

光纤激光同带级联抽运的研究进展

吴武明 肖虎 许将明 冷进勇 周朴 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 光纤同带级联抽运的特点是以高亮度激光作为抽运光,且抽运光与激光的波长比较接近,处于激活离子的同一能带内。它最大的优点是在光纤高功率放大时量子亏损小,可以较好地减小热效应的影响,同时能使用较短的光纤来避免非线性效应的发生。针对同带级联抽运技术在高功率光纤中的重要性,简单综述了国外掺镱、掺铒、掺铥、掺钕光纤同带级联抽运的实验研究。给出了掺镱光纤同带级联抽运的其他优点,如抑制大模场面积光纤的高阶模式增益以及减少铝硅酸盐掺镱光纤中的光子暗化影响,这些优点都有助于光纤高功率的放大。讨论了掺镱同带级联抽运技术在高功率双包层光纤激光中面临的主要问题及解决方法。

关键词 激光器;高功率光纤激光器;同带级联抽运;高阶模式增益;光子暗化

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.091402

Research Progress of Tandem-Pumped Fiber Lasers

Wu Wuming Xiao Hu Xu Jiangming Leng Jinyong Zhou Pu Guo Shaofeng

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract High-brightness in-band pumping sources are used in tandem-pumping. It makes it possible to pump close to the emission wavelength, so the quantum defect heating can be low. This allows for the use of a shorter fiber. Therefore, it is easier to avoid thermal and nonlinear limits simultaneously. In view of the important of tandem-pumping in high power fiber laser, the experimental researches of tandem-pumped over seas are introduced firstly, including Yb-doped, Er-doped, Tm-doped, Ho-doped fiber lasers. Then the advantages such as restraining unwanted excess gain for higher order modes in cladding-pumped large-core Yb-doped fiber amplifiers are presented. And the potential benefits of reducing fiber photodarkening are also analyzed. At last, the problem and techniques of the tandem-pumping in high power fiber lasers are discussed.

Key words lasers; high power fiber lasers; tandem-pumped; gain for higher order modes; photodarkening

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3615

1 引言

与传统的块状激光器相比,光纤激光器的工作介质极细长。这一几何形状的变化引起了质的变化,使光纤激光器具有一些独特的优点。特别是采用双包层结构以后,大大提高了抽运效率,使得单根双包层光纤激光器或放大器的输出功率逐步提高^[1,2]。目前采用大模场面积的双包层掺镱光纤,以振荡器方式工作,单纤连续输出功率已达 2.1 kW^[3];采用光纤放大器的方式,IPG 公司已经实现了 10 kW 的单模、50 kW 的多模连续激光输出^[4,5]。

当单根光纤激光输出功率达数千瓦,其热效应及非线性效应成为继续放大的制约因素,光纤同带级联抽运技术就应运而生了。所谓光纤同带级联抽运是指:在光纤中利用高亮度的激光作为抽运光,且抽运光的波长接近输出激光波长,两者处于激活离子的同一能带内。一些文献也定义为高亮度同带抽运或者二次抽运,其显而易见的优点是在光纤放大时量子损耗小,从而废热少。一方面可以避免高功率放大时,热效应导致的

收稿日期: 2011-02-24; 收到修改稿日期: 2011-03-14; 网络出版日期: 2011-07-28

基金项目: 国防科技预研基金(513260102)资助课题。

作者简介: 吴武明(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: treewwm@gmail.com

各种不利影响;另一方面可以用较短的光纤来散热,避免非线性效应的发生。就现有的文献报道来看,输出功率大于 3 kW 的连续光纤激光都利用了同带级联抽运技术^[6]。

针对同带级联抽运技术在高功率光纤放大中不可取代的地位,本文总结了国外光纤同带级联抽运技术的实验和理论研究进展。针对掺镱光纤是当今高功率放大的研究热点,详细分析了同带级联抽运掺镱光纤的各种优点及其面临的问题,讨论了解决这些问题的各种方法。

2 研究进展

2.1 实验进展

关于光纤激光同带级联抽运的研究较少,主要集中于实验方面。具体来总结掺镱、掺铒、掺钕、掺钐光纤同带级联抽运的情况。对于利用激光二极管(LD)同带抽运的情况,由于它不属于高亮度激光级联抽运,在这里不做总结。

2.1.1 掺镱激光

掺镱硅酸盐光纤的能级结构如图 1 所示,1000~1050 nm 范围的光源可以同带抽运放大 1064 nm 左右的激光^[7]。IPG 推出的 6 kW 和 10 kW 单模光纤激光就是利用同带级联抽运技术实现的。如图 2 所示是输出 10 kW 左右的放大器结构,种子光为 1 kW 的 1079 nm 激光被注入长 15 m 的掺镱光纤,光纤的参数为:纤芯为 30 μm ,有效模场面积为 500 μm^2 ;抽运光由功率为 300 W 的 1018 nm 光纤激光器提供,总共 45 个^[3]。值得注意的是,这种光纤的掺杂成分、吸收系数及内包层直径等重要参数没有报道,只给出了放大器工作时光纤的热负载高达 200 W/m。从这个数据可以推测:放大器工作时导致的光纤温度上升,有助于提高光纤对抽运光 1018 nm 的吸收。

