

MOPA Structured Tm-doped Fiber Amplifier

Yu-li Song¹, Ling-cong Zhang², Yi Xu¹, De-bo Huang¹, Jun-qing Zhao¹, Chun-yu Guo¹, Ge-guo Du^{1#}

1. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of Guangdong Higher Education Institutes, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, P. R. China

2. Graduated from Shenzhen University in July 2013 and organization is unknown in present.

#Email: dugegao@szu.edu.cn

Abstract

Tm-doped fiber amplifier in MOPA structure has been studied in details in this paper; specifically, the laser in MOPA takes the primary amplification, of which the gain fiber in seed part is a domestic made Tm-doped double-clad silica fiber with the length 1.7 m, while that in amplification is the same kind with length 1.9 m. The pump coupled efficiency of seed laser has been estimated, along with the analysis on the characteristics of the seed laser's pulse as well as the reason of low efficiency in seed part, obtaining high quality laser with pulse in minimum width 167 ns; in addition, in amplification, comparison of the average power output, magnification and power conversion efficiency has been made in the condition of the output end with or without the dichroic mirror being HT(95%) at 2 μm and HR at 790 nm; leading to the pulse laser with maximum average power output 5.27 W under the positive condition, that is, the output end with the dichroic mirror being HT(95%) at 2 μm and HR at 790 nm.

Keywords: Tm-doped Fiber Amplifier; Seed Source; Amplified Part; MOPA

基于 MOPA 结构的掺铥光纤放大器*

宋玉立¹, 张灵聪², 徐意¹, 黄德波¹, 赵俊清¹, 郭春雨¹, 杜戈果¹

深圳市激光工程重点实验室 先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室 深圳大学电子科学与技术学院, 深圳 518060

2. 已于 2013 年 7 月从深圳大学毕业, 目前供职单位不详

摘要: 对基于 MOPA 结构的掺铥光纤放大器进行了较全面的实验研究。激光器采用主振荡放大(MOPA)方式, 采用一级放大结构, 种子源增益光纤为一根长度 1.7m 的国产掺铥双包层石英光纤, 放大级增益光纤为长度 1.9m 的同类型光纤。在种子源部分, 测量了种子激光器的泵浦耦合效率, 分析了种子脉冲的输出特性, 以及造成种子激光器效率较低的原因, 得到最小脉冲宽度 167ns 的较高质量的种子信号光。在放大级部分, 对比分析了在放大级的输出端有无 2 μm 高透(95%透过率)、790nm 高反二色镜情况下的输出平均功率、放大倍数和泵浦转换效率。最终, 在放大级的输出端加上 2 μm 高透(95%透过率)、790nm 高反二色镜情况下, 得到最大输出平均功率 5.27W 的 2 μm 脉冲激光。

关键词: 掺铥光纤放大器; 种子源; 放大级; 主振荡功率放大

引言

近年来, 光纤激光器以其光束质量好、转换效率高、稳定性好、体积小等独特优势得到了迅猛发展。随着高功率半导体激光器泵浦技术和双包层光纤制作工艺的发展, 单根光纤的输出输出功率有了很大提高^[1-4]。但由于单根光纤所承受的功率有限, 及一些非线性效应的影响, 高功率的光纤激光器往往采用多级放大, 而获得大功率的脉冲光纤激光输出, 如今采用的主要有两种方式: 一种是直接采用快速调制电源驱动泵浦源,

*基金资助: 受国家自然科学基金 (No. 61308049) 及 (No. 61275144) 和深圳市科技研发基金基础研究计 (1104300029783024) 支持资助。

以此作为种子源，然后逐级放大；另一种方式是先在一个光纤激光器中放入声光调制器，得到一个脉冲光纤激光器，获得一个高光束质量，较小功率的脉冲种子激光，再进行逐级放大，这种方式称之为主振荡功率放大（Master Oscillator Power Amplifier, MOPA）。由于前者对电源及器件的要求较高，因此目前商用的一些大功率的脉冲光纤激光器，如 IPG 等，大多采用 MOPA 方式^[5-8]。由于 $2\mu\text{m}$ 波段的激光属于人眼安全光，且在激光雷达、激光测距、工业加工以及医学等领域有着广泛的应用，所以 $2\mu\text{m}$ 掺铥光纤激光器目前引起了科研人员的广泛关注^[9,10,11]。本文将对 MOPA 结构的掺铥光纤放大器进行研究，采用一级放大，对比信号光的功率变化对放大器输出功率及转换效率的影响，研究放大器对信号光特性的影响等。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示

