

·学科进展·

包层泵浦光纤激光器

吕可诚 刘伟伟 吕福云 盛秋琴 董孝义

(南开大学物理科学学院,天津 300071)

[摘要] 本文在概述双包层光纤结构和包层泵浦技术的基础上,综述了近年来连续输出高功率光纤激光器、被动调Q光纤激光器和拓宽光纤激光器波长范围技术的最新进展,并展望了包层泵浦光纤激光器的应用前景。

[关键词] 双包层光纤,包层泵浦技术,光纤激光器,非线性频率转换

引言

光纤激光器以其效率高、阈值低、窄线宽、可调谐、紧凑小巧和高性能价格比等众多的优良特点受到普遍关注,并得到了长足发展。尤其从20世纪80年代开始,由于掺稀土离子单模光纤生产技术和半导体激光器工艺的发展,有源光纤器件开始腾飞。但是,由于泵光较难有效地耦合到光纤芯中,因此光纤激光器通常被认为是一种低功率的光子源,因而研究工作大都集中在通信领域。后来,采用新泵浦方法将泵光有效地耦合到纤芯中,实现了单模光纤高功率激光输出。80年代后期,美国宝丽来公司的研究者们作出了开创性的工作,发展了一种包层泵浦技术,大大地促进了高功率光纤激光器的发展。1993年,H. Po等报道了他们研制的高功率 Nd^{3+} 光纤激光器,并在1064 nm波长获得了近5W的单模连续激光输出,斜率效率达到51%^[1]。1997年CLEO会议上,宝丽来公司报道了输出功率为16—35.5 W、波长为1065—1472 nm的包层泵浦掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 光纤激光器^[2]。Z. J. Chen等报道了包层泵浦掺 Nd^{3+} 调Q光纤激光器,获得了峰值功率3.7 kW、脉宽2 ns的脉冲激光输出^[3]。高功率光纤激光器的实现,纤芯内的光功率密度达到每平方米百兆瓦量级,使光纤中出现多种非线性现象,这些非线性效应成为拓宽光纤激光器输出波长的有效途径。

1 双包层掺杂光纤

包层泵浦技术的关键是双包层掺杂光纤的设计和制造,这种光纤的结构如图1所示^[4,5]。可以看到,光纤由4个层次组成:(1)光纤芯;(2)内包层;(3)外包层;(4)保护层。纤芯由掺稀土元素的 SiO_2 构成,它作为激光振荡的通道,对相关波长应设计成为单模;内包层由横向尺寸和数值孔径比纤芯大得多、折射率比纤芯小的纯 SiO_2 构成。它是泵光通道,对泵光波长是多模的;外包层由折射率比内包层小的软塑材料构成;最外层则由硬塑材料包围,构成光纤的保护层。

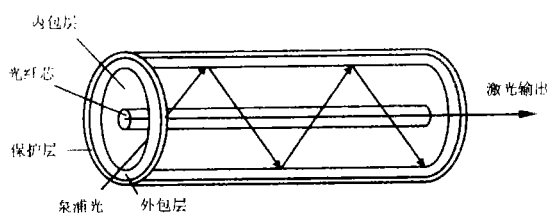


图1 双包层掺杂光纤的构形

双包层光纤内包层的作用是:(1)包绕纤芯,将激光辐射限制在光纤芯内;(2)多模导管作为泵光的传输通道,把多模泵光转换为单模激光输出。正如图1所示的那样,泵光的能量不能直接耦合到光纤芯内,而是将泵光耦合到内包层,光在内包层和外包层之间来回反射,多次穿过单模纤芯被其吸收。这

国家自然科学基金资助项目,批准号 69877006

本文于1999年1月25日收到。

种结构的光纤不要求泵光是单模激光,而且可对光纤的全长度泵浦,因此可选用大功率的多模激光二极管阵列作泵源,将约70%以上的泵浦能量间接地耦合到纤芯内,大大提高了泵浦效率。

