

203 W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器

刘江 刘晨 师红星 王璞

203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser

Liu Jiang Liu Chen Shi Hong-Xing Wang Pu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 194208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.194208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器

342W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser

物理学报.2016, 65(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194209>

基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量

Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating

物理学报.2016, 65(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104203>

超长腔碳纳米管锁模多波长掺镱光纤激光器

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

物理学报.2015, 64(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204205>

石墨烯被动锁模全正色散掺镱光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报.2015, 64(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194205>

基于 10 m 光子晶体光纤的放大自相似锁模振荡器研究

Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber

物理学报.2015, 64(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184210>

## 203 W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器\*

刘江 刘晨 师红星 王璞†

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

(2016年4月26日收到; 2016年7月14日收到修改稿)

利用光纤布拉格光栅作为光谱滤波器来控制锁模掺铥光纤激光器的光谱形状和脉冲宽度, 以及结合纤芯抽运高掺杂双包层掺铥光纤技术, 实现了  $2\ \mu\text{m}$  波段重复频率为 611.5 MHz 的皮秒脉冲激光输出. 利用该高重复频率皮秒激光作为种子源, 结合主振荡功率放大技术, 研制出了百瓦量级全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光放大系统, 得到了平均功率为 203 W 的线偏振皮秒脉冲激光输出, 偏振消光比  $>15\ \text{dB}$ , 激光脉冲宽度为 15 ps, 相应的激光峰值功率为 22 kW. 该结果为目前国际上  $2\ \mu\text{m}$  波段全光纤结构超短脉冲激光器所产生的最高平均输出功率, 为下一步  $2\text{--}5\ \mu\text{m}$  波段高功率中红外激光的产生提供了可靠的抽运源.

**关键词:** 光纤激光器, 光纤放大器, 被动锁模, 超短脉冲

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Fc, 42.65.Re

**DOI:** 10.7498/aps.65.194208

## 1 引言

掺铥光纤具有较宽的增益带宽, 可实现  $1.7\text{--}2.1\ \mu\text{m}$  波段范围内的激光输出<sup>[1]</sup>. 该波段的掺铥光纤激光器可广泛应用于激光医疗、材料加工、光谱成像、激光雷达、中红外光学频率梳等众多领域<sup>[2-5]</sup>. 与常规  $1\ \mu\text{m}$  波段掺铥光纤激光器相比, 透明玻璃、塑料聚合物等非金属材料对  $2\ \mu\text{m}$  波段的激光具有较强的吸收,  $2\ \mu\text{m}$  波段掺铥光纤激光器用于非金属材料加工具有近红外波段激光器所无可替代的重要作用<sup>[4]</sup>.

在生物医疗领域, 水分子在  $2\ \mu\text{m}$  波段附近具有很强的吸收峰, 高功率掺铥光纤激光器可用于新一代激光手术刀<sup>[5]</sup>, 使血液迅速凝结, 具有手术创面小、止血性好等优点. 此外,  $2\ \mu\text{m}$  波段短脉冲掺铥光纤激光器可作为基频激光, 经过周期性极化铌酸锂以及三硼酸锂晶体四倍频之后, 将可以得到波长为 465 nm 的蓝光激光, 该波段的蓝光激光可作

为绿色荧光蛋白标记所用的光源<sup>[6]</sup>. 在科学研究领域,  $2\ \mu\text{m}$  波段高峰值功率超短脉冲掺铥光纤激光器可作为抽运光源用于激发惰性气体产生高次谐波, 相对于近红外激光抽运而言, 将可以实现更短的阿秒激光脉冲输出<sup>[7]</sup>. 此外,  $2\ \mu\text{m}$  波段高峰值功率短脉冲掺铥光纤激光器也为首选的抽运源, 用于  $2\text{--}5\ \mu\text{m}$  波段高功率中红外激光的产生<sup>[8-10]</sup>.

