

输出平均功率大于 2W 的高功率、包层抽运、超短脉冲 钕镜共掺光纤激光器*

刘艳格[†] 张春书 孙婷婷 鲁云飞 王志 袁树忠 开桂云 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

(2005 年 12 月 29 日收到, 2006 年 2 月 21 日收到修改稿)

采用主振荡功率放大的方式, 研制成功集宽带波长连续可调谐、带宽内输出功率谱均衡、高重复频率和高功率性能于一体的超短脉冲包层抽运钕镜共掺光纤激光器. 将优化主振荡器和功率放大器的腔结构与掺钕光纤的饱和增益特性结合起来, 实现了 1535nm—1570nm(35nm 带宽)的输出功率均衡的波长连续可调谐激光输出, 在带宽内激光功率的最大波动仅为 0.5dBm, 带宽内平均输出功率大于 2W, 脉冲重复频率大于 10GHz, 脉冲宽度小于 30ps. 该激光器具有综合性能指标先进、结构简单、全光纤化、使用方便等优点.

关键词: 光纤激光器, 包层抽运, 短脉冲, 高重复频率

PACC: 4260, 4281, 4255N

1. 引 言

因光纤激光器具有效率高、阈值低、可调谐、紧凑小巧、与传输光纤兼容等优点, 在光通信、光传感、光谱测量等诸多领域具有潜在的应用前景而备受关注. 目前关于锁模掺钕光纤激光器^[1,2]、可调谐掺钕光纤激光器^[3-5]、高功率包层抽运光纤激光器^[6,7]的报道很多, 但或者是重复频率不高、输出功率只有毫瓦量级^[1,2]、或者是连续激光输出^[3-7]、不是全光纤化结构^[6,7]、没有宽带可调谐功能^[1,2,7]. 实际上, 在许多应用场合, 如光谱测量、光传感、科学研究等, 需要光纤激光器同时具有高功率、高重复频率、超短脉冲、宽带波长连续可调谐、且调谐带宽内功率波动很小等性能. 目前, 同时具有这些性能的光纤激光器的报道很少.

本文在研究掺钕光纤的增益饱和特性的基础上, 提出并研制成功集宽带波长连续可调谐、带宽内输出功率谱均衡、高重复频率和高功率性能于一体的超短脉冲包层抽运钕镜共掺光纤激光器. 在不加

任何功率控理的情况下, 实现了 1535nm—1570nm(35nm 带宽)的输出功率均衡的波长连续可调谐激光输出, 在带宽内激光功率的最大波动仅为 0.5dBm, 带宽内平均输出功率大于 2W, 脉冲重复频率大于 10GHz, 脉冲宽度 30ps. 据我们所知, 目前还未见如此高性能的全光纤化、包层抽运、超短脉冲的光纤激光器研究报道.

2. 掺钕光纤的增益饱和特性

掺钕光纤(EDF)在特定功率抽运光作用下产生的增益谱形状, 与掺钕光纤长度、钕离子掺杂浓度等有关^[8]. 图 1 是我们利用 Giles 模型^[9]理论模拟得到的 120mW 980nm 半导体激光器前向抽运不同长度掺钕光纤时得到的小信号增益谱. 由图可见, 小信号增益谱的形状与掺钕光纤的长度有很大的关系, 当抽运功率确定时, 通过优化设计掺钕光纤长度, 可以达到从 1540nm—1560nm 范围内相对比较平坦的增益谱(见图中 20 米 EDF 的情况), 但在 1532nm 附近存在一个较大的增益峰, 也就是说, 在不加增益平坦机理的情况下, 掺钕光纤的小信号平坦增益带宽最

* 国家自然科学基金(批准号: 60407005 和 60137010), 国家 973 计划项目(批准号: 2003CB314906)和国家 863 计划项目(批准号: 2003AA312100)资助的课题.