双包层光纤的设计应兼顾光的注入效率和泵浦速率的不同要求,前者要求较大尺寸的包层波导,而后者则要求较小尺寸的包层波导。同时泵光吸收效率依赖于内包层的几何形状和纤芯在包层结构中的位置,因此圆形、长方形、正方形和星形结构的内包层,以及同心、偏心的包层波导都被研究过。另外,泵光被掺杂离子的吸收率正比于内包层和外包层的面积比,最佳面积比应权衡光纤的耦合效率(大半径比)和器件的效率(与泵光功率有关),研究表明,最佳面积比约为100。

下面介绍2种不同几何结构的双包层光纤例证。

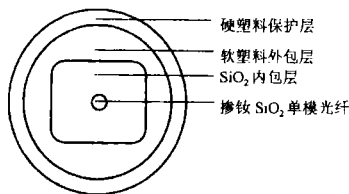


图2 方形内包层的双包层光纤横剖面

例1,内包层为正方形结构的双包层 Nd^{3+} 光纤,其横截面的几何形状如图2所示^[7]。直径为 $5\mu\text{m}$ 的单模纤芯由掺 Nd_2O_3 (质量浓度0.5%) 的熔融 SiO_2 和 Al_2O_3 , GeO_2 掺杂物(摩尔浓度为2%)组成, Nd_2O_3 的掺入用水溶液侵蚀法,铝的掺入用汽相沉积法。内包层由一壁厚为 $290\mu\text{m}$ 的正方形结构的纯 SiO_2 构成。对 810nm 波长的泵光,其折射率 n 为1.46。选用正方形结构的优点是:(1)能用同一种制备方法拉制出内包层较大的光纤;(2)能与辐射场轴对称的泵浦源很好地匹配,在其他条件相同的情况下,能允许注入更大功率的泵浦辐射;(3)易与标准的圆形光纤波导熔接。外包层为软塑聚合物,对 810nm 波长泵光, n 为1.40;保护层则为硬塑聚合物。

例2,内包层为矩形结构的双包层 Nd^{3+} 光纤^[1],单模光纤用 MOCVD 法将铒掺入到 SiO_2 中,掺杂浓度为0.2%。纤芯直径为 $3.5\mu\text{m}$,数值孔径 NA 为0.11;矩形内包层的截面积为 $300\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, NA 为0.59。对 807nm 波长的泵光其折射率 n 为1.453。这种长宽比为3:1的矩形结构是为了与作为

泵光的激光二极管纵横比更好地匹配,使泵光和光纤更有效地耦合;外包层是一种特殊的 UV-Curable 氟代聚合物,对 807nm 波长, n 为1.382;光纤的最外层用硬塑材料 Desoto 涂镀,形成光纤的保护层,整个光纤直径为 $500\mu\text{m}$ 。

2 包层泵浦光纤激光器

2.1 包层泵浦、连续运转的高功率光纤激光器

双包层单模激光器是产生高功率连续辐射的有效手段,它的最基本的优点是工作物质上的热负荷相当小。因为光纤的侧面积与体积之比非常大,这是任何其他激光器所无法媲美的。可以预期,这类光纤激光器将代替某些二极管泵浦的固体激光器而获得广泛应用。

H. Po 等报道了一种内包层为矩形的包层泵浦 Nd^{3+} 光纤激光器^[1],激光器的光纤长度为 45m ,铒掺杂量为0.2%。驻波腔结构,光纤端面与二色镜对接。泵浦端的二色镜,对 807nm 的泵光波长, $R=1\%$,对 1060nm 的泵光波长, $R=99\%$ 。输出端的二色镜的特性正好相反。泵光采用条形激光二极管,输出光束的面积为 $750\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$,孔径的纵横比为3:1,这与矩形包层光纤相匹配。泵光的总功率为 15W 。用4个镀抗反射膜的透镜系统,将大约72%的泵浦功率耦合到光纤中。泵浦阈值为 70mW 。用该系统获得了 5W 的 1060nm 波长的激光输出。系统的总效率为30%。对输出光近场光斑包络进行扫描证实,激光输出为单横模。在 $1/e^2$ 处的宽度为 $8\mu\text{m}$ 。