目前实现  $2\ \mu\text{m}$  波段掺铥超短脉冲激光输出采用的技术手段主要包括主动锁模、非线性偏振演化 (nonlinear polarization evolution, NPE) 锁模、可饱和吸收体锁模、非线性放大环镜 (nonlinear amplifier loop mirror, NALM) 锁模等, 以前我们已对这些锁模方式进行过详细叙述<sup>[11]</sup>. 被动锁模的可饱和吸收材料主要包括半导体 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)、碳纳米管 (carbon nanotubes, CNT)、石墨烯 (graphene)、氧化石墨烯 (graphene oxide)、以及拓扑绝缘体 ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) 等. 通常为了实现高平均功率、高峰值功率激光脉冲

\* 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (批准号: 61527822)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61235010)、国家自然科学基金青年项目 (批准号: 61505004)、中国博士后科学基金特别资助项目 (批准号: 2016T90019)、中国博士后科学基金面上资助项目 (批准号: 2015M570019)、北京市博士后工作经费资助项目 (批准号: 2015ZZ-03) 和北京市教委科技计划一般项目 (批准号: KM201610005028) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

输出, 主要采用主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构来对低功率超短脉冲激光种子源进行功率和能量放大.

最近几年, 2  $\mu\text{m}$  波段高功率超短脉冲掺铥光纤放大器得到了迅速发展. 2010年, 德国汉诺威激光技术中心利用啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)技术得到了平均功率为5.7 W的飞秒脉冲掺铥光纤放大器<sup>[12]</sup>. 激光种子源采用大模场面积掺铥光纤放大之后, 相应的单脉冲能量达到了151 nJ, 脉冲在放大之后压缩到了258 fs. 2012年, 本课题组报道了高功率全光纤结构皮秒脉冲掺铥光纤主振荡功率放大器<sup>[13]</sup>, 最大平均输出功率为20.7 W, 功率放大器斜率效率为42%, 激光脉冲宽度为18 ps, 中心波长为1962.7 nm. 2012年, 美国中佛罗里达大学采用啁啾脉冲放大技术实现了脉冲能量为1  $\mu\text{J}$ 的飞秒脉冲掺铥光纤放大器<sup>[14]</sup>. 种子源的重复频率为60 MHz, 脉冲宽度为150 fs, 掺铥光纤功率放大器采用了25/400  $\mu\text{m}$ 大模场面积掺铥光纤, 在进行功率放大器之前, 种子源被啁啾布拉格光栅展宽到了160 ps, 激光重复频率也降到了100 kHz. 最后经过放大的激光脉冲利用光栅对压缩到了300 fs, 相应的激光峰值功率高达3 MW. 2013年, 美国PolarOnyx公司报道了平均功率为36 W的飞秒脉冲掺铥光纤放大器<sup>[15]</sup>, 种子源为SESAM锁模的皮秒掺铥光纤激光器, 重复频率为30.8 MHz, 脉冲宽度为2.9 ps. 经过多级掺铥光纤放大器以及光栅对压缩之后, 放大器平均输出功率达到了36 W, 脉冲宽度为790 fs. 2013年, 本课题组首次在国际上研制出了百瓦量级全光纤结构皮秒脉冲掺铥光纤激光器<sup>[16]</sup>, 最高平均输出功率为120.4 W, 脉冲宽度为16 ps, 中心波长为1965 nm. 2014年, 德国耶拿大学采用空间抽运耦合方式, 以及大模场面积掺铥光子晶体光纤作为增益介质<sup>[17]</sup>, 有效抑制了超短脉冲激光放大过程中的非线性效应, 实现了平均功率为152 W的激光脉冲输出, 压缩之后的脉冲宽度为690 fs. 最近, 该课题组利用啁啾脉冲放大和非线性脉冲压缩技术<sup>[18]</sup>, 采用空芯Kagome光子晶体光纤作为脉冲压缩器, 实现了平均功率为2 W, 峰值功率达200 MW的飞秒脉冲输出, 压缩之后的脉冲宽度为70 fs. 此外, 该课题组研究人员也采用14 cm长、纤芯直径为108  $\mu\text{m}$ 的实芯光纤作为非线性脉冲压缩器<sup>[19]</sup>,

实现了脉冲宽度为24 fs的激光脉冲输出, 平均输出功率为24.6 W, 峰值功率为24 MW. 然而, 上述的高峰值功率掺铥光纤放大器都采用了空间抽运耦合方式和大模场面积光子晶体光纤作为增益介质<sup>[17-19]</sup>, 因此激光器更加容易受到温度、压力等环境波动的影响.