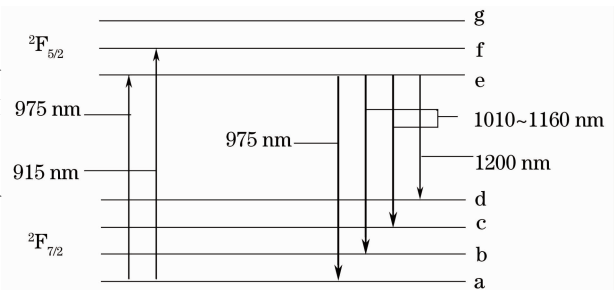


图 1 掺镱硅酸盐光纤的能级结构图

Fig. 1 Energy level diagram for Yb-doped silica

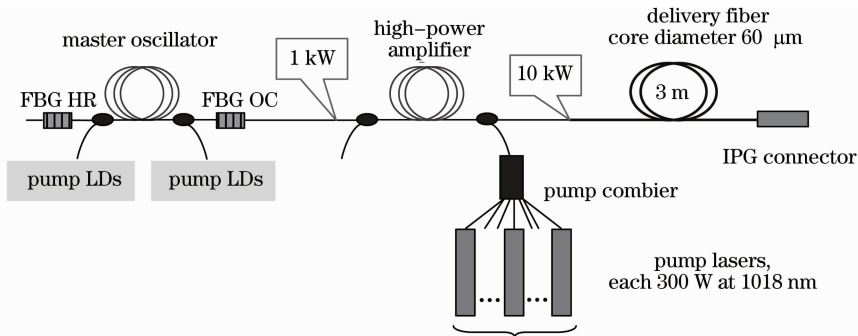


图 2 10 kW 单模光纤激光器方案

Fig. 2 Experimental arrangement for a 10 kW laser

2.1.2 掺铒激光

掺铒硅酸盐光纤的能级结构如图 3 所示,1480 nm 附近的光源可以同带抽运放大 1.5 μm 左右的激光^[8]。

2008 年,SPI 公司的 Alam 等^[9]利用铒镱共掺光纤输出的 1535 nm 激光放大后作为同带级联的抽运光源,最大功率达 50 W。放大器的种子光为经过一级放大后的 1565 nm,功率为 0.5 W;同带级联抽运放大器中的光纤参数为:纤芯直径为 12 μm ,内包层直径为 160 μm 。图 4(b)给出了如图 4(a)所示放大器的输出特性,斜效率