周稳观等人^[6]介绍了一种采用正方形内包层结构的包层泵浦掺 Nd^{3+} 光纤激光器,双包层光纤结构见图2。激光器光纤的长度为 30m ,驻波腔结构,采用二色镜与光纤端面对接,二色镜的特性与文献[1]提供的数据基本相同。用输出波长为 810nm 、总功率为 15W 的阵列(19个)激光二极管作泵浦源,有~50%的泵光功率注入到内包层,泵浦阈值~ 500mW ,获得 1060nm 、 3W 的激光输出。

美国宝丽来公司的 M. Muendel 等人在'97 CLEO 会议上报道了一种双包层掺 Yb^{3+} 石英光纤激光器^[2],他们用4个光纤耦合的 916nm 波长的激光二极管条,以 54.4W 功率泵浦双包层光纤,在 1100nm 波长上获得 35.5W 的极限输出。这是迄今为止报道的光纤激光器的最高连续输出。

在同一个会议上,美国新泽西州默里山贝尔实验室-鲁申特技术公司的 D. Inmiss 等报道了包层泵

浦 Yb^{3+} 光纤激光器,驻波腔结构,腔镜是 2 个 Bragg 光纤光栅。采用 1 个 915 nm 波长、1 cm 宽的高功率半导体激光二极管条作泵源,精心设计双包层光纤和光束耦合整形器,使系统的输出功率在 1 065 nm 波长处为 16.4 W,在 1 101 nm 波长处为 20.4 W。

在 1998 年 CLEO 会议上,鲁申特技术公司的 S. Kosinki 等人^[7]又报道,用一种内包层为星形的双包层单模 Yb^{3+} 光纤激光器得到 20 W 的激光输出,见图 3。这些光纤激光器的光纤长度是几十米。

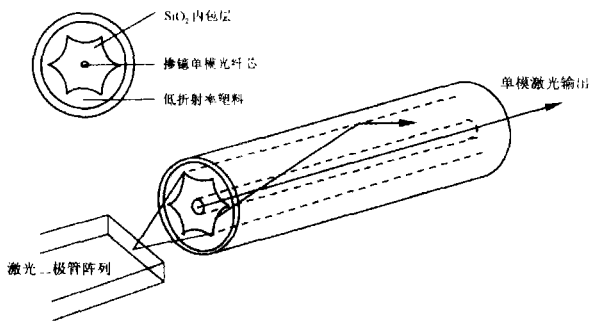


图 3 星形内包层掺镱双包层光纤激光器

2.2 包层泵浦调 Q 光纤激光器

调 Q 和锁模是产生短脉冲激光的 2 种基本技术。近期的研究工作表明,采用包层泵浦技术的调 Q 光纤激光器与常规调 Q 光纤激光器相比,可将峰值功率提高一个数量级,脉宽从 70 ns 压缩到 2 ns。这种短脉冲激光器在医学、测距、遥感和参量振荡等许多领域中可得到广泛应用。

Z. J. Chen 等^[3]报道了一种增强式包层泵浦调 Q 光纤激光器。他们用一种新型的混合式结构,如图 4 所示。这种新结构吸取了包层泵浦调 Q 光纤激光器和常规调 Q 技术的优点,基于光纤中的非线性效应产生高功率和窄脉宽的激光输出。实验选用双包层 Nd^{3+} 光纤作增益介质,纤芯中钕掺杂浓度高达 2%,光纤的最佳长度是 7.2 m。纤芯直径为 5.1 μm ,数值孔径 NA 为 0.12。光纤的内包层采用矩形结构,截面尺寸为 150 $\mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$,这与泵浦激光二极管相匹配。泵浦源采用 800 nm、3 W 的激光二极管,为将泵光功率有效地耦合到双包层光纤中,将光纤以某一角度劈开,用约 1 mm 的一小段单模光纤与双包层对接,可将 60% 的泵光注入到内包层中。系统用一个全反镜和一个二色镜构成驻波腔结构。用这样的系统获得了峰值功率为 3.7 kW、脉宽 2 ns 的脉冲输出,但重复频率不稳定。

