

高功率拉曼光纤激光器技术研究进展

冯 衍, 姜华卫, 张 磊

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 近年来,高功率拉曼光纤激光器技术发展迅速,输出波长范围覆盖可见光至中红外波段,最大输出功率超过千瓦。在功率提升方面,拉曼光纤激光器技术的发展脉络可概括为:激光振荡器、主振功率放大器 and 抽运/信号集成放大器。在重要科研应用的驱动下,高功率窄线宽拉曼光纤放大器技术得到显著发展。另外,高功率拉曼光纤激光器技术还有一些新的扩展,包括包层抽运、二极管直接抽运以及拉曼光纤激光合束等,未来发展潜力巨大。

关键词 激光技术;拉曼光纤激光器;受激拉曼散射;可调谐激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201005

Advances in High Power Raman Fiber Laser Technology

Feng Yan, Jiang Huawei, Zhang Lei

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In recent years, high power Raman fiber lasers have progressed significantly. The output wavelength covers from visible to mid-infrared. The maximum output power can be higher than a thousand watts. For power scaling, the Raman fiber lasers have utilized schemes of laser oscillator, master oscillator power amplifier, and pump and signal integrated amplifier. Motivated by important scientific applications, high power narrow linewidth Raman fiber amplifiers have advanced greatly as well. Moreover, new Raman fiber laser schemes are emerging, for example, cladding pumping, laser diode direct pumping, and Raman fiber laser beam combining etc. There is a great potential for Raman fiber laser technology in the future.

Key words laser technique; Raman fiber lasers; simulated Raman scattering; tunable lasers

OCIS codes 140.3550; 140.3510; 140.3600

1 引 言

光纤激光器因具有结构紧凑、效率高、光束质量好和稳定易用等优点,成为目前激光技术研究的热点^[1]。高功率光纤激光器在基础研究、国防、工业加工和医疗等领域均具有重要应用。功率、亮度的提高以及工作波长的拓展是激光技术发展的两个重要方向,也是光纤激光器发展的核心课题。拉曼光纤激光器在波长拓展方面具有独特的优势。

一般的稀土离子掺杂光纤激光器的工作波长由稀土离子能级跃迁决定,这种激光器只能在分立的光谱区域内高效运转。镱(Yb)光纤激光器的发展比较成熟,工作波长范围为 $1.0\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 。工作波长可以进一步拓宽至 $1.2\ \mu\text{m}$,但是效率不高。除此以外,其他常用的光纤激光器包括:工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近的铒(Er)光纤激光器;工作波长为 $2\ \mu\text{m}$ 附近的铥(Tm)和钬(Ho)光纤激光器;工作波长为 $3\ \mu\text{m}$ 附近的Er或Ho掺杂的玻璃光纤激光器。稀土掺杂的氟化物玻璃光纤可以通过上转换过程获得可见波段的激光输出,但是功率与效率都不高。但是,许多实际应用中(如气体探测、激光雷达、钠激光导引星等)需要特定波长的功率激光,使用稀土离子掺杂的光纤激光器往往无法满足需求。

利用光纤中的非线性光学过程可以产生新波长的激光。目前发展较为迅速的光纤超连续谱光源^[2-3],可以覆盖紫外至中红外波段,但是该光源在特定波长的光谱功率密度很低。另外,利用光纤中的参量过程也可

收稿日期: 2016-10-10; 收到修改稿日期: 2016-11-15

作者简介: 冯 衍(1974—),男,博士,研究员,主要从事激光技术与非线性光学方面的研究。E-mail: feng@siom.ac.cn

以产生新波长激光^[4-5],但是由于相位匹配的要求,需要色散可调控的光子晶体光纤。由于对抽运源的高要求和热效应等限制因素,实际获得的波长调谐范围和输出功率均不太理想。

基于光纤中受激拉曼散射的拉曼光纤激光器,具有增益谱宽、可级联工作以及不需要相位匹配等特点,只要有合适波长的抽运激光,即可产生光纤透明范围内任意波长的激光输出^[6-9]。从发展现状看,拉曼光纤激光器是目前唯一一种可同时实现高功率与宽波段输出的光纤激光器。图 1 为近红外至中红外波段内拉曼光纤激光器的功率随波长的变化。在波长为 1.1 μm 附近,拉曼光纤激光器的功率可达数千瓦^[10-12];随着波长的增加,其功率呈指数减小^[13]。采用的拉曼增益光纤主要包括石英光纤(包括掺锗^[14-16]和掺磷^[17]石英光纤)、氟化物光纤^[18-19]和硫化物化合物光纤^[20-21]等。

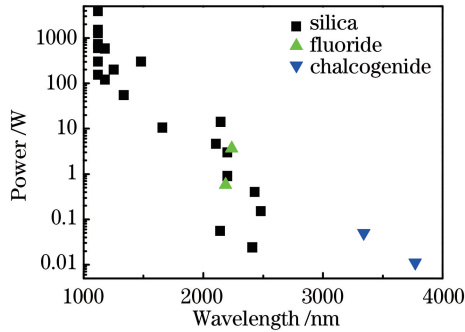


图 1 近红外至中红外波段拉曼光纤激光器的功率随波长的变化

Fig. 1 Variation in Raman fiber laser power with wavelength from near-infrared to mid-infrared

这里综述了高功率拉曼光纤激光器技术的研究进展。首先梳理了高功率拉曼光纤激光器技术的发展脉络:激光振荡器、主振功率放大(MOPA)、抽运/信号集成的放大器;然后介绍了高功率窄线宽拉曼光纤放大器技术的发展和典型应用;接着介绍几类新型的高功率拉曼光纤激光器技术,包括包层抽运、二极管直接抽运和光纤激光合束;最后对高功率拉曼光纤激光器技术的发展进行了总结与展望。

2 拉曼光纤激光器的功率提升

早在 20 世纪 70 年代,Stolen 等^[22]便研究了光纤中的拉曼放大过程,之后陆续有这方面的研究报道。直到上世纪 90 年代,随着二极管抽运的稀土离子掺杂光纤激光器的发展,拉曼光纤激光器与拉曼光纤放大器开始迅速发展,并作为光纤通信网络中分布式光纤放大器得到了广泛的关注^[23]。本世纪开始,拉曼光纤激光器的输出功率大幅提高,这与掺 Yb 光纤激光器的迅速发展紧密相关。受激拉曼散射是一种非线性光学过程,需要较高的抽运功率密度。高功率、高亮度的稀土掺杂光纤激光器的输出光纤可以直接与拉曼光纤激光器熔接,提供了一种简便的抽运方式。

图 2 为拉曼光纤激光器输出功率随年份的变化,其中每一个数据点均源于相关的典型报道。由图可见,拉曼光纤激光器的输出功率呈指数形式增长,将其与作为抽运源的 Yb 光纤激光器进行比较,发现两者的输

