

# 980 nm 光纤激光器发展现状与展望

刘莹 曹涧秋\* 肖虎 郭少锋 司磊

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 980 nm 波段的掺镱光纤激光器因有望获得高亮度激光输出, 代替 980 nm 波段的半导体激光器成为掺铒/镱光纤激光器高亮度的抽运源而备受关注。从 980 nm 波段光纤激光器广泛使用的 4 类增益光纤——单模单包层掺镱光纤、常规双包层掺镱光纤、JAC(Jacketed air-clad)掺镱光纤以及超大纤芯掺镱光子晶体光纤出发, 对国际上各研究机构所做的工作进行了综述, 介绍了其实验进展和存在的问题。最后就 980 nm 波段光纤激光器的未来发展方向进行了探讨。

**关键词** 光纤光学; 光纤激光器; 掺镱光纤; 转换效率

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080007

## Current Status and Future Perspective of 980 nm Fiber Lasers

Liu Ying Cao Jianqiu Xiao Hu Guo Shaofeng Si Lei

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm have exhibited great potential to replace laser diodes as high-brightness pump source for erbium or ytterbium-doped fiber lasers. We review the current status of fiber lasers operating near 980 nm employing different types of gain fiber, including single-mode single-clad Yb-doped fiber, conventional double-clad Yb-doped fiber, jacketed air-clad (JAC) Yb-doped fiber and ultra-large-core Yb-doped photonic crystal fiber. Also the problems existing in 980 nm fiber lasers are mentioned. In the end we speculate the approaches for future development.

**Key words** fiber optics; fiber laser; ytterbium-doped fiber; power conversion efficiency

**OCIS codes** 060.2310; 060.3510; 140.361

## 1 引言

掺镱光纤激光器(YDFL)具有光束质量好、结构紧凑和转换效率高等优点,在工业加工领域有着广阔的应用前景。随着双包层光纤制造技术的发展和激光二极管(LD)制造工艺的提高,光纤激光器的输出功率迅速提升。目前,以 LD 作为抽运源已成功实现了千瓦级的光纤激光输出。不过,LD 的亮度有限,限制了光纤激光器功率输出的进一步提高。IPG 公司的 Shkurikin 指出,受抽运激光二极管亮度及热效应的限制,采用 LD 抽运的传统高功率掺镱光纤激光器的输出将一直限制在千瓦级水平,掺镱光纤放大器或激光器获得更高功率输出的关键之一在于使用亮度更高的抽运光源。2009 年,IPG 公司利用 1018 nm 光纤激光器抽运掺镱光纤(YDF),实现了 10 kW 的单模激光输出<sup>[1]</sup>。然而由于镱离子在 1018 nm 附近的吸收截面比其在 976 nm 附近的吸收截面<sup>[2]</sup>低 1~2 个量级,这对掺镱光纤的设计和抽运方案的选取提出了极高要求。而以 980 nm 波段(974~980 nm,以下简称 980 nm)光纤激光抽运掺镱光纤,在提高了抽运光亮度的同时又有利于掺镱光纤的吸收,有望实现千瓦级以上的激光输出。此外,980 nm 光纤激光器可通过 BIBO 晶体、KTP 晶体、LBO 晶体及周期性 MgO:LiNbO<sub>3</sub>波导等进行频率转换,获得新的激光频率输出。其中倍频产生的 480~490 nm 激光可以

收稿日期: 2012-01-05; 收到修改稿日期: 2012-03-06; 网络出版日期: 2012-05-21

作者简介: 刘莹(1988—),女,硕士研究生,主要从事 976 nm 光纤激光器方面的研究。E-mail: yinghe@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 司磊(1971—),男,研究员,主要从事高能激光光束控制方面的研究。E-mail: w\_zt@163.com