为了稳定激光输出的重复频率,在腔内插入一

个声光调制器,声光驱动频率为 110 MHz,可使激光的重复频率在 6.6—16.4 kHz 范围内可调,且输出稳定。

研究者在常规的调 Q 光纤激光器中,得到脉冲激光的峰值功率是 330 W、脉宽为 70 ns。而用包层泵浦的调 Q 光纤激光器,可使峰值功率提高 1 个量级,脉宽可压缩到 2 ns。为了研究这种增强式调 Q 光纤激光器的运转机制,在双包层光纤的一端接入 10 m 长的常规单模掺杂光纤,从 1 端和 2 端分别测量输出激光的特性(见图 4)。研究表明,系统的运转机制是基于受激 Brillouin 散射(SBS)过程。这时激光器作为具有谐振泵浦的 SBS 腔工作。SBS 对激光腔提供强反馈,形成一短的 SBS 弛豫振荡。这等效于在很短的周期内使腔 Q 值增加几个量级。所产生的光脉冲经过高反转增益介质,经受极高的动态增益,形成高功率、窄线宽的脉冲激光输出

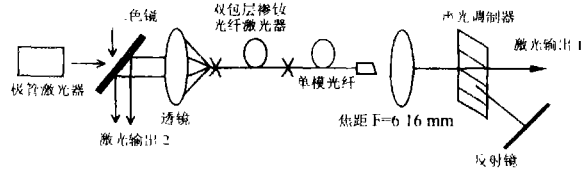


图 4 增强式 Q 开关 Nd^{3+} 光纤激光器结构

S. V. Chrenikov 等人^[7]报道了一种新颖独特的自调 Q 掺 Yb^{3+} 光纤激光器。2—20 m 长的掺 Yb^{3+} 光纤作增益介质,用 910—975 nm 的掺 Ti 蓝宝石激光器或相应波长的激光二极管作泵源,通过二色镜或光纤耦合器将泵光引入到增益光纤中。系统输出的峰值功率是 10 kW,脉冲能量 ~ 50 μJ ,脉冲宽度 2 ns,输出激光的波长为 1 040—1 120 nm。运转机制也是基于光纤中的 SBS 过程。

2.3 包层泵浦光纤激光器的波段扩展

光纤激光器的输出波长范围扩展到可见区和近红外区可提供更多的应用领域。进一步研究稀土离子的光谱特性,可开辟新的激光跃迁和新的泵浦方案,例如,掺铒的氟化物光纤作增益介质可获得 2.7 μm 的激光输出;掺镱钨硫化物玻璃(GLS)可在 3—5 μm 范围内获得激光辐射;另一种拓宽光纤激光器输出波长的有效途径则是利用增益介质的非线性变频效应。因为包层泵浦光纤激光器可在纤芯内获得超高功率密度,光纤中可出现受激 Raman 散射、受激 Brillouin 散射和频率上转换等多种非线性

效应。因此,利用光纤中非线性效应拓宽光纤激光器输出波长范围的研究工作引人注目。

I. Iiev 等人^[8,9]采用自准直棱镜调谐技术,设计了一种双程 Raman 光纤激光器,深入研究了紫外、可见和近红外波段的 Raman Stokes 光谱。实验中采用常规通信光纤作 Raman 光纤,纤芯直径 60—100 μm ,长度 40 m。用峰值功率 100 kW 的 Nd:YAG 调 Q、二倍频激光(532 nm)作泵源,获得了 540—1 010 nm 波段的 13 级 Stokes 光谱。用该 YAG 激光器的 3 倍频激光(355 nm)作泵源,获得了 360—540 nm 波段的 21 级 Stokes 光谱。

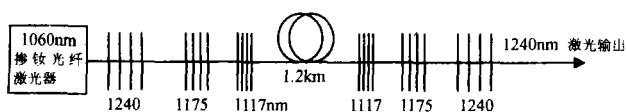


图5 级联 Raman 光纤激光器简图

I. Bennion 报道一种级联 Raman 激光器^[10],其结构示于图 5。采用包层泵浦的 Nd³⁺ 光纤激光器输出的 1 060 nm 激光作泵源,将泵光耦合到 1.2 km 长的锗硅光纤内,产生 1 117、1 175、1 240 nm 三级 Raman Stokes 分量。选用与该 3 个分量相对应的光纤光栅构成相互嵌套的谐振腔,使 3 个分量同时振荡,将 1 240 nm 的 Stokes 分量引为输出。这种激光器已被用于 1 310 nm 光纤放大器的泵源。

在 1998 年 CLEO 会议上,S. Kosinki 报道了 3 种用于卫星-卫星通信的高功率 Raman 光纤激光器系统^[7]:(1)高功率光纤激光器输出的 1 117 nm 光泵浦 1 240 nm 的 Raman 源。该 Raman 源可驱动用于通信系统的 1 300 nm 的 Raman 放大器;(2)1 117 nm 的激光泵浦级联 Raman 源产生 1 487 nm 的光作 1 500 nm 通信窗口的 Er³⁺ 光纤放大器的泵源;(3)1 100 nm 泵浦运转在 1 500 nm 波段的级联 Raman 放大器。据报道鲁申特技术公司已提供了这 3 种 Raman 系统的商品原型。

从 90 年代初开始,频率上转换光纤激光器的研究受到重视。但是,由于泵光较难有效地耦合到纤芯内,上转换光纤激光器的输出功率的提高受到限制。包层泵浦技术解决了这一难题。最近,Uwe Brinkman 介绍了将这种双包层光纤结构用于上转换激光器的研究工作^[11]。Zentrum Hannover 研究小组(Hannover, Germany)和 Hamburg 大学(Hamburg, Germany)的研究者们设计了一种 Pr³⁺/Yb³⁺ 掺杂 ZBLAN 双包层光纤,由 Le Verre Foure (Brittany,

France)制造。纤芯直径 5 μm ,NA 为 0.15,光纤的内包层的直径为 25 μm ,NA 为 0.35。外包层直径为 125 μm 。根据计算,该光纤的阈值为 1W。研究表明,双包层上转换光纤激光器有着巨大的潜力。他们预期,用 ~3 W 带尾纤的激光二极管作泵源,在可见区的红光波段(653 nm)和绿光波段(520 nm)可获得 1W 的激光输出,而在 491 nm 的蓝光波段可获得 0.5 W 的激光输出。

S. V. Chernikov 等^[7]和 Z. J. Chen 等^[3]在他们研制的 Nd³⁺ 和 Yb³⁺ 调 Q 光纤激光器中也观察到受激 Raman 散射、与 Raylein 散射和 Brillouin 散射有关的分布背向散射以及各种非线性变频过程。这些非线性效应使 Nd³⁺, Er³⁺, Ho³⁺, Pr³⁺, Tm³⁺ 和 Yb³⁺ 光纤激光器的输出波长大大拓宽。可以预期,近期将有多种基于非线性效应的光纤激光器的研究报道。

3 结束语

包层泵浦概念的提出大大推进了高功率光纤激光器研究工作的进展。近年来,各类双包层掺杂光纤的设计和制造、包层泵浦高功率连续运转激光器、包层泵浦高峰值功率调 Q 激光器以及基于非线性效应拓宽光纤激光器输出波长范围的研究工作取得了一系列重大进展。今后研究工作的方向将是进一步提高激光器的输出功率和最大限度地拓宽光纤激光器的输出波长范围。可以预期,这类大功率、宽波段、结构紧凑、运转可靠、高性能价格比的激光器,将在航天航空、生命科学、医学、材料科学、精密机械加工、家庭 TV、广告显示、印刷业、光通信(特别是高速和孤子通信以及卫星-卫星之间的通信)等诸多领域得到广泛应用。在某些应用领域,光纤激光器已成为气体激光器和激光二极管泵浦的固体激光器强有力的竞争对手,展示出光辉灿烂的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Po H, Cao J D, Laliberte B M et al. High power neodymium-doped single transverse mode fiber laser. *Electro. Lett.* 1993, 29(17): 1500—1501.
- [2] 友清译. 超高功率光纤激光器. *激光和光电子学进展*, 1998, (1): 40.
- [3] Chen Z J, Grudin A B, Minelly J D et al. Enhanced Q switching in double-clad fiber laser. *Opti. Lett.* 1998, 23(6): 454—456.
- [4] Richardson D, Minelly J, Hanna D, Fiber laser systems shine brightly, *Laser Focus World*, 1997, (9): 87—96.
- [5] Rossi B. Commercial fiber laser take on industrial markets. *Laser Focus World*, 1997, (5): 143—149.
- [6] 周稳观, 罗山译. 高功率单模掺钕光纤激光器. *激光与光电子学进*