[†] E-mail: ygliu@nankai.edu.cn

大只有 20nm. 这是不是意味着只能得到 20nm 的可调谐带宽呢? 答案是否定的, 我们理论研究发现, 掺铒光纤的增益谱形状与信号的输入功率有关. 图 2 是理论模拟得到的输入信号功率不同的单信号扫描增益谱, 由图可见, 随着输入信号功率的增加, 1532nm 处的增益峰逐渐变小, 直至基本消失, 从而可以实现从 1525nm—1565nm 范围内的增益平坦. 这是因为随着输入信号功率的增大, 掺铒光纤逐渐工作在饱和状态, 但由于小信号增益的差别, 对于相同的输入信号功率, 掺铒光纤在不同波长处所处的饱和深度不同, 小信号增益越大的波长处, 其达到的饱和程度越深, 因此 1532nm 附近和 1550nm 附近的增益差值会随着输入信号功率的增加而逐渐变小, 直至最后基本持平. 因此, 只要优化设计掺铒光纤激光器和放大器的结构参数, 使掺铒光纤工作在深度饱和状态, 则有可能实现 C 波段带宽为 40nm 的功率均衡和增益平坦的可调谐光纤激光器和放大器.

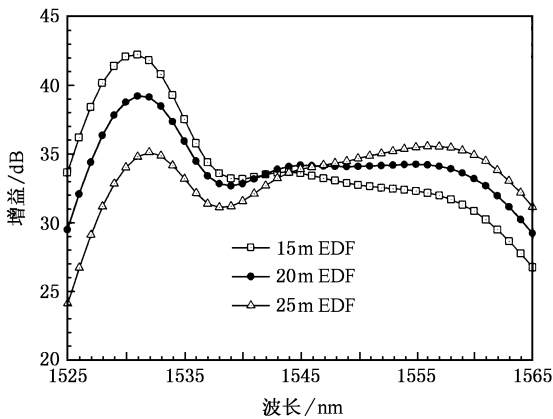


图 1 抽运功率一定时, 增益谱形状随掺铒光纤长度的变化

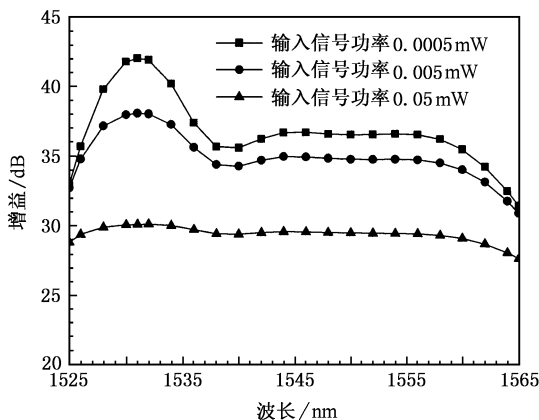


图 2 掺铒光纤增益谱形状随输入信号功率的变化

3. 实验装置

我们提出的高功率、高重复频率的超短脉冲包层抽运光纤激光器的结构示意图如图 3 所示. 该激光器分两部分, 左边虚框内是一个基于普通单包层光纤的环形腔光纤激光器结构, 右边虚框内是一个后向抽运的全光纤铒镱共掺双包层光纤放大器结构, 两部分构成一个主振荡功率放大 (MOPA) 的光纤激光器系统. 为实现在没有任何增益控制和平坦机理的情况下, 宽带波长连续可调谐、且调谐带宽内的激光输出功率均衡的高功率、高性能激光输出, 要求左边光纤激光主振荡器具有宽带可调谐、且输出功率谱平坦的高性能输出, 右边的放大器要做到高功率和宽带增益平坦的高性能输出.