本文采用光纤布拉格光栅作为光谱滤波器来控制被动锁模掺铥光纤激光器的光谱形状和脉冲宽度, 实现了2  $\mu\text{m}$ 波段高重复频率皮秒脉冲激光输出. 利用该高重复频率皮秒脉冲激光作为种子源, 搭建了百瓦量级全光纤全保偏结构皮秒脉冲掺铥光纤激光放大系统, 最高平均输出功率为203 W, 偏振消光比 > 15 dB, 脉冲宽度为15 ps, 平均输出功率未能进一步提高仅受限于最大抽运功率.

## 2 实验装置与结果

如图1所示, 高功率全光纤全保偏结构皮秒脉冲掺铥光纤激光器由SESAM被动锁模皮秒脉冲掺铥光纤振荡器和三级全保偏结构掺铥光纤放大器组成. 保偏掺铥光纤振荡器与我们以前报道的结构类似<sup>[13,16]</sup>, 为了提高重复频率采用了线型腔结构设计, 而没有使用环形腔结构<sup>[20-22]</sup>. 实验中, 1550 nm连续掺铥光纤激光器作为抽运源, 最大平均输出功率为1 W; SESAM的调制深度为8%, 非饱和吸收损耗为5%, 恢复时间为500 fs, 饱和通量为20  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ; 保偏双包层掺铥光纤(Nufern PM-TDF-10P/130-HE)的长度仅为0.12 m, 纤芯直径为10.0  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为0.15, 内包层直径为130  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为0.46. 保偏掺铥光纤的一端熔接有低反射率的保偏光纤布拉格光栅(FBG)作为激光脉冲输出端, FBG工作的中心波长为1984.6 nm, 反射率约为30%, 3 dB光谱带宽为3 nm. 快轴截止慢轴通光的保偏光学隔离器位于掺铥光纤振荡器与第一级保偏掺铥光纤预放大器之间, 用于隔离任何反向传输的信号光. 第一级保偏掺铥光纤预放大器使用了与掺铥光纤振荡器相同型号的掺杂光纤, 其长度为3 m, 该增益光纤在793 nm处包层抽运吸收率约为4.7 dB/m. 中心波长为793 nm的多模半导体激光器作为激光抽运源, 单个最大平均输出功率为12 W.

