步较晚。2013 年,中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[20]</sup>使用 60 W 的 915 nm LD 作为抽运源,非保偏大模场掺镱双包层棒状 PCF(长度为 36 cm,芯径为 85  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.02,内包层直径为 200  $\mu\text{m}$ )作为增益介质,利用声光调制方法获得 978 nm 调 Q 激光器。当腔内插入格兰棱镜(GTP)时,可以获得输出功率为 2 W 的线偏振光;当无 GTP 时,获得 3 W 的随机

偏振光。通过控制 Q 开关,可以获得稳定 978 nm 脉冲序列,重复频率在 10~200 kHz 之间,脉宽小于 50 ns。在基于短长度、高吸收系数棒状 PCF 下,最终获得脉宽为 9 ns,单脉冲能量为 120  $\mu$ J,峰值功率为 130 kW,重复频率为 10 kHz 的线偏振光。实验装置如图 10 所示。该实验采用后向抽运方式改变增益光纤反转粒子数分布,以提高 978 nm 增益,抑制四能级系统寄生振荡。

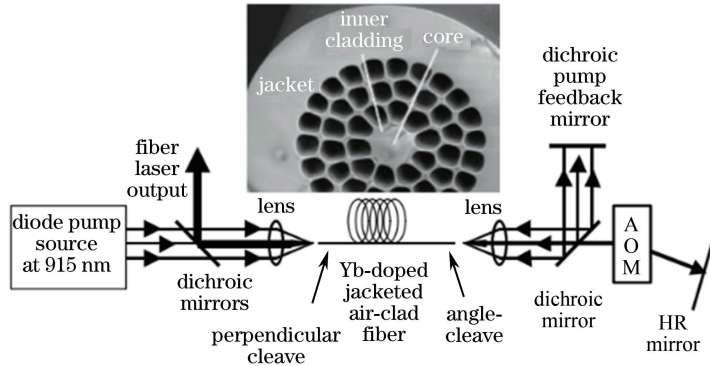


图 9 980 nm 光纤激光器实验装置图

Fig. 9 Experimental setup of 980 nm fiber laser

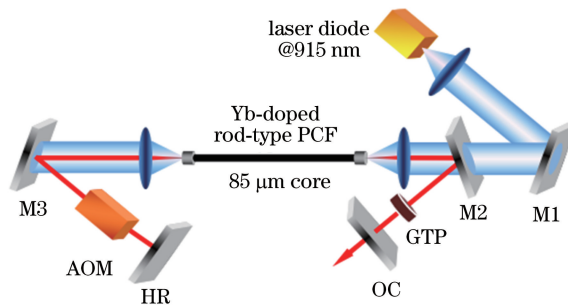


图 10 978 nm 短脉冲调 Q 光纤振荡器实验装置图

Fig. 10 Experimental setup of the short-pulse Q-switched 978 nm laser oscillator

在石墨烯发现以后,二维新材料由于其优良的光电特性受到了重视,在激光领域也得到了深入研究,并被应用到调 Q 及锁模激光器中。2016 年,本课题组<sup>[21]</sup>报道一种基于二硫化钼( $\text{MoS}_2$ )可饱和吸收体的 980 nm 调 Q 光纤激光器。实验中抽运源采用最大输出功率为 50 W 的 915 nm LD,增益光纤使用大模场掺镱 PCF(长度为 0.78 m,模场直径为 33  $\mu$ m,有效数值孔径为 0.03,内包层直径为 170  $\mu$ m,数值孔径为 0.62),抽运光通过透镜空间耦合进入光纤,可饱和吸收体部分由  $\text{MoS}_2$  可饱和吸收体和一个对 980 nm 高反的反射镜组成,腔内还使用二向色镜 DM2(980 nm 处高透,1030 nm 处高反)来抑制 1020~1080 nm 波段的四能级系统振荡。在抽运功率分别为 24 W 和 25 W 时获得了两种调 Q 序列,最大输出功率为 127 mW,重复频率分别为 212 kHz 和 221 kHz,对应的脉冲宽度为 2.7  $\mu$ s 和 0.63  $\mu$ s,两种输出的光谱宽度为 0.8 nm,中心波长为 978 nm。不足之处是在腔内 DM3 处检测有剩余抽运光,以及由于可饱和吸收体损耗较大,导致光-光转化效率较低。这是首次在 980 nm 波段使用  $\text{MoS}_2$  实现调 Q 激光器,也为二维新材料在 980 nm 波段的应用奠定了基础。