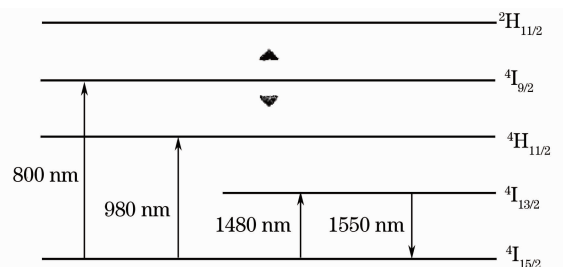


图 3 掺铒硅酸盐光纤的能级结构图

Fig. 3 Energy level diagram for Er-doped silica

仅为 34%，远远小于理论最大值 98%。所用的双包层光纤对 1565 nm 激光吸收较大，纤芯与内包层面积比较小，导致了放大器的效率很低^[9]。

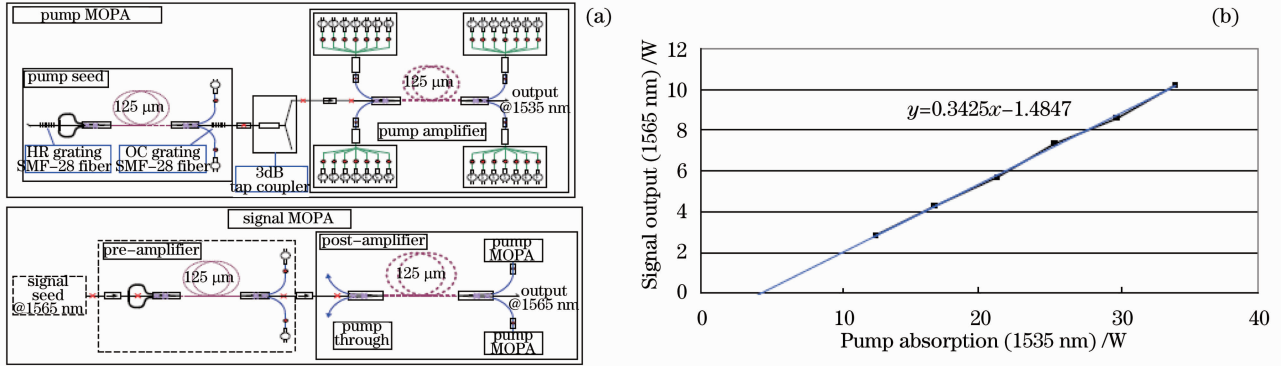


图 4 放大器结构及输出特性。(a)放大器结构;(b)输出特性

Fig. 4 Layout and efficiency of in-band pumped MOPA. (a) Configuration of MOPA; (b) efficiency of 1565 nm signal MOPA

2010 年,波士顿大学的研究小组利用拉曼激光器获得单模的 1480 nm 激光,然后用作同带级联抽运的抽运光^[10]。放大器中的种子光为频率 100 kHz、脉宽 1 ns 的 1554 nm 激光,所用的光纤为 4 m 长的大模场面积掺铒(LMA-Er)光纤、高阶模掺铒(HOM-Er)光纤,实验结构如图 5 所示^[10]。图中的模式转换器是用来把单模 LP₀₁ 的种子光及抽运光转换至高阶模 LP₀₉,这样可以导入 HOM-Er。放大器输出功率与抽运光功率关系如图 6(a)所示,由于光纤在 1554 nm 处是反常色散,所以调制不稳定是限制放大器功率的主要因素。HOM-Er 光纤的最大输出功率是 LMA-Er 光纤的 2.7 倍,放大器在三种不同输出功率时的光谱如图 6(b)所示。

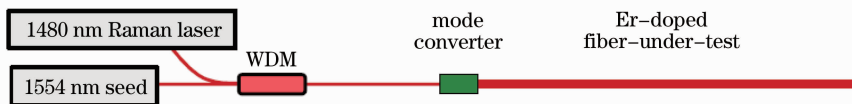


图 5 拉曼激光器抽运掺铒激光器结构图

Fig. 5 Setup of the Laman laser pumped Er³⁺-doped fiber laser

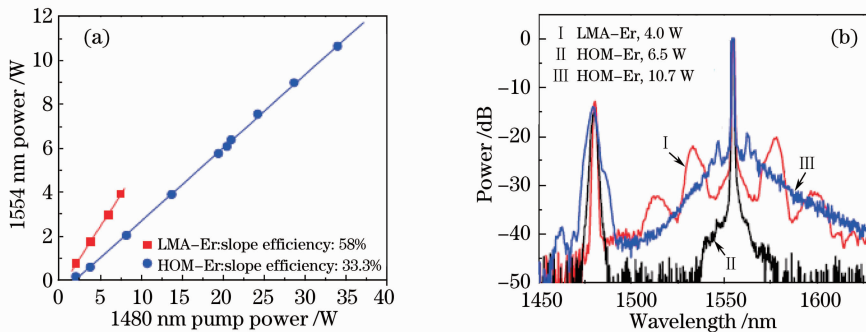


图 6 光纤放大器输出特性。(a)输出功率与抽运功率关系图;(b)最大输出功率光谱图

Fig. 6 Amplifier performance of the fiber laser. (a) 1554 nm output power versus 1480 nm pump power; (b) output spectra for maximum output power

2.1.3 掺铟激光

掺铟硅酸盐光纤的能级结构如图 7 所示,1550~1750 nm 范围的光源可用来同带抽运放大 2 μm 左右的激光^[8]。相对于传统掺铒光纤激光,掺铟光纤激光的受激布里渊散射(SBS)效应和受激拉曼散射(SRS)效应的产生阈值要高 4 倍以上,光纤端面的损伤阈值也高出近 1 个量级,是今后高功率光纤激光的发展趋势^[11]。

2008 年,南安普顿大学的 Zhang 等^[12]首先利用单模的 1565 nm 激光用作同带抽运的抽运光,其 $M^2 < 1.1$ 、线宽小于 2 nm。然后通过空间耦合的方式把得到的 1565 nm 激光分别同带级联抽运掺铟激光器及放大器。其中掺铟光纤的参数为:铟共掺的纤芯直径为 10 μm ,数值孔径(NA)为 0.17;纤芯外围是直径为 125 μm

