

## 高功率 GTWave 光纤激光器研究进展

黄值河<sup>1,2,3\*</sup>, 曹润秋<sup>1,2,3\*\*</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3\*\*\*</sup><sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;<sup>2</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;<sup>3</sup>大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410073

**摘要** 高功率 GTWave 光纤激光器是目前光纤激光器研究的一个热点。介绍了 GTWave 光纤的结构,并回顾了国内外高功率 GTWave 光纤激光器的研究成果,可以看出,国内外 GTWave 光纤激光器的发展极其迅猛,其功率扩展能力非常强、结构设计非常灵活,输出功率远高于其他光纤激光器;同时,对比分析了高功率 GTWave 光纤激光器的特点和优势,并对今后的研究进行了展望。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; GTWave 光纤; 光纤放大器; 侧面泵浦; 掺镱光纤

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401010

## 1 引言

光纤激光器具有光束质量优良、转换效率高、结构紧凑和热管理方便等优势,在工业加工、军事国防等领域有着广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>。随着双包层光纤泵浦技术的提出<sup>[6]</sup>和发展<sup>[7-8]</sup>,基于空间结构耦合泵浦的光纤激光器的输出功率很快突破了千瓦量级<sup>[9]</sup>。然而,由于基于空间结构的光纤激光器具有结构复杂、稳定性差等缺点,全光纤结构的光纤激光器逐渐成为了主流的发展趋势。伴随着光纤合束器等光纤器件的快速发展<sup>[10-11]</sup>,全光纤结构激光器的输出功率也迅速达到了 3 kW<sup>[12-13]</sup>。其中,熔融拉锥光纤束(TFB)合束器发挥了非常重要的作用。但是,TFB 合束器在高功率光纤激光器中存在两个问题:1)端面泵浦方式使得泵浦光集中注入到有源光纤中,导致注入点存在非常严重的温升;2)由于 TFB 合束器在制作过程中需要对光纤进行拉锥,高功率的信号光在经过合束器的拉锥段时,不可避免地将产生巨大的热量并影响激光器的稳定工作,这也是放大器的种子光功率通常限制在百瓦量级的一个原因。而侧面泵浦耦合技术可以在有源光纤的侧面实现多点泵浦注入,在分散泵浦光

注入的同时也不影响信号光的传输,能够有效避免 TFB 合束器的这些问题。常见的侧面泵浦光纤耦合技术包括 V 型槽法耦合技术<sup>[14]</sup>、嵌入反射镜法耦合技术<sup>[15]</sup>、角度磨抛法耦合技术<sup>[16]</sup>、衍射光栅泵浦耦合技术<sup>[17]</sup>和 GTWave<sup>TM</sup>(商标名字)光纤耦合技术<sup>[18]</sup>等。而在侧面泵浦耦合技术中,GTWave 光纤技术是比较成熟的能够应用到高功率光纤激光器中的技术。

GTWave 光纤通常由一根有源信号光纤和至少一根无源泵浦光纤组成,它们被共同的外包层包裹着,如图 1 所示。其中 1 为泵浦光纤,2 为信号光纤,2a 为信号光纤纤芯,2b 为信号光纤内包层,3 为

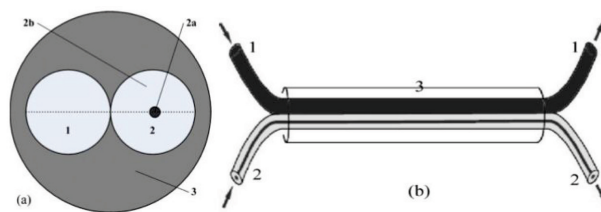


图 1 GTWave 光纤结构示意图<sup>[37]</sup>。(a)横截面;  
(b)侧视图

Fig. 1 Schematic of GTWave fiber structure<sup>[37]</sup>. (a) Cross section; (b) side-view

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-08-10; 录用日期: 2020-08-28

\* E-mail: hzhihe@163.com.com; \*\* E-mail: jq\_cao@126.com; \*\*\* E-mail: kdchenjinbao@aliyun.com

外包层。泵浦光被折射率较低的外包层限制在光纤中,通过倏逝波在泵浦光纤和信号光纤之间耦合,然后被有源纤芯吸收并产生激光。由于 GTWave 光纤的结构比普通双包层光纤更为复杂,对光纤拉制设备和技术的要求都非常高,能够做出突出成果的单位相对较少,本文首先回顾了国内外几家主要单位在 GTWave 光纤激光器方面的研究进展,然后再简要介绍其他单位的研究进展,最后给出 GTWave 光纤激光器的分析和思考,并展望了 GTWave 光纤激光器的发展趋势。

## 2 GTWave 光纤激光器研究进展

利用光纤进行侧面耦合的泵浦技术方案最早可以追溯到 1991 年美国海军实验室的固体 Nd:YAG 激光器<sup>[19]</sup>,如图 2 所示。该激光器的谐振器由一对反射镜和固体增益介质组成,而激光半导体的泵浦光通过多模光纤注入,多模光纤与增益介质紧密接触,进而通过倏逝场的耦合将泵浦光耦合到固体激光器的增益介质中去。由于固体激光器介质的折射率比光纤纤芯大很多,固体激光器的直径也远大于光纤直径,因此在激光腔周围可以放置很多的泵浦

光纤,从而大大提升泵浦能力。正是这种光纤倏逝场耦合的原理和方案给光纤激光器的发展带来了很大的启发。

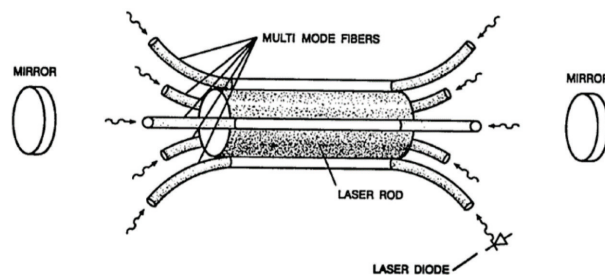


图 2 倏逝场耦合的固体激光器结构示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Schematic of solid laser coupled by evanescent field<sup>[19]</sup>

最先把这种泵浦方式应用到光纤激光器中的是英国南安普顿大学的研究小组,表 1 给出了高功率 GTWave 光纤激光器的典型研究结果。从表 1 中可以看出,主要的研究结果均集中在 SPI (Southampton Photonics Inc.)、IPG 光子公司、国防科技大学和中国工程物理研究院 4 家单位,下面将对各单位的研究结果分别进行详细的介绍。

表 1 GTWave 光纤激光器研究结果

Table 1 Research on GTWave fiber laser

Year	Power /kW	Organization	Technique
2004	0.1	SPI	Oscillator
2005	0.1	Russian Academy of Sciences	2 stages oscillator
2006	2	IPG	3 stages MOPA
2009	10.5	IPG	Tandem pumping MOPA
2011	1.1	JT Optical Engine GmbH Co. KG & SPI	MOPA
2012	17	IPG	Tandem pumping MOPA
2014	1	NUDT	2 stages MOPA
2016	2	SPI	Oscillator
2016	2	NUDT	3 stages oscillator
2016	2	CAEP	(2+1)GTWave MOPA
2016	5	CAEP	(3+1)GTWave MOPA
2017	3	NUDT	3 stages oscillator
2017	6	CAEP	(3+1)GTWave MOPA
2018	4	NUDT	4 stages oscillator & MOPA
2018	10.45	CAEP	(8+1)GTWave MOPA

### 2.1 南安普顿大学研究进展

从 2000 年开始英国南安普顿大学的光子研究中心便研究了这种基于倏逝场耦合的光纤结构,并通过改进拉丝塔制作出了可用的光纤<sup>[20-22]</sup>。2002

年南安普顿大学陆续报道了这种光纤结构中的侧面耦合包层泵浦激光器,把这种泵浦方案叫做 GTWave 技术,并首先应用到了通信波段的掺铒光纤放大器中<sup>[23]</sup>。2004 年南安普顿大学申请了专