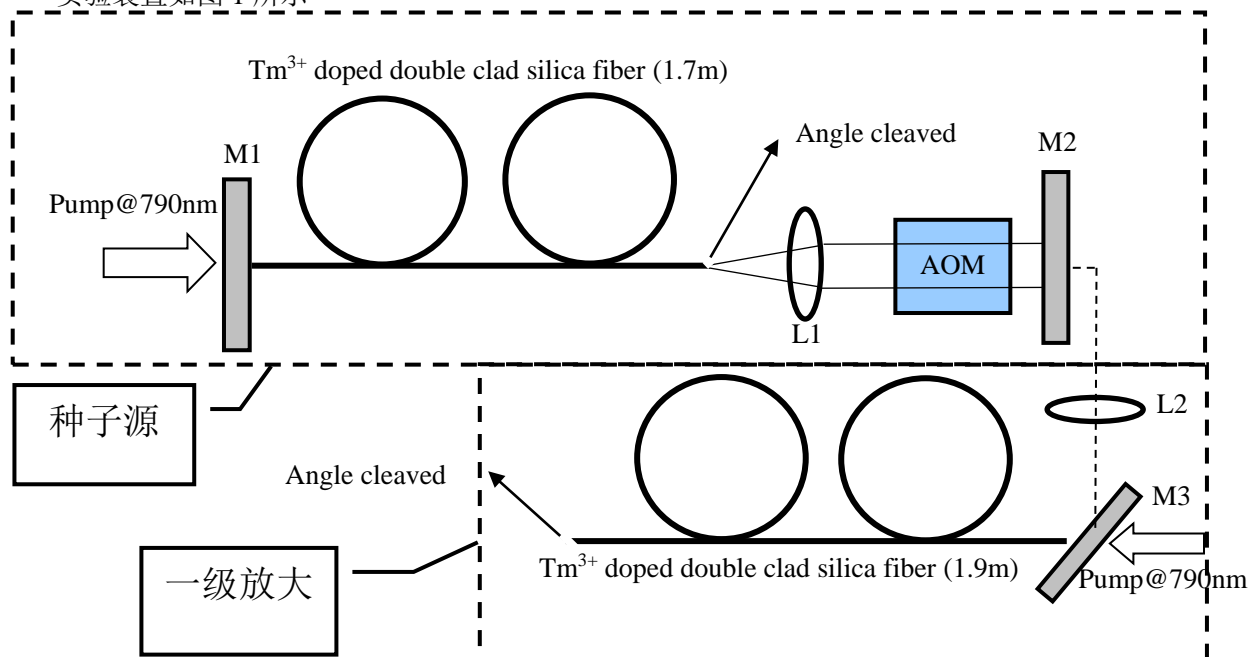


图 1 实验装置图

主振荡部分(MO): 所采用的泵浦源是中心波长为 790nm 的半导体激光二极管，最大工作电流为 6.5A，提供的最大输出功率为 17.5W。泵浦光通过一个 1:1 的双透镜耦合系统进行聚焦，然后再经过一个对 790 nm 高透、 $2\mu\text{m}$ 高反的二色镜 M1 耦合到光纤中，此时光斑直径为 $400\mu\text{m}$ 。所用的增益光纤为一根长度 1.7m 的国产掺铥双包层石英光纤，其具体参数如下：纤芯截面为六角形，直径为 $27.5\mu\text{m}$ ，数值孔径(NA)为 0.2，对 790 nm 信号光的吸收为 5 dB/m。内包层直径为 $400\mu\text{m}$ ，NA 值为 0.46。在泵浦光输入端，光纤端面用研磨机磨平，并且贴近二色镜 M1。光纤另一端则磨成 8° 角以抑制光纤端面的菲涅尔反射。M2 为激光输出二色镜，其表面所镀膜层为 790nm 高反， $2\mu\text{m}$ 透过率为 65%。焦距为 5mm 的透镜将光纤的出射光进行准直，并使其经 M2 反射后能沿原路返回，进入光纤，其表面没有经过镀膜。声光调制器(acoustic-optical modulator, AOM)是 Gooch&Housego 提供的 I-QS027-5S4V5-x5-ST1，工作频率为 27.12MHz，两表面均镀有 $2\mu\text{m}$ 高透膜，透过率大于 99.6%，重复频率为 0.1-50 kHz 可调，置于 5mm 透镜和输出镜之间。最后 $2\mu\text{m}$ 调 Q 种子脉冲通过 M2 输出二色镜输出腔外。

一级放大(PA): 从主振荡器出射的调 Q 种子脉冲用一个焦距为 15mm 的透镜聚焦，再经一个 $45^\circ 2\mu\text{m}$ 高反，790 nm 高透的二色镜耦合进入一级放大的增益光纤中。一级放大增益光纤与种子激光器的增益光纤一样，只是长度为 1.9m。同样，在泵浦光输入端，光纤端面用研磨机磨平，另一端则磨成 8° 角以抑制光纤端面的菲涅尔反射。放大器的泵浦源中心波长为 790nm 的半导体激光二极管，最大工作电流为 36A，提供的最大输出功率为 24W。泵浦光通过一个 1:0.8 的双透镜耦合系统耦合入增益光纤中，其光斑直径为 $320\mu\text{m}$ 。