图 3(a) 作为主振荡器采用的是主动锁模的光纤环形腔结构, 该环形腔由 1480nm/1550nm 波分复用器 (WDM) 一段长 5m 的掺铒光纤 (EDF) 可调谐滤波器 (filter) 偏振控制器 (PC) 调制器 (Modulator) 光隔离器 (ISO) 以及光纤耦合器 (coupler) 组成. EDF 由电子科技集团第 46 所生产, 其 Er^{3+} 浓度为 1600ppm, 1530nm 处的吸收系数 10dB/m. 波长为 1480nm 的半导体激光器 (LD) 通过 WDM 抽运 EDF, 最大抽运功率为 130mW. 可调谐光滤波器在 1528nm—1570nm 范围内连续波长可调, 3dB 带宽约为 0.9nm, 其作为腔内选频器件, 使主振荡器具有在增益带宽内连续波长可调谐的功能. 调制器是形成主动锁模的关键器件, 实验中使用的调制器为国内生产的高频 (调制频率大于 10GHz) 宽带 LiNbO_3 调制器. 因调制器的调制效率对偏振态比较敏感, 所以在调制器前放置 PC 来调节入射到调制器的光场偏振态. 直流偏置 (DC bias) 和射频 (RF) 信号通过 T 形耦合器一同加到调制器上, 实验中要调节直流偏压使调制器工作在线性工作区. 约 10GHz 的射频信号由 HP83711B 型信号发生器提供, 其输出的正弦信号幅度可调, 最大输出为 20dBm. 隔离器 (ISO) 用来保证激光的单向运转, 脉冲激光由光纤耦合器的一端输出. 为得到掺铒光纤增益带宽内近 40nm 的可调谐激光输出, 关键是如何优化环形腔的参数, 使掺铒光纤工作在深度饱和区域.

图 3(b) 为功率放大器, 我们采用的是后向抽运的全光纤化双包层光纤放大器结构. 其中所用 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤的长度约为 10m, 其内包层结

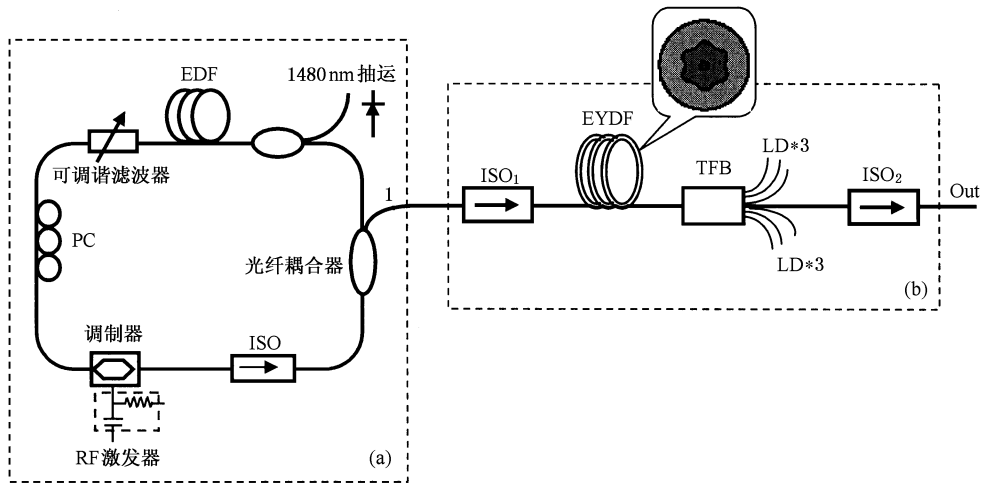


图 3 高功率高重复频率超短脉冲光纤激光器装置示意图

构为如插图所示的梅花形,数值孔径为 0.45. 光纤外径为 $125\mu\text{m}$,可直接与普通单模光纤低损耗熔接,该光纤在 1535nm 处的峰值吸收系数为 39dB/m ,在 915nm 处的峰值吸收系数为 389dB/m . 实验中抽运和信号光的耦合是通过一个树杈形光纤 (TFB) 耦合器来完成的. 该耦合器输入端有 7 个尾纤端口,中间一个是普通单模光纤,作为信号通道,其周围环绕有六根多模光纤作为抽运光耦合的通道. 这些多模光纤的数值孔径为 0.15,芯径 $105\mu\text{m}$,外径 $125\mu\text{m}$,耦合器的输出尾纤数值孔径为 0.45,外径 $125\mu\text{m}$,直接与铈共掺双包层光纤相连. 实验中所用抽运源为六个多模 LD,输出中心波长位于 976nm 附近,每个 LD 的最大输出功率约为 1W ,其总功率约为 6W . 抽运源的尾纤为与耦合器 6 个多模光纤数值孔径相匹配的多模光纤,可以与其低损耗的直接熔接在一起. 我们采用后向抽运结构,可以保证具有较大的输出功率. 输入和输出端各有一个隔离器,其作用是可以抑制由于端面反射引起的激光振荡,从而增加放大器的工作稳定性. 为了得到增益平坦的高效、高性能放大输出,抽运光与铈共掺双包层光纤的高效耦合、抽运功率和光纤长度的最佳匹配是其关键. 我们通过优化设计放大器的结构和参数,最大得到了 2.18W 的连续激光放大输出,其光光转化效率高达 35.63% ^[10]. 据我们所知,该效率是目前报道中最高的.