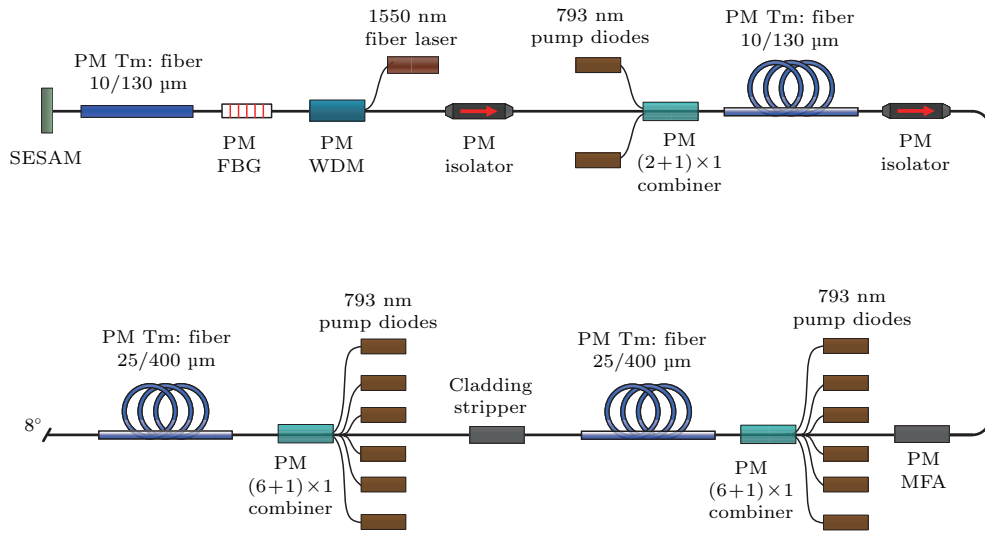


图1 (网刊彩色) 高功率全光纤全保偏结构皮秒脉冲掺铥光纤激光器实验装置示意图 其中: SESAM为半导体可饱和吸收镜; PM FBG为保偏光纤布拉格光栅; PM WDM为1550/2000 nm保偏波分复用器; PM MFA为保偏模场匹配器

Fig. 1. (color online) Schematic setup of the all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser. SESAM, semiconductor saturable absorber mirror; PM FBG, polarization-maintaining fiber Bragg grating; PM WDM, 1550/2000 nm polarization-maintaining wavelength division multiplexer; PM MFA, polarization-maintaining mode field adaptor.

在第二级和最后一级保偏掺铥光纤功率放大器中, 采用了保偏大模场面积双包层掺铥光纤作为增益介质, 保偏掺铥光纤的长度都为4.5 m, 纤芯直径为25 μm, 数值孔径为0.09, 内包层直径为400 μm, 数值孔径为0.45, 该增益光纤在793 nm处包层抽运吸收率为2.4 dB/m. 在最后一级保偏掺铥光纤功率放大器中, 抽运源为光纤耦合输出的高功率半导体激光模块, 单个最大输出功率为55 W, 中心波长为793 nm, 输出尾纤为105/125 μm, 最后从高功率保偏(6+1) × 1抽运合束器输出的最高抽运功率为300 W. 保偏大模场面积双包层掺铥光纤与保偏(6+1) × 1合束器输出的无源光纤的熔接损耗大约为0.2 dB. 为了提高掺铥光纤功率放大器的转换效率, 保偏大模场面积双包层掺铥光纤置于循环水冷却的热沉上, 水温保持在10 °C左右. 保偏大模场面积双包层掺铥光纤之后熔接了0.5 m长匹配的保偏无源光纤, 输出端面切成8°角.

在1550 nm连续掺铥光纤激光器抽运功率约为600 mW时, 适当地调节SESAM与掺铥增益光纤之间的耦合, 掺铥光纤振荡器开始产生稳定的自锁模激光脉冲输出. 图2所示为掺铥光纤振荡器输出激光脉冲的射频谱, 从图中可以看出, 锁模激光的中心频率为611.5 MHz, 与掺铥光纤振荡器的腔

长相吻合, 激光信噪比大于65 dB, 表明锁模状态非常稳定. 当1550 nm连续掺铥光纤激光器输出功率为750 mW时, 掺铥光纤振荡器产生了100 mW平均输出功率. 如图3所示, 此时测得输出激光的中心波长为1984.6 nm, 3 dB光谱带宽为0.24 nm. 此时采用中红外偏振片(Thorlabs, LPMIR100)测得输出激光的偏振消光比大于20 dB. 在第一级保偏掺铥光纤预放大器中, 当抽运功率为17 W时, 平均输出功率达到了4.5 W, 采用自相关仪(Femtochrome FR-103XL)测得激光脉冲宽度为18 ps, 输出激光波长与振荡器相比无明显变化.