### 3.2.2 掺镱光纤锁模振荡器

光纤激光器中形成锁模的方式很多,如在谐振腔内插入半导体饱和吸收体,或者利用光纤本身的特性,例如非线性偏振旋转(NPR)、群速度色散(GVD)等,都可以方便地实现锁模输出。2003 年,Okhotnikov 等<sup>[22]</sup>报道了一台能够实现自启动锁模的 980 nm 皮秒脉冲激光器。实验采用 220 mW 带尾纤耦合输出的 915 nm 单模 LD 作为抽运源,基于溶液掺杂技术制作的掺镱硅酸盐光纤作为增益介质,数值孔径为 0.13。在激光器中,插入一对光栅对来补偿谐振腔中的群速度色散,分别用一个高反镜(HR)和一个可饱和吸收镜 SESAM(调制深度  $\Delta R \approx 12\%$ )作为激光谐振腔腔镜。当抽运功率达到 40 mW 时实现 980 nm 锁模脉冲输出,其输出功率为 3 mW,重复频率为 30 MHz,脉冲宽度为 2.3 ps,单脉冲能量为 0.1 nJ。当抽运功率超过

50 mW 时,进入自启动锁模,脉冲宽度为 1.6 ps。在 980 nm 光纤激光器中,采用包层抽运方式容易产生 ASE。该系统表明在选择合适增益光纤长度下采用纤芯抽运方式时,只要抽运功率足够高就可以更好地保证三能级系统正常运转。

2011 年,Lhermite 等<sup>[23]</sup>报道了 500 nJ 的全正色散 976 nm 光纤振荡器,实验装置如图 11 所示。实验中使用 915 nm LD 抽运棒状掺镱光纤(纤芯直径为 80  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 200  $\mu\text{m}$ ),环形腔中插入一个 SESAM(调制深度约为 30%)。为了提供正群速度色散,插入一段无源光纤(长为 20 m,纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$ )。为了防止 ASE,使用 2 个二向色镜(M4 和 M9)。当抽运功率达到 41 W 时,腔内发生自启动锁模现象,通过优化 SESAM 的饱和阈值,获得了稳定的 976 nm 激光脉冲输出。当重复频率为 8.4 MHz 时,光纤激光器最大平均输出功率为 4.2 W,脉冲宽度为 24 ps,单脉冲能量为 500 nJ。激光脉冲的输出脉宽在腔外通过体光栅对压缩至 460 fs。

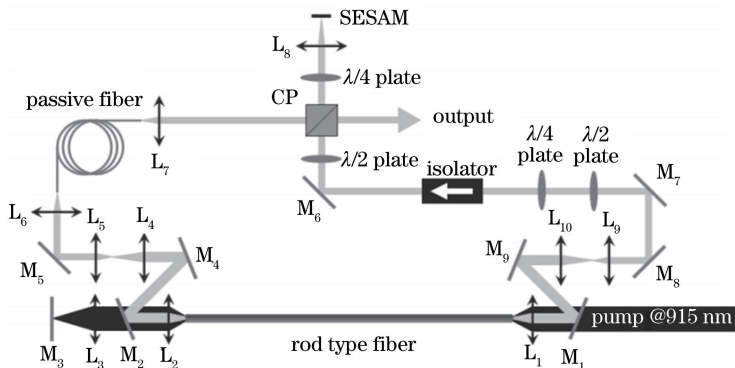


图 11 976 nm 锁模光纤激光器实验装置图

Fig. 11 Experimental setup of the 976 nm mode-locked fiber laser

上述报道的 980 nm 波段锁模光纤激光器,虽已在超短脉冲方面有一定的收获,但是系统几乎都是空间结构,耦合效率低、结构稳定性差,也限制了激光器输出指标。为了确保系统稳定运行,器件间的连接方式最好是光纤熔接。相比较之下,全光纤锁模振荡器会解决这些问题,提高系统的稳定性,更加满足实际应用需求。2014 年,本课题组<sup>[24]</sup>报道了一台 980 nm 全光纤 NPR 锁模掺镱光纤振荡器,实验装置如图 12 所示。该谐振腔采用环形腔结构,腔内所有器件均采用全光纤器件,保证了整个振荡器的全纤化结构,使结构更加稳定。为了抑制 ASE,在腔内放入 960~990 nm 的带通滤波器。抽运光源采用是 2 个相同带尾纤输出功率为 220 mW 的 915 nm LD,增益介质采用长度为 2.8 cm 高掺杂单模掺镱磷酸盐光纤(对 915 nm 吸收为 589 dB/m),耦合输出端采用 30:70 的分束器。最终获得平均输出功率 26.1 mW 的 977 nm 激光脉冲,其脉冲宽度为 159.48 ps,重复频率为 20.38 MHz,单脉冲能量为 1.28 nJ。虽然该系统为全纤化结构,可以实现稳定锁模,但是由于抽运功率较低,限制了信号光最大输出功率值。