\* 通信联系人。jq\_cao@126.com

代替笨重的氩离子激光器作为蓝光源。因此,980 nm 光纤激光器具有很高的研究价值。

本文对国际上 980 nm 掺镱光纤激光器的发展现状进行综述,指出了存在的一些问题,并对 980 nm 光纤激光器的未来发展做了展望。

## 2 980 nm 光纤激光器发展现状与存在的问题

鉴于 980 nm 掺镱光纤激光器的应用优势,国内外多家研究单位对其进行了广泛而深入的研究,并获得了一定的成果。但是,取决于掺镱光纤的能级结构,980 nm 激光输出较为困难。如图 1 所示<sup>[2]</sup>,980 nm 激光输出会与属于四能级系统(1020~1100 nm)的自发辐射放大(ASE)产生增益竞争。在掺镱光纤激光器中实现 980 nm 信号光输出要求增益介质中有 50% 以上的下能级粒子数反转到上能级,而 ASE 产生仅需 5% 左右。另外,如图 2 所示,因 980 nm 处的发射截面远大于 ASE 波段处,所以在满足粒子数反转的条件时,980 nm 处的发射更占优势。因此,要实现 980 nm 激光输出,需提高增益介质抽运吸收以增加反转粒子数来抑制 ASE 自激振荡<sup>[3]</sup>。

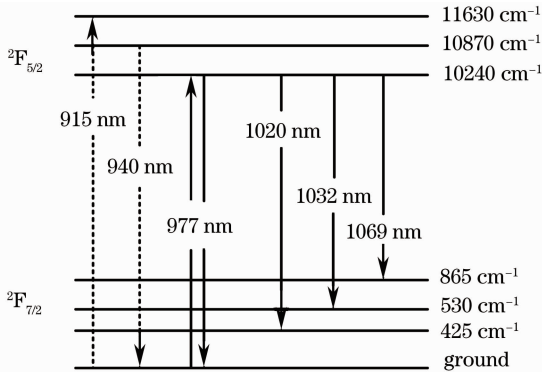


图 1 掺镱光纤能级简图

Fig. 1 Energy levels of Yb-doped fiber

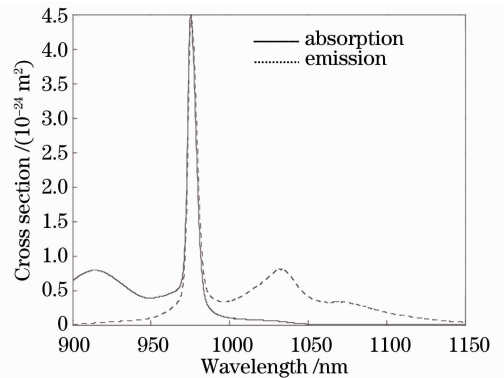


图 2 掺镱光纤的吸收发射截面图

Fig. 2 Absorption and emission cross sections of Yb-doped fiber

980 nm 光纤激光器的典型结构组成如图 3 所示。研究表明,实现 980 nm 激光输出、抑制 ASE 自激振荡的核心在于增益光纤结构与参数的合理设计。因此,将 980 nm 光纤激光器按增益光纤的不同分为以下几类:单模单包层掺镱光纤激光器、常规双包层掺镱光纤激光器、JAC(Jacketed air-clad)双包层掺镱光纤激光器(JAC YDFL)和超大纤芯光子晶体光纤激光器等。下面就这 4 类激光器分别进行介绍。

### 2.1 单模单包层掺镱光纤激光器

最早用于 980 nm 光纤激光器的增益光纤是单模单包层掺镱光纤。1990 年,南安普顿大学 Hanna 等<sup>[5]</sup>用 65 mW 的 900 nm 染料激光器正向抽运长度为 0.5 m,数值孔径(NA)为 0.16,纤芯直径为  $3.7 \mu\text{m}$  的单模掺镱光纤,得到了最高 9.3 mW,斜率效率为 67% 的 974 nm 激光输出。限于当时抽运激光器亮度较差,导致抽运光耦合效率低下。