4. 实验结果及讨论

理论和实验研究都表明^[8,11],铈共掺光纤激光器

的输出特性与腔内的结构参数,如抽运功率、光纤长度、光纤掺杂浓度、腔内损耗等参数有关,要得到宽波长调谐范围、高效率的激光输出,就要适当选择激光器的各个参数. 因此,在图 3(a)部分的光纤主振荡器的设计和研制中,在抽运功率和掺铈光纤长度匹配的前提下,腔内各器件确定后,其激光输出特性仅由输出光耦合器的耦合比决定. 因此,为了得到最优化的可调谐激光输出,必须研究输出耦合比对光纤激光器输出特性的影响. 为了简单,首先考虑在图 3(a)的实验装置中没有插入调制器的连续激光输出情况下,保持 LD 的输出功率、掺铈光纤长度不变,在装置中分别插入分光比为 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 1/99 的光纤耦合器,而每种耦合器又考虑了两种接入方式,如 10/90 的耦合器,分 10% 作为激光输出、90% 作为反馈和 90% 作为激光输出、10% 反馈两种情况接入. 这样就考虑了 1%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% 和 99% 输出等多种情况时的激光特性. 对于每一种耦合输出情况,调节滤波器,使滤波器的中心波长在 1528nm — 1570nm 之间变化,每隔 2nm ,在耦合器的输出端口 1 测量主振荡器的输出功率和输出光谱.

图 4 所示为不同输出耦合比情况下,测量的激光输出功率随波长的变化曲线. 由图可以看出,输出耦合比不同的情况下,激光器在某一个波长处输出的功率大小和功率谱的形状都是不一样的. 为了更清楚地反映出输出耦合比对激光输出功率及其带宽范围内功率谱平坦性的影响,我们分别根据图 4 的实验数据作图 5 和图 6. 图 5 为激光输出功率随输出耦合比的变化情况. 图中的点为实验测量数据,取激