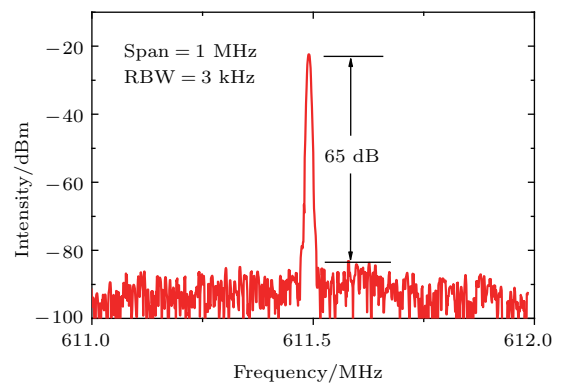


图2 (网刊彩色) SESAM锁模611.5 MHz时保偏掺铥光纤振荡器的射频谱

Fig. 2. (color online) RF spectrum of the SESAM mode-locked PM fiber oscillator at 611.5 MHz.

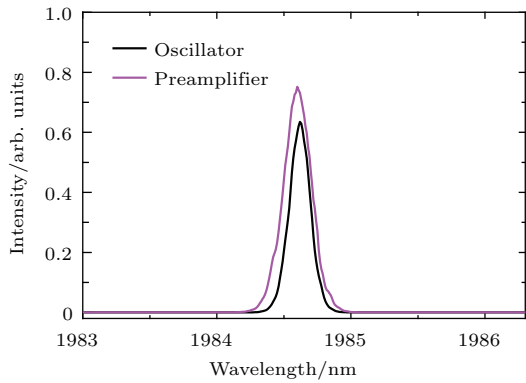


图3 (网刊彩色) SESAM 锁模保偏掺铥光纤振荡器及第一级光纤预放大器输出的光谱

Fig. 3. (color online) Optical spectrum of the SESAM mode-locked PM thulium-doped fiber oscillator and first thulium-doped fiber preamplifier.

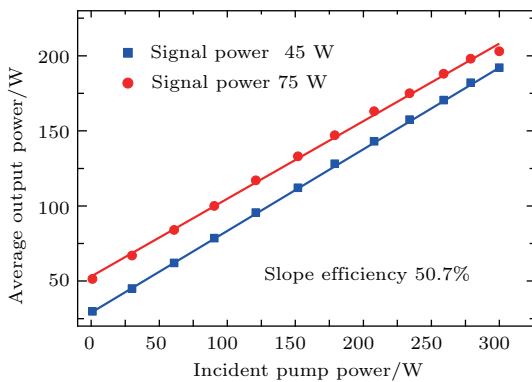


图4 (网刊彩色) 保偏掺铥光纤功率放大器 611.5 MHz 时平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4. (color online) Average output power of the PM thulium-doped fiber power amplifier with the increase of incident pump power at 611.5 MHz repetition rate.

当第二级保偏掺铥光纤功率放大器最大抽运功率为 135 W 时, 该级光纤放大器产生了大约 73 W 最大平均输出功率, 相应的斜率效率为 53%. 图 4 所示为最后一级保偏掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率变化的关系图, 光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率几乎成线性增加. 当抽运功率增加到 300 W 时, 最后一级保偏掺铥光纤功率放大器产生了 203 W 平均输出功率, 相应的斜率效率为 50.7%, 小于第二级保偏掺铥光纤功率放大器的斜率效率, 主要由于光纤非线性导致了斜率效率降低. 在掺铥光纤放大系统最高平均输出功率时测得激光偏振消光比 >15 dB. 图 5 所示为最后一级保偏掺铥光纤功率放大器不同平均输出功率时的光谱, 由于自相位调制的作用, 在平均输出功率为 200 W 时激光的中心波长为 1985 nm, 3 dB 光谱带宽变为 2.3 nm, 明显高于掺铥光纤振荡器的光

谱带宽. 图 6 所示为最高平均输出功率时激光脉冲的自相关信号, 测得激光脉冲宽度为 15 ps, 由于自相位调制作用, 放大后的激光脉冲宽度比掺铥光纤振荡器的脉宽有所降低, 相应的峰值功率为 22 kW.