的硅包层, 铥的掺杂质量分数为 1%; 光纤对 1565 nm 波长的吸收系数约为 100 dB/m。

实验结构图如图 8 所示, 首先由 10 W 的 1565 nm 激光抽运约 8 cm 长掺铥光纤, 得到 875 mW 的 1943 nm 线偏振激光输出。然后把得到的激光输出作为信号光, 经过预一级放大获得 3.15 W 输出, 最后经过二级放大后获得最大功率为 10 W 的单频线偏振光输出。两级放大的抽运光功率都为 20 W, 后一级放大器的输出功率随抽运功率变化如图 9(a) 所示。研究表明, 其输出功率仅仅受限于抽运功率, 只要进一步提高抽运功率, 还可以获得更大的激光输出。利用 F-P 扫描仪测量了输出光谱 (正交两个偏振态) 的线宽及经过半波片后的为单偏振态的线宽, 如图 9(b) 所示, 其单频性较好。

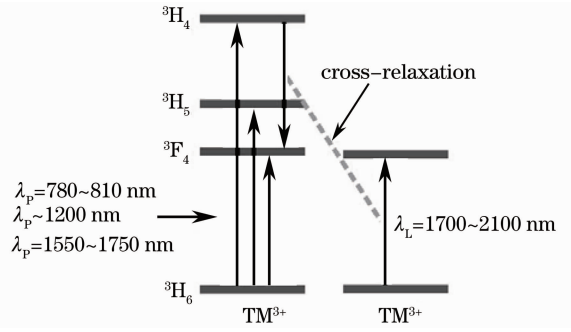


图 7 掺铥硅酸盐光纤的能级结构图
Fig. 7 Energy level diagram for Tm-doped silica

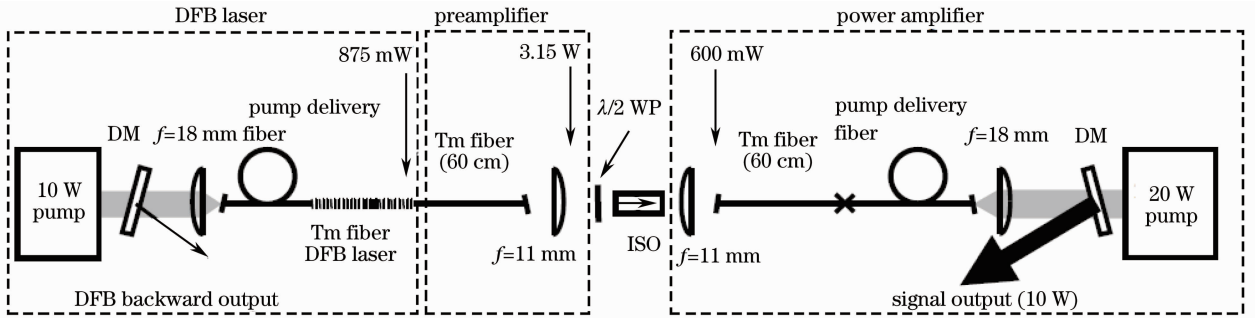


图 8 南安普顿大学的实验结构图

Fig. 8 Experimental setup of university of southampton

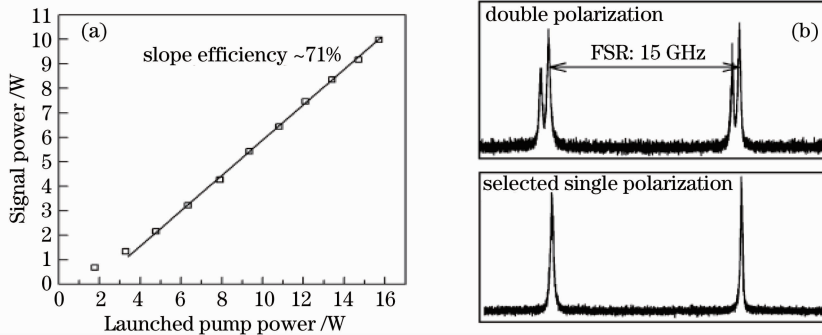


图 9 后一级放大器输出特性。(a) 输出功率与抽运功率关系图; (b) 输出光正交双偏振态及单偏振态的线宽
Fig. 9 Amplifier performance of the laser. (a) Signal output power versus pump power for final-stage amplifier; (b) scanning traces for orthogonally-polarized modes and single (linearly polarized) mode

2009 年, Meleshkevich 等^[13] 搭建了同带级联抽运掺铥激光器。纤芯直径为 20 μm、长度为 8 m 低掺杂铥光纤和一对布拉格光栅 (FGB) 形成全光纤化的激光腔。同带级联抽运光由 18 个 42 W 的钇激光输出的 1567 nm 提供, 采取端面抽运的方式获得了 720 W 的 1940 nm 连续输出, 输出随抽运功率变化如图 10 所示^[13]。由于同带级联抽运的优点, 放大器的最大输出功率不受热效应和受激拉曼散射影响, 仅受限于抽运光功率大小。