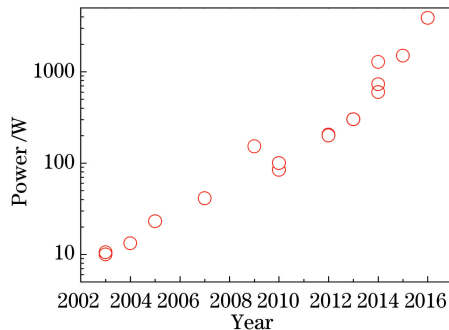


图 2 拉曼光纤激光器输出功率随年份的变化

Fig. 2 Variation in output power of Raman fiber laser with year

输出功率均以指数形式增长,但是拉曼光纤激光器的输出功率比 Yb 光纤激光器小一个数量级。高功率拉曼光纤激光器的光效率可以达到 80% 以上^[14],但为何其输出功率比作为抽运源的 Yb 光纤激光器小一个数量级呢?这主要是由于拉曼光纤激光器功率提升面临着光谱展宽、抽运与信号光合并以及高阶拉曼激光产生等诸多挑战。为应对这些挑战,高功率拉曼光纤激光器的发展脉络大致有激光振荡器、主振功率放大和抽运/信号集成的放大器 3 个阶段。下面分别介绍相关的典型工作。

2.1 激光振荡器

最典型的拉曼光纤激光器由抽运光纤激光器、高反光纤光栅、拉曼增益光纤和输出耦合光纤光栅组成。图 3 为典型的拉曼光纤激光器的结构示意图^[14],该激光器由 1070 nm 的 Yb 光纤激光器抽运产生 1120 nm 的拉曼光纤激光。抽运与信号激光的波长间隔由所采用的石英光纤的拉曼频移量决定。在激光的输出端,焊接了一个 1070/1120 nm 的波分复用器(WDM),以滤除剩余的 1070 nm 抽运激光。在拉曼激光谐振腔和抽运激光之间,加入了两个 1070/1120 nm 波分复用器,以隔离来自高反光纤光栅后向传播的 1120 nm 激光。采用了高反光栅的同时还需要使用两个波分复用器来进行隔离的原因主要是光纤光栅的带宽有限,而拉曼光纤激光器中激光光谱会随着功率的提高迅速展宽,因而从光栅光谱的两边泄漏。拉曼光纤激光器中的光谱展宽主要是由不同纵模之间四波混频过程引起的^[24]。漏过的信号激光若不经隔离直接进入抽运光纤激光器,会影响抽运光纤激光器的性能。

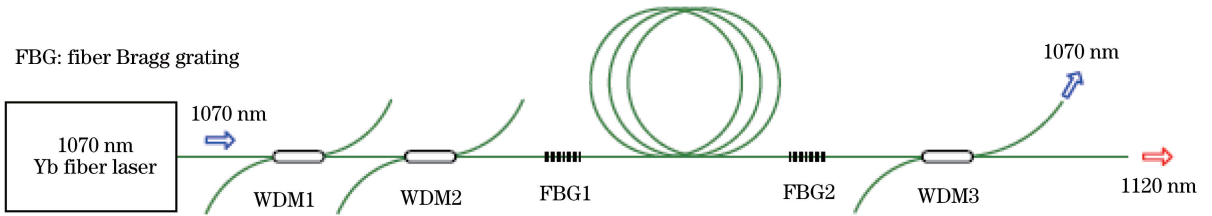


图 3 基于光纤光栅的高功率拉曼光纤激光器的结构示意图^[14]

Fig. 3 Structural diagram of high power Raman fiber laser based on fiber Bragg grating

光谱展宽是限制拉曼光纤振荡器输出的一个主要因素。研究者们提出了采用宽谱啁啾光栅作为高反光栅的方法^[25-26],但是这类光栅的损耗较大。2009 年,Feng 等^[14]采用 1 nm 带宽的光纤光栅,较好地克服了由光谱展宽引起的激光后向传播问题。采用仅 30 m 长的标准 HI1060 光纤作为拉曼增益介质,获得了输出功率为 153 W、输出波长为 1120 nm 的高功率全光纤拉曼激光器,效率高达 85%,从而将拉曼光纤激光器的输出功率提高至百瓦量级。该装置中,高反光栅的带宽为 1.05 nm,峰值反射率为 99.7%;输出耦合光栅的带宽为 0.55 nm,峰值反射率为 8.9%。随着输出功率的提高,光谱展宽,有效反射率分别演变为 81.5% 和 0.97%,由于两个光栅之间具有很高的反射率比,谐振腔中后向传播的激光功率远小于前向传播的激光功率。虽然高反光栅有效反射率为 81.5%,但是漏过的激光只有 3.2 W。另外,由于拉曼增益光纤的长度只有 30 m,二阶拉曼散射和光谱展宽也得到了有效的抑制。该工作的关键在于谐振腔的设计,设计中应选择输出耦合光栅的带宽小于高反光栅的带宽。在高功率情况下,高反光栅与输出耦合光栅的有效反射率比远大于 1,从而使得谐振腔中后向传播的激光功率远小于前向传播的激光功率。工作在设计状态的激光近似于前向的单程放大器,为后续高功率拉曼光纤激光器的发展提供了新思路:如果采用前向抽运的拉曼光纤放大器,则不存在光谱展宽导致的激光后向漏光问题。

通过级联拉曼频移产生特殊波长的光纤激光一直是拉曼光纤激光研究的一个重点^[27-29]。其中,1480 nm 激光可作为 1.55 μm 波段光纤激光器与放大器的抽运源,因此,1480 nm 激光器的研制是级联拉曼光纤激光器研究中的一个重要课题。2010 年,Nicholson 等^[28]报道了输出功率为 81 W、输出波长为 1480 nm 的基于嵌套光栅对的级联拉曼光纤激光器,其结构示意图如图 4(a)所示。该设计中采用输出功率为 162 W、输出波长为 1117 nm 的掺 Yb 光纤激光器作为抽运源,经过了 1175,1239,1310,1390,1480 nm 5 级拉曼频移。该设计中使用长周期光栅将抽运激光与拉曼振荡器隔离,克服了光谱展宽导致的后向激光泄漏问题。另外,系统中还采用了拉曼滤波光纤,抑制了 1580 nm 附近的下一阶拉曼频移,从而可以采用较长的增益光纤(120 m),大幅提高了拉曼转化效率。图 4(b)为长周期光纤光栅的功率损耗谱。