- 展, 1997, (7): 29~30.
- [7] Chernikov S V, Zhu Y, Taylor J R et al. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5): 298—300.
- [8] Iiev I, Live L K, Kumagai H et al. A widely tunable Double-pass fiber Raman laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(3): 1846—1848.
- [9] Iiev I, Live L K, Kumagai H et al. Ultraviolet and blue discretely tunable double-pass fiber Raman Laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(24): 3200—3202.
- [10] Bennion I, Williams J A R, Zhang L et al. UV-written in-fiber grating, 5.5.3 Cascaded Raman amplification at 1.3 μm , *Optical and Quantum Electronics*, 1996, **28**(1): 124—125.
- [11] Brinkmann U. Upconversion fiber laser now powerful in the visible. *Laser Focus World*, 1998, (5): 15—16.

CLADDING PUMPING FIBER LASER

Lü Kecheng Liu Weiwei Lü Fuyun Sheng Qiuqin Dong Xiaoyi

(*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract Based on survey construction on double clad fiber and cladding pumping technique, this paper summarized advances of high power fiber laser of CW output, passive Q-switched fiber laser and technique of extended wavelength range of fiber laser in the recent years. The paper also prospected the applying future of cladding pumping fiber.

Key words double clad fiber, cladding pumping technique, fiber laser, nonlinear frequency conversion

·资料·信息·

首次由中国学者主持的国际大洋钻探计划 第 184 航次在中国南海顺利完成

国际大洋钻探计划(ODP)是一个有 21 个国家参加的科学组织,目的是通过大洋科学钻探,探索地球的历史和结构。十余年来,该科学组织共打钻 1 414 个井位,取得了 173 268 m 的岩芯记录,对板块俯冲作用、气候变化、地震灾害、高压流体、极端环境下的生命及 6 500 万年前的陨石撞击事件等领域的研究取得了重大进展。第 184 航次是在中国南海进行的第一次大洋钻探,中国科学家提出了此次钻探建议、井位设计和研究思路,首席科学家是同济大学教授汪品先院士。

承担该航次任务的“地球深部取样海洋研究机构联合体(JOIDES)决心号”大洋钻探船,于 1999 年 2 月 18 日从澳大利亚西南弗里曼特尔港启航,于 4 月 12 日在香港靠岸,历时 50 多天,行程 5 000 多公里。该船先到南沙海区,然后进入东沙以南深水区钻深,在南海南北 6 个深水站位钻孔 17 口,从水深 2 000 m

到 3 300 m 的海底钻入地层,最深的一口钻入海底以下 850 m,取得高质量的连续岩芯共计 5 500 m,取心率达 95%,超额完成了预定任务。

这次南海大洋钻探的主题是“东亚季风演变史在南海的记录及其全球气候意义”,旨在取得深海沉积的连续记录,从而研究气候演变尤其是东亚季风的演变,及其与地质构造运动的关系。本航次使用了当代最先进的动力定位、液压取心、一点三孔和一系列新颖的录井和测井技术,获取了三千多万年来来的深海沉积记录,为研究东亚和西太平洋地区的古环境长期演变提供了最佳剖面,为揭示青藏高原隆升、东亚季风形成与变迁的历史,为了解中国宏观环境变迁的机制提供条件,也为揭示南海的形成演化和开发南海资源提供了极其宝贵的资料。

(地球科学部 供稿)