2 实验结果及讨论

2.1 种子源

首先测量了种子激光器的入纤泵浦功率，如图 2 所示。

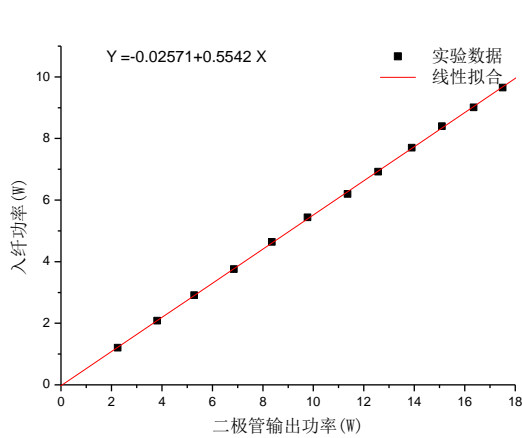


图 2 入纤泵浦功率与二极管输出功率的关系

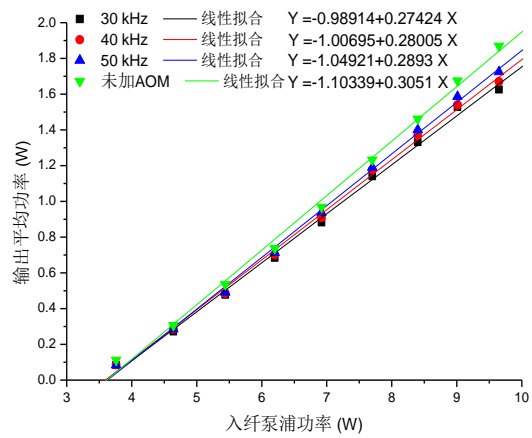


图 3 输出平均功率与入纤泵浦功率的关系

图 2 所示种子激光器的泵浦耦合效率为 55%，当二极管最大输出功率为 17.5W 时，真正进入光纤的最大功率只有 9.65W。实验数据显示出很好的线性关系，可以说明低耦合效率主要是由耦合系统的损耗所造成。原因主要有：1、二极管的输出光斑模式较差，可以观察到输出光斑中出现几个明显的暗环，可能是二极管内有芯片已经损坏。2、双透镜耦合系统中的透镜没有针对 790nm 波长镀增透膜。3、经过耦合系统聚焦的光斑大小虽与增益光纤的内包层直径一致，但内包层为六角形。

图 3 所示为激光器在 65% 输出透过时各调制频率下的输出平均功率随入纤泵浦功率变化曲线。从图中可以看出，激光器的阈值泵浦功率为 3.76W。在各个调制频率下输出的平均功率与入纤的泵浦功率保持着很好的线性关系，并没有出现饱和的迹象，可以预计，如果泵浦功率继续增大，输出的平均功率也将线性增大。由于声光调制器(AOM)本身具有一定的插入损耗，所以加入声光调制器(AOM)后激光器的输出平均功率和斜率效率都有一定的下降。当调制频率增大时，在同一泵浦入纤功率下的输出平均功率也增大，当入纤功率达到 9.65W、调制频率为 50kHz 时，得到 1.725W 的最大输出平均功率，光光转换效率为 17.9%，激光器的斜率效率为 29%。效率较低的原因是激光谐振腔内的 5mm 透镜 L1 没有进行镀膜处理，造成较大的腔内损耗。

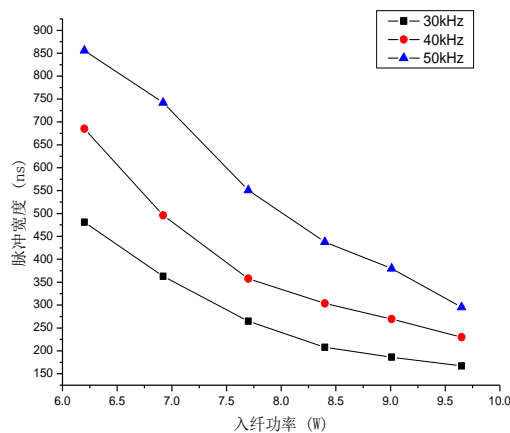


图 4 脉冲宽度随入纤泵浦功率的变化关系

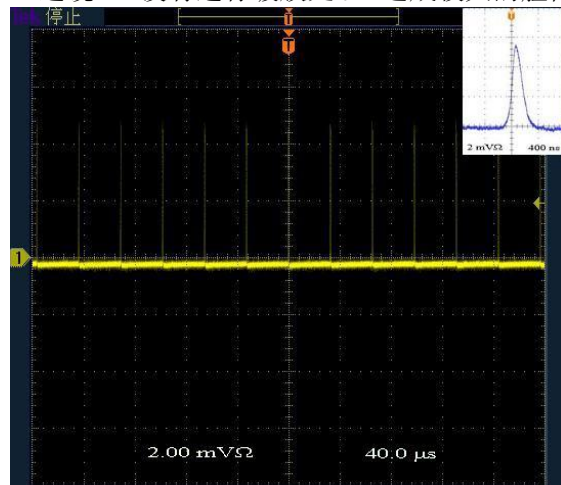


图 5 信号光在 30kHz 时的脉冲序列 (小图: 167ns 单脉冲波形)