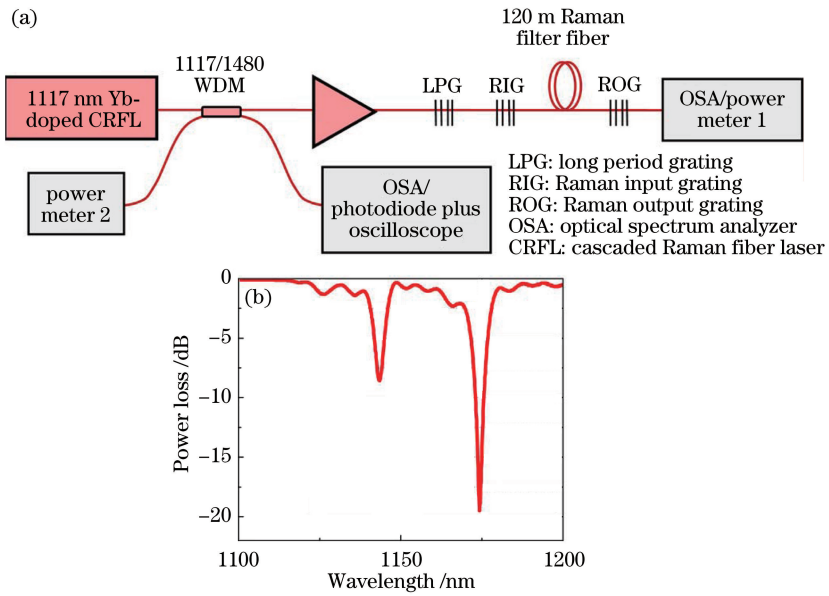


图 4 (a) 基于嵌套光纤光栅对的级联拉曼光纤激光器结构示意图; (b) 长周期光纤光栅的功率损耗谱^[28]
 Fig. 4 (a) Structural diagram of cascaded Raman fiber laser based on nested fiber grating pairs;
 (b) power loss spectrum of long period fiber grating^[28]

2.2 主振功率放大

研究者们逐渐意识到,和其他激光器类型相同,使用主振荡器加功率放大器(MOPA)的结构是提升拉曼光纤激光器输出功率的有效方案。这种结构把激光器的功率指标与其他性能指标分开来实现,降低了高功率激光器的制作难度。对于拉曼光纤激光器,采用 MOPA 结构的一个特殊好处是可以避免振荡器中光谱展宽带来的激光后向泄露。另外,它也降低了对光纤光栅等器件的热与功率损伤阈值的要求。

2013 年,Supradeepa 等^[16]提出了一种级联拉曼光纤放大器结构,获得了 200 W 的 1480 nm 拉曼激光输出。虽然经过了 5 级拉曼频移,但效率仅达到 65%(量子极限效率约为 75%)。接着,通过进一步优化,可将输出功率提高至 301 W^[8]。图 5(a)为级联拉曼光纤放大器的结构示意图。将一个低功率的级联拉曼光纤激光器与一个高功率的 1117 nm 光纤激光器通过一个波分复用器(WDM)合并到同一根拉曼光纤中,低功率的级联拉曼光纤激光器输出中包含波长范围为 1117~1480 nm 的各级拉曼频移波长的激光,因此在拉曼光纤中,1117 nm 的抽运激光被逐级拉曼频移至 1480 nm。由于采用的拉曼增益光纤是 W 形折射率分布的拉曼滤波光纤,该光纤在波长大于 1500 nm 时的损耗迅速增加,因此下一阶的拉曼频移得到抑制。图 5(b)为拉曼种子激光器光谱图,图 5(c)为拉曼滤波光纤的损耗谱^[8]。

级联拉曼光纤放大器中的核心高功率器件是合并抽运激光和多波长种子激光的波分复用器,它是一种单模器件,激光在纤芯中传播。但高功率波分复用器的制作很难,商用的器件损伤阈值仅为数十瓦量级。因此,波分复用器是进一步提升功率的器件与技术瓶颈。

2.3 抽运/信号集成的放大器

2014 年,Zhang 等^[30]提出了掺镱-拉曼混合放大的技术,该技术避免了在传统拉曼放大器中需要承受高功率的 WDM,使拉曼激光器的输出功率达到千瓦量级成为可能。图 6 为掺镱-拉曼混合放大器的结构示意图,将 1070/1120 nm 混合双波长种子激光注入到掺镱和拉曼的混合放大器中,1070 nm 和 1120 nm 激光首先在掺镱光纤中被同时放大,之后 1070 nm 的激光逐步被拉曼转移至 1120 nm。初步的演示实验中获得了 300 W 的 1120 nm 单模线偏振的拉曼激光输出。这种结构的好处在于:拉曼抽运激光与信号激光在低功率时就被合并到同一根单模光纤中,然后在同一个放大器中同时实现抽运激光的放大和拉曼频移,即抽运激光和信号激光的放大器是集成在一起的。从功率合并的角度看,将单模的 WDM 器件替换为多模的抽运/信号合束器可大幅降低功率合并的难度。

2015 年,Feng 等^[31]采用 10/400 的保偏光纤进一步提升了抽运功率,获得了 600 W 的 1120 nm 线偏振

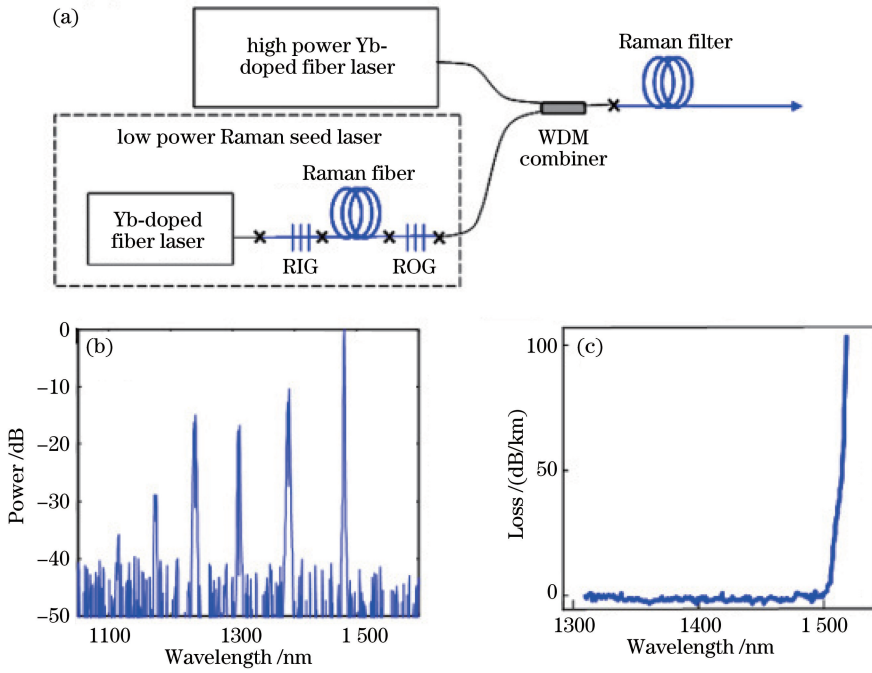


图 5 (a)级联拉曼光纤放大器结构示意图;(b)拉曼种子激光器光谱图;(c)拉曼滤波光纤损耗谱^[8]
Fig. 5 (a) Structural diagram of cascaded Raman fiber amplifier; (b) spectrum of Raman seed laser; (c) loss spectrum of Raman filtering fiber

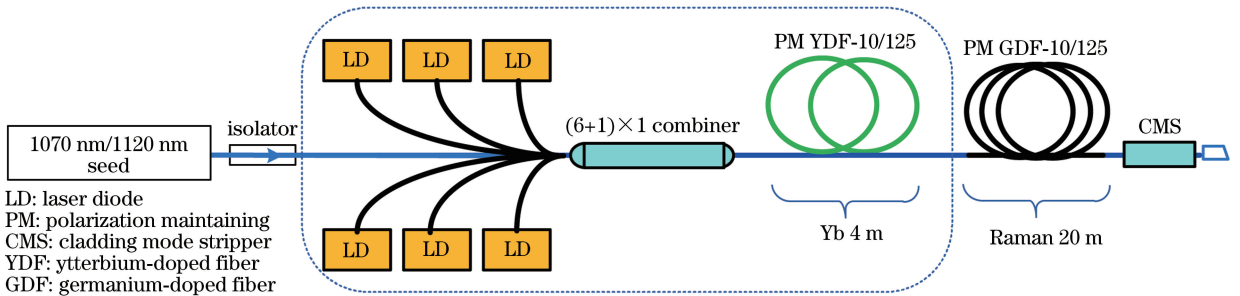


图 6 掺镱-拉曼混合放大器结构示意图^[30]
Fig. 6 Structural diagram of Yb-Raman mixed amplifier

单横模拉曼激光输出。采用纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的非保偏大模场的掺镱和拉曼增益光纤,最大获得了 $1.3\ \text{kW}$ 的拉曼激光输出^[10],这是首个千瓦级的拉曼光纤激光器。当拉曼光纤激光器输出高功率时,观察到拉曼转化不充分的现象,初步分析认为该现象与光场模式有关。

通过同时注入多个波长的拉曼种子激光,原理上可以在混合放大器中将拉曼频移进行级联,从而实现超宽波长范围的高功率拉曼激光输出。初步的实验发现,随着拉曼级数的增加,输出激光的光谱纯度越来越难以控制,需要后续的深入研究。另外,现有的高功率掺 Yb 光纤激光器均采用 MOPA 结构,功率可达万瓦级,提出的抽运/信号集成的放大器结构只需要再添加一个或者多个波长的拉曼种子激光。因此,采用该结构有望实现万瓦级的拉曼激光输出。

Zhang 等^[11]采用类似的结构,将掺镱-拉曼混合放大器的输出功率进一步提升至 $1.5\ \text{kW}$,其实验装置如图 7 所示。2015 年, Ma 等^[32]利用偏振选择损耗机制,获得了 $1182\ \text{W}$ 的线偏振拉曼激光输出,其偏振度高达 $18.2\ \text{dB}$ 。2016 年, Xiao 等^[12]报道了 $3.89\ \text{kW}$ 的高功率拉曼激光输出,与之前的工作不同,该系统中未注入拉曼种子激光,而是利用高抽运功率下的高拉曼增益将激光器中的自发拉曼辐射放大,获得了高功率的一阶拉曼激光输出。

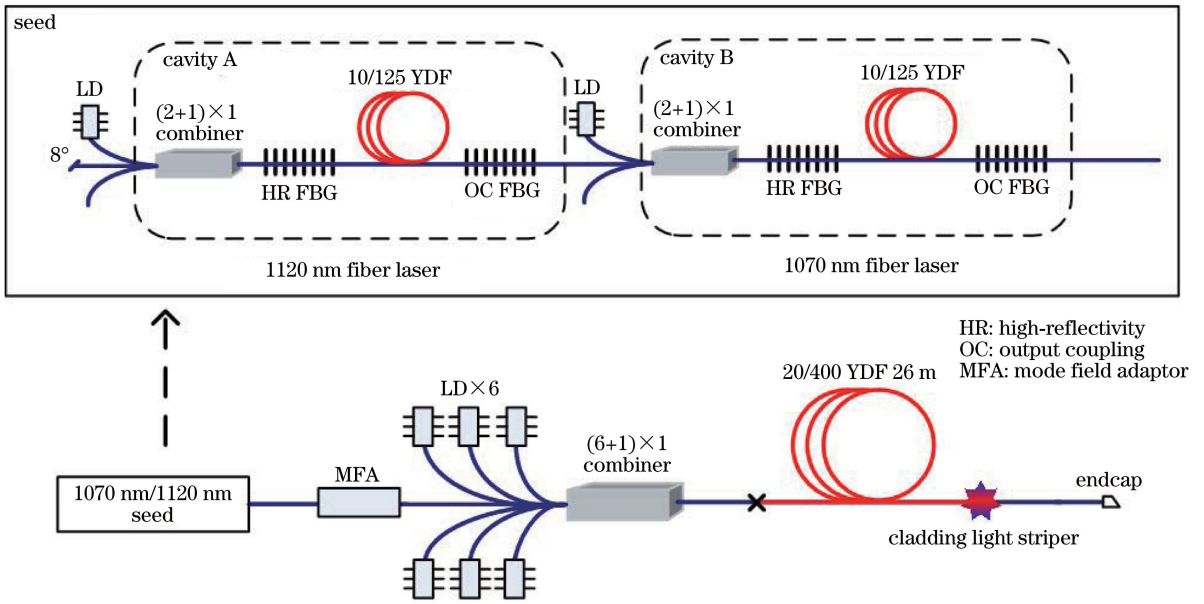


图 7 1.5 kW 掺镱-拉曼混合放大激光器的实验装置示意图^[11]

Fig. 7 Experimental setup diagram of 1.5 kW Yb-Raman mixing amplification laser

3 窄线宽拉曼光纤放大器

在部分高端应用中,不仅对光纤激光器的波长有特殊要求,而且对其光谱宽度也有很高的要求,线宽往往要求为兆赫兹甚至更窄。如果光纤激光器的线宽小于吉赫兹,那么它的输出功率主要受限于光纤中另一种与受激拉曼散射来源类似的非线性光学过程——受激布里渊散射(SBS)。在近红外波段,光纤中受激布里渊散射带宽通常在数十兆赫兹量级^[6]。

在窄线宽拉曼光纤放大器和高功率拉曼光纤激光器的发展过程中,钠激光导引星的应用起到了关键的推动作用^[33]。钠激光导引星需要波长为 589.159 nm 的激光对准钠原子 D2a 吸收线,并需要输出高功率、窄线宽、高光束质量和单一偏振的激光以激发 90 km 高空的钠原子层。钠原子层发射荧光,形成一个人工的导引星,辅助地面大型天文望远镜的自适应光学系统校正大气湍流引起的波前畸变,提高望远镜的角分辨率。现有的钠导星激光技术包括染料激光器、固体激光器和拉曼光纤激光器等。所使用的拉曼激光器是利用光纤中拉曼频移获得 1178 nm 的高功率窄线宽激光,然后将其倍频至 589 nm^[34-38]。

1178 nm 的窄线宽拉曼光纤放大器采用后向抽运结构,以保持窄线宽特性^[38]。由于拉曼增益相对较小,所需的光纤长度在百瓦级抽运条件下,依旧需要数十米量级。但在这一过程中,很容易达到受激布里渊散射阈值。Zhang 等^[37]在进行相关实验时,在 50 m 长的放大器,即使抽运激光关闭,种子激光功率为 0.7 W 时,受激布里渊散射已经产生,无法进行放大。

目前,多种方法被用于抑制窄线宽拉曼光纤放大器中的受激布里渊散射。通过设计特殊的增益光纤,可降低声学声子与纤芯中光场的重叠,从而降低 SBS 增益系数^[39-40]。Dajani 等^[41]采用这种方法实现的最高输出功率为 22 W,光学效率为 25%。同样,温度阶梯法和多种光纤串联的方法也被用于展宽有效 SBS 谱和降低 SBS 增益^[40]。但是,这些方法的 SBS 抑制效果均有限。