鉴于此,2000 年,Zenteno 等<sup>[6]</sup>用 946 nm 的 Nd:YAG 激光器正向抽运单模 CS980 光纤,获得最高输出功率为 0.655 W,斜率效率为 59% 的 979.8 nm 激光输出。该研究以两个光纤布拉格光栅(FBG)作为高反射率腔镜(HR)和输出耦合腔镜(OC),提高了激光器的稳定性,降低了耦合损耗,同时,在增益光纤和 OC 之间引入抽运反射镜(PR)使抽运光二次吸收,提高了抽运光吸收效率,从而提高了激光输出功率。不足之处在于透镜耦合对抽运光的损耗较大。

980 nm 光纤激光器由于抽运亮度的限制,输出激光功率一直较低(不足 1 W)。2005 年,Bouchier 等<sup>[7]</sup>用级

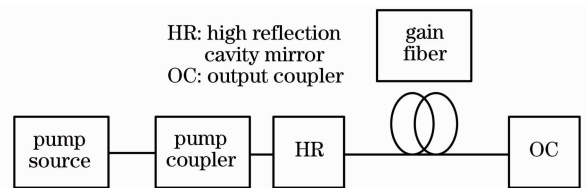


图 3 980 nm 光纤激光器典型结构图

Fig. 3 Typical scheme for 980 nm fiber lasers

联抽运输出的 4 W 914 nm 激光作为抽运源,提高了抽运光的光束质量,从而获得了接近衍射极限的 2 W 979 nm 激光输出,斜率效率为 66%。但由于空间耦合的激光器系统稳定性差,难以集成并作为抽运源使用。

2011 年, Bartolacci 等<sup>[8]</sup>以全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构成功得到了 2.1 W 的 980 nm 激光输出。该方案由全光纤级联抽运方式得到的 2.7 W 930 nm 激光,与 1 mW 单模 980 nm LD 种子源通过波分复用器耦合进入长为 19 cm,纤芯直径为 6  $\mu\text{m}$ , NA 为 0.15 的掺镱增益光纤中得到放大输出。该激光器采用了全光纤结构,提高了系统稳定性。但多级抽运波长的转换导致激光器光-光转换效率较低。

国内对 980 nm 单模单包层光纤激光器也有一定的研究。北京工业大学于 2008 年采用级联抽运方式抽运长为 36.5 cm,纤芯直径为 6  $\mu\text{m}$ , NA 为 0.11 的掺镱光纤,得到 1.32 W 的 980 nm 激光双向输出,其斜率效率为 75.3%<sup>[9,10]</sup>。之后,他们通过外腔调 Q 技术,获得脉冲间隔 10 ns,重复频率为 16 kHz 下平均输出功率 100 mW 的 980 nm 调 Q 脉冲输出。

综上所述,在单模单包层掺镱光纤激光器中,耦合进入增益光纤的抽运光全部进入纤芯,抽运填充因子约为 1,抽运光吸收效率高。同时纤芯抽运使得抽运光在纤芯中功率密度分布高,能够持续满足 980 nm 处的粒子数反转条件,使激光器的优势振荡波长保持在 980 nm 附近,从而无需损耗元件,直接可以抑制 ASE 的自激振荡。再者,单模光纤激光器可以输出光束质量接近衍射极限的激光。但是,980 nm 单模单包层光纤激光器的小芯径导致抽运耦合效率低,限制了激光输出功率水平的提高,使得迄今最高激光输出功率为 2 W 左右,这个结果显然无法满足高功率应用需求。因此,更多研究侧重于能够提高抽运注入功率的双包层增益光纤。

## 2.2 常规双包层掺镱光纤激光器

在常规双包层增益光纤中,抽运光耦合入内包层传输,抽运耦合效率高。并且,常规双包层光纤易与光纤器件匹配,适合应用于全光纤化激光器中。

早在 2001 年就已有对 980 nm 双包层掺镱光纤激光器的研究<sup>[11]</sup>,增益光纤的纤芯直径取 6~9  $\mu\text{m}$ ,内包层直径取 25~50  $\mu\text{m}$ ,得到最高输出功率为 1.2 W,斜率效率为 60%的 980 nm 激光。该研究的单模纤芯保证了激光输出的光束质量好,双包层结构提高了抽运耦合效率,大纤芯包层比提高了抽运光吸收效率。但这种增益光纤需要特殊制备,且其包层 NA 不大,导致抽运光耦合效率没有显著提高。