图 4 是激光器输出的脉冲宽度随调制频率和入纤泵浦功率的变化曲线。由图可知，脉冲宽度随着泵浦入

纤功率的增大而减小。从图中的趋势可以看出，在入纤泵浦功率较小时，脉冲宽度下降较为明显，随着入纤功率的增大，脉冲宽度变化越来越小，可以预计，在到达某一入纤功率后，脉冲宽度将不再变化。而在同一泵浦入纤功率下，调制频率越大，脉冲宽度越小。在调制频率 30kHz、泵浦入纤功率 9.65W 时，得到了最小脉冲宽度 167ns 的种子脉冲输出。

图 5 为激光器在调制频率为 30kHz 时的脉冲序列，图中小图为单脉冲波形，其脉冲宽度为 167ns。

2.2 放大级

由种子激光器出射的 2 μm 激光经过一个 15mm 的聚焦透镜 L2 和一个 45° 2 μm 高反，790 nm 高透的二色镜 M3 耦合进入一级放大的增益光纤中，同时由泵浦源提供的 790nm 泵浦光经一个 1:0.8 的双透镜耦合系统耦合入增益光纤中，其光斑直径为 320 μm 。

首先，测量了放大级的泵浦入纤功率，如图 6 所示。由于要考虑到种子激光的耦合以及镜架等机械件对泵浦光遮挡造成额外损耗，尽管聚焦的泵浦光斑直径较小，耦合效率还是比种子源的泵浦耦合效率要小，只有约 52%。

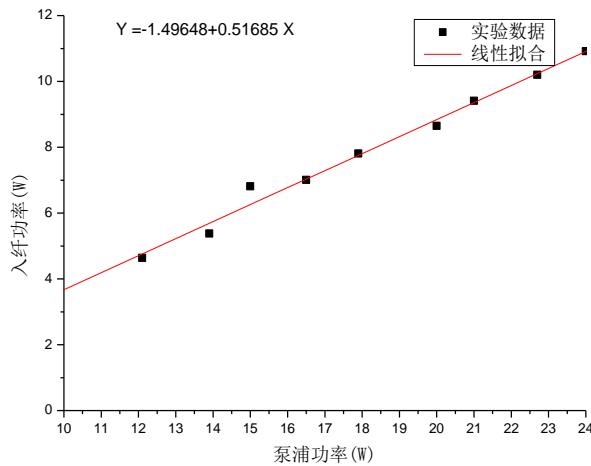


图 6 入纤功率随泵浦功率的变化关系

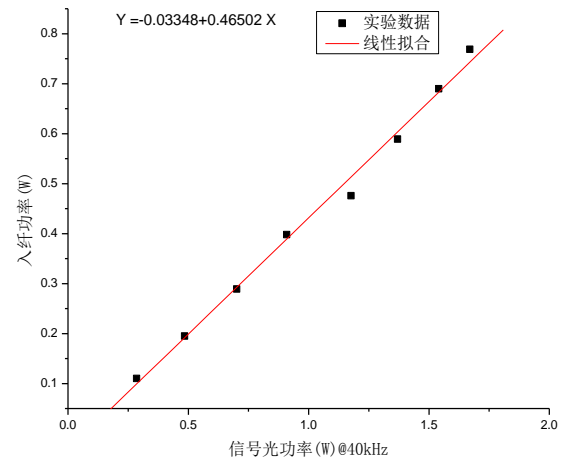


图 7 入纤的信号光功率

图 7 是重复频率为 40kHz 时，种子源输出的 2 μm 脉冲激光信号耦合入放大级的功率曲线。可以看到，耦合效率只有 46.5%，原因主要在于用于聚焦的 15mm 透镜 L2 没有针对 2 μm 波段镀增透膜，一部分信号光被损耗掉，并没有耦合入光纤中。

由于放大级的泵浦光并没有被增益光纤所完全吸收，为了防止剩余泵浦光对测量的 2 μm 激光输出功率造成影响，在放大级的输出端放置了一个 45° 2 μm 高反，790 nm 高透的二色镜以滤除剩余的泵浦光（图 1 装置中未画出，实验中采用做对比实验）。