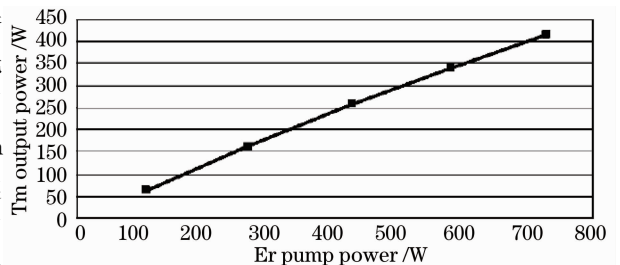


图 10 输出功率与抽运功率关系图

Fig. 10 Output optical power versus total Er pump power

2010 年, Zhang 等^[14] 在 2008 年的工作基础上, 改用全光纤化结构的激光器及放大器来输出单频 1943 nm 激光, 激光器光路如图 11 所示。高反射率 FBG 被刻蚀在非

保偏掺铥光纤上,其 3 dB 带宽为 6 GHz。激光腔的有效长度为 3 cm,其对应的纵模间距为 3.3 GHz,因此腔内只有不超过两个纵模起振。通过调整光栅的温度来输出线偏单纵模激光,激光器的输出功率特性如图 12(a)所示。当 9 W 的 1565 nm 激光作为同带抽运光源时,后向的 1940 nm 激光功率为 70 mW,而前向的激光功率为 580 mW。在同带级联抽运放大器中,以前向输出 580 mW 的激光作为种子光,利用未吸收完的 1940 nm 激光抽运 60 cm 长的掺铥光纤。放大器输出光的保偏度大于 20 dB,其功率特性如图 12(b)所示。

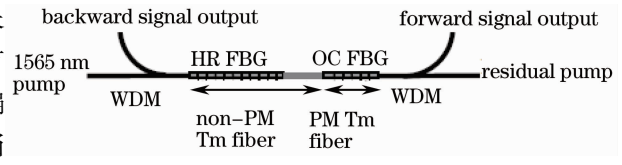


图 11 实验结构图

Fig. 11 Schematic diagram of the experimental setup

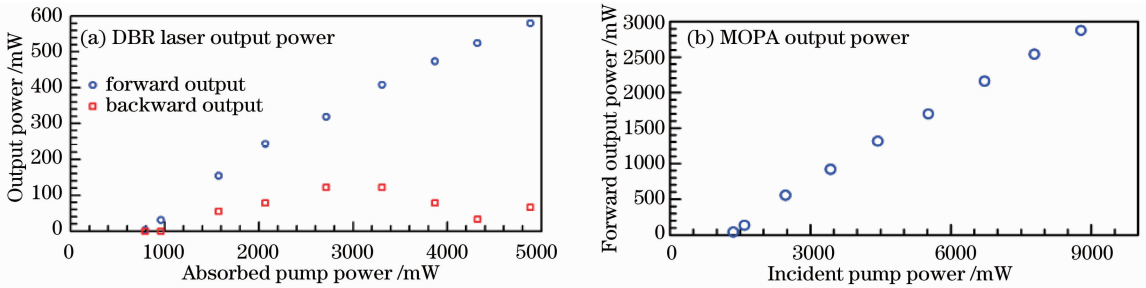


图 12 输出功率与抽运功率关系图。(a) 单纵模激光器;(b)同带抽运放大器

Fig. 12 Output power versus absorbed pump power. (a) Single-logitudinal mode laser; (b) tandem-pumped amplifier

2.1.4 掺铥激光

掺铥硅酸盐光纤的能级结构如图 13 所示, 2046 nm 左右的光源可以同带抽运放大 2100 nm 的激光^[15]。2006 年,悉尼大学的 Jackson^[15]首先利用掺铥光纤激光器得到 13 W 左右的多模 2046 nm 激光,然后同带级联抽运两种不同的掺铥光纤放大器。放大器的实验结构如图 14 所示,其中使用的光纤有两种,一种为铝钬共掺硅酸盐玻璃,玻璃成分包含摩尔分数 5% 的 GeO₂ 和质量分数 11.5% 的 Al³⁺,另一种为质量分数 4.2% 的钬氟化物玻璃[纤芯直径为 (13±1) μm, NA=0.16±0.02]。

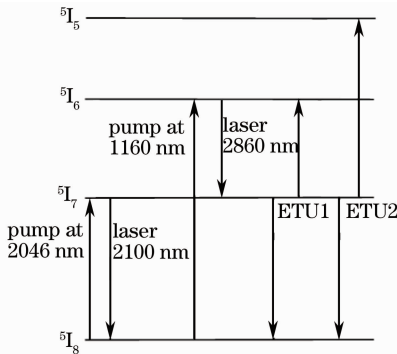


图 13 掺铥硅酸盐光纤的能级结构图

Fig. 13 Energy level diagram for Ho-doped silica

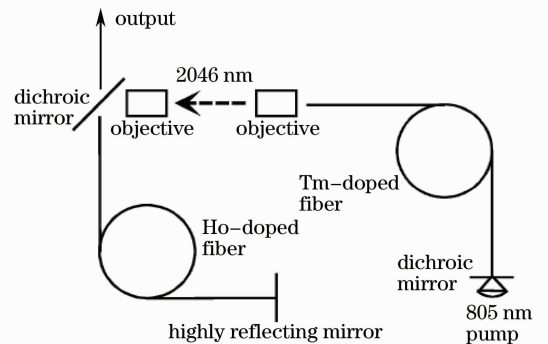


图 14 掺铥光纤激光抽运掺铥激光器结构图

Fig. 14 Experimental setup of the Tm³⁺-doped fiber laser pumped Ho³⁺-doped fiber lasers