利<sup>[24]</sup>, 简单介绍了光纤的拉制原理, 如图 3(a) 所示, 并给出了多种保持光学接触的侧面泵浦光纤排布结

构, 如图 3(b) 所示, 说明这种光纤结构的设计是非常灵活的, 并列出了这种结构的优势和应用实例。

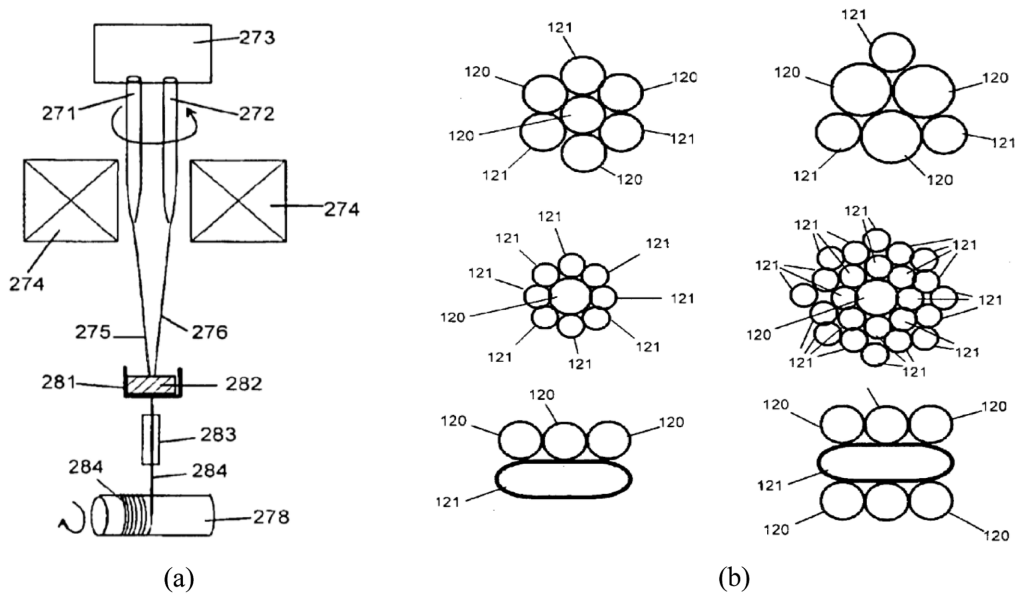


图 3 GTWave 光纤<sup>[24]</sup>. (a) GTWave 光纤拉制原理; (b) 多种排布的光纤结构 (120 为信号光纤, 121 为泵浦光纤)  
 Fig. 3 GTWave fiber<sup>[24]</sup>. (a) Drawing principle of GTWave fiber; (b) multiple arrangements of fiber structure (120 denotes the signal fiber, 121 denotes the pump fiber)

南安普顿大学的光子研究中心在国际光学工程学会 (SPIE) 会议及其他期刊中发表了许多 GTWave 光纤相关的研究论文<sup>[24-28]</sup>。2004 年, Norman 等<sup>[18]</sup>报道了 GTWave 光纤激光器的结构

和原理, 并得到了接近 80 W 的输出功率, 如图 4(a) 所示, 其光束质量  $M^2 = 1.1$ , 同时南安普顿大学的 SPI 公司还推出了基于 GTWave 光纤的 70 W 风冷和 100 W 水冷的激光器产品, 如图 4(b) 所示。

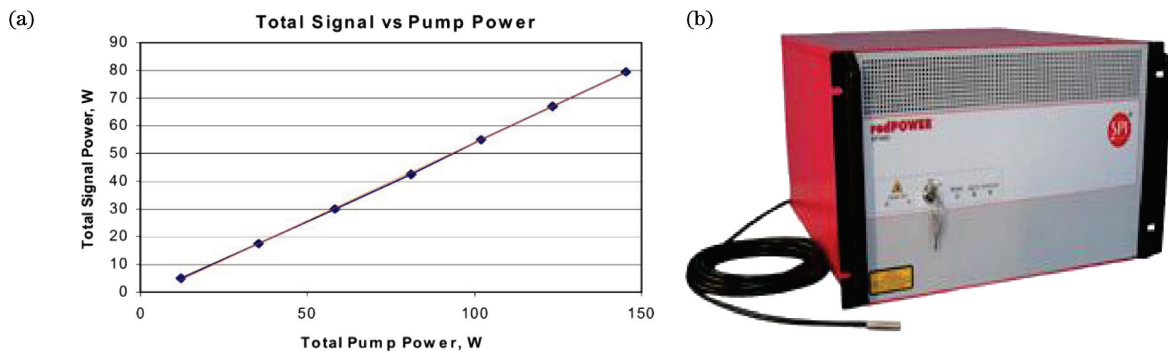


图 4 百瓦 GTWave 光纤激光器<sup>[18]</sup>. (a) 输出功率曲线; (b) 产品图  
 Fig. 4 Hundred watt GTWave fiber laser<sup>[18]</sup>. (a) Output power curve; (b) product photo

2006 年, Norman 等<sup>[25-27]</sup>又报道了 200 W 的 GTWave 光纤振荡器, 如图 5(a) 所示, 其光束质量  $M^2 < 1.1$ , 如图 5(b) 所示。该激光器采用双向泵浦振荡器的方式获得了单腔 200 W 的功率输出。然后他们利用该振荡器并通过同样泵浦结构主振荡功率放大器 (MOPA) 获得了 400 W 的功率输出, 如图 6 所示。值得注意的是, 两级 GTWave 光纤的信号纤参数完全相同可以直接熔接, 利用侧面耦合泵浦的方式注入泵浦光而不需要引入其他器件, 激光

器在 1000 h 出光的过程中非常稳定。之后 SPI 公司基于这种激光器结构推出了 RedPOWER™ 系列 200 W 风冷和 400 W 水冷的商用产品。由于采用了 GTWave 光纤双向泵浦方式, 其功率扩展较强, 同时该级联放大的方式也不受合束器的限制, 因此能够较早地推出高功率高稳定性的激光器产品。

2011 年, SPI 公司的 Zervas 等<sup>[28]</sup>研究了 GTWave 光纤中的泵浦吸收问题。同年, 德国耶拿

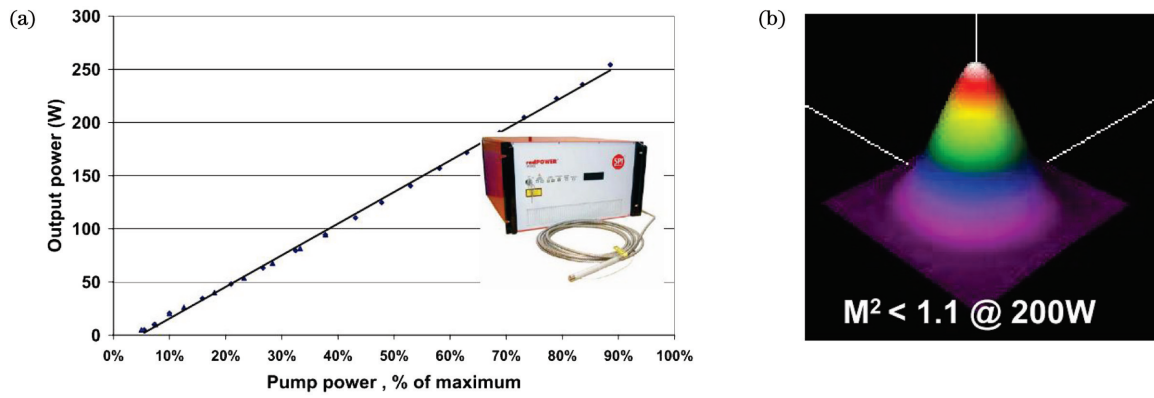


图 5 SPI 200 W 光纤激光器<sup>[25]</sup>。(a)输出功率曲线;(b)光束质量图

Fig. 5 200 W GTWave fiber laser developed by SPI<sup>[25]</sup>. (a) Output power curve; (b) beam quality

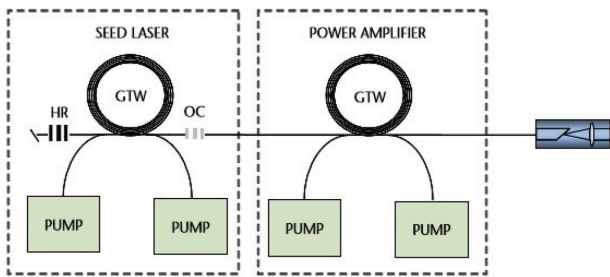


图 6 SPI 400 W 光纤放大器结构示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 6 Schematic of 400 W fiber amplifier developed by SPI<sup>[27]</sup>