图 8 是在各个信号光功率下放大级的输出平均功率与泵浦入纤功率的变化曲线。从图中可以看出，输出的平均功率随入纤功率的增大而增大，而且没有出现饱和的现象，如果可以提高泵浦的入纤功率或者是增大泵浦的耦合效率，激光器的输出功率将进一步提高。另外，激光器的输出功率随着输入信号功率的增大，其输出的功率也是增大的，而且信号光的功率变化比泵浦光功率的变化对最终的输出功率影响更大。如在同一泵浦入纤功率 10.92W 下，信号光的功率从 0.69W 增大到 0.769W 时，最终的输出功率从 4.1W 增加到 4.43W；而在信号光功率固定在 0.769W，泵浦入纤功率从 10.2W 增加到 10.92W 时，输出的平均功率从 4.16W 增加到 4.43W。因此，提高信号光的耦合效率对提高激光器的输出功率更为直接，同时也可以避免因提高泵浦功率而产生一些不必要的非线性效应。

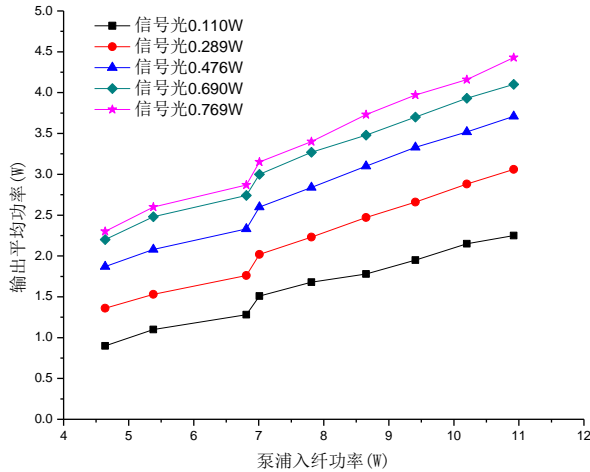


图 8 在不同信号光功率下放大器输出平均功率随入纤泵浦功率的变化关系

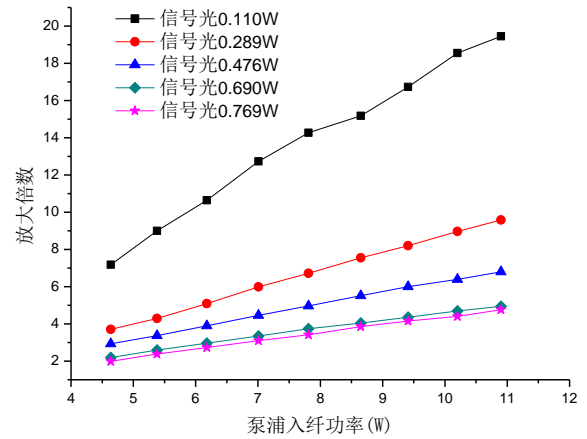


图 9 放大倍数与入纤泵浦功率的关系

放大倍数是光纤放大器的一个评价指标，它定义为：

$$\beta = \frac{P_o - P_{ASE}}{P_s} \quad (1)$$

其中 P_o 为放大器的输出功率， P_s 为输入的信号光功率， P_{ASE} 为自发辐射功率，在此忽略不计。图 9 就是在不同的信号光功率下激光器的放大倍数随入纤泵浦功率的变化曲线。从图中可以看出，激光器的放大倍数随着泵浦入纤功率的增大而增大，它们之间的关系接近线性关系。另外，信号较小时所获得的放大倍数较信号大时更大，如前面所论述的，信号光的功率变化比泵浦光功率的变化对最终的输出功率影响更大，因此造成了放大倍数随着信号光的功率增大而减小。还可以看到一个趋势，就是随着信号光的功率增大，放大倍数的曲线斜率也开始减小，这说明了放大器的放大功率有饱和的这一趋势，这也在一定程度上符合了自然规律，放大倍数不可能无限地增长。图中最大的放大倍数为 19.5 倍，出现在信号光功率 0.11W，泵浦入纤功率 10.9W；最小的放大倍数为 2 倍，出现在信号光功率 0.769W，泵浦入纤功率 4.64W。

光纤放大器的另一个非常重要的评价指标就是泵浦转换效率(power conversion efficiency, PCE)，其定义为^[12]：

$$\eta = \frac{P_o - P_s}{P_p} \quad (2)$$

其中 P_o 为放大器的输出功率， P_s 为输入的信号光功率， P_p 为放大级的泵浦入纤功率。由于高功率的激光器价格昂贵，所以较高的 PCE 就意味着较高的效率，同时也意味着成本的降低。

图 10 是在不同的信号光功率下激光器的 PCE 随入纤泵浦功率的变化曲线。从图中可以看出，当信号光功率较小时，放大器的 PCE 值保持在一个比较稳定的范围内，单纯提高泵浦入纤功率并不能提高转换效率，更多的泵浦光没有被光纤利用就已经离开了光纤。