市面上常见的双包层光纤的纤芯包层比一般小于 0.5,抽运填充因子较小,耦合进入纤芯的功率少,抽运光在纤芯中功率密度小,抽运吸收效率差,达到 980 nm 附近粒子数反转条件困难,导致 ASE 抑制困难。若增大纤芯直径,则抽运吸收增强,ASE 抑制良好,而纤芯中存在的激光模式增多,光束质量下降。因此,以常规双包层掺镱光纤作为增益介质的 980 nm 光纤激光器的报道较少。

直到 2010 年, Lhermite 等<sup>[12]</sup>用纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$  的常规双包层掺镱光纤实现了 980 nm 锁模激光脉冲。输出脉宽为 286 fs,峰值功率为 20 kW,脉冲能量为 6 nJ。由于所用的双包层掺镱光纤增益较小,得到的脉冲能量处于纳焦耳级。

## 2.3 JAC 单模双包层掺镱光纤激光器

为了在保持激光单模输出的同时提高抽运光耦合效率,南安普顿大学引入外包层为空气孔的 JAC YDF。JAC YDF 一般为单模纤芯,内包层直径为 20~50  $\mu\text{m}$ ,外包层采用特制的空气层,折射率非常低(接近空气折射率 1),因此增大了内包层的 NA,提高了抽运耦合效率。并且,由于 JAC YDF 的纤芯包层比较大,抽运光在纤芯中功率密度高,ASE 抑制容易。

针对 JAC YDF,南安普顿大学的研究人员进行了一系列研究。K. H. Yla-Jarkko 等<sup>[13]</sup>通过增加抽运功率、优化激光器结构,于 2003 年通过反向抽运得到最高 3.5 W 的 980 nm 激光输出,其斜率效率约为 65%。实验中采用了偏振耦合方式将两束抽运光耦合进增益光纤,保持了抽运光的光束质量,增大了抽运功率;在 HR 端加入二色镜(DM),通过 ASE 波段的高透射来抑制 ASE,通过反射 915 nm 光进行抽运反馈,达到了较好的 ASE 抑制效果且提高了抽运吸收效率。但由于增益光纤很短,抽运光吸收效率低。同样,空间耦合的方式导致整个系统稳定性差。同年,R. Selvas 等<sup>[14]</sup>引入 FBG 作为 HR 和 OC,使得光路更加稳定,并得到了 1.4 W 的 977 nm 激光输出,其斜率效率为 68%。

2004 年,D. B. S. Soh 等<sup>[15]</sup>用 MOPA 结构获得 4.3 W 的 980 nm 激光输出。该实验对增益光纤进行了

环形掺杂,有效地抑制了 ASE,使放大器工作在 980 nm 附近。实验用多个 915 nm LD 通过空间耦合方式后向抽运增益光纤,977 nm 种子源采用光纤耦合方式进入增益光纤。之后,他们又用 JAC YDFL 作为种子源,得到了斜率效率为 75%,光束质量为 1.8 的 2.7 W 978 nm 激光输出<sup>[16]</sup>。

JAC YDF 的使用在提高了抽运耦合效率的同时确保了输出激光的光束质量。但是这种光纤纤芯和内包层直径均很小,无法支持更高功率的抽运光输入。此外, JAC YDF 的结构复杂,无法应用于全光纤激光器中。

## 2.4 双包层掺镱光子晶体光纤激光器

为进一步提高注入增益光纤的抽运光功率,并保证输出激光的高光束质量,超大芯径光子晶体光纤作为增益介质应用到光纤激光器中。

2008 年, Roser 等<sup>[17]</sup>用 200 W 的 915 nm LD 双向抽运(在 OC 端加入抽运反馈器件)长度为 120 cm,纤芯包层比为 80/200 ( $\mu\text{m}$ )的超大纤芯掺镱光子晶体光纤,获得最高 94 W 的 980 nm 连续激光输出,其斜率效率为 72%,光束质量因子为 2.2。此后 Bouillet 等<sup>[18]</sup>采用类似的结构,同样得到了 94 W 的 980 nm 连续激光输出,斜率效率为 48%,光束质量因子小于 1.2。这两个实验均使用二色镜作为波长选择元件,增加了 ASE 在激光腔内的损耗以抑制 ASE;使用 915 nm 高反射镜进行抽运反馈以增强抽运光吸收,提高了斜率效率。但是,光子晶体光纤结构过于复杂,抽运光空间耦合的结构使激光器稳定性差。

超大纤芯光子晶体光纤在脉冲激光器中也有重大的应用。2010 年, Bouillet 等<sup>[19]</sup>以此作为增益光纤,通过 MOPA 结构获得脉冲宽度为 12 ns, 80 kHz 时平均功率 69 W, 脉冲强度 0.75 mJ 的 977 nm 调 Q 脉冲激光输出,斜率效率为 35%。在纳秒级脉冲激光器中,这是迄今获得的最高功率输出。2011 年, Lhermite 等<sup>[20,21]</sup>通过 MOPA 结构、腔外锁模技术得到脉宽为 1.56 ps, 平均功率为 40 W, 单脉冲能量为 1  $\mu\text{J}$  的 976 nm 锁模脉冲输出;采用激光腔内锁模、腔外压缩的方式,获得了脉宽为 460 fs, 平均功率为 2.1 W, 峰值功率为 508 kW(在压缩效率为 50%时)的锁模脉冲输出。

国内对 980 nm 光子晶体光纤激光器也有一定研究。2011 年北京工业大学 P. Li 等<sup>[22]</sup>使用 16 W 915 nm 激光抽运纤芯包层比分别为 40/170 ( $\mu\text{m}$ )和 40/200 ( $\mu\text{m}$ )的光子晶体光纤,获得了 1.24 W 和 1.1 W 的 980 nm 激光输出,其光-光转换效率分别为 7.8%和 6.8%。

由于光子晶体光纤的特殊构造,它难以应用于全光纤结构。激光器整体装置需通过空间耦合的方式进行连接,虽然在技术发展的条件下,这种耦合方式效率较高,但是由于空间耦合装置体积庞大、稳定性差,对光路设置、光路调节提出了很高的要求。

## 3 结束语

980 nm 光纤激光器在应用中很有前景,但是若要投入实际应用,还有很长的路。根据其研究意义和发展状况,提出 980 nm 光纤激光器的发展要求如下:

1) 提高 980 nm 激光输出的亮度和光转换效率。迄今发展最好的是 980 nm 光子晶体光纤激光器。可以在此基础上,进一步设计光子晶体光纤的结构以控制激光输出模式并优化其纤芯尺寸及激光器的抽运方式、ASE 抑制方法,获得更高亮度、更高效率的激光输出。

2) 实现激光器整体结构的全光纤化。第一,实现全光纤结构光子晶体光纤激光器。要提高 980 nm 超大纤芯光子晶体光纤激光器系统的稳定性,可以采用全光子晶体光纤光路,设计与超大纤芯光子晶体光纤匹配的各种光纤化器件(如抽运合束器、反射腔镜等),使激光光路全光子晶体光纤化。第二,基于常规双包层光纤激光器,进行各参量的优化设计,得到高功率激光输出。常规双包层光纤最大的优点是可用于全光纤化激光器中,保证激光光路的稳定,不受外界干扰。可以预期,为获得全光纤化激光器,常规双包层光纤激光器将是一个研究热点。

综上,要实现 980 nm 光纤激光器的高亮度激光输出还有很多的工作要做,这需要理论和技术等多方面相配合。随着理论研究的深入和实验方案、实验手段的成熟与提高,980 nm 光纤激光器的研究将会有很大的发展。