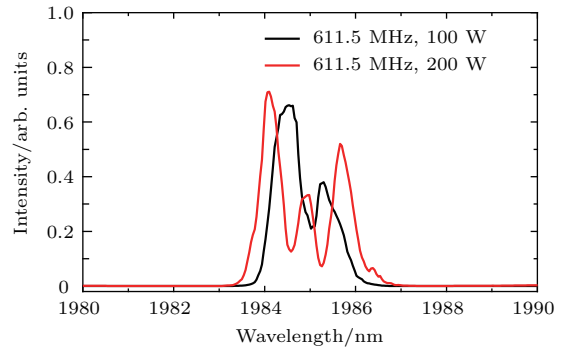


图5 (网刊彩色) 保偏掺铥光纤功率放大器不同平均输出功率时的光谱

Fig. 5. (color online) Optical spectrum of the thulium-doped fiber power amplifier at different average power.

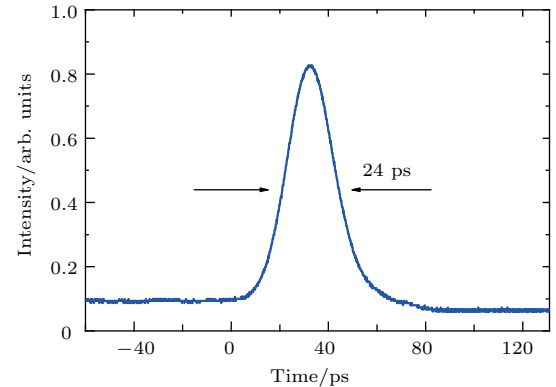


图6 (网刊彩色) 最后一级保偏掺铥光纤功率放大器输出脉冲的自相关信号

Fig. 6. (color online) Autocorrelation trace of the final PM thulium-doped fiber power amplifier.

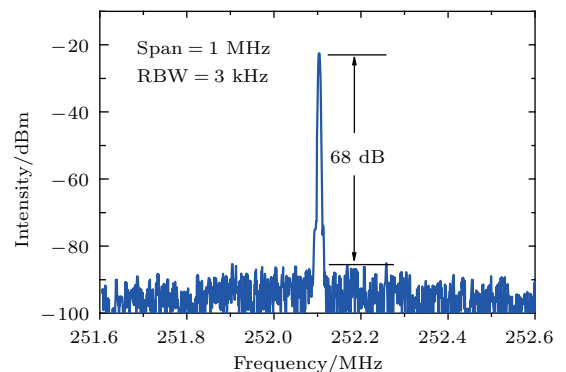


图7 (网刊彩色) SESAM 锁模 252.1 MHz 时保偏掺铥光纤振荡器的射频谱

Fig. 7. (color online) RF spectrum of the SESAM mode-locked PM fiber oscillator at 252.1 MHz.

另外, 实验中为了得到更高的激光单脉冲能量, 我们通过延长掺铥光纤振荡器中无源光纤的长

度来降低被动锁模激光种子源的重复频率, 通过使光纤光栅 (FBG) 尾纤的长度增加了大约 24 cm 之后, 激光脉冲就从 611.5 MHz 降低到了 252.1 MHz. 图 7 所示为掺铥光纤振荡器重复频率为 252.1 MHz 时输出激光脉冲的射频谱, 从图中可以看出, 激光信噪比大于 68 dB, 表明激光锁模状态非常稳定. 掺铥光纤振荡器平均输出功率为 60 mW 左右, 激光中心波长为 1984.5 nm, 3 dB 光谱带宽为 0.26 nm.

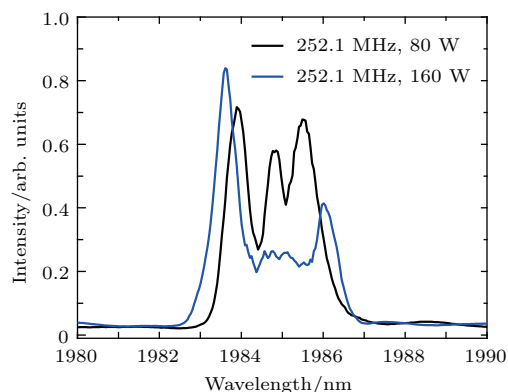


图 8 (网刊彩色) 保偏掺铥光纤功率放大器工作在 252.1 MHz 时输出的光谱

Fig. 8. (color online) Optical spectrum of thulium-doped fiber power amplifier at 252.1 MHz.