在同一入纤泵浦功率下，信号光的功率越大 PCE 也越大。这是由于信号光能量越大，对上能级储能的提取能力越大。但是可以看出在脉冲作用时间内，反转粒子数并没有完全被消耗完，其直接结果就是 PCE 值较低。信号光是脉冲光，泵浦是连续泵浦，在脉冲作用时间内，泵浦功率越大，所积累的反转粒子数越多，所激发的受激辐射就越强。而随着入纤泵浦功率的增大，剩余反转粒子数增加，而信号光在光纤内的作用距离不变，脉冲作用时间也不变，所以 PCE 值随着入纤泵浦功率的增加而减小，造成泵浦光的浪费。最大的 PCE 值为 47.2%，出现在信号光功率为 0.769W，入纤泵浦功率为 4.64W；而最小的 PCE 值为 17.0%，此时的信号光功率为 0.11W，入纤泵浦功率为 4.64W。

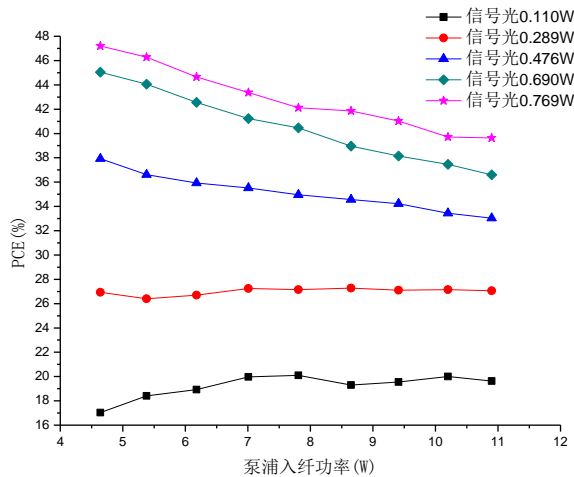


图 10 PCE 值与入纤泵浦功率的关系

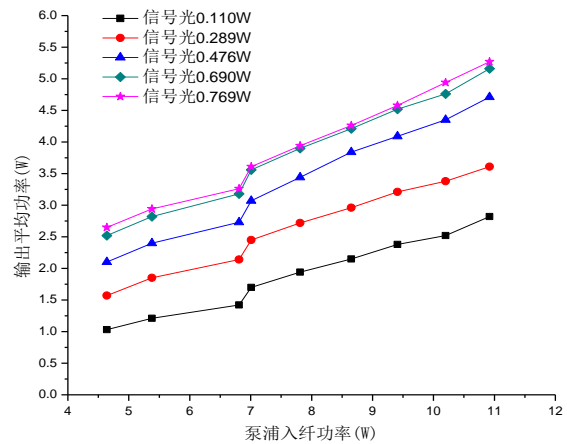


图 11 输出平均功率与入纤泵浦功率的关系

为了利用剩余的泵浦光，提高放大器的整体效率，应在在放大器的输出端加上一个 $2\ \mu\text{m}$ 高透、790nm 高反的二色镜，但考虑到实验室的现有条件只是用 $2\ \mu\text{m}$ 高透(95%透过率)、790nm 高反的二色镜加以代替。图 11 所示是在各个信号光功率下放大级的输出平均功率与泵浦入纤功率的变化曲线。从图中可以看出，最大输出平均功率仍然出现在信号光功率为 0.769W，入纤泵浦功率为 10.92W 时，为 5.27W。与图 8 所示的最大输出平均功率 4.43W 相比增加了将近 19%。与图 8 相比，在各个信号光功率下，输出平均功率的曲线都有一定程度的抬高，也就是说在同样的条件下在放大器的输出端加上一个 $2\ \mu\text{m}$ (95%)高透、790nm 高反的二色镜其最终的输出功率有所提高。

图 12 是在不同的信号光功率下激光器的放大倍数随入纤泵浦功率的变化曲线。可以看出放大倍数依然是呈现出增大的趋势，并没有出现饱和现象，而且表现出在信号光功率较小时，放大倍数反而比较大，这与前面的结果是一致的。随着泵浦入纤功率的增加，放大倍数也几乎是线性增加。最大的放大倍数是 24.6，出现在信号光功率 0.11W，泵浦入纤功率 10.9W。与图 9 所示的最大放大倍数 19.5 相比较，增加了 26%，而最小的放大倍数也提高了 20%。总体上来看，在相同的条件下，加上二色镜得到的结果比没有加的有了很大的提高，这说明放大器的效率得到一定程度的提高。

