

文章编号: 1001-5078 (2006) 09-0833-04

高功率掺镜双包层光纤激光器

赵玉辉^{1,2}, 郑义¹, 詹仪¹, 杨洪杰¹

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052; 2. 山东理工大学, 山东 淄博 255049)

摘要: 简要地概述高功率双包层掺镜光纤激光器的基本原理和关键技术, 介绍其在工业、通信、医疗等领域的应用, 并对国内外的近期进展作了综述。

关键词: 双包层光纤激光器; 包层泵浦; 高功率

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

High-power Yb-doped Double-clad Fiber Laser

ZHAO Yu-hui^{1,2}, ZHENG Yi¹, ZHAN Yi¹, YANG Hong-jie¹

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Optoelectronics Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The principles and key technique of high-power Yb-doped double-clad fiber laser are briefly described. Its applications in industry, communication, medical treatment are introduced. The latest progresses and development trends in the area are prospected.

Key words: double-clad fiber laser; cladding-pump; high power

1 引言

光纤激光器由于其诸多优点而倍受青睐。自 20 世纪 80 年代中期开发出掺稀土离子单模光纤制造技术以来, 光纤激光器成为激光技术领域研究的热点。但是, 由于泵浦光较难有效耦合到纤芯中, 因此, 光纤激光通常被认为是一种低功率光源。近年来, 国际上发展了一种以双包层光纤为基础的包层泵浦技术, 提高了光纤激光器的输出功率, 改变了光纤激光器仅仅是小功率光子器件的历史。目前, 掺镜双包层光纤激光器的输出功率与单模光纤激光器相比提高了几个数量级, 而且具有光束质量好、结构紧凑小巧、全固化、低阈值、高效率等优点, 因此, 在工业加工、光通信、医学、印刷、激光测距等领域具有广泛的应用前景^[1-2]。本文简要介绍了高功率掺镜光纤激光器的机理、关键技术与应用、以及近几年的研究进展和发展方向。

2 掺镜双包层光纤激光器的基本原理和特点

图 1 为一个纵向泵浦的光纤激光器的基本结构图。一段掺镜离子的双包层光纤放置于两反射率经过选择的腔镜间, 泵浦光从光纤激光器的左边腔镜耦合进光纤。光纤激光器是一个波导型的谐振装置, 光波的传输介质是光纤, 这种结构实际上是 Fabry-Perot 谐振腔结构。在光纤激光器中, 非常细

的掺镜光纤纤芯就充当了光纤激光器的增益介质, 由于外加泵浦光的作用, 在光纤内便很容易形成高功率密度, 从而引起激光工作物质的粒子数反转, 从纤芯输出激光。



图 1 双包层光纤激光器原理示意图

Fig 1 schematic diagram of principle configuration for double-clad fiber laser

由于双包层掺镜光纤激光器是波导式结构, 因而具有可容强泵浦和高增益的特点, 而且光纤本身具有良好的柔绕性、小尺寸和可掺杂等特点, 从而使其具有很多优异的性能和特点。主要表现在:

a) 输出激光的光束质量好, 激光器可以实现光束质量达到近衍射极限 ($M^2 \approx 1$) 的单模高功率激光输出;

b) 掺镜双包层光纤激光器具有量子效率高、增

基金项目: 河南省创新人才培训对象基金资助项目; 河南省杰出青年基金资助项目 (No. 121001200)。

作者简介: 赵玉辉 (1973 -), 男, 硕士生, 主要从事光纤激光器技术的研究。E-mail: zhaoyhs@163.com

收稿日期: 2006-03-09; 修订日期: 2006-04-11

益带宽大以及无激发态吸收、无浓度淬灭等优点,可采用波长位于 915nm 或 980nm 附近的多模大功率 LD 泵浦,而且输出波长范围宽;

c)具有大的表面积与体积比,散热效果好,能在无强制制冷条件下连续工作;

d)体积小巧,结构简单、灵活。

3 掺镱双包层光纤激光器的关键技术

3.1 包层泵浦技术

包层泵浦的技术基础是掺镱的双包层光纤。双包层光纤由纤芯、内包层、外包层组成,其结构示意图见图 2。折射率从纤芯到外包层依次递减,其中纤芯是由掺 Yb^{3+} 的 SiO_2 构成,和传统的单模光纤纤芯相似,专用于传输信号光;其外部较粗的内包层则用于传输多模泵浦光。这样,可以使用多个多模激光二极管同时耦合至双包层光纤的内包层上,当多模泵浦光每次横穿过单模光纤纤芯时,都会被其中的 Yb^{3+} 吸收,大大提高了耦合效率。

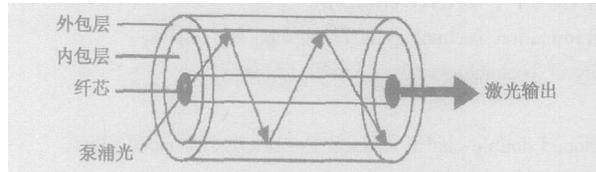


图 2 双包层光纤示意图

Fig 2 schematic diagram of double-cladding fiber

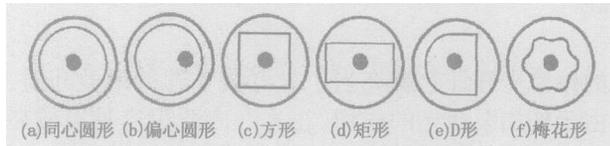


图 3 双包层光纤不同内包层形状示意图

Fig 3 structure diagram of different internal cladding shape of double-clad fiber