图 8 所示为掺铥光纤振荡器重复频率为 252.1 MHz 时, 最后一级保偏掺铥光纤功率放大器不同平均输出功率下的光谱, 当 793 nm 半导体激光模块最大抽运功率为 300 W 时, 最后一级保偏掺铥光纤功率放大器产生了 163 W 最高平均输出功率, 此时测得输出激光的中心波长为 1984.7 nm, 3 dB 光谱带宽为 3.9 nm, 较强的非线性效应明显展宽了光谱带宽. 采用自相关仪测得放大后激光脉冲宽度为 21 ps, 相应的激光峰值功率为 30.7 kW. 最后一级保偏掺铥光纤功率放大器的斜率效率为 48%, 明显小于掺铥光纤功率放大器重复频率为 611.5 MHz 时的斜率效率. 从图 8 可以看出, 激光脉冲在放大过程中自相位调制效应展宽了脉冲光谱, 从而也引入了线性啁啾, 在高平均功率放大之后, 利用压缩器压缩之后还可以得到比种子源更窄的激光脉冲输出.

### 3 结 论

本文利用常规光纤布拉格光栅作为光谱滤波器来控制 SESAM 锁模掺铥光纤激光器的光谱形状

和脉冲宽度, 以及结合纤芯抽运高掺杂双包层掺铥光纤技术, 实现了 2  $\mu\text{m}$  波段高重复频率皮秒脉冲激光输出. 利用该高重复频率皮秒脉冲激光作为种子源, 以及全保偏光纤和全保偏光纤基于的光学元器件, 搭建了全光纤全保偏结构的皮秒脉冲掺铥光纤主振荡功率放大器, 最后一级功率放大器最高平均输出功率达到了 203 W, 脉冲宽度为 15 ps, 偏振消光比 >15 dB, 中心波长为 1985 nm. 该结果为目前国际上 2  $\mu\text{m}$  波段全光纤超短脉冲激光器所产生的最高平均输出功率.

### 参考文献

- [1] Moulton P, Rines G, Slobodtchikov E, Wall K, Frith G, Samson B, Carter A 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **15** 85
- [2] Baudelet M, Willis C, Shah L, Richardson M 2010 *Opt. Express* **18** 7905
- [3] Li Z, Heidt A M, Daniel J M O, Jung Y, Alam S U, Richardson D J 2013 *Opt. Express* **21** 9289
- [4] Mingareeva I, Weirauch F, Olowinsky A, Shah L, Kadwani P, Richardson M 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 2095
- [5] Hardy L, Wilson C, Irby P, Fried N 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **20** 0902604
- [6] Gather M, Yun S 2011 *Nature Photon.* **5** 406
- [7] Popmintchev T, Chen M, Arpin P, Murnane M, Kapteyn H 2010 *Nature Photon.* **4** 822
- [8] Nieuwenhuis A, Lee C, van d, Lindsay I, Gross P, Boller K 2008 *Opt. Lett.* **33** 52
- [9] Dergachev A, Armstrong D, Smith A, Drake T, Dubois M 2007 *Opt. Express* **15** 14404
- [10] Leindecker N, Marandi A, Byer R, Vodopyanov K, Jiang J, Hartl I, Fermann M, Schunemann P 2012 *Opt. Express* **20** 7046
- [11] Wang P, Liu J 2013 *Chin. J. Laser* **40** 1002 (in Chinese) [王璞, 刘江 2013 中国激光 **40** 1002]
- [12] Haxsen F, Wandt D, Morgner U, Neumann J, Kracht D 2010 *Opt. Lett.* **35** 2991
- [13] Liu J, Wang Q, Wang P 2012 *Opt. Express* **20** 22442
- [14] Sims R, Kadwani P, Shah A, Richardson M 2013 *Opt. Lett.* **38** 121
- [15] Wan P, Yang L, Liu J 2013 *Opt. Express* **21** 21374
- [16] Liu J, Xu J, Liu K, Tan F, Wang P 2013 *Opt. Lett.* **38** 4150
- [17] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, Jansen F, Wienke A, Zeitner U, Fuchs F, Jauregui C, Wandt D, Kracht D, Limpert J, Tünnermann A 2014 *Opt. Lett.* **39** 4671
- [18] Gebhardt M, Gaida C, Hädrich S, Stutzki F, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Opt. Lett.* **40** 2770
- [19] Gaida C, Gebhardt M, Stutzki F, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Opt. Lett.* **40** 5160