的 Zimer 等<sup>[29]</sup>与 SPI 公司合作报道了 1.1 kW 的 GTWave 光纤放大器。他们采用 28 路功率为 75 W 的 960 nm 半导体激光器 (LD) 作为泵源, 通过振荡器和一级 MOPA 放大共产生了功率为 1.1 kW 的 1070 nm 激光, 总体光光效率 65%, 激光器原理图、输出功率和光谱如图 7 所示。信号光纤的模场直径为 13.5  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 200  $\mu\text{m}$ , 即通过准单模光纤实现了千瓦输出, 所测光谱受激拉曼散射效应抑制比大于 25 dB。由于采用了 GTWave 光纤双向泵浦和级联放大方式, 能够在较小纤芯和包层中获得

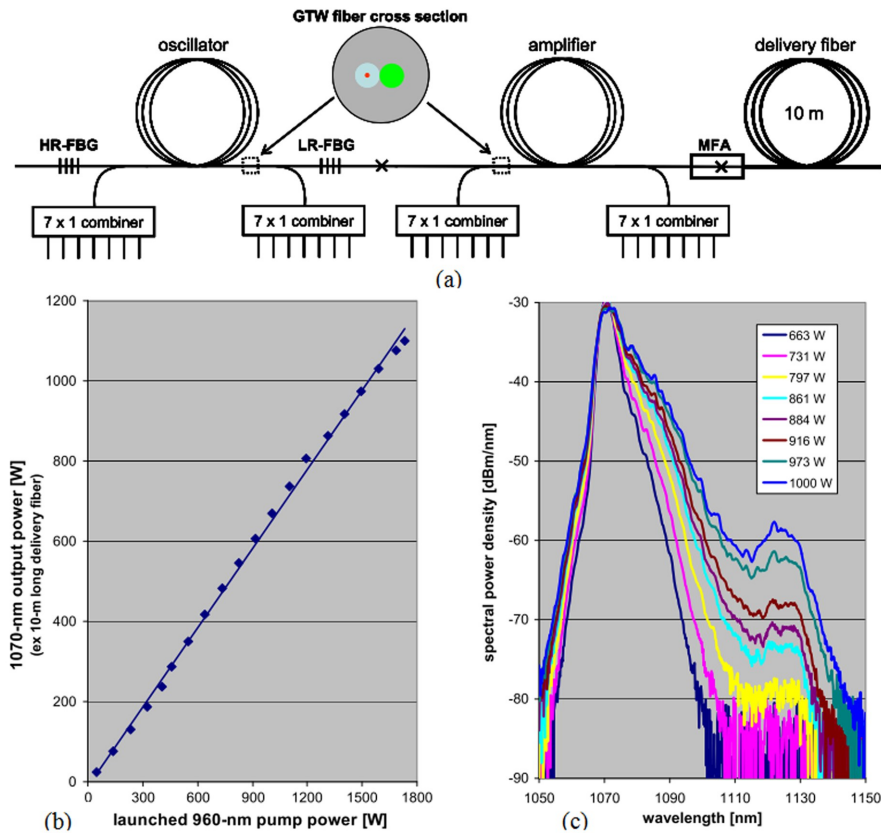


图 7 1 kW GTWave 光纤激光器<sup>[29]</sup>。(a)原理图;(b)输出功率;(c)光谱图

Fig. 7 1 kW GTWave fiber laser<sup>[29]</sup>. (a) Schematic diagram; (b) output power; (c) spectrum diagram

千瓦准单模输出,显示了 GTWave 光纤输出单模高功率激光的较强能力。

2016 年, SPI 公司的 Codemard 等<sup>[30]</sup> 报道了功率为 2 kW 的 GTWave 光纤振荡器,该激光器具有较好的受激拉曼散射(SRS)和横模不稳定性(TMI)抑制效果,输出光谱如图 8 所示。他们采用 12 个功率为 140 W 的 940 nm LD 泵源合成 1 路,通过直径为 200 μm 的泵浦光纤双向注入到直径为 125 μm

的信号光纤中,总泵浦功率可达 3.3 kW,最终获得了 2155 W 的振荡器输出,斜率效率为 72%,光束质量  $M^2=1.2$ 。随后,其官网推出了功率为 2 kW 的单模激光器产品。采用了 GTWave 光纤双向泵浦方式,可以使总共 3.3 kW 的泵浦光最终耦合到直径为 125 μm 的信号光纤包层中,这充分显示了 GTWave 光纤超强的泵浦注入能力,同时采用 940 nm 泵源可以较好抑制 TMI。

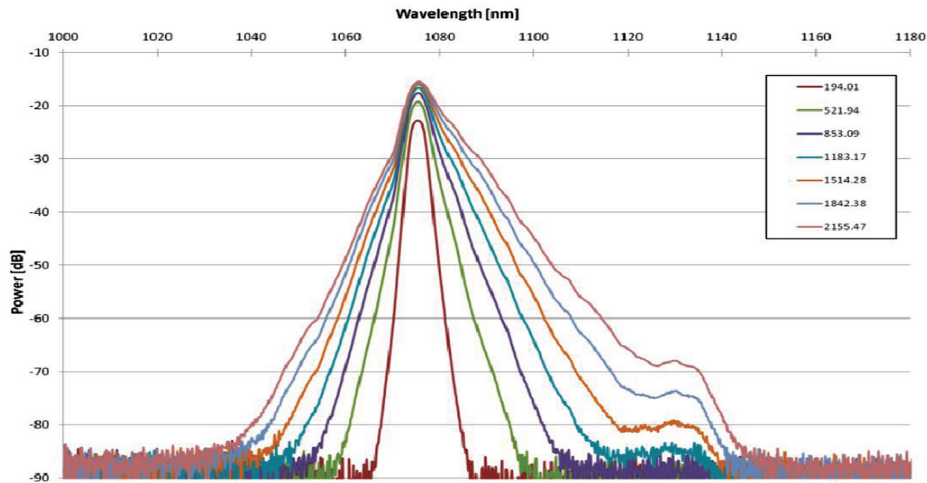


图 8 SPI 2 kW 光纤激光器输出光谱图<sup>[30]</sup>

Fig. 8 Output spectra of 2 kW fiber laser developed by SPI<sup>[30]</sup>

南安普顿大学最早制作出了 GTWave 光纤,并在早期搭建了高功率光纤激光器,初步展示了 GTWave 光纤强大的泵浦注入能力和功率扩展能力,还推出了一系列的激光器产品,并在研究获得了广泛的应用。

### 2.2 IPG 光子公司的研究进展

美国的 IPG 光子公司是世界激光器的领先者,其激光器的性能指标远高于其他单位。2005 年,

IPG 光子公司的 Gapontsev 等<sup>[31]</sup> 报道了输出波长为 1075 nm、输出功率为 2 kW 的光纤激光器,其光束质量  $M^2 < 1.2$ 。该激光器的各级均使用包层直径为 125 μm 的 GTWave 光纤双向泵浦结构,而每个泵浦端通过 19×1 的合束器注入功率为 380 W 的泵浦光,其中种子振荡器输出功率为 490 W,通过一级预放大器后输出功率为 1020 W,最后经过两级级联主放大器后输出功率为 2189 W,如图 9 所示。

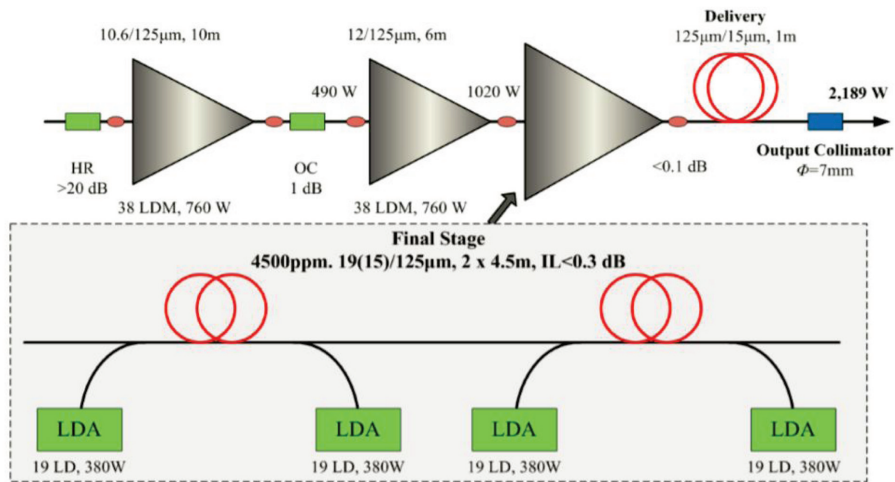


图 9 IPG 2 kW 光纤激光器结构原理图<sup>[31]</sup>

Fig. 9 Schematic of 2 kW fiber laser structure developed by IPG<sup>[31]</sup>

值得注意的是,由于采用 GTWave 光纤双向泵浦和级联放大的方式,仅仅利用众多数量功率为 20 W 的 LD 就在 125  $\mu\text{m}$  的包层直径中获得了 2 kW 功率的输出,该结果充分显示了 GTWave 光纤惊人的泵浦注入能力。2006 年,IPG 光子公司 Fomin 等<sup>[32]</sup>报道了功率为 3 kW 的光纤激光器,但是没有公开技术细节。

2009 年 IPG 申请了一些光纤侧面耦合泵浦激光器技术方面的专利<sup>[33-34]</sup>,这也是他们掌握的侧面泵浦光纤激光器关键核心技术之一。专利中指出输入到侧面泵浦光纤的合束器应该由多模光纤到多模光纤改为单模光纤到多模光纤,即利用光纤激光器级联泵浦的方式可以大大提高泵浦光的亮度,如图 10 所示;同时,级联泵浦的波长更接近激光波长,量子亏损变小,降低了 GTWave 光纤的热负荷。

同年,IPG 光子公司通过官方网站宣布了震惊世界的高功率全光纤化单模激光器研究结果,获得了单纤单模 10 kW 的光纤激光输出<sup>[35]</sup>,如图 11 所示。其中的泵浦源为 47 个功率为 270 W 的 1018 nm 的高亮度光纤激光器,通过一个 57 $\times$ 1 的泵浦合束器注入到 GTWave 光纤的泵浦光纤中,

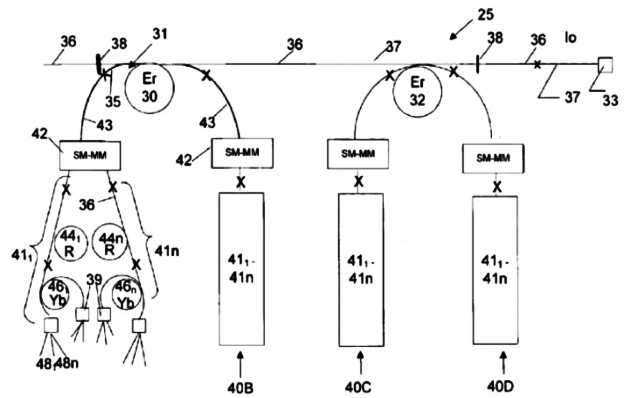


图 10 IPG 专利中的激光器结构方案图<sup>[33-34]</sup>

Fig. 10 Schematic of fiber laser in IPG's patent<sup>[33-34]</sup>

利用后向泵浦方式获得了 10.5 kW 的功率输出。由于采用 GTWave 光纤后向泵浦技术和 1018 nm 光纤激光器级联泵浦的方式,能够将高功率高亮度的泵浦光注入到有源光纤中,同时还能隔离信号光对泵浦激光器的影响,最终获得了 10 kW 的激光输出。随后,IPG 公司推出了 5 kW 和 10 kW 光纤激光器产品,他们的结构是类似的,只是泵浦源的数量不同,主放大器的模场面积和光纤的长度不同。

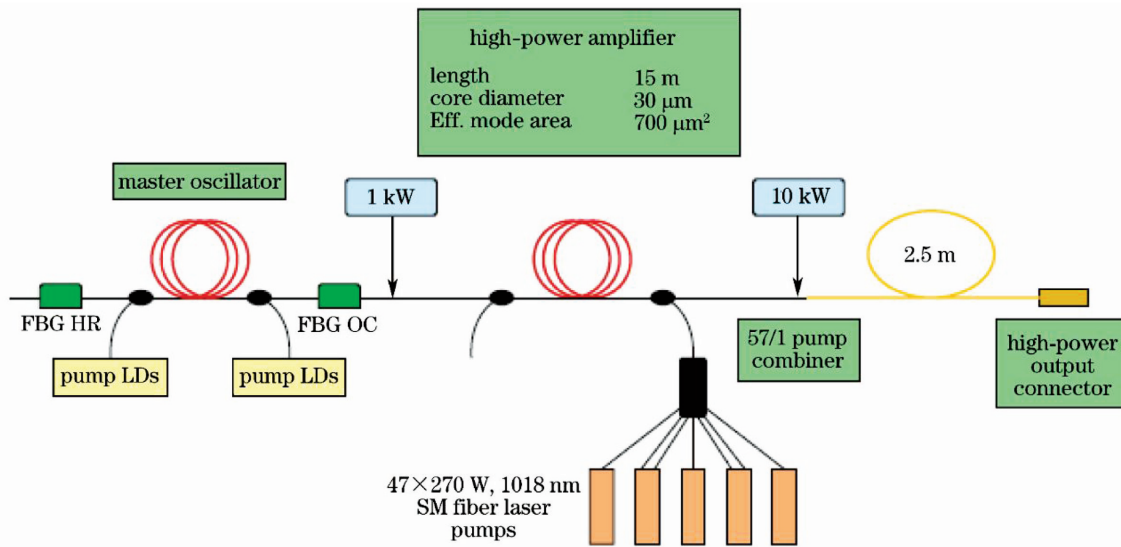


图 11 IPG 10 kW 光纤激光器结构示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 11 Schematic of 10 kW fiber laser structure developed by IPG<sup>[35]</sup>

2012 年,IPG 光子公司的 Ferin 等<sup>[36]</sup>又报道了 17 kW 的光纤激光器。该激光器由 1018 nm 光纤激光器泵浦,在 50  $\mu\text{m}$  纤芯中将功率为 4 kW 的 1075 nm 种子激光放大到了 17 kW,光束参量为 2 mm $\cdot$ mrad,转换效率高达 94%。虽然他们没有公布技术细节,但是与前面的 10 kW 光纤激光器具有较强的继承性;即使该激光器不再是单模的,其功率

和亮度均远高于其他激光器结果。

IPG 光子公司较早地发展了 GTWave 光纤,并在早期就充分展示了 GTWave 光纤灵活的设计和惊人的泵浦注入能力,较早地实现了数千瓦激光器;结合光纤激光器级联泵浦的设计理念,2009 年就获得了 10 kW 高功率输出,远远高于其他研究结果。

### 2.3 国防科技大学的研究进展

2011 年开始,作者所在团队开始从理论上研究 GTWave 光纤结构的特性,分析了泵浦光的耦合和传输特性<sup>[37]</sup>,并对比了 GTWave 光纤激光器与普通双包层光纤激光器的特性<sup>[38]</sup>。2013 年,国防科技大学与中国电子科技集团第 23 研究所合作研发 GTWave 光纤,当年就获得了可用的光纤,并在国

内率先搭建了百瓦的 GTWave 光纤放大器<sup>[39]</sup>。2015 年,采用两台功率为 600 W 的 LD 分别泵浦放大两段自制的 GTWave 光纤,通过将信号光纤直接熔接的方式搭建了两级级联前向泵浦的放大器,如图 12 所示,并获得了 1009 W 的功率输出<sup>[40-41]</sup>,斜率效率可达 79.3%,验证了高功率高效率级联放大的可行性。

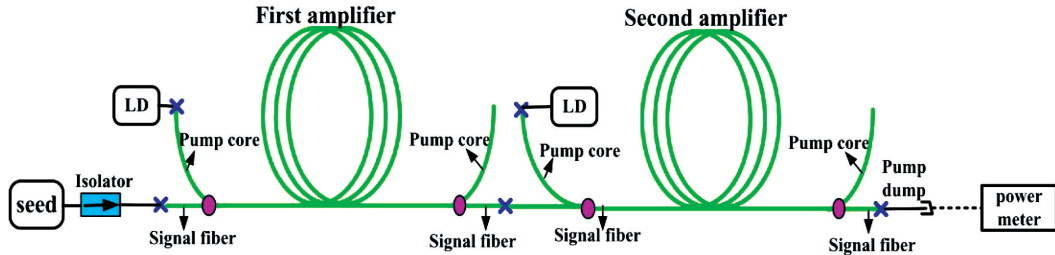


图 12 级联放大 1 kW GTWave 光纤激光器结构示意图<sup>[40]</sup>

Fig. 12 Schematic of cascade-amplified 1 kW GTWave fiber laser structure<sup>[40]</sup>

由于 GTWave 光纤具有非常好的级联泵浦功率扩展能力,团队还重点研究了多级级联泵浦 GTWave 光纤振荡器。2016 年,通过两级级联双向泵浦和第三级后向泵浦放大的方获得了无需泵浦倾泄的 2 kW<sup>[42-43]</sup>

振荡器输出,斜率效率为 72.8%,如图 13 所示,其中每一个泵浦端均采用  $7 \times 1$  合束器注入功率约为 600 W 的泵浦光,前面两级剩余的泵浦光可以在第三级充分吸收,因此最后输出光中几乎没有残余泵浦光。

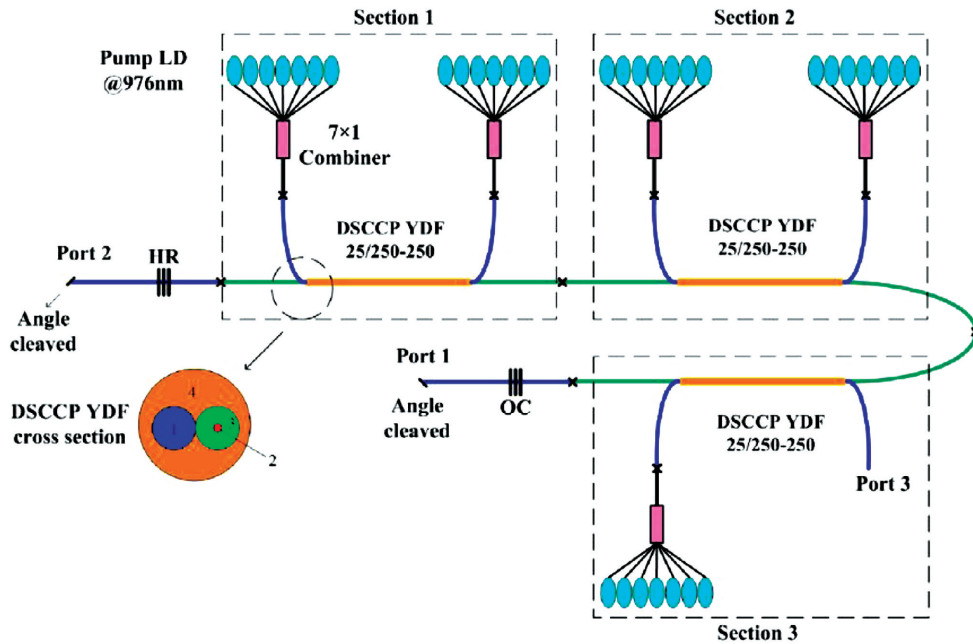


图 13 级联放大 2 kW 振荡器结构示意图<sup>[41-42]</sup>

Fig. 13 Schematic of 2 kW cascaded amplified fiber oscillator<sup>[41-42]</sup>

2017 年和 2018 年分别将双向泵浦的级联数量扩展为 3 级和 4 级,如图 14 所示,获得了 3 kW<sup>[44-45]</sup>和 4 kW<sup>[46-47]</sup>的振荡器激光输出,斜率效率分别为 77.4%和 73%,受激拉曼抑制比均大于 48 dB。另外,在前端添加种子源,并通过双向泵浦和级联放大的方式,获得了 4 级级联放大的 4 kW 放大器输出。

国防科技大学在国内率先开展 GTWave 光纤理论和实验研究,较快地验证了国产千瓦级 GTWave 光纤激光器,并利用自制 GTWave 光纤开展了数千瓦双向泵浦多级级联放大器和多级级联泵浦振荡器的研究,取得了较好的结果,但是在光纤研制方面还需要进一步改进。

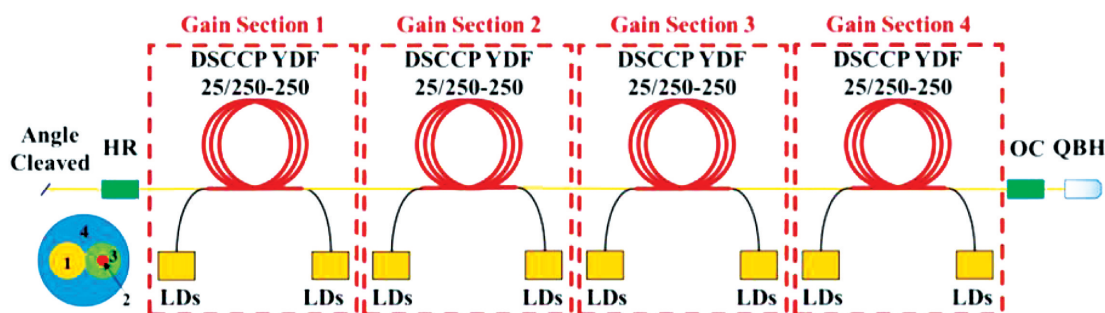


图 14 级联放大 4 kW 光纤振荡器结构示意图<sup>[46]</sup>

Fig. 14 Schematic of 4 kW cascaded amplified fiber oscillator<sup>[46]</sup>

## 2.4 中国工程物理研究院的研究进展

与其他单位发展思路不同的是,中国工程物理研究院采用发展多根泵浦光纤 GTWave 技术思路。2016 年,中国工程物理研究院的 Zhan 等<sup>[48]</sup>报道了功率为 2 kW (2+1) GTWave 光纤激光器,如图 15

所示。他们采用功率为 190 W 的振荡器作为种子源,四个泵浦端口均通过  $(6+1) \times 1$  的合束器注入功率为 665 W 的 976 nm 泵浦光,获得了 2.02 kW 的放大功率输出,斜率效率为 67.8%。这也展示了他们具备多根泵浦光纤 GTWave 的研制能力。

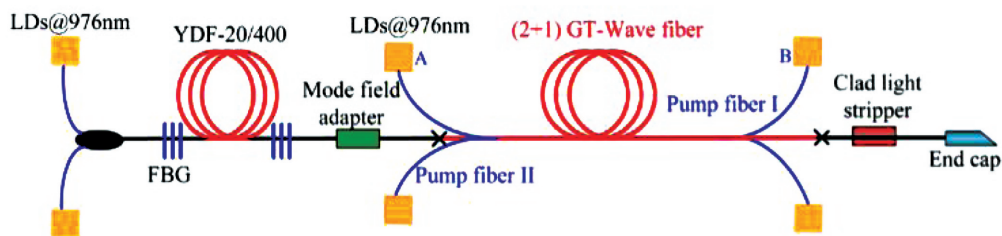


图 15 (2+1) GTWave 光纤激光器结构示意图<sup>[48]</sup>

Fig. 15 Schematic of (2+1) GTWave fiber laser structure<sup>[48]</sup>

同年,中国工程物理研究院的 Zhan 等<sup>[49]</sup>又报道了 5 kW 的 (3+1) GTWave 光纤放大器,如图 16 所示。他们采用功率为 1210 W 的振荡器作为种子源,三个后向泵浦端口和两个前向端口均采用功率为 900 W 的 976 nm LD 注入泵浦光,还有一个前向泵浦端口采用  $7 \times 1$  的合束器注入功率为 690 W 的

976 nm 泵浦光,获得了 5.07 kW 的放大功率输出,斜率效率为 74.5%。2017 年,他们又报道了 6 kW 的 GTWave 光纤放大器,斜率效率为 69.8%<sup>[50]</sup>。这进一步展示了他们在多根泵浦光纤的 GTWave 光纤激光器的研制能力,并获得了 5 kW 高功率国产光纤激光器的输出。

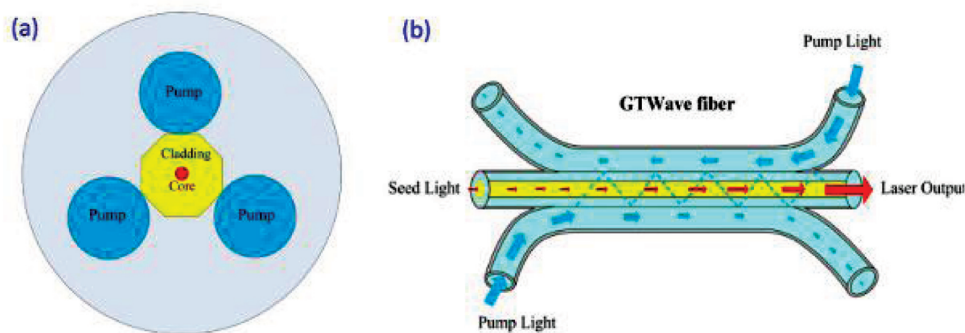


图 16 (3+1) GTWave 光纤结构示意图<sup>[49]</sup>。(a) 横截面; (b) 侧视图

Fig. 16 Schematic of (3+1) GTWave fiber structure<sup>[49]</sup>. (a) Cross section; (b) side-view

2018 年,中国工程物理研究院的 Zhan 等<sup>[51]</sup>又报道了 8.72 kW 的 (8+1) GTWave 光纤放大器,如图 17 所示。他们采用功率为 79.8 W 的振荡器作为种子源,6 个后向泵浦端口均通过功率为

1.7 kW 的 976 nm LD 注入总共 10.66 kW 的泵浦光,获得了 8.72 kW 的放大功率输出,斜率效率为 81%。采用的光纤结构如图 18 所示,8 根泵浦光纤与中间的信号光纤几乎完全融为一体,与泵浦的光



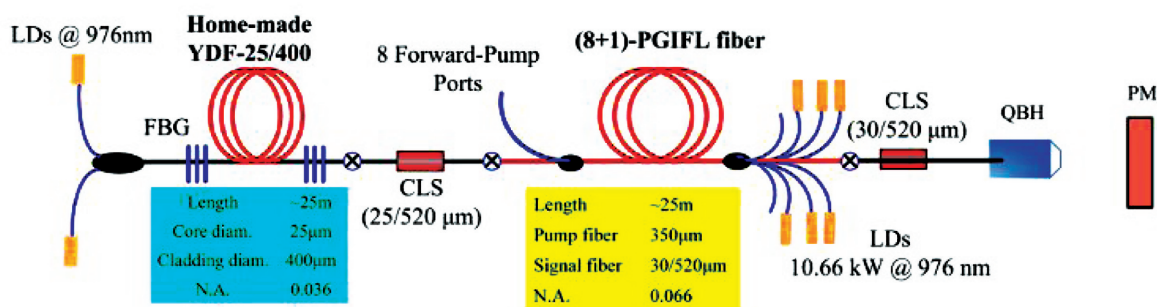


图 17 (8+1) GTWave 光纤放大器结构示意图<sup>[51]</sup>

Fig. 17 Schematic of (8+1) GTWave fiber amplifier structure<sup>[51]</sup>

纤合束器较为相似。通过改进方案和增加泵浦功率,同年他们利用同样的光纤又实现了 10.45 kW 的激光输出<sup>[52]</sup>。他们可以根据现有泵浦源的参数

灵活设计 GTWave 光纤的结构,而不必局限于商用产品的参数,使得资源整合得以最大化利用,最终获得了大于 10 kW 的激光输出。

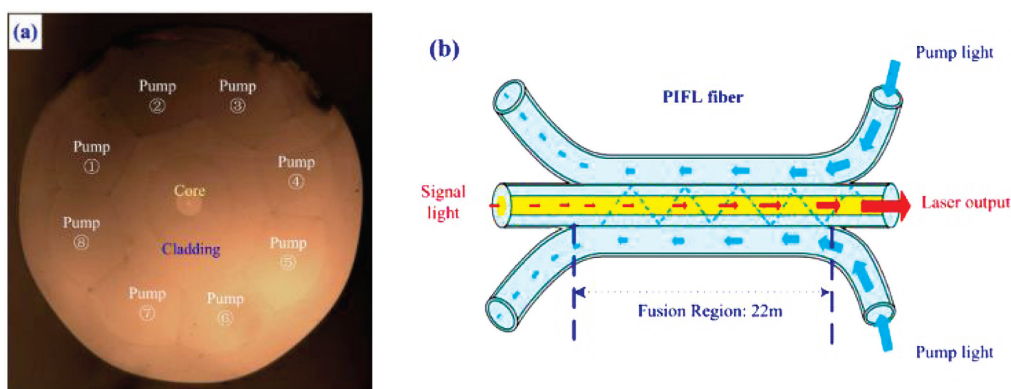


图 18 (8+1) GTWave 光纤结构图<sup>[51]</sup>。(a)横截面照片 (b)侧视图

Fig. 18 Schematic of (8+1) GTWave structure<sup>[51]</sup>。(a) Cross section graph; (b) side-view

中国工程物理研究院虽然在 GTWave 光纤的研制上起步较晚,但是进步很快,并且一开始就采取发展多根泵浦光纤 GTWave 技术的思路,其光纤设计和研制能力均较强,在较短时间内实现了 10 kW 的 GTWave 光纤激光器输出。

### 2.5 其他研究进展

2005 年,俄罗斯科学院的研究小组陆续发表了一系列基于这种 GTWave 光纤方案的文章<sup>[53-57]</sup>,他们称之为 MFC (multi-element first cladding) 光纤。他们在理论和实验方面做了探索性的工作,并且由 FORC RAN 制造了这种光纤。虽然大多数都是应用在低功率激光器中,但是这种光纤应用起来方便简洁,如同普通光学器件一样具有非常好的兼容性。同年俄罗斯科学院报道了基于 MFC 光纤两级泵浦的振荡器输出 100 W 的功率,如图 19 所示,并基于倏逝场耦合利用光线理论推导了耦合方程,得到了耦合系数随入射角度的关系。

除了实验研究,也有部分单位进行了相应的理论研究。2005 年,加拿大 Ryerson 大学的 Gu

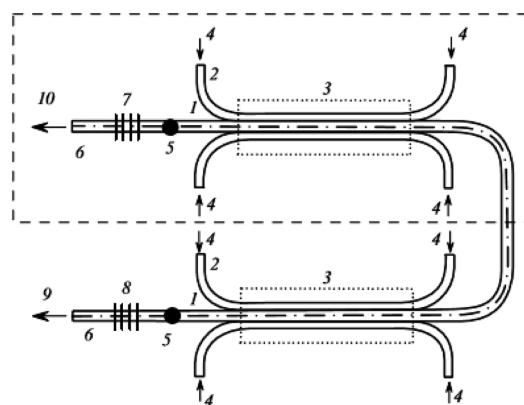


图 19 两级泵浦的 100 W GTWave 振荡器示意图<sup>[53]</sup>

Fig. 19 Schematic of two stages pump 100 W GTWave fiber oscillator<sup>[53]</sup>

等<sup>[58]</sup>也研究了这种 GTWave 光纤中的光场耦合问题,他们建立了数学模型并与实验进行对比,探讨了耦合过程的非振荡实验现象。2011 年,中国科学院西安光学精密机械研究所的赵保银等<sup>[59]</sup>在《中国激光》上发表了一篇介绍基于这种泵浦技术的光纤放大器的理论文章。他们研究了小芯径泵浦光纤中单

个模式的耦合与吸收,结合速率方程和热传导方程分析了光场分布和温度场分布。2013年,清华大学的 Xiao 等<sup>[60]</sup>研究了 GTWave 光纤中单个模式耦合和吸收过程,他们认为高阶模的耦合吸收会较好。之后他们又研究了在有泵浦回路情况下的耦合吸收问题<sup>[61]</sup>。2017年,俄罗斯科学院的 Bochkov 等<sup>[62]</sup>还研究了(2+1)GTWave 光纤中的泵浦光传输特性。2018年,华中科技大学的 He 等<sup>[63]</sup>分析了高功率 GTWave 光纤激光器中的激光效率和热效应等问题。2019年,国防科技大学的 Du 等<sup>[64]</sup>理论分析了多根泵浦光纤情况下的泵浦光耦合传输特性,同时还通过理论分析了多级级联泵浦放大情况下的拉曼阈值特性<sup>[65]</sup>。

许多单位都对 GTWave 光纤表现出了浓厚的兴趣,也对其发展前景非常乐观,但是由于缺乏足够的资金投入和技术支撑,发展比较缓慢甚至停滞。他们在 GTWave 光纤方面的研究主要集中在理论分析和低功率光纤实验,并进行一些初步的探索和尝试,但是掌握这门技术还需要更大的投入。

### 3 分析和思考

GTWave 光纤激光器经过近二十年的高速发展,取得了非常瞩目的成果。从 2000 年诞生开始,2004 年便获得了百瓦的功率输出,并分别于 2005 年和 2006 年突破 2 kW 和 3 kW 的单纤单模功率输出,与其他方案的光纤激光器最高功率水平基本持平;2009 年,一举突破 10 kW 的单纤单模功率输出,远远领先于其他光纤激光器的输出功率。从诞生到领先,只用了十年的时间,足以说明其发展的迅猛,其功率扩展能力之强。国内的研究起步较晚,从 2011 年开始有少量理论研究,也在不到十年的时间里输出功率达到了 10 kW 量级。

GTWave 光纤激光器的一个显著特点是从一开始就多数采用双向泵浦结构,而普通高功率双包层光纤激光器由于早期缺乏后向合束器而通常仅使用前向泵浦结构。另外,从 GTWave 光纤激光器研究的过程来看,其发展思路主要集中在两个方面:一是通过在光纤激光器的纵向进行级联放大实现功率扩展,只需要对现成的 GTWave 光纤激光器进行级联,就能够较容易地实现功率的成倍扩展,但是光纤长度的增加,使其易受到受激拉曼效应的限制;二是研制在 GTWave 光纤横向具有较多泵浦光纤的结构来实现功率扩展,能够成倍地增加激光器的泵浦注入能力从而实现功率扩展,由于结构更加复杂,光

纤更粗,对工艺要求也更高,因此数量的进一步扩展也将受到限制。

尽管 GTWave 光纤激光器的优势特别明显,但是世界范围的研究机构还是非常有限的,能够做出突出成果的更是屈指可数。由于 GTWave 光纤的研制工艺非常复杂,需要投入非常大的人力、物力和财力,很多单位有研究的想法却缺乏相应的条件,使得相关的理论和实验研究均集中在少数几家单位;而由于技术的垄断,这些单位也不会推出商业化的光纤,超高功率光纤激光器的市场只能掌握在他们手中。

近几年来,普通双包层光纤激光器获得了极大的发展,尤其是后向合束器的商业化推广,使得高功率光纤激光器的双向泵浦技术被突破,其功率输出水平也迅速超过了 5 kW。这些激光器容易搭建,也缩小了 GTWave 光纤激光器的优势,值得我们重新思考这其中的问题。GTWave 光纤激光器由于固有的分布式侧面耦合包层泵浦特点,仍然具有无可取代的优点:1)其功率扩展能力更强,方式更加灵活;2)泵浦光是分布式注入的,其热量分布更加均衡;3)整个信号通道没有薄弱点,能够承受更高功率。

随着国内外光纤激光器的发展,GTWave 光纤技术也将获得更多的关注,很多面临的问题也将逐步解决,尤其是 GTWave 光纤的机理、技术和工艺的深入和突破;同时,GTWave 光纤激光器热效应与非线性效应的研究也将更加丰富,GTWave 光纤技术的研究也将越来越深入。

### 4 结束语

本文主要介绍了几家单位在高功率 GTWave 光纤激光器方面的典型研究结果,从 GTWave 光纤激光器的发展历程来看,其发展非常迅猛。相比普通双包层光纤其优势非常明显,易于实现双向泵浦,且在纵向级联和横向泵浦光纤数量上都可以成倍增加泵浦注入能力,功率扩展能力非常强;由于泵浦光是分布式注入的,其热量分布也更加均匀,且整个信号通道不受干扰,适合应用于较高功率光纤激光器中。但是由于研制工艺非常复杂,技术垄断等原因,研究成果仅限于少数几家单位。但是随着关注的人越来越多以及技术的发展和推广,GTWave 光纤激光器的商业化时代终将到来。

### 参 考 文 献

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al.

- Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [2] Horley R, Norman S, Zervas M N. Progress and development in fibre laser technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6738: 67380K.
- [3] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [4] Nilsson J, Ramachandran S, Shay T M, et al. Introduction to the issue on high-power fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 1-2.
- [5] 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.
- [6] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad, offset core Nd fiber laser [C]// *Optical Fiber Sensors*, 1988, PD5: 533-536.
- [7] Zellmer H, Tünnermann A, Welling H, et al. Double-clad fiber laser with 30 W output power [J]. 1997: FAW18.
- [8] Liu A P, Ueda K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers [J]. *Optics Communications*, 1996, 132(5/6): 511-518.
- [9] Jeong Y, Sahu J, Payne D, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [10] Kosterin A, Temyanko V, Fallahi M, et al. Tapered fiber bundles for combining high-power diode lasers [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(19): 3893-3900.
- [11] Digiovanni D J, Stentz A J. Tapered fiber bundles for coupling light into and out of cladding-pumped fiber devices: US5864644 [P]. 1999-01-26.
- [12] Xiao Q R, Ren H C, Chen X, et al. Tapered fiber bundle  $7 \times 1$  end-pumping coupler capable of high power CW operation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(24): 2442-2445.
- [13] Li W, Chen X, Wu Z C, et al. combining power of high power fiber laser exceeds 3 kW [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 242. 李伟, 陈曦, 武子淳, 等. 大功率光纤激光合成功率突破 3 kW [J]. *强激光与粒子束*. 2010, 22(2): 242.
- [14] Ripin D J, Goldberg L. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded v-grooves [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(25): 2204-2205.
- [15] Koplou J P, Moore S W, Kliner D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(4): 529-540.
- [16] Hakimi F, Hakimi H. Side pumped optical amplifiers and lasers: US6370297 [P]. 2002-04-09.
- [17] Herda R, Liem A, Schnabel B, et al. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(3): 276-277.
- [18] Norman S, Zervas M N, Appleyard A, et al. Latest development of high-power fiber lasers in SPI [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 229-237.
- [19] Howerton P H, Cordray D M. Diode pumping of asolid state laser using evanescent field fiber optic coupling: a proposed technique [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 1911-1915.
- [20] Grudinin A B, Nilsson J, Turner P W. New generation of cladding pumped fibre lasers and amplifiers [J]. *Conference Digest. 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*, 2000: CWA3.
- [21] Renaud C. High-power diode-pumped fibre-laser [D]. Southampton: University of Southampton, 2001.
- [22] Alam S U, Nilsson J, Turner P W, et al. Low cost multi-port reconfigurable erbium doped cladding pumped fibre amplifier [EB/OL]. [2020-06-22]. <https://eprints.soton.ac.uk/16934/1/2013.pdf>.
- [23] Yla-Jarkko K H, Codemard C, Singleton J, et al. Low-noise intelligent cladding-pumped L-band EDFA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 15(7): 909-911.
- [24] Yla-Jarkko K, Alam S U, Turner P W, et al. Cladding pumping technology for next generation fiber amplifiers and lasers [C]// *OAA*, 2003: TuC1.
- [25] Norman S, Zervas M, Appleyard A, et al. Power scaling of high-power fiber lasers for micromachining and materials processing applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6102: 61021P.
- [26] Zervas M N, Ghiringhelli F, Durkin M K, et al. Distribution of photodarkening-induced loss in Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 79140L.
- [27] Norman S, Appleyard A. Fiberlasers conquer the industrial mainstream market [J]. *Laser Technik Journal*, 2009, 6(3): 45-50.
- [28] Zervas M N, Marshall A, Kim J. Effective absorption in cladding-pumped fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 79141T.
- [29] Zimer H, Kozak M, Liem A, et al. Fibers and fiber-optic components for high-power fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 791414.

- [30] Codemard C A, Zervas M N. UK industrial high-power fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9989: 998907.
- [31] Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, et al. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C] // CLEO/Europe. 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005, June 12-17, 2005, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2005: 508.
- [32] Fomin V, Mashkin A, Abramov M, et al. 3 kW Yb fibre lasers with a single-mode output [C] // International Symposium on High-Power Fiber Lasers and their Applications, 2006.
- [33] Gapontsev V P, Fomin V, Platonov N. Powerful fiber laser system: US7593435 [P]. 2009-09-22.
- [34] Kashiwagi M. Fiber laser system: US9966727 [P]. 2018-05-08.
- [35] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology [C] // Proceeding of the 5th International Workshop on Fiber Laser, 2009.
- [36] Ferin A, Gapontsev V, Fomin V, et al. 17 kW CW laser with 50  $\mu\text{m}$  delivery [C] // 15th International Conference on Laser Optics. Jun. 25-29, 2012, St. Petersburg, Russia, 2012: TuSY1.
- [37] Huang Z H, Cao J Q, Guo S F, et al. The characteristics of pump light in side-coupled cladding-pumped fibers [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(4): 293-297.
- [38] Huang Z H, Cao J Q, Guo S F, et al. Comparison of fiber lasers based on distributed side-coupled cladding-pumped fibers and double-cladding fibers [J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 2187-2195.
- [39] Yu Y, Huang Z H, Cao J Q, et al. Experimental study on bidirectional distributed side-pumped single mode optical fiber amplifiers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070602. 余宇, 黄值河, 曹润秋, 等. 双向分布式侧面抽运单模光纤放大器的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070602.
- [40] Huang Z H, Cao J Q, An Y Y, et al. A kilowatt all-fiber cascaded amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1683-1686.
- [41] Chen J B, Cao J Q, Pan Z Y, et al. Home-made distributed side-pumped fiber laser with kW output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0219002. 陈金宝, 曹润秋, 潘志勇, 等. 全国产分布式侧面抽运光纤激光器实现千瓦输出 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0219002.
- [42] Ying H Y, Yu Y, Cao J Q, et al. 2 kW pump-light-stripper-free distributed side-coupled cladding-pumped fiber oscillator [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(6): 065102.
- [43] Chen J B, Cao J Q, Pan Z Y, et al. Home-made multi-cascaded distributed side-pumped fiber oscillator with 2 kW output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415002. 陈金宝, 曹润秋, 潘志勇, 等. 基于国产光纤的多级级联分布式侧面抽运光纤振荡器实现 2 kW 的功率输出 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0415002.
- [44] Chen H, Cao J Q, Huang Z H, et al. 3-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillator with high SRS suppression [C] // 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [45] Chen J B, Cao J Q, Huang Z H, et al. Home-made 3-kilowatt distributed side-pumped oscillator with high SRS suppression [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0315002. 陈金宝, 曹润秋, 黄值河, 等. 基于国产光纤的多级级联分布式侧面抽运光纤振荡器实现强拉曼抑制的 3 kW 量级功率输出 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0315002.
- [46] Chen H, Cao J Q, Huang Z H, et al. 4-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators [C] // Laser Congress 2018 (ASSL), Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 2018.
- [47] Chen H, Cao J Q, Huang Z H, et al. Experimental investigations on multi-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators [J]. Laser Physics, 2019, 29(7): 075103.
- [48] Zhan H, Wang Y Y, Peng K, et al. 2 kW (2+1) GT-wave fiber amplifier [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(4): 045103.
- [49] Zhan H, Liu Q, Wang Y, et al. 5 kW GTWave fiber amplifier directly pumped by commercial 976 nm laser diodes [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27087-27095.
- [50] Zhan H, Peng K, Wang Y Y, et al. 6 kW GTWave fiber amplifier [C] // Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou, Guangdong. Washington, D.C.: OSA, 2017.
- [51] Zhan H, Peng K, Liu S, et al. Pump-gain integrated functional laser fiber towards 10 kW-level high-power applications [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(9): 095107.
- [52] Lin A X, Zhan H, Peng K, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(6): 060101. 林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(6):

- 060101.
- [53] Mel'kumov M A, Bufetov I A, Bubnov M M, et al. Pump radiation distribution in multi-element first cladding laser fibres[J]. *Quantum Electronics*, 2005, 35(11): 996-1002.
- [54] Bufetov I A, Bubnov M M, Mel'kumov M A, et al. Yb-, Er-Yb-, and Nd-doped fibre lasers based on multi-element first cladding fibres [J]. *Quantum Electronics*, 2007, 35(4): 328.
- [55] Mel'kumov M A, Bufetov I, Kravtsov K S, et al. Lasing parameters of ytterbium-doped fibres doped with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(9): 843-848.
- [56] Kurkov A S, Dvoyrin V V, Paramonov V M, et al. All-fiber pulsed Raman source based on Yb:Bi fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(6): 449-451.
- [57] Nikulin M A, Babin S A, Dmitriev A K, et al. Low frequency noise distributed-feedback ytterbium fibre laser[J]. *Quantum Electronics*, 2009, 39(10): 906.
- [58] Gu X J, Liu Y. The efficient light coupling in a twin-core fiber waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(10): 2125-2127.
- [59] Zhao B Y, Duan K L, Zhao W, et al. High-power fiber laser amplifiers based on a new pump-coupling technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0702014.
- 赵保银, 段开棕, 赵卫, 等. 基于一种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0702014.
- [60] Xiao Q R, Ren H C, Yan P, et al. Theoretical study of pumping absorption in a co-linear side-pumping coupler [J]. *Optics Communications*, 2013, 300: 220-224.
- [61] Xiao Q R, Ren H C, Yan P, et al. Theoretical study of pump absorption of colinear side-pumping coupler with pumping and absorption loops [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 096111.
- [62] Bochkov A V, Slobozhanina M G, The features of the optical pumping active fibers with three-piece inner clad[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 33: 64-70.
- [63] He X L, Liao L, Zhang F F, et al. Analysis of laser efficiency and thermal effects in kilowatt fiber lasers based on distributed side-coupled fibers[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(9): 1.
- [64] Du H T, Cao J Q, Huang Z H, et al. Generalized study on the pump light propagation in the distributed side-coupled cladding-pumped fiber with identical pump cores [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47: 66-72.
- [65] Du H T, Cao J Q, Chen H, et al. Analytical study on the stimulated Raman scattering threshold in distributed-pumped fiber amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2010-2020.

## Research Progress on High-Power GTWave Fiber Lasers

Huang Zhihe<sup>1,2,3\*</sup>, Cao Jianqiu<sup>1,2,3\*\*</sup>, Chen Jinbao<sup>1,2,3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup> Hunan Provincial key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup> Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China

### Abstract

**Significance** High-power fiber lasers offer many advantages: high-power output, excellent beam quality, high optical efficiency, high degree of integration, high reliability, and spatial compactness. Fiber lasers have therefore been widely adopted for both scientific and commercial applications including material processing, free space communication, and military defense. Among the different kinds of fiber laser, the GTWave is especially popular for its significant power scalability and flexible structure design. This paper reviews the results of high-power GTWave fiber lasers across the world; their characteristics and merits are analyzed through comparison with conventional double cladding fiber lasers. Future directions of research on GTWave fiber lasers are additionally discussed.

**Progress** The construction of GTWave fiber is detailed in Fig.1 of this paper. The results of high-power GTWave fiber lasers all over the world, shown in Table 1, indicate that most of the results are made by four organizations: Southampton Photonics Inc., the IPG Photonics Corporation, China's National University of Defense Technology, and the China Academy of Engineering Physics.

The concept of using optical fibers to evanescently couple pump energy from laser diodes to a solid-state laser

rod was proposed by U. S. Naval Research Laboratory in 1991, but the University of Southampton made the first GTWave fiber, and Southampton Photonics Inc. manufactured many high-power fiber lasers that demonstrated the high injected pump power and high-power scalability of GTWave fiber lasers. Southampton Photonics Inc. manufactured a 2 kW GTWave fiber oscillator in 2016; its stimulated Raman scattering (SRS) level was low, and the transverse mode instability (TMI) had been mitigated. The IPG Photonics Corporation also developed GTWave fiber very early, and manufactured a 2 kW fiber laser in 2006, which showed the flexible structure design of GTWave fiber and displayed massive injected pump power. They created the first 10 kW high-power GTWave fiber laser in 2009, which was much more powerful than other fiber lasers. The Chinese National University of Defense Technology developed a homemade 1 kW GTWave fiber laser in 2014, and obtained a 4 kW GTWave fiber oscillator and main oscillator power amplifier (MOPA) by multi-stage bidirectional pumping in 2018. Although the China Academy of Engineering Physics' research on GTWave fiber started relatively late, they adopted multi-pump fiber schemes to develop GTWave fiber and developed a (2 + 1) GTWave fiber 2 kW MOPA laser in 2016. They obtained a 10.45 kW (8 + 1) GTWave fiber MOPA laser in 2018.

Many other organizations have paid much attention to GTWave fiber lasers; however, the technology requires much investment and technology, and as a result most can do only theoretical research. The Russian Academy of Sciences developed a 100 W GTWave fiber laser in 2005, and made many low-power fiber components in early years, but no results have been reported of late.

**Conclusion and Prospect** The above research shows that the development of GTWave fiber lasers is very fast, and that their power scalability is so strong that their output power is much higher than that of other fiber lasers. The output power of GTWave fiber has grown to 10 kW within 10 years. We analyze the characteristics and merits of GTWave fiber lasers through comparison with conventional double cladding fiber lasers. Although the conventional double cladding fiber laser has exceeded 5 kW for the reverse combiners commercialized in recent years, GTWave fiber lasers are still more suitable for bidirectional pumping and multi-injected ports by means of multi-stage cascaded amplifiers or multi-pump fiber schemes. As the pump light is coupled gradually to the active GTWave fiber, the heat is well-distributed along the fiber, which is more suitable for a high-power fiber laser.

The development process of GTWave fiber is very complicated, and the price is very high at present. This limits the research of GTWave fiber lasers to only a few organizations. With the development of high-power fiber lasers, people have paid more attention to GTWave fiber both theoretically and experimentally. We believe that the commercialization of GTWave fiber will come in the near future, as more and more people conduct research on GTWave fiber lasers.

**Key words** lasers; fiber laser; GTWave fiber; fiber amplifier; side pumping; Yb-doped fiber

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 140.3615