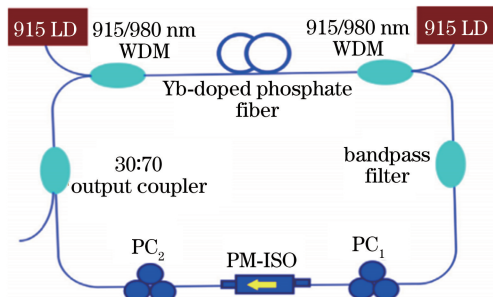


图 12 980 nm 全光纤锁模激光器

Fig. 12 980 nm all-fiber mode-locked laser

2015 年,本课题组<sup>[25]</sup>报道了 978 nm 超短脉冲光子晶体光纤振荡器,实验装置如图 13 所示。实验中采用 SESAM 和 NPR 相结合的锁模方式,其中 SESAM( $\Delta R = 35\%$ )在腔内起到稳定锁模和锁模自启动作用,采用最大输出功率为 50 W 的 915 nm LD 作为抽运源,抽运 69 cm 长的大模场双包层 PCF(模场直径约为

33  $\mu\text{m}$ , 内包层直径为 170  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.62)。当抽运功率达到 23.7 W 时, 可实现连续锁模输出。最大输出功率为 497 mW, 重复频率为 87.37 MHz, 单脉冲能量为 5.7 nJ, 脉冲宽度仅有 1.24 ps, 光谱宽度小于 2 nm, 中心波长在 977.7 nm 处。虽然 SESAM 在锁模光纤振荡器中有其独特的优势, 但是其损伤阈值低, 成本高, 制作过程复杂等, 并不适合广泛使用。近几年发现的多种新型二维新材料, 在其他波段实现了超短脉冲输出, 有望其能在 980 nm 波段有更多新的进展。

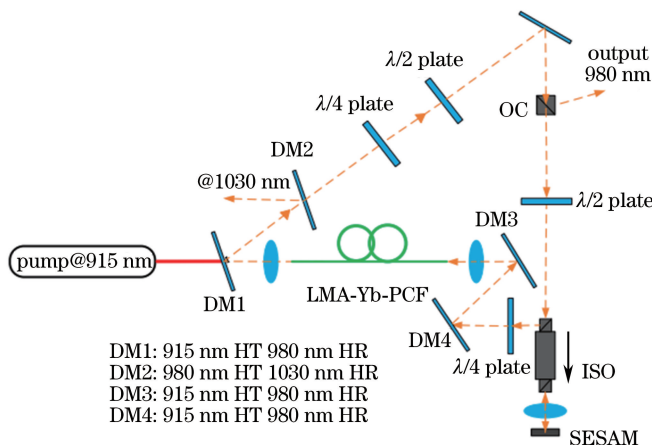


图 13 980 nm 锁模激光器实验装置图

Fig. 13 Experimental setup of 980 nm mode-locked fiber oscillator

2016 年, 北京邮电大学<sup>[26]</sup>报道了全正色散掺镱光纤振荡器。实验中使用单模 915 nm LD(最大输出功率为 225 mW)作为抽运源, 使用 22 cm 长的单包层单模掺镱光纤(YB501, Coractive 公司, 加拿大)作为增益介质, 在腔中插入了一个带宽为 4 nm 带通滤波器, 最后获得 980 nm 激光, 其最大输出功率为 43 mW, 脉冲重复频率为 44.3 MHz, 单脉冲能量为 1 nJ, 斜效率为 19%。输出脉宽在腔外经体光栅对压缩至 250 fs。实验中采取单包层单模纤芯抽运方式, 与双包层多模抽运方法相比, 其斜效率更高。实验装置如图 14 所示。

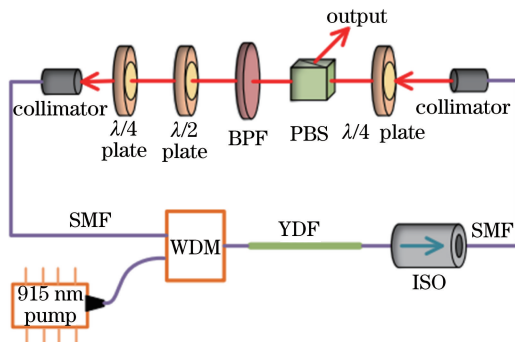


图 14 976 nm 全正色散掺镱光纤振荡器实验装置图

Fig. 14 Experimental setup of 976 nm all-normal dispersion Yb-doped fiber oscillator

### 3.3 980 nm 光纤放大器

在激光应用的某些领域中, 需要高功率、高能量的激光, 只靠激光器来实现是有一定困难的。因为提高激光器输出功率与其他指标相矛盾。尽管通过脉冲激光器可获得高峰值功率, 也未必可以满足实际应用需求。一种简单的方法是采用光纤放大器来实现高脉冲能量、高功率激光输出。光纤放大器一般是由种子光源、抽运光源、增益光纤、合束器以及隔离器等器件构成。国内外关于 980 nm 光纤放大器的报道如下所述。

#### 3.3.1 连续光纤放大器

2004 年, Soh 等<sup>[27]</sup>首次报道了 980 nm 掺镱光纤放大器。实验中为了增加抽运光的吸收系数, 采用长为 72 cm, 内包层数值孔径较大的 JAC 光纤作为增益介质, 最大输出功率为 300 mW 的 977 nm 半导体激光器作为种子光源, 915 nm 多模 LD 作为抽运光源。当种子光源注入功率为 300 mW, 抽运功率达到 11 W 时, 应用主振荡放大(MOPA)技术后获得功率为 4.3 W 的 977 nm 连续放大激光, 其线宽为 0.2 nm, 光束质量因子为 1.14。



2011年, Laroche等<sup>[28]</sup>采用输出功率为20 W的806 nm多模LD抽运W型掺钕双包层光纤, 得到输出功率为2.7 W的930 nm激光。将其作为抽运源, 种子源使用978 nm单模LD, 增益介质使用单模掺镱光纤(纤芯直径为6  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为0.15), 经过MOPA放大机制后得到输出功率为2.1 W的978 nm全光纤连续激光, 斜效率为81%。整个系统为全纤化结构, 保证了结构的稳定性, 提高了整个系统的耦合效率。但是由于其种子功率并不高, 限制了放大激光的输出功率。实验装置如图15所示。

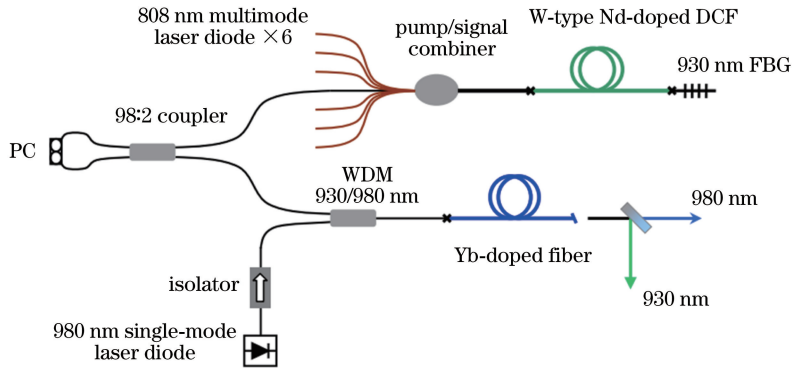


图15 980 nm MOPA 光纤激光器实验装置图

Fig. 15 Experimental setup of the 980 nm MOPA fiber laser

国内对980 nm光纤放大器也有一定的研究。2012年, 本课题组<sup>[29]</sup>报道一个大模场双包层980 nm掺镱光子晶体光纤放大器。实验中, 种子源采用先前报道自制的980 nm掺镱光子晶体光纤激光器<sup>[14]</sup>, 其输出功率为600 mW; 用最大输出为30 W的915 nm LD抽运PCF(长为40 cm, 芯径直径为40  $\mu\text{m}$ , 内包层直径为170  $\mu\text{m}$ ), 放大后的980 nm输出功率为1.21 W, 带宽为2.5 nm。通过BIBO晶体倍频后, 得到功率为51 mW的490 nm蓝绿光, 其线宽为0.61 nm, 波长调谐范围约为1 nm, 倍频效率为4.2%。

在光纤放大器中使用双包层掺镱光纤作为增益介质, 解决了传统光纤放大器的抽运功率耦合效率低的问题。2014年, Cao等<sup>[30]</sup>首次报道了980 nm全光纤掺镱双包层光纤放大器。通过使用输出功率较大的种子光源以及使用双包层掺镱光纤作为增益介质, 整个系统实现全光纤化结构, 提高了耦合效率, 最终提高了放大之后的信号光输出功率。实验装置如图16所示。采用915 nm LD作为抽运源, 功率为2 W的976.13 nm LD作为种子光, 掺镱光纤(纤芯直径为60  $\mu\text{m}$ , 内包层直径为130  $\mu\text{m}$ )作为增益光纤, 通过一个2 $\times$ 1光纤合束器将976 nm种子光和915 nm抽运光一起耦合进增益光纤内包层中。为了将信号光与剩余抽运光和ASE分离开, 在光纤后面放入2个双色镜。当抽运功率达到26.4 W时, 976.13 nm放大信号光输出功率为6.22 W, 放大器的斜效率为32%。通过分析光谱后发现, ASE不仅可以在1030 nm处产生, 也可以在980 nm处产生。因此, 在研究980 nm光纤放大器时, 也应该考虑980 nm处产生的ASE。

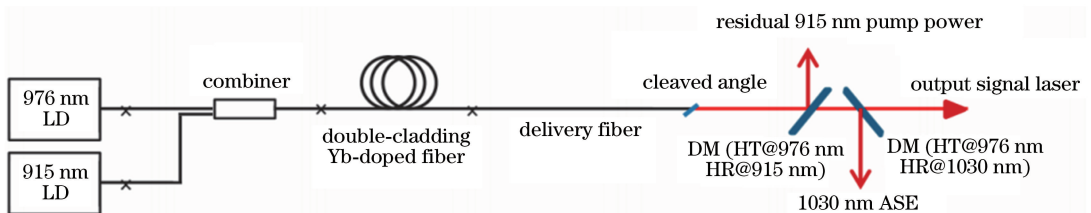


图16 980 nm全光纤放大器实验装置图

Fig. 16 Experimental setup of the 980 nm all-fiber amplifier

在连续光纤放大器中, 国内外的研究机构分别使用不同种类的增益光纤, 系统结构也从初期的空间耦合结构发展到后来的全光纤结构。虽然目前平均输出功率还达不到高功率, 但是随着种子光源和抽运光源功率的提高, 以及其他光纤器件的发展, 以后会获得更高功率的连续980 nm光纤放大器。

### 3.3.2 脉冲光纤放大器

2006年, Khitrov等<sup>[31]</sup>采用输出功率为500 mW线偏振光的977 nm LD作为种子源, 500 mW的915 nm LD作为抽运源, 采用全光纤2级放大机制, 2级增益光纤均采用只传输基横模的保偏大模场掺镱光

纤(纤芯直径为  $10\ \mu\text{m}$ , 包层直径为  $125\ \mu\text{m}$ ), 并且在 2 级放大之间插入一个保偏光纤隔离器, 防止回光对其他器件造成损害, 最终获得  $977\ \text{nm}$  线偏振激光脉冲输出, 其最大输出功率为  $110\ \text{mW}$ , 峰值功率为  $1\ \text{kW}$ , 单脉冲能量为  $15\ \mu\text{J}$ 。

2011 年, Machinet 等<sup>[32]</sup> 采用脉宽为  $2\ \text{ps}$ , 重复频率  $40\ \text{MHz}$ , 单脉冲能量  $10\ \text{nJ}$  的全正色散  $976\ \text{nm}$  被动锁模光纤振荡器作为种子源, 采用功率为  $160\ \text{W}$  的  $915\ \text{nm}$  LD 抽运棒状掺镱 PCF (长为  $1.2\ \text{m}$ , 芯径为  $80\ \mu\text{m}$ , 内包层直径为  $200\ \mu\text{m}$ ), 所获放大激光脉冲的平均输出功率为  $40\ \text{W}$ , 峰值功率为  $640\ \text{kW}$ , 单脉冲能量为  $1\ \mu\text{J}$ , 脉冲宽度为  $1.56\ \text{ps}$ 。脉冲经过一个长为  $12\ \text{mm}$  的  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  晶体倍频后, 得到平均输出功率为  $20\ \text{W}$  的  $488\ \text{nm}$  蓝光输出。实验装置如图 17 所示。