铝钬共掺硅酸盐玻璃光纤在不同长度下的激光输出功率特性如图 15(a)所示,在 0.71 m 时,得出最大功率为 1.5 W 的 2100 nm 激光输出,此时斜率效率为 82%;在 0.93 m 时,斜率效率为 58%,这是由于光纤较长的原因。对于掺铥硅酸盐玻璃光纤,由于实验条件原因,未使用最佳长度的光纤。图 15(b)给出了掺铥硅酸盐玻璃的输出波长随不同长度光纤的变化特性,可以看出,变化特性近似线性关系。输出的功率特性如图 16 所示,其最大斜率效率只有 50%。

2.2 理论分析进展

同带级联抽运在理论方面的研究处于初始阶段,2010 年,Southampton 大学的 Codemard 研究小组^[16]具体分析了在大芯径的掺铥双包层光纤中同带级联抽运技术的各种优点。

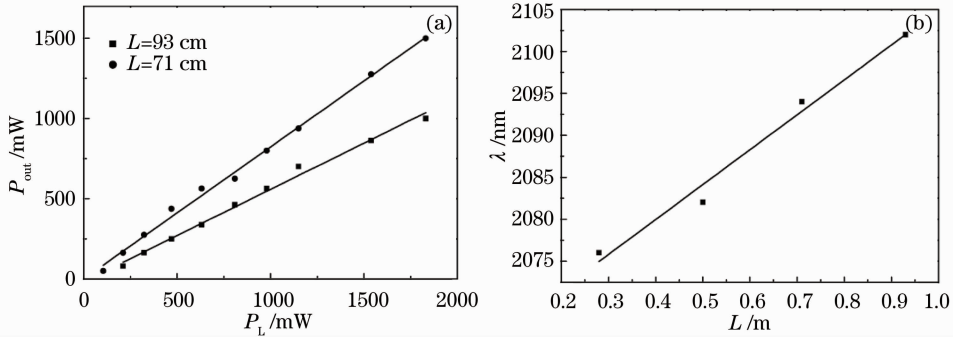


图 15 掺铈硅酸盐光纤放大器输出特性。(a) 两种长度的输出功率;(b) 不同长度的输出波长

Fig. 15 Amplifier performance of the Ho-doped fiber laser. (a) Output power for two lengths; (b) output wavelength as a function of the length

首先光纤在 1080 nm 基模信号光注入下饱和、抽运光强度刚好能够激发的反转粒子数占总粒子数的 0.03, 同时不考虑均匀掺铈离子磷酸盐玻璃的自发发射的条件下, 理论分析了 5 种不同波长的抽运光纤芯抽运直径为 $50 \mu m$ 的阶跃型光纤, 其 $NA = 0.06$, 可以传输 1080 nm 的 12 个 LP_{mn} 模。通过模拟计算给出了受激反转粒子数占总粒子数的比例, 如图 17(a) 所示。从图中可以看出在纤芯外围的比例都大于平均值 0.03。另外当铈离子掺杂浓度为 $2 \times 10^{-26} m^{-3}$ 且抽运光和信号光子数目处处相等(反向抽运可以满足)时, 可以得到不同抽运波长对信号光高阶模增益的影响情况。抽运光范围在 910~980 nm 时, 对于一些高阶模, 某些波长峰值增益可达 6.2 dB/m, 远远大于 1080 nm 饱和信号光基模的增益, 如此高的增益很可能发生寄生振荡或者其他的自饱和放大自发辐射(ASE)^[17]。而在大于 1020 nm 波段的同带级联抽运时, 这些问题可以避免。这种优点有助于增大光纤纤芯来进行更高功率的放大, 相关的数据如图 17(b) 所示。

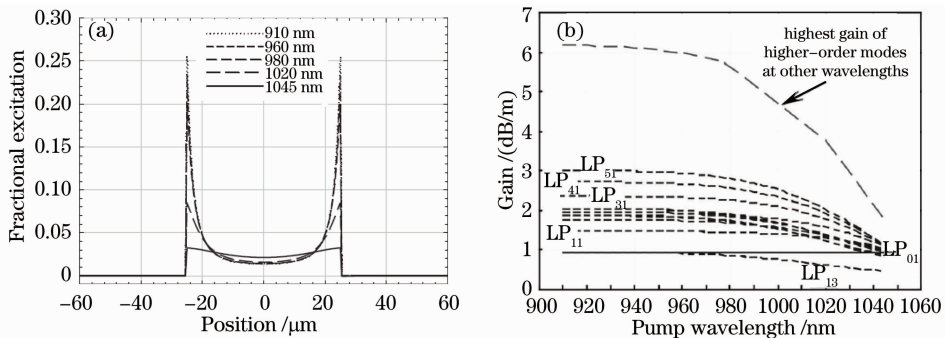


图 17 理想阶跃型光纤在不同抽运光时的特性。(a) 反转粒子数比例分布;(b) 各种模式的增益

Fig. 17 Ideal step-index core performance under different pumping wavelength. (a) Fractional excitation level; (b) different modes gain at the signal wavelength

因为不同波长处的吸收系数差别很大, 需要调整光纤内外层与纤芯面积比来满足抽运光和信号光子数目处处相等的假设。通过模拟计算得到的光纤内外层与纤芯面积比如图 18 所示, 从图中可以看出有些波长的比值相差 3 个量级。这也说明了在同带级联抽运时, 由于掺铈离子光纤对长波段的吸收系数很小, 所以增加抽运光与纤芯的重叠度, 即提高纤芯与内包层面积比是同带级联抽运的一个关键问题。

铝硅酸盐基底具有较小的折射率系数梯度, 更适合于制作高掺杂度、大模场面积的光纤。但在输出高功率时, 光子暗化对高掺杂度铝硅酸盐光纤影响严重, 同带级联抽运技术可以用来解决这个问题。由于光暗速

率与最大受激反转粒子数的 4.3 次方成正比,在 910 nm 抽运时光暗速率是 1045 nm 同带级联抽运时的 1000 倍左右,所以同带级联抽运可以大大减小光子暗化的影响,如图 19 所示。

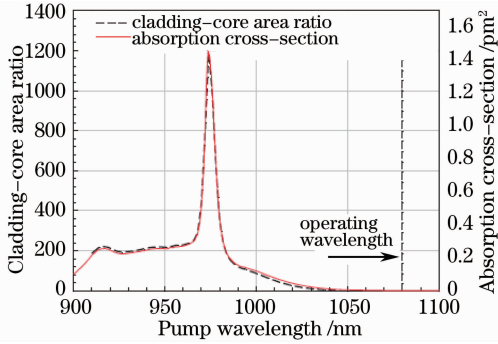


图 18 不同抽运光时需要的外层与纤芯面积比

Fig. 18 Cladding-to-core area ratio requirement for different pumped laser

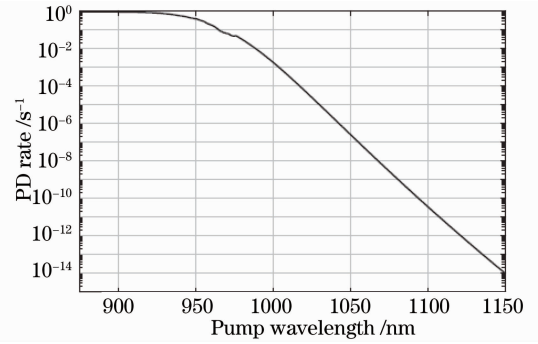


图 19 铝硅酸盐光纤的光暗速率随抽运波长的关系

Fig. 19 Photodarkening rate versus pump wavelength for an aluminosilicate YDF

3 结 论

传统的光纤激光器都是采用直接 LD 抽运,受量子亏损的限制,这种方式产生了较高的单位长度热负载。因此采用这种抽运方式的单根光纤激光输出功率最大输出迄今为止不超过 3 kW。而同带级联抽运与之相比,首先具有高亮度的特性,其亮度要比一般的 LD 高 100 倍,可以允许在一定大小的内包层光纤内耦合进更大的抽运功率,以满足高功率放大的要求。另外明显的优点是抽运光波长可以尽可能地接近激光波长,量子损耗小,废热少。

其实同带级联抽运在高功率掺镱光纤中还有其他优点,包括减小大模场面积掺镱光纤高阶模的增益系数和抑制铝硅酸盐掺镱光纤中光子暗化的影响。前者可以避免高阶模的放大及其自脉冲的发生,从而允许大模场面积光纤在输出高功率激光的同时还可以保持好的光束质量。后者的原因在于同带级联抽运时的光暗速率要比直接 LD 抽运小约 1000 倍。这就可以使铝硅酸盐掺镱光纤不受几乎不受光子暗化的影响,能够应用在输出不同波长的高功率放大领域中。关于这些优点的研究处于刚刚起步,值得关注。

综上所述,高功率掺镱光纤同带级联抽运面临的主要问题及解决的方法如下:

1) 如何获得特殊波长的高亮度抽运光。由于同带抽运光的波长一般不在掺镱光纤的发射谱峰值附近,得到高亮度、高功率的抽运光是同带级联抽运技术首先面临的难题。解决的方法可以通过 LD 抽运特殊的光纤来得到,或者通过拉曼放大的方式来实现。例如 IPG 公司用做同带抽运光的 1018 nm 激光器,采用选择发射谱方向短波漂移的掺镱光纤,直接通过 LD 抽运方式得到的。

2) 如何提高光纤对同带抽运光的吸收系数。常用的光纤对同带抽运光的吸收系数很小,比如普通掺镱光纤在 1018 nm 的吸收系数比在 975 nm 小 1 个量级。对于这个问题,可以通过选择合适的增益光纤和抽运光波长,以及调节光纤的温度以增大吸收系数来解决,最重要的是需要增大纤芯与内包层面积比(即提高抽运光的填充因子)。

3) 如何平衡光纤放大斜率效率和热管理负担。在同带级联抽运中,斜率效率随抽运功率填充因子的增大而增加,但是纤芯的温度又会过高,增加了热管理的负担。因此在设计光纤和抽运合束器等元件时,应当通过合理提高抽运功率填充因子,在保证转换效率的同时获得较好的温度特性。

可以预见,随着各种光纤技术的快速发展,可以解决掺镱光纤同带级联抽运面临的主要问题,高功率的光纤激光同带级联抽运技术将得到广泛的应用。

参 考 文 献

1 Fu Yongjun, Mao Xiangqiao, Peng Jian *et al.*. Measurement of pump absorption of rare-earth doped double-clad fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 166~170

傅永军, 毛向桥, 彭 健 等. 稀土掺杂双包层光纤的抽运吸收的测试[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 166~170

- 2 Fan Yuanyuan, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Preparation and high-power fiber laser experimentation of double-clad fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2395~2399
范元媛, 周 军, 何 兵 等. 双包层光纤光栅的制备及其高功率光纤激光实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2395~2399
- 3 Yoon-Chan Jeong, Alexander J. Boyland, Jayanta K. Sahu *et al.*. Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. *J. Optical Society of Korea*, 2009, **13**(4): 416~422
- 4 E. Stiles. New developments in IPG fiber laser technology[C]. The 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009
- 5 Jeff Hecht. Fiber lasers ramp up the power[J]. *Laser Focus World*, 2009, **45**(12): 53~57
- 6 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers; current status and future perspectives[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B63~B92
- 7 H. M. Pask, Robert J. Carman, C. David *et al.*. Ytterbium-doped silica fiber lasers; versatile sources for the 1~1.2 μm regions[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(1): 2~13
- 8 Koechner Walter. Solid-State Laser Engineering[M]. Berlin; Springer, 1999. 66~67
- 9 S. U. Alam, A. T. Harker, R. J. Horley *et al.*. All-fibre, high power, cladding-pumped 1565 nm MOPA pumped using high brightness 1535 nm pump sources[C]. CLEO, San Jose, 2008. CWDJ4
- 10 J. W. Nicholson, A. M. DeSantolo, S. Ghalmi *et al.*. Nanosecond pulse amplification in a higher-order mode erbium-doped fiber amplifier[C]. CLEO, San Jose, 2010. CPDB5
- 11 Han Kai, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Progress of high power tm-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 101406
韩 凯, 马阎星, 王小林 等. 高功率掺铥光纤激光的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(10): 101406
- 12 Z. Zhang, D. Y. Shen, A. J. Boyland *et al.*. Single-frequency Tm-doped fiber master-oscillator power amplifier with 10 W linearly-polarized output at 1943 nm[C]. CLEO, San Jose, 2008. CFD5
- 13 M. Meleshkevich, N. Platonov, D. Gapontsev *et al.*. 415 W Single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format[C]. CLED/Europe, munich, 2009. 1
- 14 Z. Zhang, A. J. Boyland, J. K. Sahu *et al.*. High-power tm-doped fiber distributed-feedback laser at 1943 nm [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **23**(7): 417~419
- 15 Stuart D. Jackson. Midinfrared holmium fiber lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **42**(2): 187~191
- 16 Christophe A. Codemard, Jayanta K. Sahu, Johan Nilsson *et al.*. Cladding-pumping for control of excess gain in ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, **46**(12): 1860~1868
- 17 Han Qun, Ning Jiping, Zhang Weiyi *et al.*. ASE suppression method for high power pumped Er-Yb Co-doped fiber amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 252~257
韩 群, 宁继平, 张伟毅 等. 高功率抽运铒镱共掺光纤放大器中放大自发辐射抑制方法的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 252~257