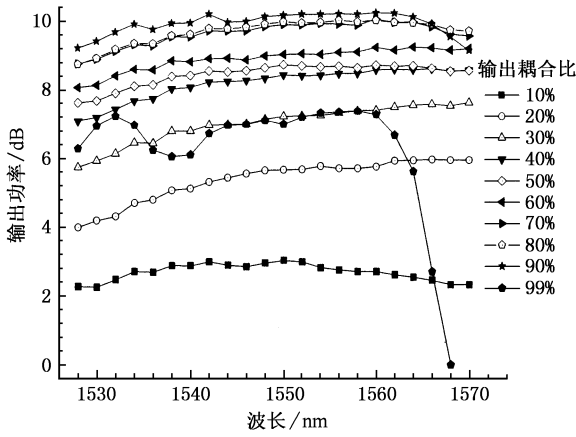


图 4 不同耦合输出比的激光输出功率谱曲线

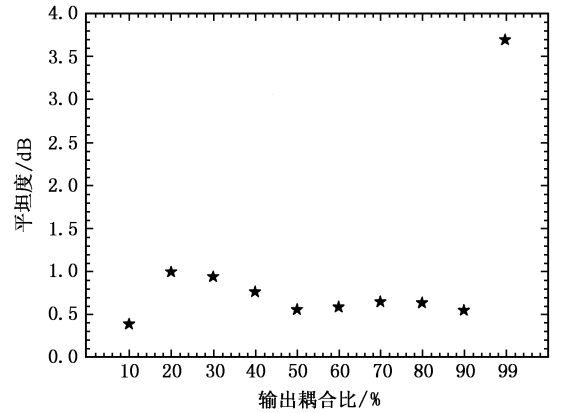


图 6 激光输出功率平坦度随输出耦合比的变化

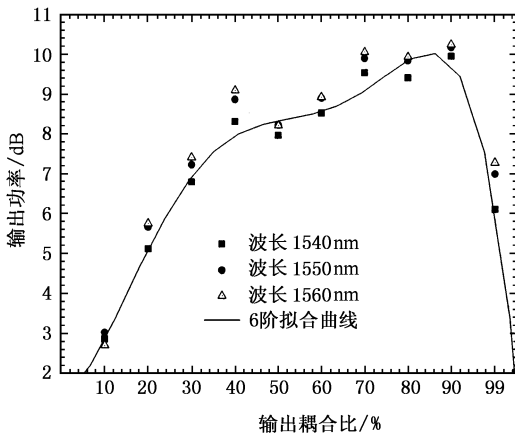


图 5 激光输出功率随输出耦合比的变化

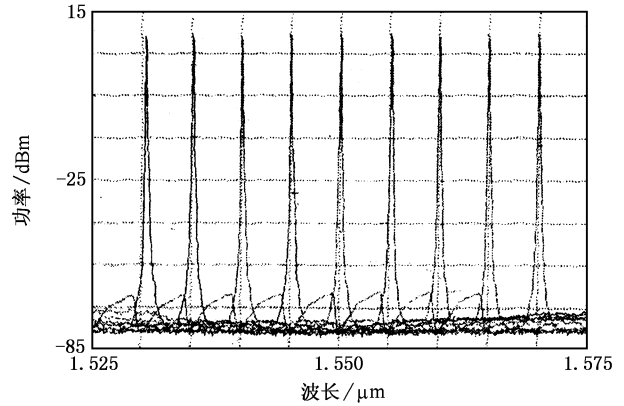


图 7 激光可调谐输出光谱图

光振荡波长分别在 1540nm,1550nm,1560nm 时的情况,曲线为实验数据的 6 阶拟合曲线.由图 5 可以看出,主振荡器的输出功率并不是随输出耦合比的增大而一直增大的,而是输出耦合比存在一个最佳值,该最佳值大约在 80%—90% 之间.当采用具有最佳输出耦合比的耦合器时,同样的抽运功率会得到较大的激光输出.但是如果输出耦合比继续增大,比如输出耦合比达到 99% 时,此时因腔内信号反馈太小,腔内激光振荡强度将减弱,甚至停止振荡.

图 6 为激光波长带宽内输出功率波动情况随输出耦合比的变化.输出耦合比为 10% 时,激光输出功率平坦度最佳,为 $\pm 0.385\text{dBm}$,不过此时的激光峰值功率较低,只有 3dBm.而在输出耦合比为 99% 时,当滤波器中心波长达到 1565nm 以后,激光输出功率会急速下降,甚至不能起振,此时功率谱平坦度最差.在输出耦合比为 80% 和 90% 时,此时激光输出功率的平坦度是比较好的,分别为 $\pm 0.63\text{dB}$,

$\pm 0.545\text{dB}$.对照图 5,此时激光输出功率也较大,分别为 10.01dBm 和 10.23dBm.因此,综合考虑输出功率和功率谱平坦度性能,该可调谐环形腔掺铒光纤激光器的最优情况应该出现在输出耦合比 80% 和 90% 之间,此时激光输出功率具有最大值,并且带宽范围内的功率波动较小.再考虑到短脉冲情况下要插入锁模调制器,其插入损耗比较大,所以我们选择了 80% 的耦合输出.图 7 给出了耦合输出为 80% 的情况下,输出的连续激光光谱.由图可见,激光可在 1528nm—1570nm 的范围内波长调谐输出,峰值功率约为 10dBm.在可调谐波长范围内,激光输出功率波动很小,功率谱平坦度约为 $\pm 0.63\text{dB}$.

然后我们按图 3(a) 的装置将 LiNbO_3 调制器插入到光路中.该环形腔光纤激光器的腔长约为 20m,对应基频约为 10.2MHz. LiNbO_3 调制器上可最大施加约 10GHz 的正弦波调制信号,调制频率远远大于环形腔的基频,调整高频调制信号的频率,当调制频率为基频的整数倍时可实现谐波锁模.图 8 给出调

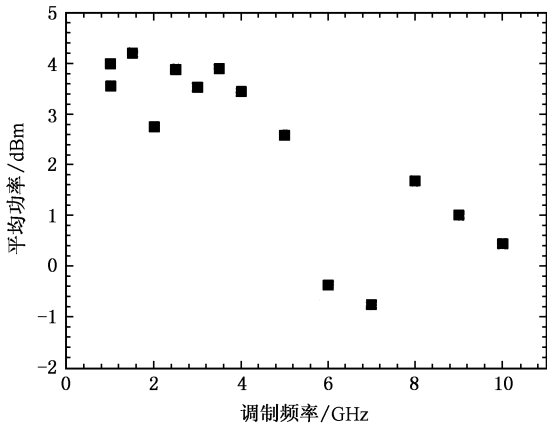


图 8 激光输出平均功率随调制频率的变化可调谐输出光谱图

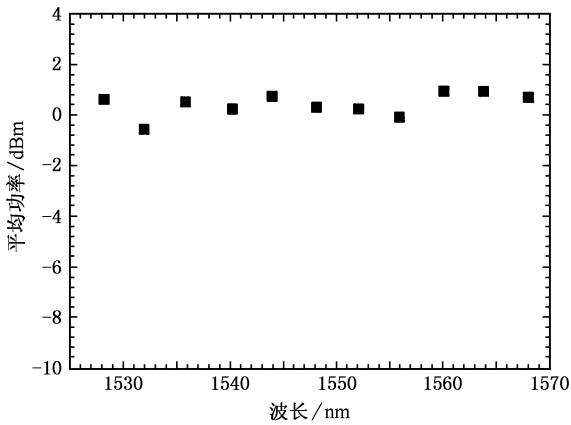


图 9 10GHz 锁模激光输出的平均功率随波长的变化

制频率从 1GHz 到 10GHz 变化时,测量不同调制频率的谐波锁模激光输出时的平均功率随调制频率的变化情况,由图可见,平均功率随调制频率的变化而波动,当调制频率比较小时($< 5\text{GHz}$),具有较高平均功率,在 7GHz 处平均功率最低,而大于 7GHz,平均功率又先增大后减小,我们分析其主要原因是由于调制器的插入损耗和调制频率有关,调制频率不同,其插入损耗不同,从而造成输出功率的差异,另外输出的脉冲宽度随调制频率的不同,也有些差异,调制频率越小,脉宽越宽。图 9 是在调制频率约为 10GHz 的谐波锁模激光输出时,由光谱仪测试的平均功率随波长的变化,从图可以看到,在 1528nm—1568nm 范围共 40nm 带宽的波长调谐范围内,锁模光纤激光主振荡器的平均功率波动 $\leq \pm 0.78\text{dBm}$ 。

然后,我们将优化后的锁模光纤主振荡器与双包层光纤放大器连接形成如图 3 所示的 MOPA 激光

系统,并研制成了样机。表 1 给出了我们测量的样机在短脉冲工作时,工作带宽内几个波长处的调制频率、平均功率和脉冲宽度的详细数据。由这些数据可以看出,该样机在短脉冲工作时的调制频率都大于 10GHz,脉冲宽度小于 30ps,最大输出功率为 33.304dBm(2.14W,波长 1545nm 处),从 1535nm 到 1570nm 总共 35nm 带宽内波长连续可调,功率谱波动小于 0.5dBm。图 10 给出了样机在 10GHz 锁模激光输出时波长调谐输出光谱,该图是多个光谱计算机合成的结果,从该图可以看出,该激光系统在调谐带宽内光谱的峰值功率均衡性很好,激光边模抑制比都约为 35dB。图 11 给出了激光系统在四个波长处的时域测量特性,在实验中通过长时间的观察锁模脉冲,其工作非常稳定。

表 1 激光系统的实验测试结果

输出波长 /nm	调制频率 /GHz	脉冲激光 功率/W	脉冲激光 功率/dBm	脉冲宽度 /ps
1535	10.126	1.91	32.810	29.46
1540	10.133	2.03	33.075	27.35
1545	10.066	2.14	33.304	30.09
1550	10.183	2.13	33.284	30.51
1555	10.093	2.06	33.139	26.14
1560	10.190	2.06	33.139	28.96
1565	10.136	2.02	33.054	29.38
1570	10.146	1.94	33.878	26.07

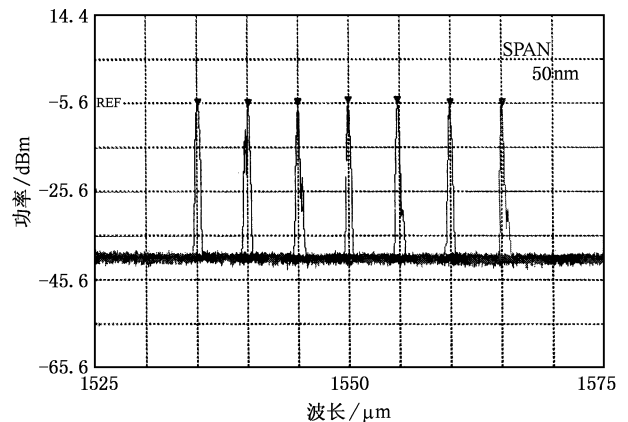


图 10 10GHz 锁模激光输出的可调谐激光谱

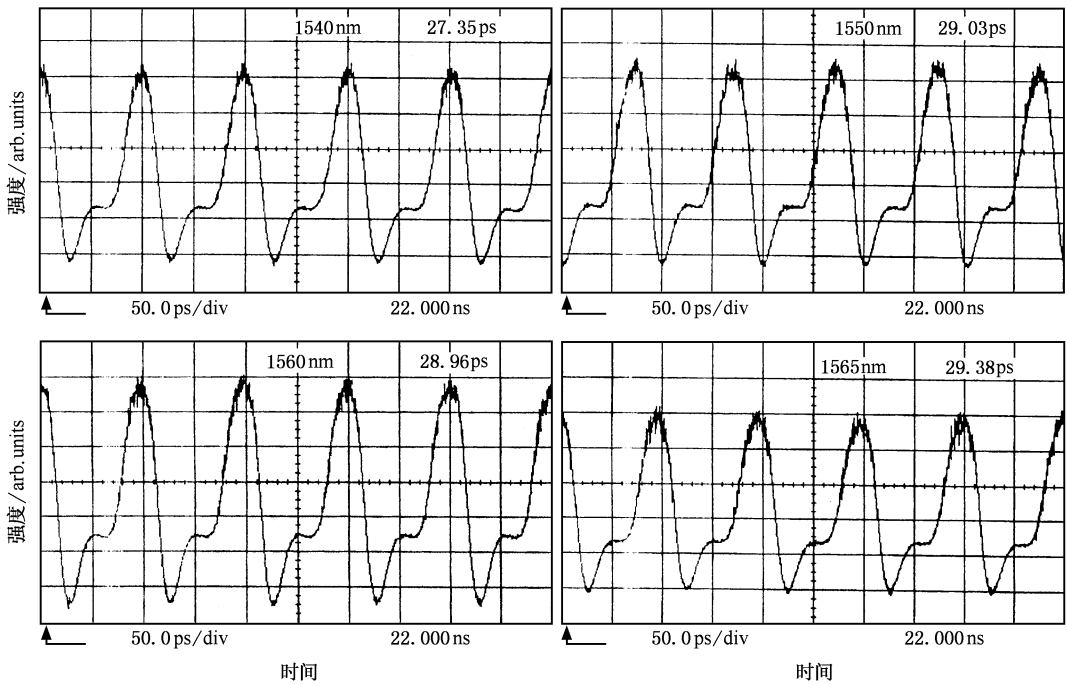


图 11 激光系统在不同波长处的锁模脉冲输出

5. 结 论

本文在研究光纤激光器和放大器饱和增益特性的基础上,通过优化光纤激光器和双包层光纤放大器的结构参数,采用主振荡功率放大的方式,实现了

1535nm—1570nm 范围总共 35nm 带宽波长连续可调谐、输出功率均衡的全光纤化、高效、高功率包层抽运钕镜共掺光纤激光器的实验样机.其实现的主要指标为:脉冲宽度小于 30ps,重复频率大于 10GHz,平均功率大于 2W,35nm 带宽内平均功率谱波动小于 0.5dBm.

- [1] Feng X H, Liu Y G, Liu L H *et al* 2004 *Applied Optics* **43** 6334
 [2] Feng X H, Liu Y G, Yuan S Z *et al* 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1813
 [3] Moon D S, Paek U C, Chung Y 2005 *Optics Express* **13** 5615
 [4] Liu B, Liu Y G, Luo J H *et al* 2005 *Acta Photonica Sinica* **34** 1285
 (in Chinese) [刘 波、刘艳格、罗建花等 2005 光子学报 **34** 1285]
 [5] Dong X Y, Zhao C L, Guan B O *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2750 (in Chinese) [董新永、赵春柳、关柏鸥等 2002 物理学报 **51** 2750]
 [6] Fu S G, Fan W D, Zhang Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4262
 (in Chinese) [付圣贵、范万德、张 强等 2004 物理学报 **53** 4262]
 [7] Lou Q H, Zhou J, Zhu J Q *et al* 2004 *Chinese Journal of Lasers* **31** 1029 (in Chinese) [楼祺洪、周 军、朱健强等 2004 中国激光 **31** 1029]
 [8] Liu Y G, Zhang H, Meng H Y *et al* 2003 *Acta Photonica Sinica* **32** 1196 (in Chinese) [刘艳格、张 昊、蒙红云等 2003 光子学报 **32** 1196]
 [9] Giles C R, Desurvire E. 1991 *Journal Lightwave Technology* **9** 271
 [10] Liu Y G, Feng X H, Li L J *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 343
 [11] Liu Y G, Feng X H, Li Y *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 991

Clad-pumped $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped short pulse fiber laser with high average power output exceeding 2W^{*}

Liu Yan-Ge[†] Zhang Chun-Shu Sun Ting-Ting Lu Yun-Fei Wang Zhi

Yuan Shu-Zhong Kai Gui-Yun Dong Xiao-Yi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

(Received 29 December 2005 ; revised manuscript received 21 February 2006)

Abstract

A clad-pumped short pulse $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped fiber laser based on master oscillator and power amplifier (MOPA) structure , integrating the performances of broad-band tunable wavelength , uniform output power spectrum , high repetition rate and high average power to together , is proposed and demonstrated . Combining the cavity parameter optimization of the fiber master oscillator and power fiber amplifier with gain saturation characteristic of erbium-doped fiber , we achieved a lasing output with uniform output power and continuously tunable wavelength in the range from 1535 to 1530nm (i. e. 35nm band width). The maximum output power fluctuation is no more than 0.5 dBm , the average power is about 2 W , pulse repetition rate is greater than 10 GHz and pulse width is less than 30 ps in the whole tunable wavelength band width . Furthermore , the laser has advantages of good performance , simple all-fiber structure and convenient operation .

Keywords : fiber laser , clad pumped , short pulse , high repetition rate

PACC : 4260 , 4281 , 4255N

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60407005 and 60137010) , the State Key Development Programme for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314906) , and the National High Technology Development Programme of China (Grant No. 2003AA312100) .

[†] E-mail : ygliu@nankai.edu.cn