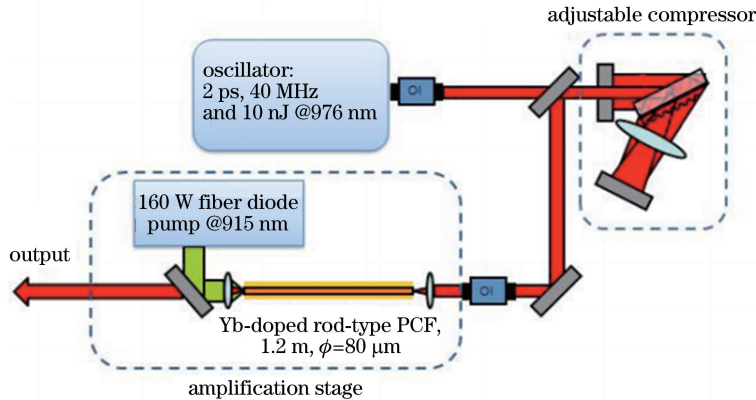


图 17 976 nm 锁模光纤激光器主振荡功率放大实验装置

Fig. 17 Experimental setup of the master oscillator power amplifier for 976 nm mode-locked fiber laser

国内对于  $980\ \text{nm}$  脉冲光纤放大器研究相对较少, 2011 年, 本课题组<sup>[33]</sup> 采用自制的调 Q  $946\ \text{nm}$  的 Nd:YAG 固体激光器作为振荡器和放大器的抽运源, 首先抽运长为  $23.5\ \text{cm}$  高掺杂单模掺镱光纤, 获得了  $980\ \text{nm}$  准连续掺镱光纤振荡器。当重复频率为  $16\ \text{kHz}$  时, 输出脉冲宽度为  $10\ \text{ns}$ , 平均功率为  $73\ \text{mW}$ , 斜效率为  $22.5\%$ , 激光线宽为  $4\ \text{nm}$ , 光谱范围为  $977\sim 981\ \text{nm}$ 。然后将其作为种子源再次放大, 所获  $980\ \text{nm}$  脉冲激光的最高功率为  $167\ \text{mW}$ , 峰值功率为  $700\ \text{W}$ , 脉冲宽度为  $15\ \text{ns}$ 。

2014 年, 本课题组<sup>[24]</sup> 报道了  $980\ \text{nm}$  全光纤掺镱光纤放大器, 实验装置如图 18 所示。种子光为自制的  $980\ \text{nm}$  全光纤 NPR 锁模掺镱光纤振荡器, 其最大输出功率为  $26.1\ \text{mW}$ , 脉宽为  $159.48\ \text{ps}$ , 重复频率为  $20.38\ \text{MHz}$ , 采用 2 级 MOPA 机制对种子光进行放大。一级功率放大中采用单模  $915\ \text{nm}$  LD 抽运长为  $60\ \text{cm}$  的单模掺镱光纤, 2 级放大中采用 2 个多模  $915\ \text{nm}$  LD 作为抽运源, 抽运掺镱双包层光纤 (纤芯直径为  $20\ \mu\text{m}$ , 包层直径为  $128\ \mu\text{m}$ ), 所获放大  $980\ \text{nm}$  脉冲激光的平均功率为  $205\ \text{mW}$ , 脉宽为  $178.10\ \text{ps}$ 。

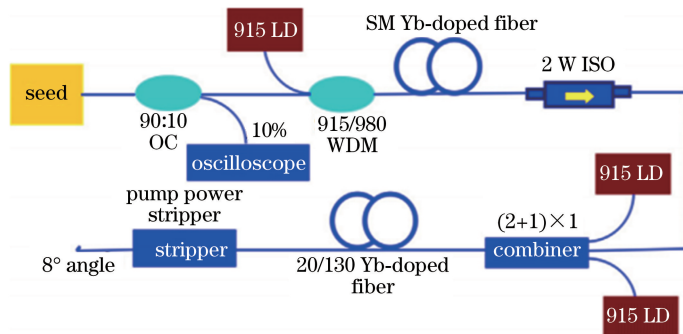


图 18 980 nm 全光纤放大器原理图

Fig. 18 Schematic of 980 nm all-fiber amplifier

2016 年, 本课题组<sup>[34]</sup> 报道了  $980\ \text{nm}$  全光纤 SESAM 锁模放大器。实验采用自制的输出功率为  $20.96\ \text{MHz}$  的  $980\ \text{nm}$  SESAM 锁模光纤振荡器为种子源。采用 2 级 MOPA 放大机制, 在一级放大中, 使用 2 个单模  $915\ \text{nm}$  LD 双端抽运单模磷酸盐光纤, 输出  $90\ \text{mW}$  激光; 二级放大采用多模  $915\ \text{nm}$  LD 抽运国产

双包层掺镱光纤(纤芯直径为  $20\ \mu\text{m}$ , 内包层直径为  $130\ \mu\text{m}$ )。为了消除 ASE, 2 级放大中都插入带通滤波器。为了避免回光对一级放大的损害, 在带通滤波器与合束器之间插入了一个 2 W 的隔离器。最后获得放大的 980 nm 激光脉冲输出, 其最大输出功率为 740 mW, 重复频率为 200 ps, 线宽为 0.29 nm。

## 4 结束语

抑制四能级起振及三能级重吸收是获得 980 nm 波段激光需解决的难题。本文从连续光纤振荡器、脉冲光纤振荡器、光纤放大器 3 种工作模式出发, 回顾了 980 nm 波段光纤激光器的研究进展, 并进行了简单的分析。980 nm 光纤激光器要走向实用化, 还面临着光纤制备工艺提高、抽运功率提升、实现全纤化结构等方面的挑战。对于 980 nm 脉冲光纤激光器, 新兴的二维新材料(拓扑绝缘体、石墨烯、 $\text{MoS}_2$  等)已经在其他波段实现稳定锁模, 希望以后也能在 980 nm 波段获得更好的成果。相信在不久的将来, 随着激光技术以及光纤制备工艺的完善, 实现高功率 980 nm 全光纤激光器会成为必然。

## 参 考 文 献

- [1] Huang Xiujiang, Liu Yongzhi, Sui Zhan, *et al.* Characteristics and design of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(12): 1531-1534.  
黄绣江, 刘永智, 隋展, 等. 掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器的特性与设计[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(12): 1531-1534.
- [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [3] Selves R, Sahu J K, Fu L B, *et al.* High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm[J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1093-1095.
- [4] Nilsson J, Minelly J D, Paschotta R, *et al.* Ring-doped cladding-pumped single-mode three-level fiber laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(5): 355-357.
- [5] Prosentsov V, Sherman E, Patlakh A, *et al.* Efficient Yb-doped air-clad fiber laser operating at 980 nm and its frequency doubling[C]. SPIE, 2003, 4974: 193-201.
- [6] Zenteno L A, Minelly J D, Dejneka M, *et al.* 0.65 W single-mode Yb-fiber laser at 980 nm pumped by 1.1 W Nd:YAG[C]. Topical Meeting on Advanced Solid State Lasers, 2000, 34: 440-443.
- [7] Zenteno L A, Minelly J D, Liu A, *et al.* 1 W single-transverse-mode Yb-doped double-clad fibre laser at 978 nm[J]. Electronics Letters, 2001, 37(13): 819-820.
- [8] Ylä-Jarkko K H, Selvas R, Soh D B S, *et al.* A 3.5 W 977 nm cladding-pumped jacketed air-clad ytterbium-doped fiber laser[C]. 2003 OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 2003, 83: 103-107.
- [9] Bouchier A, Lucas-Leclain G, Georges P. Frequency doubling of an efficient continuous wave single-mode Yb-doped fiber laser at 978 nm in a periodically-poled  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  waveguide[J]. Optics Express, 2005, 13(18): 6974-6979.
- [10] Röser F, Jauregui C, Limpert J, *et al.* 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17310-17318.
- [11] Aleshkina S S, Likhachev M E, Lipatov D S, *et al.* All-fiber single-mode laser at 977 nm with 5.5 W output power [C]. The European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015: CJ\_P\_13.
- [12] Zou Shuzhen, Li Pingxue, Li Gang, *et al.* Single-mode Yb-doped fiber laser at 980 nm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s3): 72-76.  
邹淑珍, 李平雪, 李港, 等. 980 nm 单模掺镱光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s3): 72-76.
- [13] Zou S, Li P, Wang L, *et al.* 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and its frequency-doubling with BIBO[J]. Applied Physics B-Laser and Optics, 2009, 95(4): 685-690.
- [14] Li P X, Zhang X X, Liu Z, *et al.* Large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber laser in the watt range at 980 nm[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(8): 084206.
- [15] Wang R X, Liu Y, Cao J Q, *et al.* Experimental study on the all-fiberized continuous-wave ytterbium-doped laser operating near 980 nm[J]. Applied Optics, 2013, 52(24): 5920-5924.
- [16] Wang Y S, Ke W W, Ma Y, *et al.* The design and experiment research of high brightness all-fiberized ytterbium doped laser operating near 980 nm[J]. Applied Optics and Photonics China(AOPC), 2015, 9671: 96710U.