## 参 考 文 献

- 1 Hagop Injeyan, Gregory D. Goodno. High-Power Laser Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2011. 523~526

- 2 P. Jelger, M. Engholm, L. Norin *et al.*. Degradation-resistant lasing at 980 nm in a Yb/Ce/Al-doped silica fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(2): 338~342
- 3 Amos Hardy, R. Oron. Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(3): 307~313
- 4 R. Andrew Motes, Richard W. Berdine. Introduction to High-Power Fiber Lasers[M]. Directed Albuquerque; Energy Professional Society, 2009
- 5 D. C. Hanna, R. M. Percival, R. Perry *et al.*. An ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010  $\mu\text{m}$  to 1.162  $\mu\text{m}$  and three-level operation at 974 nm[J]. *J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(4): 517~525
- 6 L. A. Zenteno, J. D. Minelly, M. Dejneka *et al.*. 0.65 W single-mode Yb-fiber laser at 980 nm pumped by 1.1 W Nd:YAG[C]. OSA Trends in Optics and Photonics, 2000, **34**: 440~443
- 7 A. Bouchier, G. Lucas-Leclin, P. Gorges. Frequency doubling of an efficient continuous wave single-mode Yb-doped fiber laser at 978 nm in a periodically-poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> waveguide[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6974~6979
- 8 Celia Bartolacci, Mathieu Laroche, Herve Gilles. All-fiber Yb-doped CW and pulsed laser sources operating near 980 nm [C]. OSA ASSP, 2011. ATuB9
- 9 S. Zou, P. Li, L. Wang. 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and its frequency doubling with BIBO[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(4): 685~690
- 10 P. Li, S. Zou, X. Zhang. A 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser pumped by a 946 nm Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt. & Laser Technol.* 2010, **42**(8): 1229~1232
- 11 A. S. Kurkov, O. I. Medvedkov, V. M. Paramonov. High-power Yb-doped double-clad fiber lasers for a range of 0.98~1.04  $\mu\text{m}$ [C]. OSA OAA, 2001. OWC2
- 12 J. Lhermite, G. Machinet, C. Lecaplain. High-energy femtosecond fiber laser at 976 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(20): 3459~3461
- 13 K. H. Yla-Jarkko, R. Selvas, D. B. S. Soh. A 3.5 W 977 nm cladding-pumped jacketed air-clad ytterbium-doped fiber laser[C]. OSA ASSP, 2003. PD
- 14 R. Selvas, J. K. Sahu, L. B. Fu. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1093~1095
- 15 D. B. S. Soh, C. Codemard, J. K. Sahu. A 4.3 W 977 nm ytterbium-doped jacketed-air-clad fiber amplifier[C]. OSA ASSP, 2004, MA3
- 16 D. B. S. Soh, C. Codemard, S. Wang. A 980 nm Yb-doped fiber MOPA source and its frequency doubling[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1032~1034
- 17 F. Roser, C. Jauregui, J. Limpert *et al.*. 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17310~17318
- 18 J. Bouillet, Y. Zaouter, R. Desmarchelier. Single mode fiber laser emitting 94 W at 977 nm[C]. OSA ASSP, 2009. TuA3
- 19 J. Bouillet, R. Dubrasquet, R. Bello-Doua. High average power, high energy fiber laser system; operation at 977 nm and frequency doubling at 488 nm[C]. OSA ASSP, 2010. AWA5
- 20 J. Lhermite, C. Lecaplain, G. Machinet. Mode-locked 0.5  $\mu\text{J}$  fiber laser at 976 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3819~3821
- 21 G. Machinet, J. Lhermite, E. Cormier. 40 W picosecond fiber laser at 976 nm[C]. CLEO, 2011. CMS2
- 22 P. Li, X. Zhang, Z. Liu *et al.*. Large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber laser in the watt range at 980 nm [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(8): 084206