- [20] Dou Z Y, Tian J R, Li K X, Yu Z H, Hu M T, Huo M C, Song Y R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 064206 (in Chinese) [窦志远, 田金荣, 李克轩, 于振华, 胡梦婷, 霍明超, 宋晏蓉 2015 物理学报 **64** 064206]  
 [21] Liu H, Gong M L, Cao S Y, Lin B K, Fang Z J 2015

- Acta Phys. Sin.* **64** 114210 (in Chinese) [刘欢, 巩马理, 曹士英, 林百科, 方占军 2015 物理学报 **64** 114210]  
 [22] Liu J, Xu J, Wang Q, Wang P 2012 *Chin. J. Laser* **39** 2009 (in Chinese) [刘江, 徐佳, 王潜, 王璞 2012 中国激光 **39** 2009]

## 203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser\*

Liu Jiang Liu Chen Shi Hong-Xing Wang Pu<sup>†</sup>

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

( Received 26 April 2016; revised manuscript received 14 July 2016 )

### Abstract

High-power ultrafast fiber lasers are important sources for a number of applications including material processing, pump source for optical parametric oscillator, and supercontinuum generation. Ultrafast thulium-doped fiber lasers, which extend the wavelength range of fiber lasers from 1.8 to 2.1  $\mu\text{m}$ , have rapidly developed in the last several years and the average output power of the ultrafast thulium-doped fiber amplifiers has reached a hundredwatt level. The broad and smooth gain spectrum of thulium-doped fiber makes it a well-suited gain medium for generating the ultrashort laser pulses and broad wavelength tunability. However, previous reports on ultrafast thulium-doped fiber lasers and amplifiers were related to non-PM fiber configuration. These ultrafast thulium-doped fiber lasers and amplifiers may suffer the environmental instability, which means that these fiber sources are sensitive to externally-induced changes, like significant temperature variations and mechanical perturbations which will influence the fiber birefringence property. An effective method to eliminate this environmental instability is to build an all-PM, thulium-doped all-fiber MOPA configuration where the light polarizes only along the slow or fast axis in the PM fiber and PM-fiber components. Here, we demonstrate a high-power all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber master-oscillator power-amplifier (MOPA) system. The linearly-polarized thulium-doped all-fiber MOPA yields 203 W of average output power at central wavelength of 1985 nm with a polarization extinction ratio of  $>15$  dB. The pulse duration of 15 ps at 611.5 MHz repetition-rate results in a peak-power of 22 kW in the final thulium-doped fiber power amplifier. To the best of our knowledge, this is the highest average output power ever reported for a picosecond-pulsed thulium-doped all-fiber laser at 2  $\mu\text{m}$  wavelength. Furthermore, high-power linearly-polarized thulium-doped fiber laser with compact and simple design is greatly demanded for a variety of applications, such as coherent polarization beam combination, and frequency conversion in nonlinear crystals.

**Keywords:** fiber laser, fiber amplifier, passively mode-locking, ultrashort pulse

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Fc, 42.65.Re

**DOI:** 10.7498/aps.65.194208

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61527822, 61235010, 61505004), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2016T90019, 2015M570019), the Beijing Postdoctoral Research Foundation, China (Grant No. 2015ZZ-03), and the Scientific Research General Program of Beijing Municipal Commission of Education, China (Grant No. KM201610005028).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn