

高功率光纤激光抽运耦合技术综述

肖起榕^{1,2}, 张大勇², 王泽晖¹, 黄昱升¹, 张利明², 李 丹^{1*}, 闫 平¹, 巩马理¹

¹清华大学精密仪器系, 北京 100084;

²固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 高功率光纤激光器是目前激光器研究发展的一个热点。抽运耦合功率将直接决定光纤激光器的输出功率。分析了光纤激光抽运耦合技术的研究现状,从端面抽运耦合和侧面抽运耦合两大基本结构出发,详细阐述了各种光纤激光抽运耦合器的技术方案和特点,并进行综合比较,针对现存问题以及今后的研究方向提出了建议。

关键词 激光器; 光纤激光; 抽运耦合; 端面抽运; 侧面抽运

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201008

Review of High Power Fiber Laser Pump Coupling Technology

Xiao Qirong^{1,2}, Zhang Dayong², Wang Zehui¹, Huang Yusheng¹, Zhang Liming²,
Li Dan¹, Yan Ping¹, Gong Mali¹

¹Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China

Abstract High power fiber laser is the current focus of laser research and development. Pumped coupling power will directly determine output power of fiber laser. This paper investigates current research of fiber laser pumping coupling technology. We start with the two basic structures, end pumping coupling and side pumping coupling, and discuss in detail the technical programs and features of various fiber laser pumping couplers. Through comprehensive comparison, existing problems and future research directions are put forward.

Key words lasers; fiber laser; pumping coupling; end pumping; side pumping

OCIS codes 140.3510; 140.3460; 060.2310

1 引 言

自 1961 年 Snitzer^[1]首次在玻璃波导中发现激光辐射以来,光纤激光器开始不断发展起来。1963 年, Snitzer 正式提出了光纤激光器的概念^[2]。自此以后,光纤激光器就因其良好的转换效率和光束质量、小巧灵活的结构、易于热管理等优势,受到人们的广泛关注。1970 年,美国康宁公司首次研制出损耗低于 20 dB/km 的光纤,1985 年 Poole 等^[3]实现了掺稀土元素的光纤的研制,1987 年英国南安普顿大学发现了稀土元素铒在波长为 1.55 μm 处可实现光放大^[4],这些新兴的技术极大地促进了光纤激光器的发展。1988 年 Snitzer 等^[5]提出了双包层光纤的基本设想,在光纤中引入了内包层和外包层,信号光、抽运光分层传输。同时为使抽运光多次穿过纤芯,出现了结构不对称的梅花形、D 形、偏心圆形等形状的双包层光纤,极大地提高了光纤激光器的抽运效率。1990 年, Hanna 等^[6]意识到掺镱双包层光纤吸收谱宽、吸收截面大,在高功率激光器中的应用前景十分广阔,此后光纤激光器得到进一步发展,且大多数高功率激光器的工作物质均是掺镱光纤(YDF)。此外,通过增大模场面积等方法已经能够较好地克服光纤激光器的非线性效应问题,而采用对流等散热方式可以改善光纤激光器中的热效应。1991 年, Gapontsev 等^[7]利用半导体激光器(LD)作为抽

收稿日期: 2016-09-12; 收到修改稿日期: 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61307057)、固体激光技术重点实验室基金

作者简介: 肖起榕(1985—),男,博士,助理教授,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: xiaoqirong08@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: dli@mail.tsinghua.edu.cn

运源,以掺镱双包层光纤为工作物质得到了功率为 50 mW 的激光输出,斜率效率为 69%。此后,光纤激光器的输出功率不断提高,美国 IPG 公司^[8]于 2009 年实现了单纤单模 10 kW 输出;之后于 2012 年又实现了单纤 17 kW 输出,光束质量为 $M^2 = 5.84$ ^[9]。

在现代光纤激光器研究中,光纤的模式匹配和热效应等问题已经得到了较大改善,且光纤激光器具有极高的增益,这些优势使光纤激光器中的抽运光可以有效地转化为激光输出。而如何将抽运能量可靠、高效地耦合注入增益光纤成为研制高功率光纤激光系统的关键问题。光纤耦合器的优劣程度将直接影响激光器的输出功率以及光束质量,因此,合适的耦合方式、高质量的光纤耦合器是高功率光纤激光器的基础和前提。

与传统的固体激光器类似,光纤激光器的主要抽运方式也可以分为端面抽运耦合与侧面抽运耦合。本文将围绕光纤激光器中的各种抽运方式,结合不同光纤抽运耦合器的特点,系统回顾高功率光纤激光抽运耦合技术的相关研究成果,并对今后的研究方向进行展望。

2 光纤激光器中的端面抽运

端面抽运耦合是指抽运光从光纤的端面进入增益光纤,其优点是只要满足光纤内包层直径和数值孔径(NA)与抽运源输出尾纤尺寸和数值孔径相匹配,就能够实现高效率耦合,同时端面抽运结构简单,易于实现。但是,一根完整的光纤只有两个端面,最多只能容纳两个端面抽运耦合点,这将会限制抽运耦合功率的扩展。此外,抽运耦合处容易形成过热点,可能对光纤造成损伤或者直接烧毁光纤。端面抽运耦合方法众多,比如分立光学元件端面耦合、直接熔接端面耦合、普通光纤熔融拉锥端面耦合、光子晶体光纤(PCF)熔融拉锥端面耦合等。

2.1 分立光学元件端面耦合

分立光学元件耦合是采用透镜(组)等分立光学系统将激光二极管输出激光耦合进入增益光纤内包层^[10],如图 1 所示,图中 DCF 为色散补偿光纤。通常激光二极管的输出要经过光学整形。此方法要获得高耦合效率,需要保证激光二极管整形后的输出激光亮度高于光纤内包层能够容纳的激光亮度,并且需要确保抽运源输出端、耦合系统和增益光纤入口之间位置的精密对准。2009 年,Jeong 等^[11]采用此方法进行双端抽运,获得了 2.1 kW 激光输出。实验所使用的抽运源为自由空间输出的叠阵型激光二极管,这样抽运亮度受到了限制,只能采用较大内包层直径和数值孔径的光纤来提高耦合效率。实验中,所使用的增益光纤的内包层直径为 850 μm ,数值孔径为 0.48,利用两个抽运模块进行偏振合成抽运,实现的单端抽运功率超过 2 kW,耦合效率超过 85%。

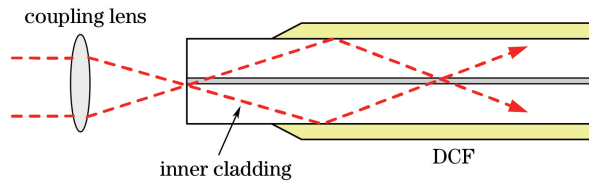


图 1 分立光学元件端面耦合示意图

Fig. 1 Schematic of discrete optical elements end coupling

2011 年,Wirth 等^[12]采用了直径为 200 μm 、数值孔径为 0.1 的尾纤输出的固体盘片激光器作为抽运源,并利用分立光学元件端面抽运方式,获得了 2.9 kW 激光输出,其原理示意图如图 2 所示。实验中,采用的双包层增益光纤内包层直径为 100 μm ,数值孔径为 0.16,该激光器实现了单端抽运耦合功率 3.7 kW,抽运耦合效率达到 95%。

2014 年 Ramachandran 等^[13]利用二向色镜以及数值孔径低至 0.046 的掺镱光纤,采用 2 个 975 nm 的二极管阵列作为抽运源,得到了 3 kW 的激光输出,如图 3 所示(HR 表示高反射率),激光光束质量 M^2 约为 1.15,耦合效率达到 95%,斜率效率达到 74%。如果光纤的数值孔径变得更低,可以获得更高的激光输出。这种方法利用分立的光学元件来实现抽运光耦合,需要非常精密的调节,系统稳定性不高,并且扩展能力较差,一般局限于实验室研究。

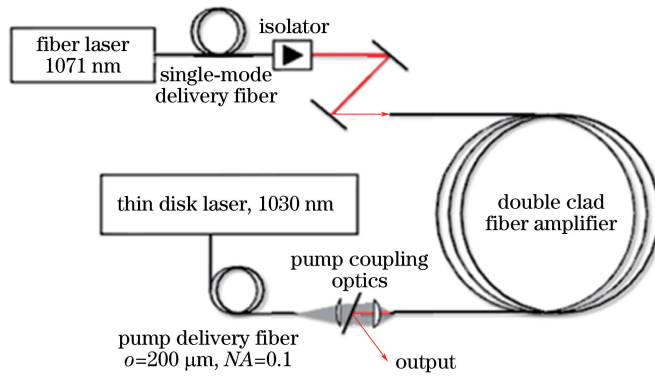


图 2 分立光学元件固体激光器端面抽运示意图

Fig. 2 Diagram of discrete optical elements solid laser end pumping

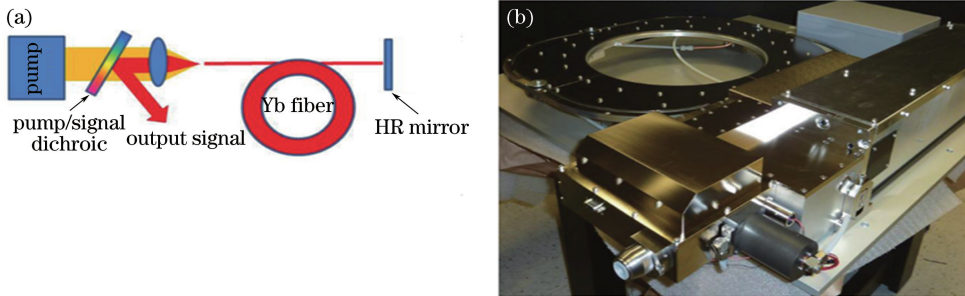


图 3 分立光学元件二向色镜端面抽运的(a)示意图和(b)实物图

Fig. 3 (a) Diagram and (b) physical map of discrete optical elements dichroic mirror end pumping

2.2 直接熔接端面耦合

对于自由空间输出的 LD, 需要采用分立光学系统进行耦合。随着 LD 的发展, 尾纤输出的 LD 在输出功率、输出激光亮度和稳定性方面都有极大的提升。而采用尾纤输出的 LD 作为抽运源, 其尾纤可以与双包层光纤直接进行熔接, 从而实现高效抽运耦合。

1) 基于普通双包层光纤

以直接熔接端面耦合的方式对普通双包层光纤进行抽运, 示意图如图 4 所示。由于熔接后双包层光纤与 LD 尾纤成为一体, 无法在它们之间插入分立光学元件而构成谐振腔, 需要用光纤光栅 (FBG) 来为激光提供反馈谐振。另外, LD 尾纤的熔接占用了双包层光纤的整个端面, 无法再注入信号光, 所以此结构只能应用于光纤激光振荡器。

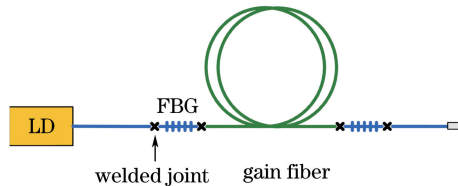


图 4 直接熔接端面耦合示意图

Fig. 4 Diagram of directly fused end coupling

2) 基于定制光纤

基于定制光纤的端面耦合方法是由 Peterka 等^[14]在 2005 年提出的一种新的端面抽运方法。此方法的最大特点是掺杂的双包层光纤为截面形状定制的光纤, 截面形状如图 5 所示。掺杂双包层截面形状设计需要满足两个要求: 第一, 双包层光纤与两根输入光纤的形状尽量接近以实现与信号光纤和抽运光纤的良好熔接; 第二, 需要保证抽运光在双包层光纤中能够被纤芯有效吸收。实验中, 只需要将抽运光纤与信号光纤平行排列, 并与定制的双包层光纤熔接即可实现抽运光到双包层光纤的耦合。2006 年, Peterka 等^[15]采用此方法搭建了一台环形腔光纤激光器, 实现了斜率效率为 26% 的激光输出。此方法既可以应用于光纤激光振荡

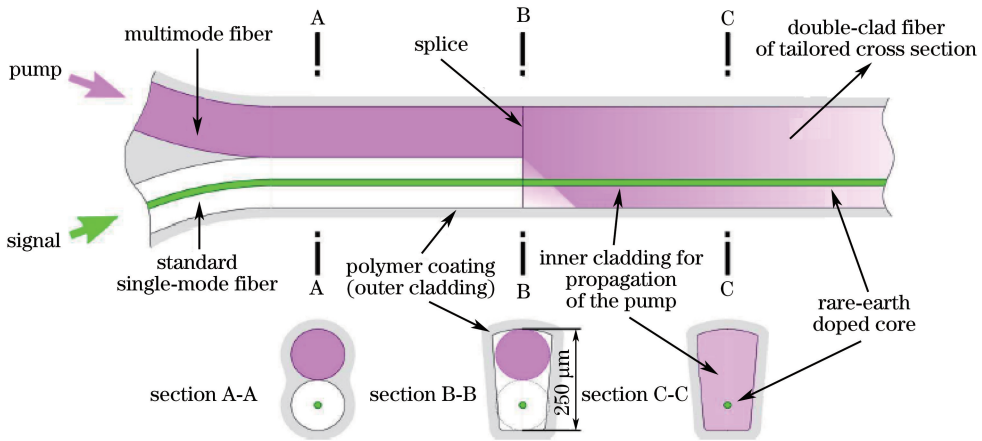


图 5 基于定制光纤的端面抽运耦合原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of end pumping coupling based on special designed fiber

器,也可以应用于光纤激光放大器,但其结构复杂,耦合效率低。

2.3 普通光纤熔融拉锥端面抽运耦合

熔融拉锥端面抽运耦合器是将多个光纤合成到一根待耦合光纤。待耦合光纤可以是多模(MM)光纤也可以是双包层光纤。其制作过程是将多根光纤组成一束,然后在高温下加热拉伸,使其互相熔合并形成锥形过渡区,最后将其切断,与输出光纤熔接^[16-17]。根据应用方式可以将熔融拉锥端面耦合器分成两类: $N \times 1$ 光纤熔锥端面耦合器和 $(N+1) \times 1$ 光纤熔锥端面耦合器。

$N \times 1$ 光纤熔锥端面耦合器的制作过程是:将 N 根多模输入光纤熔融拉锥并截断,然后和一根多模光纤熔接。这种器件主要应用于光纤激光振荡器中。 7×1 抽运耦合器示意图如图 6(a)所示。 $(N+1) \times 1$ 与 $N \times 1$ 熔锥端面耦合器的不同之处是:前者中心光纤是带有纤芯可以传输信号激光的光纤。在制作过程中,将 N 根多模光纤紧密地放置在一根信号光纤周围,然后熔融拉锥,从锥区中间截断,并和一根双包层光纤熔接。这种光纤熔锥端面耦合器主要用于光纤放大器中,构成全光纤的光纤放大器。 $(6+1) \times 1$ 抽运耦合器示意图如图 6(b)所示。

对于这种耦合方式,各大公司和研究单位都进行了大量研究。一种方法是直接将光纤进行合束拉锥,如图 6 所示。为了保证在高温加热时光纤能够互相贴合,在拉锥之前需要将光纤束进行缠绕^[18]。另一种方法是 Kosterin 等^[19-20] 提出的采用低折射率石英管将光纤束包裹,如图 7 所示。在熔融拉锥过程中,利用石英管塌陷的压力来实现光纤束的贴合。2007 年,加拿大 ITF 公司^[21] 实现了 7×1 熔锥端面耦合器的千瓦级激光合成。

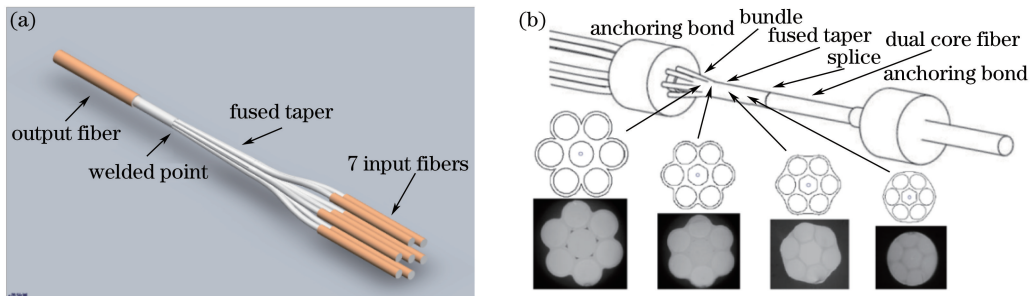


图 6 熔融拉锥端面抽运耦合器示意图。(a) 7×1 抽运耦合器;(b) $(6+1) \times 1$ 抽运耦合器

Fig. 6 Schematic of fused tapered end pumping coupler. (a) 7×1 pumping coupler; (b) $(6+1) \times 1$ pumping coupler

在国内,2015 年国防科技大学 Zhou 等^[22] 研制了 7×1 熔融拉锥端面抽运耦合器,耦合器的端面如图 8 所示,耦合器的耐受功率为 3.87 kW,获得了 3.81 kW 的激光输出,抽运耦合效率为 98.4%。

2011 年,清华大学^[23] 设计制作的 7×1 合束器,实现了单光纤抽运功率 1200 W 耦合,耦合效率为 99.2%;2013 年,又实现了 3.01 kW 抽运功率耦合,耦合效率达到 99.4%^[24]。2015 年清华大学通过工艺改

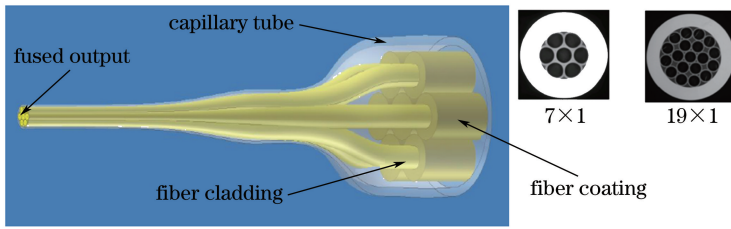


图 7 石英玻璃管包裹熔融拉锥端面耦合示意图

Fig. 7 Schematic of fused taper surrounded by quartz glass tube for end coupling

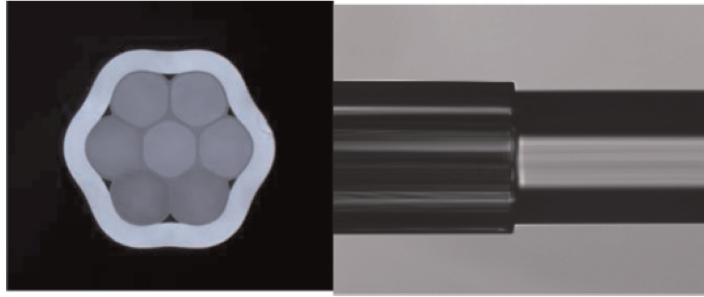


图 8 熔融拉锥端面横截面示意图

Fig. 8 Schematic of cross section of fused taper end

进,制作了 3×1 、 7×1 两款端面抽运耦合器,其中 3×1 耦合器可以输出激光 2.11 kW,耦合效率为 95.1%; 7×1 耦合器可以输出激光 4.72 kW,耦合效率为 99.4%^[25]。

2.4 光子晶体光纤熔融拉锥端面抽运耦合

光子晶体光纤熔融拉锥端面耦合与普通光纤熔融拉锥端面耦合类似,也可分为 $(N+1) \times 1$ 光子晶体熔锥端面耦合器和 $N \times 1$ 光子晶体熔锥端面耦合器,不同点在于输出光纤为光子晶体光纤。丹麦 NKT 公司^[26]于 2007 年提出了光子晶体光纤耦合器。如图 9 所示,光子晶体光纤熔锥端面耦合器由普通光纤束、光子晶体光纤锥形过渡区和作为输出的光子晶体光纤组成。它与普通光纤耦合器有两个不同点:一是输出光纤不同;二是锥形过渡区不同,光子晶体光纤熔锥端面耦合器的锥形过渡区是一个熔融拉锥的光子晶体光纤。2007 年,NKT 公司成功研制了耐受功率为 100 W 的 7×1 光子晶体光纤熔锥端面耦合器和耐受功率为 310 W 的 19×1 光子晶体光纤熔锥端面耦合器。2009 年,NKT 公司研制成功了 61×1 光子晶体光纤熔锥端面耦合器,在 1.22 kW 注入功率下,获得了 1.2 kW 的输出^[27]。

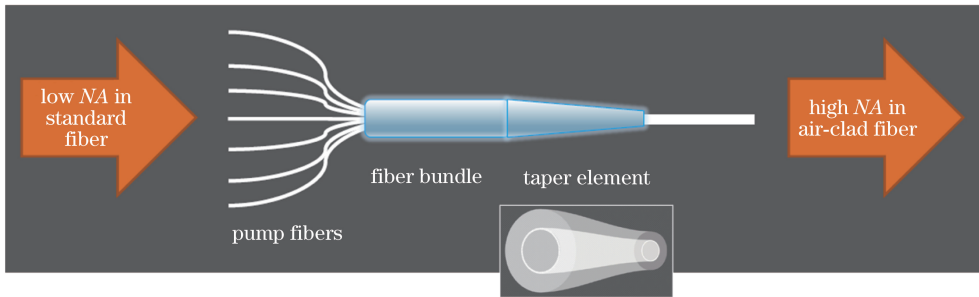


图 9 光子晶体光纤 $N \times 1$ 熔锥端面抽运耦合器示意图

Fig. 9 Schematic of PCF $N \times 1$ fused taper end pumping coupler

NKT 公司也开展了 $(N+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器的研制工作,此耦合器结构如图 10 所示。 $(N+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器与 $N \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器类似,不同点在于输入光纤束的中心光纤被一根保偏阶跃折射率光纤所取代。采用此方法,NKT 公司于 2009 年成功制作出 $(6+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器,抽运光平均插入损耗为 0.16 dB,信号光插入损耗为 1.0 dB,偏振消光比为 19 dB^[28]。2010 年,NKT 公司报道了 $(7+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器,通过改进工艺,将信号光插入损耗降低到 0.7 dB,偏振消光比提高到大于 20 dB^[29]。

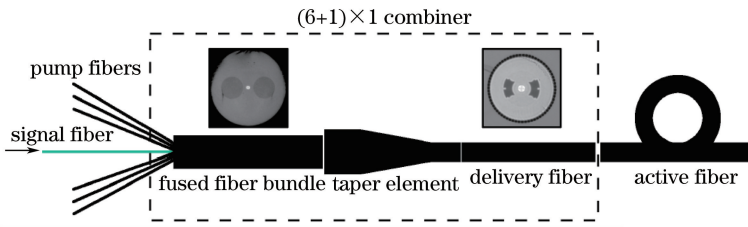


图 10 光子晶体光纤 $(N+1) \times 1$ 熔锥端面抽运耦合示意图

Fig. 10 Schematic of PCF $(N+1) \times 1$ fused taper end pumping coupler

Ward 等^[30]于 2010 年提出了与图 10 类似的 $(N+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器,不同点是锥形过渡区采用了化学腐蚀阶跃折射率光纤制作而成。这个方法的优点是在锥形过渡区,光纤的纤芯没有发生形变,可以降低信号光的插入损耗;缺点是制作工艺特别复杂。采用此方法,Ward 等^[30]成功制作出了 $(6+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器,其抽运耦合效率为 87%,信号光耦合效率为 90%,偏振消光比大于 20 dB。

此外,NKT 公司开发出了另一种端面抽运 $(N+1) \times 1$ 光子晶体光纤熔锥端面耦合器,其结构如图 11 所示。多根抽运光纤围绕中心的光子晶体光纤对称排列,形成反向光纤束。光纤束的端面处,每根光纤切割成镜面,并排列成一个平面,然后将这个平面与一个平凸透镜的平面紧密接触。平凸透镜的曲面处镀有双色膜层,能够对抽运光形成高反射,对信号光形成高透射,利用该透镜可以使抽运光通过透镜凸面的反射而耦合进入中心光子晶体光纤内包层,同时保证信号光透过透镜输出。采用此方法,NKT 公司于 2010 年实现了 55 W 抽运耦合,耦合效率达到 86.5%^[31]。

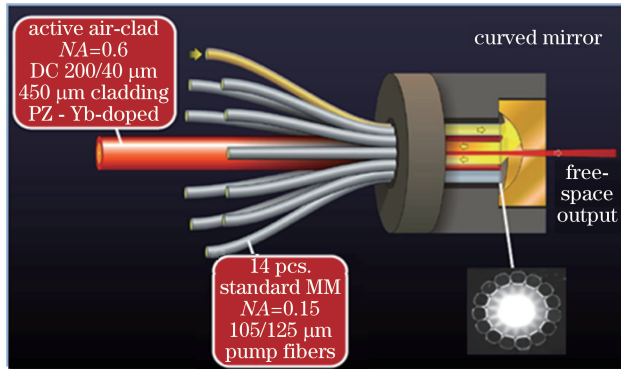


图 11 镀膜反射镜光子晶体光纤 $(N+1) \times 1$ 熔锥端面抽运耦合器示意图

Fig. 11 Schematic of PCF $(N+1) \times 1$ fused taper end pumping coupler with coating reflector

2014 年,NKT 公司设计了 $(6+1) \times 1$ 型耦合器^[32],如图 12 所示,其抽运功率超过 500 W,抽运光耦合效率超过 95%,信号光传输效率超过 97%。2016 年,Glebov 等^[33]利用法国 ALphANOV 公司生产的 $(6+1) \times 1$ 耦合器以及 NKT 公司生产的 DC-200/40-PZ-Yb 光子晶体光纤设计了一种激光器,其抽运功率超过了 300 W。

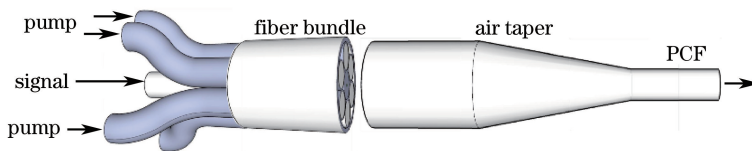


图 12 光子晶体光纤 $(6+1) \times 1$ 型抽运耦合器

Fig. 12 PCF $(6+1) \times 1$ pumping coupler

3 光纤激光器中的侧面抽运

侧面抽运耦合是指抽运光从光纤的侧面耦合进入增益光纤内包层。光纤的侧表面积远远大于端面面

积,为侧面抽运提供了非常广阔的耦合区域。侧面抽运将不再像端面抽运一样仅仅局限于两个点,因而有非常强大的可扩展性。侧面抽运耦合的种类繁多,根据抽运源的不同将其分为两类:一种是采用自由空间输出 LD 作为抽运源,以分立光学元件作为耦合元件;另一种是采用尾纤输出 LD 作为抽运源。

3.1 由空间输出 LD 侧面抽运

1) 贴合棱镜侧面抽运耦合

贴合棱镜侧面抽运耦合是最早报道的侧面抽运耦合方式。如图 13 所示,将待耦合双包层光纤的涂覆层去除一小段,露出内包层,然后将微棱镜沿光纤长度方向贴合在光纤侧面^[34];然后抽运 LD 输出激光经光纤系统耦合注入贴合棱镜,通过贴合面进入双包层光纤内包层。

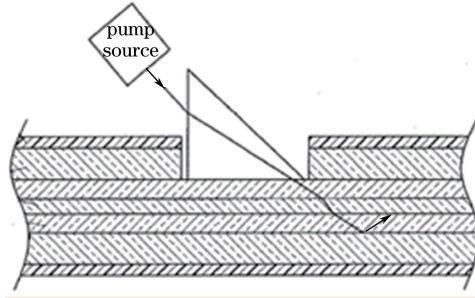


图 13 贴合微棱镜侧面抽运耦合示意图

Fig. 13 Schematic of adhered micro prism side pumping coupling

2) V 形槽侧面抽运耦合

V 形槽侧面抽运耦合如图 14 所示。采用机械磨抛的方式将去除了涂覆层的双包层光纤刻蚀出一个 V 形槽,V 形槽的表面必须平整光滑,并且不伤及光纤纤芯。LD 直接输出的抽运光通过光学耦合系统聚焦于 V 形槽侧面,由 V 形槽侧面与空气形成的全反射界面反射进入光纤内包层^[35]。虽然此方法的理论计算结果显示能够获得 240 W^[36] 和 1 kW^[37] 的光纤激光输出,但是实验中,利用此方法制作的光纤激光放大器仅得到数瓦的激光输出^[38]。

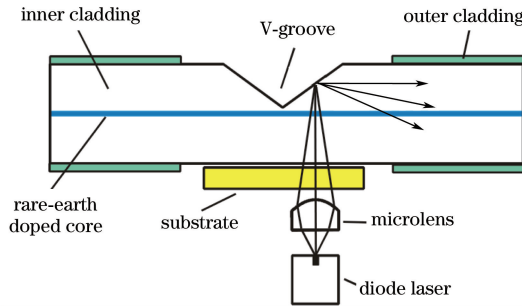


图 14 V 形槽侧面抽运耦合示意图

Fig. 14 Schematic of V-groove side pumping coupling

3) 嵌入反射镜侧面耦合

嵌入反射镜侧面耦合是 V 形槽侧面耦合的改进方案^[39]。如图 15 所示,与 V 形槽侧面耦合类似,首先需要刻蚀出一个小槽。槽的大小要足够容纳反射镜,在槽的加工过程中同样不能破坏纤芯,然后将反射镜放置入槽内。通常为了提高耦合效率,反射镜的反射面镀有对抽运光高反的膜层,入射面镀有对抽运光高透的膜层(AR-coating)。LD 输出抽运光经过反射镜反射后耦合进入双包层光纤的内包层。Koplow 等^[39]于 2003 年采用了如图 15 所示的反射镜,实现了 80% 的抽运光耦合效率,获得了功率为 5.2 W、波长为 1064 nm 的激光和功率为 2.6 W、波长为 1550 nm 的激光输出。Koplow 课题组通过改进该方法,采用折射率为 1.8 的 SF6 玻璃与空气形成的界面作为反射面来提高全反射角,最终将耦合效率提高到 84%,获得 8 W 的激光输出,斜率效率为 67%^[40]。相对于 V 形槽侧面耦合,此方法反射面不再是直接磨抛而成的光纤 V 形槽侧面,而是另外加工的反射镜,所以加工难度有所降低。但是,这两种方法都破坏了光纤内包层,对光纤的抗拉性

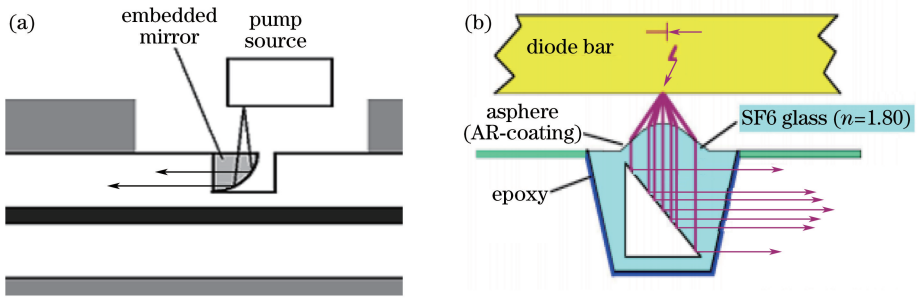


图 15 嵌入反射镜侧面抽运耦合原理示意图。(a)普通方法;(b)改进方法

Fig. 15 Schematic of embedded reflector side pumping coupling. (a) Ordinary method; (b) improved method

以及多个耦合点之间的窜扰都有较大影响。

4) 双包层光纤侧面磨抛抽运耦合

Hageman 等^[41]在 2010 年提出了光纤侧面磨抛抽运耦合方法,如图 16 所示。首先将待耦合光纤压入金属 V 形槽,然后采用胶体将其固定,使光纤相对于 V 形槽表面突出一定高度,最后将光纤突出的部分磨抛成平面。为了不破坏光纤纤芯,突出的高度必须小于内包层离纤芯的距离。制作完成后,直接将条型 LD 输出从侧面耦合进入双包层光纤。此方法已成功应用于增益导引光纤激光器,其抽运耦合效率约 60%。最终获得单脉冲能量为 18 mJ。图 16 中 GG-IAG fiber 表示增益引导-折射率反导引光纤激光器。

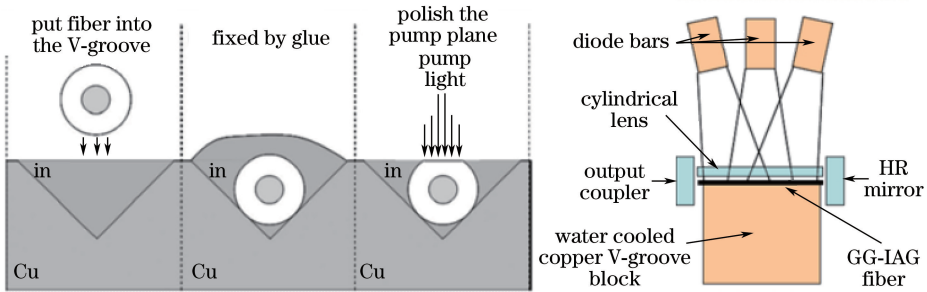


图 16 光纤侧面磨抛抽运耦合示意图

Fig. 16 Schematic of fiber side polished pumping coupling

5) 光纤盘集中侧面抽运

光纤盘集中侧面抽运由日本滨松光电激光组提出,首先将光纤盘于盘中,然后从侧面将抽运光导入,抽运光可以在盘中多次反射而被增益光纤充分吸收^[42],原理如图 17 所示。采用此方法耦合的抽运光功率超过 800 W,输出激光功率超过 600 W。

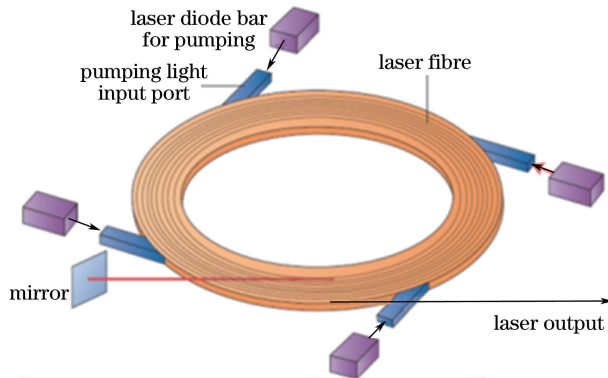


图 17 光纤盘集中侧面抽运结构示意图

Fig. 17 Structure diagram of fiber disk concentration side pumping

6) 衍射光栅侧面耦合

衍射光栅侧面耦合是通过在光纤侧面放置衍射光栅,然后将抽运光发射到光栅处,利用光栅的衍射作用

将其耦合进入双包层光纤中。衍射光栅可以是反射型,也可以是透射型。

Herda 等^[43]于 2003 年提出了反射型衍射光栅侧面耦合,耦合效率为 57%,获得激光输出功率为 1.2 W。2006 年,Zhang 等^[44]提出了一种改进的三层阶梯式金属型衍射光栅结构,能保证对 TE 偏振光 72% 的耦合效率,对 TM 偏振光也有较高的耦合效率。2011 年,Huang 等^[45]采用如图 18 (a)所示的结构,实现了两端分别为 0.95 W 和 19.9 W 的抽运光耦合,耦合效率分别为 63% 和 47%。Huang 等^[46]采用此耦合器搭建了激光器,获得 10.01 W 的激光输出,斜率效率为 61%。2013 年,Lin 等^[47]设计了一种金介质的衍射光栅耦合器,如图 18(b)所示,其信号光纤是掺铒的光子晶体光纤,在光纤侧面放置衍射光栅耦合器,利用此耦合器实现了功率为 10 W 的抽运光耦合,耦合效率为 91.5%,斜率效率为 73%。

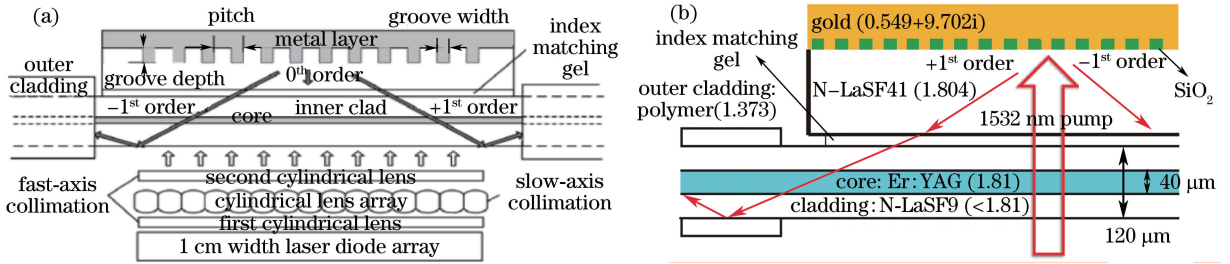


图 18 衍射光栅侧面抽运耦合原理图。(a)普通衍射光栅;(b)金介质衍射光栅

Fig. 18 Schematic of diffraction grating side pumping coupling. (a) Ordinary diffraction grating; (b) golden diffraction grating

3.2 尾纤输出 LD 侧面抽运

以自由空间输出 LD 作为抽运源,可以降低成本,但是系统需要复杂的分立光学耦合系统,并且需要精密调节,这导致系统稳定性较差,集成度不高。采用尾纤输出的 LD 作为抽运源,配合全光纤侧面抽运耦合器,可以实现全光纤化的抽运结构。全光纤侧面抽运耦合器由抽运光纤和待耦合光纤组成,抽运光纤将抽运光从侧面耦合进入待耦合光纤。通常待耦合光纤为双包层光纤,双包层光纤的大内包层面积和大数值孔径可以容许多模高功率低成本 LD 作为抽运源。

1) 抽运光纤角度磨抛侧面耦合

抽运光纤角度磨抛侧面耦合如图 19 所示,将抽运光纤进行角度磨抛,然后将其贴合到双包层光纤侧面^[48]。抽运光纤与双包层光纤的贴合面通常采用折射率匹配胶粘合为一体或 CO₂ 激光焊接,这样既起到固定作用,又不影响耦合效率。采用此方法,2004 年清华大学^[49]实现了 1.12 W 的抽运光耦合,耦合效率为 80.2%,并成功将其应用到三点抽运光纤激光器中,实现了 1.38 W 的激光输出^[50]。2010 年,清华大学^[51]采用此方法制作了侧面抽运耦合器,其耦合效率平均值为 90.1%,在 160.2 W 注入时,耦合进入主光纤的最高功率为 144.7 W。2012 年,清华大学^[52]在理论和实验上分析了多点抽运光纤角度磨抛侧面耦合器的特点。

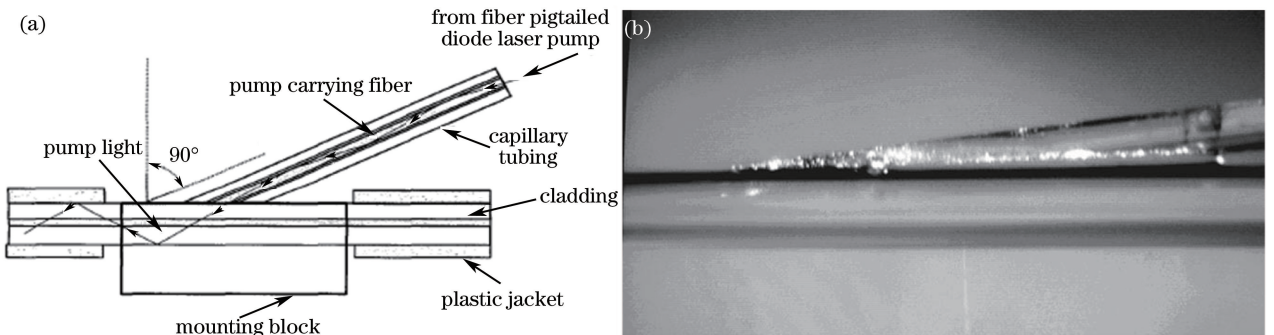


图 19 角度磨抛侧面抽运耦合的(a)原理图和(b)实物图

Fig. 19 (a) Schematic and (b) physical map of angled polishing side pumping coupling

抽运光纤角度磨抛侧面耦合方法不仅可以应用于普通阶跃折射率光纤,还被 NKT 公司成功应用于光子晶体光纤耦合^[53],如图 20 所示。首先,采用高温加热使光子晶体光纤的空气孔发生塌缩,并形成类似阶

跃折射率光纤的结构,然后,利用上述方法将角度磨抛后的多模光纤贴合到塌缩区。采用此方法实现了效率大于 90% 的抽运光耦合。

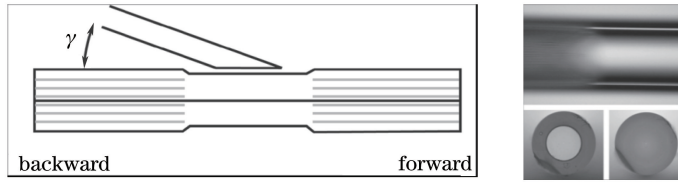


图 20 角度磨抛侧面抽运耦合应用于光子晶体光纤
Fig. 20 Angled polishing side pumping coupling for PCF

2) 非对称光纤侧面耦合

非对称光纤侧面耦合如图 21 所示,分别将双包层光纤和多模光纤固定在基底上,弯曲的曲率半径分别为 R_1 和 R_2 ,并研磨一定深度,其中对于双包层光纤的研磨要保证不破坏光纤纤芯,然后将两光纤贴合成一体,贴合面可以填充折射率匹配液,这样就形成非对称光纤侧面耦合结构。通过选择合适的光纤,以及对弯曲半径和研磨深度进行优化,可以使耦合效率达到 80% 以上^[54]。

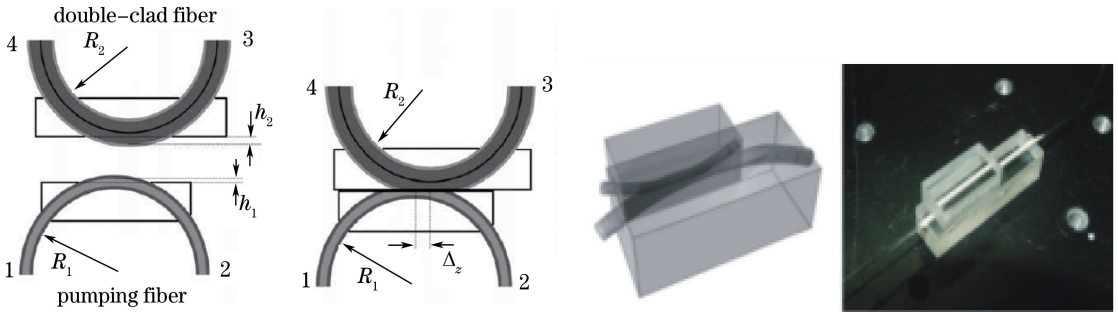


图 21 非对称结构光纤侧面抽运耦合示意图
Fig. 21 Schematic of side pumping coupling for asymmetric structure fiber

通过控制研磨深度(50 μm)以及横向偏移(8 mm),2010 年 Beres-Pawlik 等^[55]设计的非对称光纤耦合器可以实现 80% 以上的抽运耦合效率。

3) 锥形石英管侧面耦合

锥形石英管侧面耦合是由 Jauregui 等^[56]于 2010 年提出的一种新型的侧面抽运耦合结构。如图 22 所示,此耦合器由多根抽运光纤、内径不变外径逐渐缩小的石英管和贯穿其中的双包层光纤组成。首先将双包层光纤穿入一根石英管中,石英管的内径与双包层光纤的外径一致;然后使用 CO_2 激光器加热,使石英管塌缩,并与双包层光纤熔为一体;接着将其放置到氢氟酸化学溶液中,并上下提拉,使石英管外表面形成直径逐渐缩小的锥区;最后将多根抽运光纤均匀围绕在双包层光纤外层,并与石英管的大直径端面熔接,由此形成了石英管侧面结构。此结构能够将抽运光通过石英管外表面的全反射耦合进入双包层光纤。在实验上,此方法已经实现了 86 W 的抽运光耦合,耦合效率为 89%。此方法对石英管外表面的表面质量要求较高,并且制作工艺比较复杂。

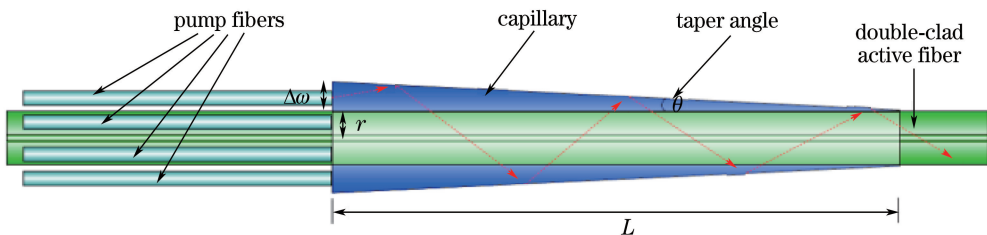


图 22 石英管光纤侧面抽运耦合原理图
Fig. 22 Schematic of side pumping coupling for quartz glass tube fiber

4) 热缩管压缩侧面耦合

Polynkin 等^[57]于 2004 年提出了热缩管压缩侧面耦合方法,如图 23 所示。将无包层的抽运光纤均匀排列在双包层增益光纤周围,然后穿入聚四氟乙烯材料制成的热缩套管,最后将热缩套管缩紧。由于石英的折射率为 1.45,而聚四氟乙烯折射率约为 1.35,所以此套管可以形成一个低折射率保护层,既可以防止抽运光的泄露,又可以保证抽运光纤与双包层光纤的紧密接触。此方法耦合的原理是通过无包层抽运光纤表面的倏逝波穿透效应,将抽运光由抽运光纤耦合进入双包层光纤。采用这种方法搭建的激光器,在 22 W 抽运功率下得到了 5 W 的激光输出。由于聚四氟乙烯的激光功率耐受有限,因此该结构无法应用于高功率光纤激光器。

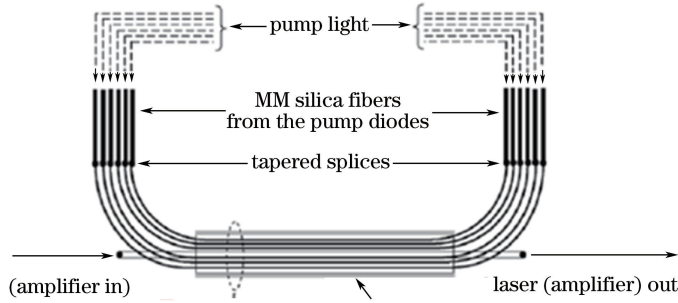


图 23 热缩管光纤压缩侧面抽运耦合原理图

Fig. 23 Schematic of side pumping coupling compressed by heat shrink tubing fiber

5) 双向抽运的侧面耦合器

在端面抽运耦合器中,由于反向隔离度差,反向传输的激光耦合进入抽运臂的效率低^[21,23,58]。端面抽运耦合器应用于双向抽运结构的光纤激光器中时,残余抽运光和包层中传输的激光将会耦合进入抽运臂从而毁坏抽运激光器。为解决该问题,2012 年 Theeg 等^[59-62]设计出一种可应用于双向抽运的侧面耦合器,如图 24 所示,与抽运光纤(PFF)连接的是一根无芯光纤(IF),无芯光纤和主光纤(TF)拉锥熔接,以增加抽运光进入主光纤的几率。

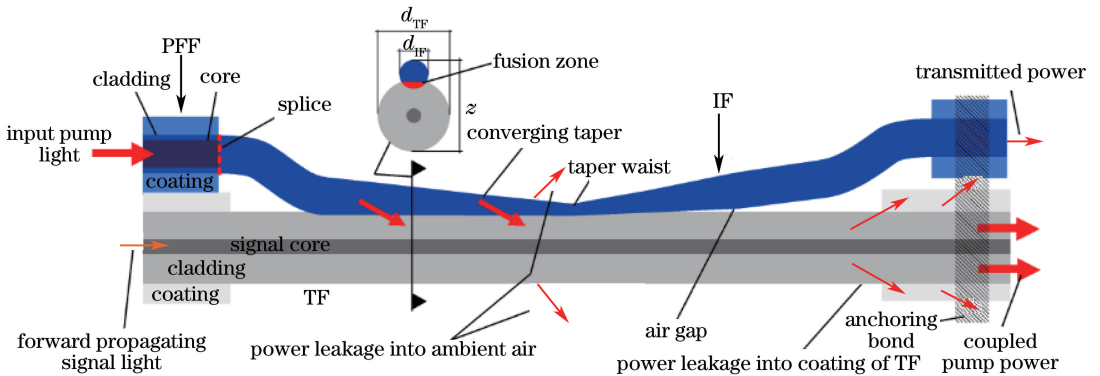


图 24 可应用于双向抽运的侧面抽运耦合器

Fig. 24 Side pumping coupler for bi-directional pumping configuration

Theeg 等^[63]随后设计了可双向抽运的 $(4+1) \times 1$ 耦合器,如图 25 所示(图中 LMA 表示大模场面积),并采用后向抽运的方式,4 个端口的抽运功率总和为 440 W,抽运耦合效率为 90.2%。此外,Theeg 等^[59]设计的 $(6+1) \times 1$ 耦合器的抽运功率为 150 W,耦合效率为 89.6%。

早在 2011 年,清华大学也提出了此技术方案,该方案实现了具备高效抽运激光耦合的特点。2014 年,清华大学将该方案成功应用到基于国产光纤的全光纤化 3000 W 级激光输出光纤激光器中,分别采用武汉烽火通信科技有限公司和中国电子科技集团公司第四十六研究所提供的国产 20/400 μm 掺镱双包层光纤作为增益主光纤,实现了 3050 W 和 3092 W 的 1080 nm 激光输出^[64]。2016 年,清华大学将该方案应用到双向抽运拉曼光纤激光器中,实现了 3.89 kW 拉曼光纤激光输出^[65]。清华大学研制的应用于双向抽运光纤的侧面耦合器,耦合抽运功率可达到数千瓦,可应用于更高输出功率的光纤激光器中。

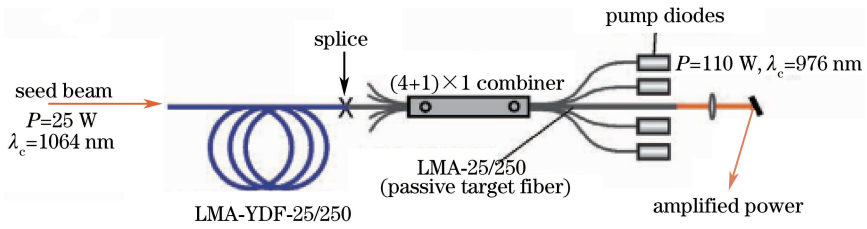


图 25 应用于后向抽运的(4+1)×1 侧面抽运耦合器

Fig. 25 (4+1)×1 side pumping coupler for backward pumping configuration

6) 级联抽运耦合技术

单个的抽运耦合器无法满足高功率的需求,为发挥侧面抽运的优势,可以采用级联抽运来提高激光输出功率。2016 年,北京工业大学 Tan 等^[66]设计了 5 级级联耦合器,如图 26 所示,该耦合器的耦合效率为 98.5%,信号光损失为 1%,5 个 LD 的总抽运功率为 546 W,输出激光功率为 532.4 W,多级级联总效率为 97.5%。

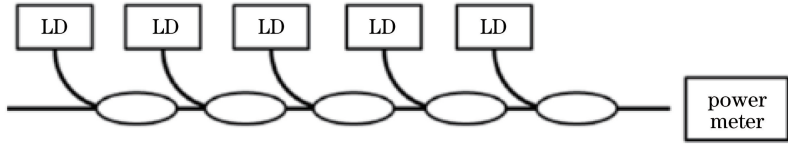


图 26 多级级联抽运示意图

Fig. 26 Schematic of multi-stage cascading pumping

清华大学^[67]早在 2005 年就提出了分布式级联抽运光纤激光器方案,2012 年设计出了基于斜抛熔接侧面抽运耦合结果的多点抽运方案^[52]。2015 年,清华大学^[68]设计出了两级(2+1)×1 级联抽运耦合器,如图 27 所示,实现了千瓦级的抽运,实验中总注入抽运激光功率为 1210 W,输出激光功率为 1120 W,耦合效率为 92.5%,且两级耦合器的信号光损耗均小于 0.4%。多级级联抽运虽然可以提高抽运光功率和输出激光功率,但随着级联耦合器数量的增加,抽运耦合效率会下降,同时,信号光损耗会增加。

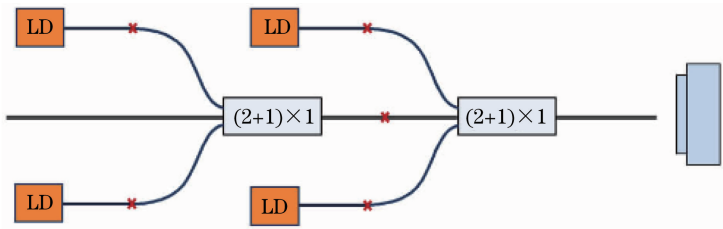


图 27 两级(2+1)×1 级联抽运耦合器示意图

Fig. 27 Schematic of two-stage (2+1)×1 cascading pumping coupler

7) GT-wave 技术

图 28 为英国 SPI 公司^[69]设计的并行排列侧面抽运耦合器结构图,这种耦合方式被命名为 GT-wave 技术。此耦合方法将抽运光纤与增益光纤平行排列,并相互缠绕,可以实现多根抽运光纤围绕单根增益光纤的

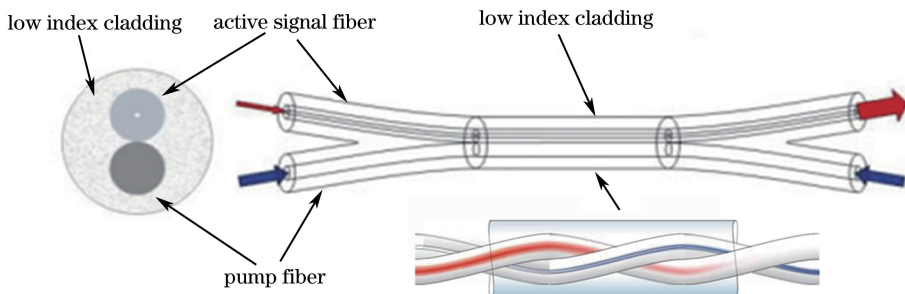


图 28 SPI 公司设计的 GT-wave 并行排列侧面抽运耦合示意图

Fig. 28 Schematic of GT-wave parallel spaced side pumping coupling designed by SPI Co.

方式;然后在抽运光纤与增益光纤外围涂覆低折射率涂覆层作为包层。此抽运方式的优点主要有:1) 可以采用多端口抽运而实现高功率耦合;2) 可以实现对于信号光非常微小的插入损耗,不需要信号光路截断而实现双端抽运;3) 高可靠性,对于整条光纤没有从中间的截断,背向反射的信号光不会被耦合进入抽运光路。SPI公司已将GT-wave技术应用于千瓦级输出的光纤激光器^[69]。

IPG公司^[70]也提出了类似的抽运结构,在其专利中提到的侧面抽运结构如图29所示。采用类似的结构,IPG公司于2009年获得了10 kW输出的单模光纤激光器^[8],可以推测IPG公司已经采用该技术将超过几千瓦的抽运光耦合到双包层增益光纤中。

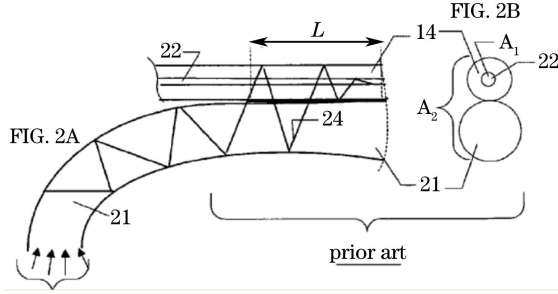


图 29 IPG 公司设计的并行排列侧面抽运耦合示意图

Fig. 29 Schematic of parallel spaced side pumping coupling designed by IPG Co.

2016年中国工程物理研究院 Zhan 等^[71-72]利用自制的(2+1) GT-wave 光纤实现了 2.65 kW 的抽运光注入^[71],利用(3+1) GT-wave 光纤实现了 3.803 kW 的抽运光注入^[72]。同年,林傲祥等^[73]利用(N+1) GT-wave 光纤,并采用双向两路抽运主控振荡器的功率放大器(MOPA)放大系统,实现了 5.19 kW 的抽运光注入,如图 30 所示。

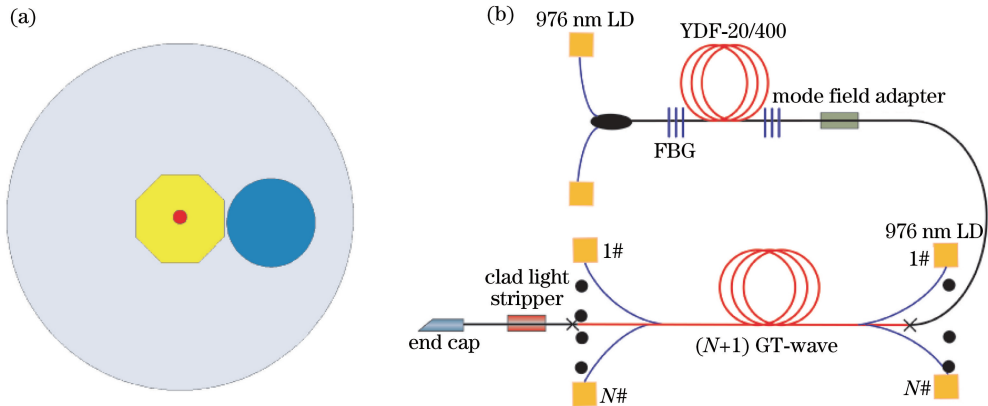


图 30 (a) (N+1) GT-wave 光纤及(b) MOPA 实验装置

Fig. 30 (a) (N+1) GT-wave fiber and (b) MOPA experimental setup

清华大学在理论上开展了关于并行抽运的相关研究,例如:基于光纤激光倏逝波耦合的圆形并行排列侧面抽运耦合特性^[74]、异性包层光纤并行排列侧面抽运耦合特性^[75]以及多光纤循环并行排列侧面抽运方法^[76],这些研究结果为并行抽运耦合的设计提供了指导。

4 对比分析

光纤激光器中的抽运方式很多,通常衡量抽运耦合的主要性能指标有:抽运耦合效率、耦合功率、结构紧凑度和可扩展性等。表 1 是已报道的一些主要的抽运耦合技术的优缺点比较。

表 1 已报道的主要抽运耦合技术对比

Table 1 Comparison of reported major pumping coupling techniques

Pumping method		All fiber	Coupling efficiency /%	Maximum power	Compactness	Scalability
End pumping	Discrete optical element	No	~90	~kW	Low	Low
	Double clad fiber direct fusing	Yes	>95	~100 W	High	Low
	Special designed fiber direct fusing	Yes	>90	~W	High	Low
	Normal fiber fused taper	Yes	>90	~kW	High	Low
	PCF fused taper	Yes	>90	~kW	High	Low
	Adhered micro prism	No	90	~W	Low	High
Free space output LD side pumping	V-groove	No	~76	~W	Low	High
	Embedded reflector	No	84	~10 W	Low	High
	Double clad fiber side polishing	No	70	~W	Low	Low
	Fiber disk side pumping	No	—	~100 W	Low	High
	Diffraction grating	No	63	~10 W	High	High
	Pumping fiber angled polishing	Yes	90	~W	High	High
Pigtail output LD side pumping	Asymmetric fiber coupling	Yes	80	~W	High	High
	Tapered capillary tube coupling	Yes	90	~10 W	High	High
	Heat shrink tubing compression	Yes	—	~W	High	High
	side coupling					
	Side coupler for bidirectional pumping	Yes	>90	~kW	High	High
	Cascaded pumping	Yes	90	~kW	Medium	High
	GT-wave	Yes	—	~kW~10 kW	High	High

从以上列出的各类型光纤激光抽运耦合器和表 1 的对比数据可以看出:1) 基于分立光学元件搭建的抽运耦合方式,如 V 型槽、嵌入反射镜、贴合棱镜和衍射光栅等,需要精密的位置调节,系统稳定性较差,结构复杂;2) 采用尾纤输出 LD 作为抽运源实现全光纤结构可大大提高系统的稳定性、紧凑度和高功率激光承受能力;3) 侧面抽运方式功率扩展性强,可以沿光纤侧面实现多点分布抽运,不影响主光纤纤芯的信号光传输,而端面抽运方式只能从主光纤的两个端面进行抽运,抽运注入数量受限;4) 熔融拉锥端面抽运耦合器、可应用于双向抽运的侧面耦合器、级联抽运耦合器和 GT-wave 技术可实现千瓦级抽运激光耦合,是当前高功率光纤激光最为重要的抽运耦合方式。清华大学在熔融拉锥端面抽运耦合器、可应用于双向抽运的侧面耦合器和级联抽运耦合器方面开展了多年的研究工作,设计出的耦合器均可实现千瓦级抽运激光耦合,并已成功应用到各种类型的光纤激光器中,实现了高功率光纤激光输出;5) 除了 GT-wave 技术、级联抽运技术和热缩管压缩侧面耦合方式外,其余耦合方式均为单点注入,单点注入下的增益光纤在抽运注入点处抽运功率密度高,热负荷效应显著,需要充分考虑增益光纤的散热问题;6) 应用于双向抽运的侧面耦合器可在单根增益光纤上实现对向抽运,将抽运功率分散到增益光纤两端;此方案的增益光纤热问题较单端注入的端面抽运降低一半,在光纤激光长时间工作和模式不稳定性抑制方面具有极大优势。

对于光纤激光抽运耦合未来的发展趋势预测如下:1) 全光纤化的光纤激光器结构紧凑度、稳定度以及

可扩展性远超分立式的光纤激光器,因此高功率光纤激光器的全光纤化抽运结构仍然是发展的主流方向;2) 熔融拉锥端面抽运耦合技术、双向抽运侧面耦合技术、级联技术以及 GT-wave 技术将是未来的主要研究方向。这些技术也是目前输出高功率激光的最有效的手段,同时,这些技术仍处于不断发展之中,可以预料到,未来使用这些技术的光纤激光器将越来越多,其抽运功率、耦合效率也将会得到进一步提升;3) 进一步提升现有抽运耦合技术水平,提高抽运耦合效率,在同等损耗的激光功率下,提升单点抽运耦合激光功率水平,为光纤激光器实现更高功率输出奠定基础;4) 探索新型抽运耦合方式,特别是在光纤设计和制备过程中,充分考虑抽运耦合问题,将增益光纤的设计和抽运耦合方式综合考虑;5) 将高功率抽运耦合技术拓展到中红外波段的氟化物光纤激光器中。

5 总 结

高功率光纤激光器的应用前景巨大,输出功率的进一步提升将是未来主要的发展方向,而光纤激光器的抽运水平将直接影响激光器输出功率的高低。围绕端面抽运、侧面抽运两种主要抽运方式,结合国内外光纤激光器抽运耦合技术进展,对高功率光纤激光器的抽运技术方案进行总结归纳,并针对现存问题以及今后的研究方向提出了建议。目前高功率光纤激光器正在向集成化、全光纤化方向发展,GT-wave 技术和双向侧面抽运耦合是卓有成效的抽运方式,代表了目前高功率光纤激光器的最高发展水平。今后光纤激光器的抽运功率、输出功率将会不断提升,耦合效率也将不断提升,另外,也势必会有更加完美的抽运耦合方式出现。

参 考 文 献

- [1] Snitzer E. Optical maser action of Nd^{+3} in a barium crown glass[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(12): 444-446.
- [2] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [3] Poole S B, Payne D N, Fermann M E. Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(17): 737-738.
- [4] Desurvire E, Simpson J R, Becker P C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(11): 888-890.
- [5] Snitzer E, Po H, Hakimi F, *et al.* Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. New Orleans: Optical Fiber Sensors, 1988: PD5.
- [6] Hanna D C, Percival R M, Perry I R, *et al.* An ytterbium-doped monomode fibre laser: broadly tunable operation from 1.010 μm to 1.162 μm and three-level operation at 974 nm[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(4): 517-525.
- [7] Gapontsev V, Samartsev I, Zayats A, *et al.* Laser-diode pumped Yb-doped single-mode tunable fibre lasers[C]. Proc of Conf Adv Solid State Lasers, Hilton Head, NC, paper WC1-1, 1991: 214.
- [8] IPG Photonics offers world's first 10 kW single-mode production laser [OL]. (2009-06-17). <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/06/ipg-photonics-offers-worlds-first-10-kw-single-mode-production-laser.html>.
- [9] Ferin A, Gapontsev V, Fomin V, *et al.* 17 kW CW laser with 50 μm delivery[C]. Chengdu: 6th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, 2012.
- [10] Jeong Y, Sahu J, Payne D, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(8): 470-472.
- [11] Jeong Y C, Boyland A J, Sahu J K, *et al.* Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, 13(4): 416-422.
- [12] Wirth C, Schmidt O, Kliner A, *et al.* High-power tandem pumped fiber amplifier with an output power of 2.9 kW[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3061-3063.
- [13] Ramachandran S, Khitrov V, Minelly J D, *et al.* 3 kW single-mode direct diode-pumped fiber laser[C]. SPIE, 2014, 8961: 89610V.
- [14] Peterka P, Kasik I, Matejec V, *et al.* Novel method for end-pumping of double-clad fiber amplifiers: principle and tailoring the cross section[J]. *Biological Trace Element Research*, 2005, 75(1-3): 29-41.
- [15] Peterka P, Kašik I, Matějč V, *et al.* Experimental demonstration of novel end-pumping method for double-clad fiber devices[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3240-3242.
- [16] 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.

- [17] Fidric B G, Dominic V G, Sanders S. Optical couplers for multimode fibers: US6434302[P]. 2002-08-13.
- [18] Gonthier F, Martineau L, Seguin F, *et al.* Optical coupler comprising multimode fibers and method of making the same: US7046875[P]. 2006-06-04.
- [19] 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.
- [20] Wang B, Mies E. Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers[C]. SPIE, 2009, 7195: 71950A.
- [21] Wetter A, Faucher M, Lovelady M, *et al.* Tapered fused-bundle splitter capable of 1 kW CW operation[C]. SPIE, 2007, 6453: 64530I.
- [22] Zhou H, Chen Z, Zhou X, *et al.* All-fiber 7×1 pump combiner for high power fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2015, 347: 137-140.
- [23] Xiao Q, Yan P, He J, *et al.* Tapered fused fiber bundle coupler capable of 1 kW laser combining and 300 W laser splitting[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(8): 1415-1419.
- [24] Xiao Q, Ren H, Chen X, *et al.* Tapered fiber bundle 7×1 end-pumping coupler capable of high power CW operation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(24): 2442-2445.
- [25] Xiao Q, Huang Y, Sun J, *et al.* Research on multi-kilowatts level tapered fiber bundle $N \times 1$ pumping combiner for high power fiber laser[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(2): 301-305.
- [26] Nielsen M D, Sørensen M H, Liem A, *et al.* High-power PCF-based pump combiners [C]. SPIE, 2007, 6453: 64532C.
- [27] Wieduwilt T, Dellith J, Talkenberg F, *et al.* Reflectivity enhanced refractive index sensor based on a fiber-integrated Fabry-Perot microresonator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25333-25346.
- [28] Noordegraaf D, Nielsen M D, Skovgaard P M, *et al.* Pump combiner for air-clad fiber with PM single-mode signal feed-through[C]. Maryland: Conference on Lasers & Electro-optics, 2009.
- [29] Noordegraaf D, Maack M, Skovgaard P M W, *et al.* $7+1$ to 1 pump/signal combiner for air-clad fiber with 15 m MFD PM single-mode signal feed-through[C]. SPIE, 2010, 7580: 75801A.
- [30] Ward B G, Jr, Sipes D L, Tafoya J D. A monolithic pump signal multiplexer for air-clad photonic crystal fiber amplifiers[C]. SPIE, 2010, 7580: 75801C.
- [31] Kim J K, Hagemann C, Schreiber T, *et al.* Monolithic all-glass pump combiner scheme for high-power fiber laser systems[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 13194-13203.
- [32] Ramachandran S, Sipes D L, Tafoya J D, *et al.* High-power monolithic fiber amplifiers based on advanced photonic crystal fiber designs[C]. SPIE, 2014, 8961: 896114.
- [33] Glebov A L, Leisher P O, Boulet J, *et al.* Multi-100 W class, fully integrated, monolithic ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier module[C]. SPIE, 2016, 9730: 97300Q.
- [34] Weber T, Lüthy W, Weber H. Side-pumped fiber laser[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1996, 63(2): 131-134.
- [35] Ripin D, Goldberg L. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded V-grooves[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(25): 2204-2205.
- [36] Li C, Shen D, Song J, *et al.* Analysis of high-power double-clad fiber lasers side-pumped by multiple diode-lasers in V-groove configuration[C]. The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 1999, 3: 805-806.
- [37] Snell K J, Setzler S D. Multiple emitter side pumping method and apparatus for fiber lasers: US6801550[P]. 2004-10-05.
- [38] Koplów J P, Goldberg L, Kliner D A V. Compact 1-W Yb-doped double-cladding fiber amplifier using V-groove side-pumping[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(6): 793-795.
- [39] Koplów 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.
- [40] Moore S W, Koplów J P, Hansen A, *et al.* Embedded-mirror side pumping of double-clad fiber lasers and amplifiers [C]. California: Conference on Lasers & Electro-Optics, 2008: 870-871.
- [41] Hageman W B, Chen Y, Bass M, *et al.* Diode side pumping of a gain guided, index anti-guided large mode area neodymium fiber laser[C]. San Diego: Advanced Solid-State Photonics, 2010.
- [42] Hamamatsu Photonics K. The fiber disk laser explained[J]. *Nature Photonics*, 2006: 14-15.
- [43] 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.
- [44] Zhang F, Wang C, Geng R, *et al.* Novel grating couplers for diode-bars multi-point side-pumping double-clad fiber[J]. Optics Communications, 2007, 279(2): 346-355.
- [45] Huang C W, Huang D W, Chang C L, *et al.* Demonstration of side coupling between high power laser diode array and double-clad fiber using sub-wavelength grating[C]. Maryland: Lasers & Electro-Optics, 2011: 1-2.
- [46] Huang C W, Chang C L, Jheng D Y, *et al.* Symmetrically side-pumped 10-W ytterbium-doped fiber laser by sub-wavelength grating coupler[C]. Munich: The European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2011.
- [47] Lin S L, Lee Y W, Hsu K Y, *et al.* Design of resonantly side-pumped 1645-nm Er:YAG crystal fiber lasers with grating couplers[C]. Kyoto: Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2013: 1-2.
- [48] Hakimi F, Hakimi H. New side coupling method for double-clad fiber amplifiers[C]. Maryland: Conference on Lasers & Electro-Optics, 2001: 116.
- [49] Ou P, Yan P, Gong M, *et al.* Coupling efficiency of angle-polished method for side-pumping technology[J]. Optical Engineering, 2004, 43(4): 816-821.
- [50] Ou P, Yan P, Gong M, *et al.* Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fibre laser and pump light leakage at coupler[J]. Electronics Letters, 2004, 40(7): 418-419.
- [51] Xiao Q R, Yan P, Yin S, *et al.* 100 W ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumping configuration[J]. Laser Physics Letters, 2010, 8(2): 125-129.
- [52] Xiao Q, Yan P, Wang Y, *et al.* Fused angle-polished multi-points side-pumping coupler for monolithic fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Communications, 2012, 285(8): 2137-2143.
- [53] Larsen J J, Vienne G. Side pumping of double-clad photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2004, 29(5): 436-438.
- [54] Grobelny A, Witkowski J, Beres-Pawlik E. The numerical predictions of the parameters of asymmetrical couplers which pump double-clad lasers[C]. Nottingham: International Conference on Transparent Optical Networks, 2006: 185-188.
- [55] Beres-Pawlik E, Grobelny A. Construction of a side pumped double-clad fiber using polished couplers [J]. Optics Communications, 2010, 283(11): 2363-2368.
- [56] Jauregui C, Böhme S, Wenetiadis G, *et al.* Side-pump combiner for all-fiber monolithic fiber lasers and amplifiers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(5): 1011-1015.
- [57] Polynkin P, Temyanko V, Mansuripur M, *et al.* Efficient and scalable side pumping scheme for short high-power optical fiber lasers and amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2024-2026.
- [58] Chen H, Zou S, Yu H, *et al.* Taper fused fiber bundle 1×4 coupler for high power splitting [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(24): 2527-2530.
- [59] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, *et al.* Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28125-28141.
- [60] Sayinc H S, Theeg T, Pelegrina-Bonilla G, *et al.* New pump and signal combiners[C]. Barcelona: Specialty Optical Fibers, 2014: SoW1B.2.
- [61] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, *et al.* Side pumping scheme for all-fiber counter-pumping of high power single-frequency fiber amplifiers[C]. Munich: The European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013: CJ_1_2.
- [62] Theeg T, Sayinc H, Overmeyer L, *et al.* Manufacturing and optical characterization of side-pumped high power fiber combiner for LMA-fibers[C]. Munich: The European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015: CE_2_4.
- [63] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, *et al.* All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [64] Wang Xuejiao, Xiao Qirong, Yan Ping, *et al.* 3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16) : 257-262.
王雪娇, 肖起榕, 闫平, 等. 国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 257-262.
- [65] Xiao Q, Yan P, Li D, *et al.* Bidirectional pumped high power Raman fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [66] Tan Q, Ge T, Zhang X, *et al.* Cascaded combiners for a high power CW fiber laser[J]. Laser Physics, 2016, 26(2): 025102.
- [67] Yan P, Gong M, Li C, *et al.* Distributed pumping multifiber series fiber laser[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2699-2706.

- [68] Chen Xiao, Xiao Qirong, Jin Guangyong, *et al.* High output power kW class of pump light by $(N+1) \times 1$ fiber couplers in a cascaded structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(6): 28-32.
陈 霄, 肖起榕, 金光勇, 等. 高功率千瓦级 $(N+1) \times 1$ 光纤级联泵浦耦合器[J]. *光子学报*, 2015, 44(6): 28-32.
- [69] Grudinin A B, Payne D N, Turner P W, *et al.* Multi-fibre arrangements for high power fibre lasers and amplifiers: US6826335[P]. 2004-11-30.
- [70] Gapontsev V P, Fomin V, Platonov N. Powerful fiber laser system: US7593435[P]. 2009-09-22.
- [71] Zhan H, Wang Y, Peng K, *et al.* 2 kW $(2+1)$ GT-wave fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(4): 045103.
- [72] Zhan H, Wang Y, Peng K, *et al.* 3.38 kW $(3+1)$ GT-wave fiber[C]. *CLEO: Applications and Technology*, 2016: ATu3K.7.
- [73] Lin Aoxiang, Zhan Huan, Huang Zhihua, *et al.* 5 kW $(N+1)$ GT-wave fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(7): 197-198.
林傲祥, 湛 欢, 黄志华, 等. 5 kW 泵浦增益一体化复合功能激光光纤[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(7): 197-198.
- [74] Xiao Q, Ren H, Yan P, *et al.* Theoretical study of pumping absorption in a co-linear side-pumping coupler[J]. *Optics Communications*, 2013, 300(14): 220-224.
- [75] Xiao Q. Theoretical study of pump absorption of colinear side-pumping coupler with pumping and absorption loops[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 096111.
- [76] Xiao Q, Ren H, Xiao C, *et al.* Research on characteristics of co-linear side-pumping couplers with special double-clad fibers[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(4): 307-314.