目前,最有效的方法是沿拉曼增益光纤施加应力梯度,使得增益光纤不同部分的 SBS 谱错开,降低总的 SBS 增益^[37,42]。通过优化应力梯度分布,可以较好地抑制放大器中的 SBS。图 8 为典型的窄线宽拉曼光纤放大器的应力梯度分布^[37]。通过设计 30 级的应力阶梯,实现了有效增益系数的大幅降低,光转化效率达到 52%^[37],输出功率为 44 W,线宽为 1 MHz。Zhang 等^[38]实现了功率为 84 W、波长为 1178 nm 的拉曼激光输出,在微秒矩形脉冲情况下,峰值功率达到 120 W。目前,基于拉曼光纤激光器的钠导星激光器已经被应用于欧洲南方天文台的甚大望远镜^[43]和位于夏威夷的凯克望远镜^[44],也被其他未来大型望远镜系统选为钠导星激光器的首选方案^[45]。

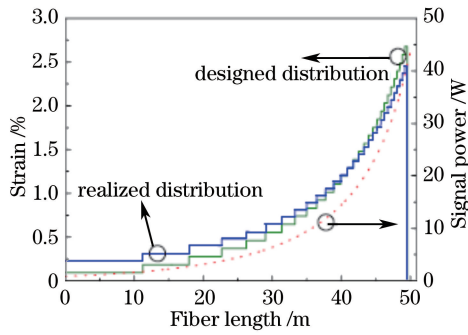


图 8 典型的窄线宽拉曼光纤放大器的应力梯度和信号功率随光纤长度的变化^[37]

Fig. 8 Variations in stress gradient and signal power of typical narrow bandwidth Raman fiber amplifier with fiber length^[37]

拉曼光纤激光器具有波长灵活的特性,因此同样的技术也可被应用于产生其它波长的激光。例如,当种子激光波长改变为 1176 nm,经过拉曼光纤放大和外部倍频至 588 nm 后,可用于氦的精密光谱测量^[46]。1260 nm 的窄线宽激光器可用于大气层氧气遥感探测,该波长可以通过掺磷光纤从 1080 nm 一级拉曼频移获得。为实现铝离子的直接激光冷却,需要 167 nm 的激光,这个波长的激光可以通过 1336 nm 激光的 8 倍频获得。高功率的 1336 nm 激光可以通过拉曼光纤放大器产生,先通过掺磷光纤一级拉曼频移获得 1260 nm 的激光,频移后的激光再通过后向抽运的石英光纤拉曼放大器,从而可以获得峰值功率大于 50 W 的长脉冲窄线宽输出^[47]。

4 新型高功率拉曼光纤激光器

如上所述,拉曼光纤激光技术已获得巨大发展,但是大部分报道都是纤芯抽运的拉曼光纤激光器和放大器。采用纤芯抽运时,尤其是采用较小纤芯抽运时,降低了拉曼阈值,使得抽运光在低功率时也可以得到较高的抽运光功率密度,获得较高的拉曼增益。但是纤芯抽运时,为获得较高的光-光转化效率,要求抽运源输出纤与拉曼增益纤匹配,这就限制了抽运光功率,进而在一定程度上限制了纤芯抽运拉曼光纤激光器的输出功率。为进一步提升拉曼光纤激光器的输出功率和简化拉曼光纤激光器的抽运过程,有一些新型拉曼光纤激光器形式的探索。

4.1 包层抽运

2002 年,借鉴包层抽运的稀土离子掺杂光纤激光器,Nilsson 等^[48]提出了包层抽运的光纤拉曼激光器模型,并证明了其可行性。包层抽运拉曼激光技术相比于纤芯抽运降低了对抽运光光束质量的要求,很大程度上提升了抽运光功率,为进一步提升拉曼光纤激光器的输出功率提供了可能。与纤芯抽运拉曼光纤激光不同,包层抽运的拉曼光纤激光器可以实现从抽运激光到 Stokes 光的亮度提高。

2006 年,Codemard 等^[49]利用自制双包层拉曼光纤(内包层直径为 21.6 μm ,纤芯直径为 9 μm)作为增益介质,利用 1550 nm 激光器作为抽运源,在 1660 nm 获得了 100 W 的功率输出,斜效率为 67%,包层抽运拉曼光纤激光器的结构示意图如图 9 所示。该设计中,包层与纤芯的面积比只有 5.76,因此激光的亮度提高并不明显。当包层与纤芯面积比较大时,在抽运光向一阶 Stokes 光完全转化之前,纤芯中的光功率密度已经远大于包层中的光功率密度,导致自发的二阶 Stokes 光的产生,从而抑制抽运光向一阶 Stokes 光的转化效率。包层抽运拉曼光纤放大器的转化效率随包层纤芯面积比的变化如图 10 所示,分析表明,为获得较高的抽运光到一阶 Stokes 光的转化效率,光纤的包层/纤芯面积比需要小于 8^[50]。

为保证包层抽运拉曼光纤激光器在获得高转化效率的同时,还能取得较大的亮度提高,Ji 等^[52]将稀土离子掺杂光纤的滤波特性引入到双包层拉曼光纤中,在这种新型的双包层拉曼光纤中,高阶 Stokes 光的损耗系数远大于低阶 Stokes 光的损耗系数,这样便可利用大包层纤芯面积比的拉曼增益光纤获得较高的转化效率和较大的亮度提高。Ji 等^[52]认为通过采用折射率 W 型分布的拉曼光纤,包层纤芯面积比可以增加至 34,激光亮度最大可提高 2000 倍。

2015 年,Jiang 等^[51]提出采用级联包层抽运级联拉曼频移的方案来克服包层纤芯面积比的问题。目标

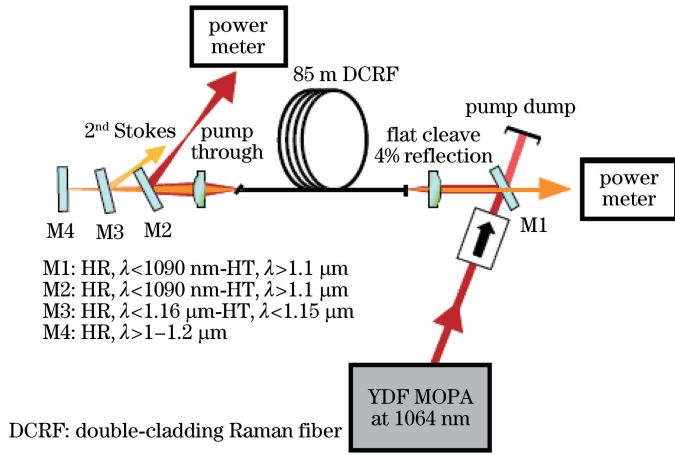


图 9 包层抽运拉曼光纤激光器的结构示意图^[49]

Fig. 9 Structural diagram of cladding-pumping Raman fiber laser^[49]

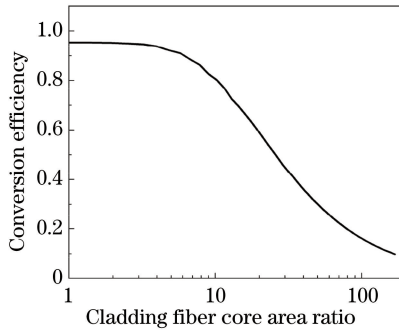


图 10 包层抽运拉曼光纤放大器的转化效率随包层纤芯面积比的变化^[51]

Fig. 10 Relationship between conversion efficiency and cladding fiber core area ratio of cladding-pumping Raman fiber amplifier^[51]

激光输出不是一阶拉曼光,而是高阶拉曼光。在与商用光纤匹配的纤芯(直径为 $10 \mu\text{m}$)、最外包层(直径为 $105 \mu\text{m}$)参数为前提条件,通过数值模拟设计出一种多包层的拉曼光纤,其结构示意图如图 11 所示。计算结果表明,抽运峰值功率为 5000 W 时,四包层光纤的转化效率可达 59% ,激光亮度提高了 2800 倍。

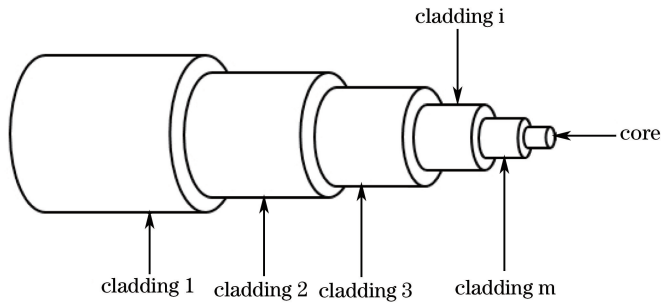


图 11 多包层拉曼光纤结构示意图^[51]

Fig. 11 Structural diagram of multi-cladding Raman fiber^[51]

4.2 二极管直接抽运

上文所述的拉曼光纤激光技术通常都是采用多模半导体二极管(LD)抽运稀土离子掺杂的光纤激光器,然后再用稀土离子光纤激光器抽运拉曼光纤激光器,这种方案使得激光器结构变复杂。如果能直接利用多模 LD 抽运拉曼光纤激光器,将会大幅简化激光器系统,同时也能提高拉曼光纤激光器的稳健性。拉曼激光器对抽运激光的亮度有一定的要求,近年来高亮度二极管激光器的发展使之成为可能。

2013 年, Kablukov 等^[53]报道了 LD 直接抽运的连续光拉曼光纤激光器,利用 938 nm LD 直接抽运长度

为 4.5 km 的多模渐变折射率 (GRIN) 光纤, 获得了 3 W 的 980 nm 激光输出。2014 年, Yao 等^[54] 搭建了如图 12 所示的脉冲二极管直接同步抽运的拉曼光纤激光器系统, 利用电调制的 806 nm LD 对由长度为 600 m 高非线性光纤组成的拉曼光纤激光器进行同步抽运, 在 836 nm 获得了平均功率为 1.4 mW 的输出, 斜效率为 65%。2013 年, Babin 等^[55] 报道了 LD 直接抽运的随机拉曼光纤激光器, 利用低光束质量的 938 nm LD 抽运渐变折射率光纤, 获得了 0.5 W 高光束质量的 980 nm 激光输出。2015 年, Yao 等^[56] 报道了 LD 抽运双包层拉曼增益光纤(内包层直径 38 μm , 纤芯直径 14.6 μm) 激光器, 相比抽运多模单包层光纤的情况, 光束质量得到了提升 ($M^2=1.9$)。2016 年, Glick 等^[57] 报道了用 976 nm LD 直接抽运渐变折射率光纤(纤芯/内包层比为 62.5/125) 的高功率、高效率的拉曼光纤激光器, 其结构示意图如图 13 所示。该激光器系统可以工作于连续(CW)和准连续(Q-CW)两种模式, 输出峰值功率可达到 80 W 和 85 W, 相应的光-光效率分别为 53% 和 60%。上述部分工作中指出, LD 直接抽运渐变折射率光纤时, 输出光光束质量得到提升, 这是由于渐变折射率光纤中的受激拉曼散射效应具有光束自清理效应, 能够改善抽运光的光束质量^[58]。

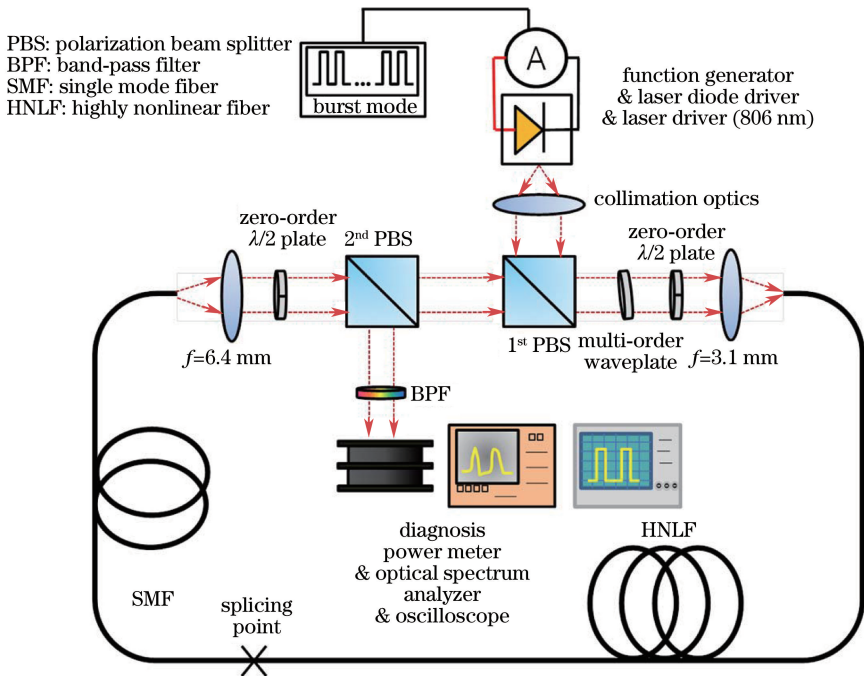


图 12 脉冲二极管直接同步抽运的拉曼光纤激光器^[54]

Fig. 12 Raman fiber laser pumped directly and synchronously by pulsed diode^[54]

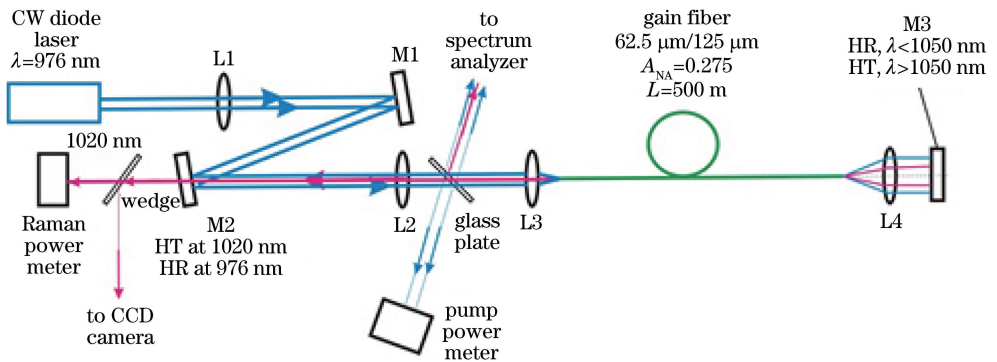


图 13 80 W 二极管直接抽运拉曼光纤激光器实验装置示意图^[57]

Fig. 13 Experimental setup diagram of Raman fiber laser pumped directly by 80 W diode^[57]

4.3 光纤激光合束

拉曼光纤激光器的量子亏损小, 热效应低, 无稀土掺杂的石英光纤的损伤阈值高, 无光致暗化, 更易于实

现数值孔径的控制,从而有可能获得高于掺镱光纤激光器的输出功率^[59]。此外,多抽运源的拉曼光纤激光器与放大器也可被视为一种光纤激光合束的方式。拉曼合束原理示意图如图 14 所示,多个多模光纤激光器抽运源(FL)与高光束质量的种子拉曼激光通过抽运/信号合束器耦合进同一根拉曼光纤的结构示意图。该拉曼光纤可以是多模渐变折射率光纤,也可以是多包层光纤,多个多模抽运激光在拉曼光纤中转化为高光束质量的拉曼激光输出。这种拉曼合束方式,与相干合束相比,不需要相位锁定;与光谱合束相比,采用该拉曼合束方式合成的激光依旧为单波长激光。

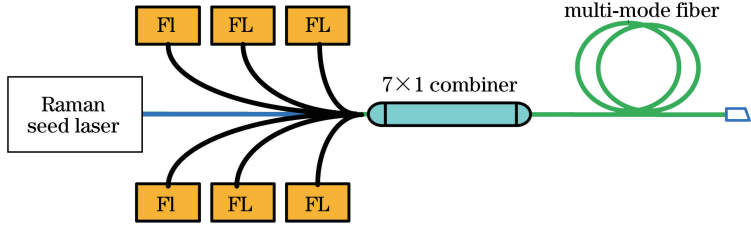


图 14 拉曼合束原理示意图

Fig. 14 Schematic diagram of Raman beam combination

高功率的拉曼光纤激光器在光谱合束上也有优势^[59]。光谱合束即采用衍射元件将多路不同波长的激光合并,该过程受两个方面的限制:1) 由于衍射元件的分光能力有限,不同激光束之间应有一定的波长间隔,由于稀土离子掺杂光纤激光器的带宽只有数十纳米,因此参与合束的激光束数量非常有限;2) 由于色散效应的影响,宽谱的激光束经过衍射元件之后会散开,导致光束质量下降,因此,参与光谱合束的光纤激光必须保持窄线宽,但是窄线宽光纤激光器会碰到受激布里渊散射和光谱展开等问题,因此提高单束光纤激光器的功率仍然是个挑战。

拉曼光纤激光器的优势是波长灵活、增益带宽宽。如图 15(a)所示,采用掺镱光纤激光器抽运石英光纤,通过级联拉曼频移,可以大幅拓宽激光的输出波长范围,原则上可以产生 1~2 μm 范围内任意波长的高功率激光,因此可以大幅度提高参与合束的激光数量。由于可选择的激光波长范围很宽,降低了对激光束间波长间隔的要求(如 20~30 nm),这时就可以抛弃衍射元件,采用基于干涉原理的双色镜进行光谱合束,如图 15(b)所示。这种情况下,对每一束激光的线宽要求降低,从而可以提高参与合束的每一束激光的功率。

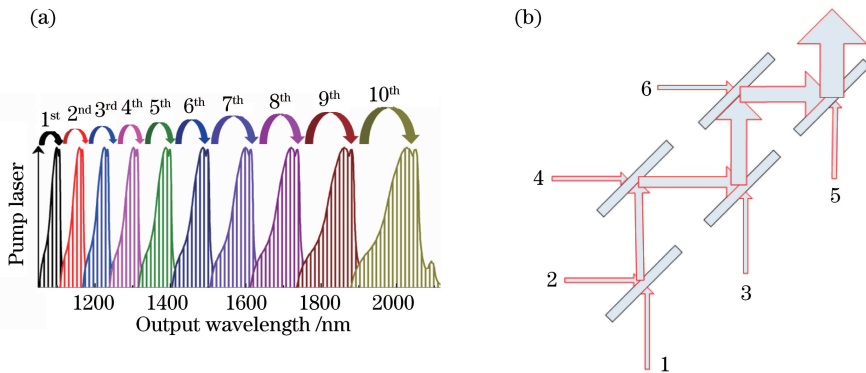


图 15 (a)掺镱光纤激光器抽运的级联拉曼光纤激光器的输出光谱;(b)基于双色镜的光谱合束示意图

Fig. 15 (a) Output spectrum of cascaded Raman fiber laser pumped by Yb-doped fiber laser;

(b) diagram of spectral beam combination based on dichroic mirror

5 结 论

由于波长灵活的特性,拉曼光纤激光器一直受到研究者的关注。但是,拉曼光纤激光器需要较高亮度的抽运源,在很长一段时间内输出功率都较低,因此实际应用范围大大受限。随着作为抽运源的稀土离子掺杂光纤激光器的迅速发展,拉曼光纤激光器的功率也获得了快速的提升。目前,拉曼激光器波长范围已经覆盖了可见光至中红外波段,并在近红外波段最大输出功率可超过千瓦。高功率拉曼光纤激光器技术的发展

脉络可概括为:激光振荡器、主振功率放大和抽运信号集成的放大器。在钠激光导引星和量子光学等重要科研应用的驱动下,高功率窄线宽拉曼光纤放大器技术得到了迅速发展和重要应用。此外,高功率拉曼光纤激光器技术还在进一步发展,出现了一些新颖的工作体制,包括包层抽运、二极管直接抽运和光纤激光合束等。拉曼光纤激光器由于量子亏损小并采用无稀土掺杂的石英光纤,具有热效应低、损伤阈值高、无光致暗化和数值孔径易于控制等优势,有望获得超越掺镱光纤激光器的输出功率,具有巨大的发展潜力。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [3] Dudley J M, Taylor J R. Supercontinuum generation in optical fibers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [4] Zlobina E A, Kablukov S I, Babin S A. Tunable CW all-fiber optical parametric oscillator operating below 1 μm [J]. Optics Express, 2013, 21(6): 6777-6782.
- [5] Murray R T, Kelleher E J R, Popov S V, *et al.* Widely tunable polarization maintaining photonic crystal fiber based parametric wavelength conversion[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15826-15833.
- [6] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 2007.
- [7] Dianov E M, Prokhorov A M. Medium-power CW Raman fiber lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1022-1028.
- [8] Supradeepa V R, Nicholson J W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2538-2541.
- [9] Zhang L, Jiang H, Yang X, *et al.* Ultra-wide wavelength tuning of a cascaded Raman random fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 215-218.
- [10] Zhang L, Liu C, Jiang H, *et al.* Kilowatt ytterbium-Raman fiber laser[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18483-18489.
- [11] Zhang H, Tao R, Zhou P, *et al.* 1.5-kW Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier at 1120 nm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 628-630.
- [12] Xiao Q, Yan P, Li D, *et al.* Bidirectional pumped high power Raman fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [13] Bernier M, Fortin V, Elamraoui M, *et al.* 3.77 μm fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2052-2055.
- [14] Feng Y, Taylor L R, Calia D B. 150 W highly-efficient Raman fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(26): 23678-23683.
- [15] Jiang H W, Zhang L, Feng Y. Silica-based fiber Raman laser at $>2.4 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2015, 40(14): 3249-3252.
- [16] Supradeepa V R, Nicholson J W, Headley C E, *et al.* A high efficiency architecture for cascaded Raman fiber lasers [J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7148-7155.
- [17] Dianov E M. Advances in Raman fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(8): 1457-1462.
- [18] Fortin V, Bernier M, Carrier J, *et al.* Fluoride glass Raman fiber laser at 2185 nm[J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4152-4154.
- [19] Fortin V, Bernier M, Faucher D, *et al.* 3.7 W fluoride glass Raman fiber laser operating at 2231 nm [J]. Optics Express, 2012, 20(17): 19412-19419.
- [20] Jackson S D, Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(22): 221106.
- [21] Bernier M, Fortin V, Caron N, *et al.* Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 127-129.
- [22] Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1973, 22(6): 276-278.
- [23] Bromage J. Raman amplification for fiber communications systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 79-93.

- [24] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E, *et al.* Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1729-1738.
- [25] Vallée R, Bélanger E, Déry B, *et al.* Highly efficient and high-power Raman fiber laser based on broadband chirped fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 5039-5043.
- [26] Babin S A, Churkin D V, Podivilov E V. Intensity interactions in cascades of a two-stage Raman fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2003, 226(1): 329-335.
- [27] Emori Y, Tanaka K, Headley C, *et al.* High-power cascaded Raman fiber laser with 41-W output power at 1480-nm band[C]. *IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2007: 9850926.
- [28] Nicholson J W, Yan M F, Wisk P, *et al.* Raman fiber laser with 81 W output power at 1480 nm[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3069-3071.
- [29] Rakich P T, Fink Y, Soljačić M. Efficient mid-IR spectral generation via spontaneous fifth-order cascaded-Raman amplification in silica fibers[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1690-1692.
- [30] Zhang L, Jiang H, Cui S, *et al.* Integrated Ytterbium-Raman fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1933-1936.
- [31] Feng Y. High power Raman fiber lasers: Recent progress[C]. *Frontiers in Optics*, 2015: FTh2F. 1.
- [32] Ma P, Zhang H, Huang L, *et al.* Kilowatt-level near-diffraction-limited and linear-polarized Ytterbium-Raman hybrid nonlinear amplifier based on polarization selection loss mechanism[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26499-26508.
- [33] Ageorges N, Dainty C. Laser guide star adaptive optics for astronomy[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [34] Feng Y, Huang S, Shirakawa A, *et al.* 589 nm light source based on Raman fiber laser[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(6A): L722-L724.
- [35] Feng Y, Taylor L, Calia D B. Multiwatts narrow linewidth fiber Raman amplifiers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 10927-10932.
- [36] Feng Y, Taylor L R, Calia D B. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19021-19026.
- [37] Zhang L, Hu J, Wang J, *et al.* Stimulated-Brillouin-scattering-suppressed high-power single-frequency polarization-maintaining Raman fiber amplifier with longitudinally varied strain for laser guide star[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4796-4798.
- [38] Zhang L, Jiang H, Cui S, *et al.* Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [39] Robin C, Dajani I. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2641-2643.
- [40] Vergien C, Dajani I, Robin C. 18 W single-stage single-frequency acoustically tailored Raman fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1766-1768.
- [41] Dajani I, Vergien C, Robin C, *et al.* Investigations of single-frequency Raman fiber amplifiers operating at 1178 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12038-12052.
- [42] Engelbrecht R. Analysis of SBS gain shaping and threshold increase by arbitrary strain distributions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(9): 1689-1700.
- [43] First Light of New Laser at Paranal[R]. [2016-10-10]. <http://www.eso.org/public/announcements/ann15034/>.
- [44] W. M. Keck Observatory. \$ 4 Million Laser Marks Ground Zero for Adaptive Optics Science[R]. [2016-10-10]. http://www.keckobservatory.org/recent/entry/4_million_laser_marks_ground_zero_for_adaptive_optics_science.
- [45] Boyer C, Ellerbroek B. Adaptive optics program update at TMT[C]. *SPIE*, 2016, 9909: 990908.
- [46] Luo P L, Hu J, Feng Y, *et al.* Doppler-free intermodulated fluorescence spectroscopy of 4He 23P-31, 3D transitions at 588 nm with a 1-W compact laser system[J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(2): 279-284.
- [47] Zhang L, Jiang H, Yang X, *et al.* High-power single-frequency 1336 nm Raman fiber amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(21): 4907-4911.
- [48] Nilsson J, Sahu J K, Jang J N, *et al.* Cladding-pumped Raman fiber amplifier[C]. *Optical Amplifiers and Their Applications*, 2002: PD2
- [49] Codemard C A, Ji J, Sahu J K, *et al.* 100 W CW cladding-pumped Raman fiber laser at 1120 nm[C]. *SPIE*, 2010, 7580: 75801N.
- [50] Ji J, Codemard C A, Ibsen M, *et al.* Analysis of the conversion to the first Stokes in cladding-pumped fiber Raman amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 129-139.

- [51] Jiang H, Zhang L, Feng Y. Cascaded-cladding-pumped cascaded Raman fiber amplifier[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 13947-13952.
- [52] Ji J, Codemard C A, Sahu J K, *et al.* Design, performance, and limitations of fibers for cladding-pumped Raman lasers [J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(6): 428-441.
- [53] Kablukov S I, Dontsova E I, Zlobina E A, *et al.* An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μm [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(8): 085103.
- [54] Yao T, Nilsson J. 835 nm fiber Raman laser pulse pumped by a multimode laser diode at 806 nm [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2014, 31(4): 882-888.
- [55] Babin S A, Dontsova E I, Kablukov S I. Random fiber laser directly pumped by a high-power laser diode [J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3301-3303.
- [56] Yao T, Harish A V, Sahu J K, *et al.* High-power continuous-wave directly-diode-pumped fiber Raman lasers [J]. Applied Sciences, 2015, 5(4): 1323-1336.
- [57] Glick Y, Fromzel V, Zhang J, *et al.* High power, high efficiency diode pumped Raman fiber laser [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(6): 065101.
- [58] Terry N B, Alley T G, Russell T H. An explanation of SRS beam cleanup in graded-index fibers and the absence of SRS beam cleanup in step-index fibers [J]. Optics Express, 2007, 15(26): 17509-17519.
- [59] Feng Y, Zhang L, Jiang H. Power scaling of Raman fiber lasers [C]. SPIE, 2015, 9344: 93440U.