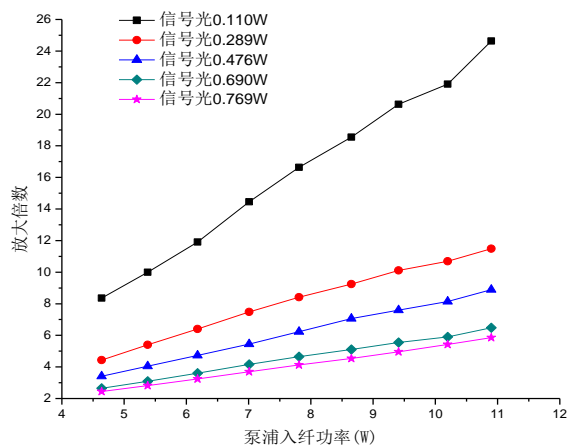


图 12 输出端加二色镜时放大倍数与入纤泵浦功率的关系

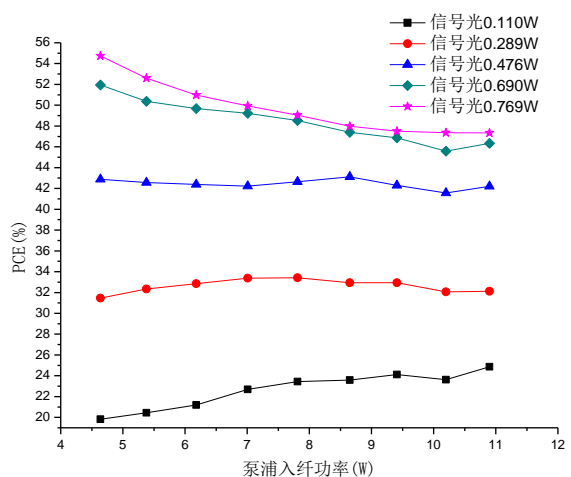


图 13 输出端加二色镜时 PCE 值与入纤泵浦功率的关系

图 13 是在不同的信号光功率下激光器的 PCE 随入纤泵浦功率的变化曲线。可以看出，在信号光 0.11W 时，放大器的 PCE 值呈现出缓慢上升；在信号光为 0.289W 和 0.476W 时，PCE 值变化较小并保持在一个稳

定的范围内；而在信号光为 0.69W 和 0.769W 时，PCE 值呈现出缓慢下降并有饱和的趋势。与图 10 相比较，呈现的主要变化有：1、PCE 值有了很大的提升。最大的 PCE 值达到了 54.7%，比原先提高了 16%，最小的 PCE 值为 19.8%，也提高了 16%；总体上来看，各个 PCE 曲线也有所抬高。因此，可以说加上二色镜提高了泵浦光的利用效率，放大器的效率也得到提高。2、信号光 0.476W 时的 PCE 曲线由原来的下降变得平坦。也就是说，在没有二色镜时在较小的泵浦入纤功率下放大器的转换效率保持在一个较高的水平，随着入纤功率的增加，转换效率逐渐下降；加上二色镜之后，不管入纤的泵浦功率高低，放大器的转换效率始终保持稳定。这是由于二色镜对 790nm 波长高反，并且有 5% 的反馈，这就相当于增加了信号光、泵浦光与光纤的作用长度。因此，放大器的增益光纤存在一个最佳长度，而且这个最佳长度在不同的信号光功率下是不一样的。可以预计，如果增加光纤的长度，信号光 0.69W 和 0.769W 的两条 PCE 曲线将变得平坦，泵浦光的利用效率将进一步提高，放大器的效率也将得到提高。

最后，还测量了放大器输出脉冲的脉冲宽度和重复频率。与信号光相比较，最终输出脉冲的脉冲宽度和重复频率并没有很大的变化。这说明了，放大器对信号光的脉冲宽度和重复频率并没有改变，只是将其功率进行了放大。图 14 是在信号光重复频率为 30kHz，脉冲宽度为 167ns 时，测得的放大器输出激光重复频率为 30kHz，脉冲宽度为 172ns。

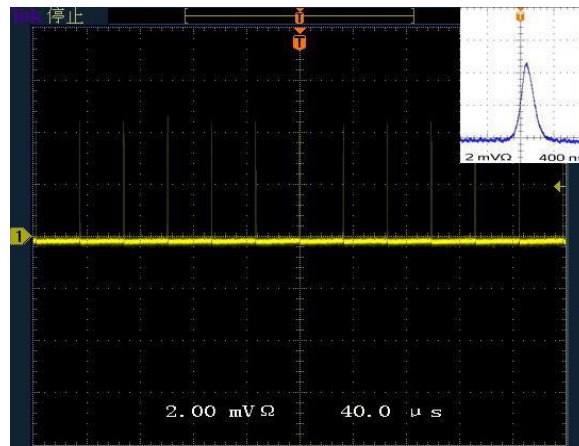


图 14 放大器输出 30kHz 的脉冲序列（小图：172ns 单脉冲波形）

3 总结

本文对 2 μm 掺铥光纤放大器进行了实验研究。放大器采用主振荡放大(MOPA)方式，采用一级放大结构，种子源增益光纤为一根长度 1.7 米的国产掺铥双包层石英光纤，放大级增益光纤为长度 1.9 米同类型光纤。实验中分析了：(1) 种子源的泵浦入纤功率，得到整体的耦合效率为 55%；(2) 种子源在各个调制频率下的信号光输出功率，脉冲宽度，得到最小为 167ns 的高质量的种子信号光；(3) 放大级泵浦光耦合效率 52%；(4) 放大级信号光的耦合效率 46.5%；(5) 对比分析了在放大级的输出端有无 2 μm (95%)高透、790nm 高反二色镜情况下的输出平均功率、放大倍数和泵浦转换效率。

最终，在放大级的输出端加上 2 μm (95%)高透、790nm 高反二色镜情况下，得到最大输出平均功率 5.27W 的 2 μm 脉冲激光。

通过分析实验数据，可以得到以下结论：(1) 谐振腔内的各个元件的插入损耗对于激光器的效率有着至关重要的影响，因此，要得到高效的激光输出，各个元件的表面必须针对特定波长镀膜。另外，泵浦光斑的大小也要与光纤纤芯的大小要匹配。(2) 在放大级，信号光的功率变化比泵浦光功率的变化对最终的输出功率影响更大，因此要着重提高信号光的入纤效率。(3) 信号较小时所获得的放大倍数较在信号大时更大。(4) 单纯提高放大级的泵浦功率并不一定提高输出的功率，最根本的是提高放大器的泵浦转换效率。(5) 放大器的增益光纤存在一个最佳长度，而且这个最佳长度在不同的信号光功率下是不一样的。在这个最佳长度下放大器的 PCE 值会保持在一个比较高的稳定水平，不随泵浦功率的变化而改变。(6) 放大器并不改变信号光的

一些特定参数，如重复频率、脉冲宽度等，只是对它的功率进行放大。

REFERENCES

- [1] Fabian Stutzki, Florian Jansen, Cesar Jauregui, et al.. “2.4mJ, 33W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality.” Optics Letters, January 15, 2013.38(2):97-99
- [2] P. Kadwani, N. Modsching, R. Andrew Sims, et al. “Q-switched thulium-doped photonic crystal fiber laser.” Optics Letters, May 15, 2012.37(10):1664-1666
- [3] Yulong Tang, Lin Xu, Yi Yang, et al. “High-power gain-switched Tm³⁺ -doped fiber laser.” Optics Express, October 25, 2010.18(22):22964-22972
- [4] Christian Gaida, Pankaj Kadwani, Lasse Leick, et al. “CW-lasing and amplification in Tm³⁺ -doped photonic crystal fiber rod.” Optics Letters, November 1, 2012.37(21):4513-4515
- [5] Jianfeng Wu, Zhidong, Jie Zong, et al. “Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser.” Optics Letters, 2007, 32(6):638-640
- [6] M. Meleshkevich, N. Platonov, D. Gapontsev, et al. “415 W Single-Mode CW thulium fiber laser in all-fiber format.” CLEO/Europe 2007, post-deadline paper CP2-3-Thu.
- [7] Thomas Ehrenreich, Ryan Leveille, Imtiaz Majid, et al. “1KW, all-glass Tm: fiber laser.” Proceeding of SPIE, 2010, 7580:16
- [8] Jihong Geng, Qing Wang, Zack Jiang, et al. “Kilowatt-peak-power, single-frequency, pulsed fiber laser near 2μm.” Optics Letters, 2011, 36(12):2293-2295
- [9] Lingcong Zhang, Geguo Du, Junqing Zhao, et al. “Adjustable pulse width thulium-doped Q-switched double-clad fiber laser.” Journal of Applied Optics, 2013, 36(2):363-367
- [10] Geguo Du, Hui Hu, Peiguang Yan, et al. “Experiment study on tunable thulium-doped double-cladding fiber laser.” Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2011, 28(2):105-108
- [11] Junqing Zhao, Geguo Du, Lingcong Zhang, et al. “Experiment studies on double-end pumped thulium-doped fiber laser.” Applied Laser, 2011, 31(4):332-337
- [12] Lei Zhou, Jiping Ning, Weiqing Zhang, et al. “All-fiber high power Er/Yb co-doped double clad fiber amplifier.” Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7):1880-1885

【作者简介】



¹ 宋玉立（1990-），性别女，民族汉，学位硕士在读，职称硕士研究生，研究方向为掺铥光纤激光器，学习经历：2008-2012 年本科就读于深圳大学电子科学与技术学院光信息专业，2012 年至今深圳大学光学专业研究生在读。

Email:songyuli@email.szu.edu.cn