- [17] Li Pingxue, Yang Chun, Yao Yifei, *et al.* Research process of 980 nm fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100001.  
李平雪, 杨春, 姚毅飞, 等. 980nm 光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100001.
- [18] Alcock I P, Tropper A C, Ferguson A I, *et al.* Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(2): 84-85.
- [19] Selvas R, Sahu J K, Nilsson J, *et al.* Q-switched 980 nm Yb-doped fiber laser[C]. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2002: 565-566.
- [20] He J, Du S T, Wang Z W, *et al.* Linearly-polarized short-pulse AOM Q-switched 978 nm photonic crystal fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29240-29245.
- [21] Li P X, Liang B X, Su M, *et al.* 980 nm Q-switched photonic crystal fiber laser by MoS<sub>2</sub> saturable absorber [J]. *Applied Physics B-Laser and Optics*, 2016, 122(5): 1-6.
- [22] Okhotnikov O G, Gomes L A, Xiang N, *et al.* 980 nm picosecond fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(11): 1519-1521.
- [23] Lhermite J, Machinet G, Lecaplain C, *et al.* 500 nJ mode-locked fiber laser at 976 nm[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2011: CMS1.
- [24] Li P X, Yao Y F, Chi J J, *et al.* 980 nm all-fiber NPR mode-locking Yb-doped phosphate fiber oscillator and its amplifier[J]. *Optics Communications*, 2014, 332: 187-191.
- [25] Li P X, Liang B X, Zhang M M, *et al.* 978 nm 1.24 ps ultra-short pulsed large mode area photonic crystal fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2015, 352: 19-24.
- [26] Yi S J, Zhou Y, Dai Y T, *et al.* Core-pumped all-normal-dispersion ytterbium-doped femtosecond fiber laser around 976 nm[C]. *CLEO: Science and Innovations*, 2016: JTu5A. 84.
- [27] Soh D B S, Codemard C, Sahu J K, *et al.* A 4.3 W 977 nm Ytterbium-doped jacketed-air-clad fiber amplifier [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2004: MA3.
- [28] Laroche M, Bartolacci C, Hervé G, *et al.* All-fiber Yb-doped CW and pulsed laser sources operating near 980 nm[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2011: ATuB9.
- [29] Li P X, Zhong G S, Liu Z, *et al.* 980 nm Yb-doped double-clad photonic crystal fiber amplifier and its frequency doubling[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(7): 2202-2205.
- [30] Cao J Q, Yu Y, An Y Y, *et al.* All-fiberized double-cladding Yb-doped fiber amplifier operation near 980 nm[C]. *Frontiers in Optics*, 2014: FTu5A.5.
- [31] Khitrov V, Machewirth D, Samson B, *et al.* 1 kW, 15 μJ linearly polarized fiber laser operating at 977 nm[C]. *Lasers and Applications in Science and Engineering*, 2006, 6102: 610222.
- [32] Machinet G, Lhermite J, Cormier E. 40 W picosecond fiber laser at 976 nm[C]. *Science and Innovations*, 2011: CMS2.
- [33] Li Pingxue, Zhang Xuexia, Zou Shuzhen, *et al.* A quasi-continuous-wave 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1688-1691.  
李平雪, 张雪霞, 邹淑珍, 等. 980 nm 准连续单模掺镱光纤激光器及放大器实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1688-1691.
- [34] Li P X, Yao Y F, Chi J J, *et al.* 980-nm all-fiber mode-locked Yb-doped phosphate fiber oscillator based on semiconductor saturable absorber mirror and its amplifier[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(8): 084207.