双包层掺镱光纤作为大功率光纤激光器的关键组成部分,其截面的几何形状严重影响掺镱纤芯对泵浦光的吸收效率^[3]。在内包层形状方面,最先提出的是对称圆形结构,但由于对称圆形内包层中存在大量螺旋光,这些光在内包层的多次反射过程中始终不经过纤芯,因而泵浦光的吸收率很低。随着包层技术的发展,科技工作者通过优化设计双包层光纤的结构,特别是内包层的几何形状,很好地解决了包层泵浦中螺旋光问题。典型的内包层结构有偏心、方形、矩形、D形、梅花形等结构,如图 3 所示。不同内包层形状的光纤具有不同的泵浦激光转换效率,Reichel V 等人曾经通过计算,得出各种内包层形状的光纤激光器的泵浦光吸收率随双包层光纤长度的变化曲线,如图 4 所示。实验结果表明:圆形内包层内存在大量螺旋光,纤芯吸收率仅 10%;而偏心形内包层则有 50%的螺旋光;对于 D 形内包层,螺旋光约 13%;而矩形内包层光纤经多次反射后纤芯吸收率可高达 92%。所以,优化内包层的边界形

状是提高对泵浦光吸收效率的有效途径。另外,内包层的横截面积和数值孔径也会影响泵浦光的吸收率。

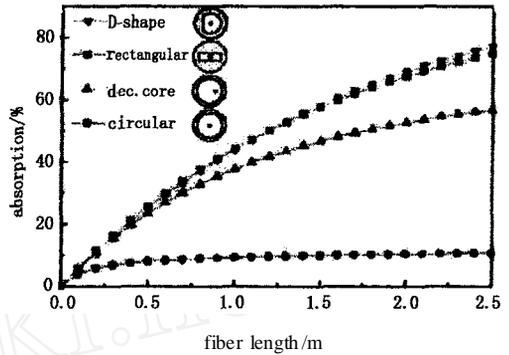


图 4 不同内包层形状的光纤激光器的泵浦光吸收率随双包层光纤长度的变化关系

Fig 4 variation of absorption efficiency of pumped light of differently internal cladding fiber laser with double-cladding fiber length

3.2 光纤耦合技术

大功率光纤激光器另一项关键技术,就是将泵浦源输出的光功率有效地耦合到增益光纤中去。目前,掺镱双包层光纤激光器的泵浦耦合方式主要有端面耦合、侧面耦合以及 Taper 型光纤耦合。

3.2.1 端面耦合

端面耦合是掺镱双包层光纤激光器最简单和有效的泵浦耦合方式,它包括两种情况:一种是透镜组直接耦合,另一种是大功率 LD 尾纤与光纤端面熔接耦合。透镜组直接耦合,即泵浦光经聚焦后通过二色镜直接耦合到双包层光纤中,如图 5 (a) 所示。Dominic V. 等报道的 110W 掺镱双包层光纤激光器以及 Y. Jeong 等报道的 610W 包层泵浦大芯径掺镱光纤激光器都是采用了这种泵浦耦合方式^[4-5]。该方法要求透镜组的数值孔径、聚焦光斑大小与双包层光纤内包层孔径相匹配,但采用这种耦合方式的光纤激光器稳定性差且不易集成,所以商用光纤激光器一般不用。大功率 LD 尾纤与光纤端面熔接耦合,如图 5 (b) 所示。这种端面直接耦合的方式结构简单紧凑,并且不需要其他的辅助微调,实现了激光器的全光纤化。但是这种结构整机比较复杂,成本较高。

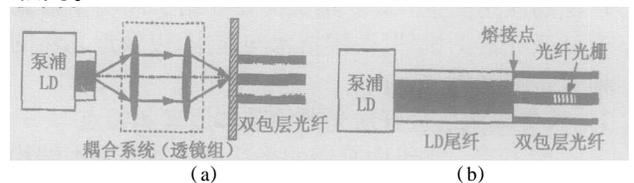


图 5 端面耦合结构示意图

Fig 5 structure diagram of fiber-end-coupled system

3.2.2 侧面耦合

侧面耦合是通过特殊的技术和工艺,将泵浦光从双包层光纤的侧面耦合进入其内包层,通常采用

的方式有以下三种:

1) V形槽侧面泵浦

该方式是将双包层光纤的一段剥除涂敷层及外包层后,在内包层的一侧开一V形槽,泵浦光经微透镜聚焦后从另一侧垂直注入双包层光纤内包层,利用V形槽的斜面处的全内反射实现泵浦光与双包层光纤内包层的耦合,基本结构如图6(a)所示^[6]。这种耦合方式易于实现各种灵巧的激光腔结构,便于实现多点阵列式泵浦及双向泵浦,能获得更大的输出光功率。但这种技术要求高,工艺复杂,在实现大功率泵浦时所用多V形槽泵浦结构复杂,不易实现,同时也存在泵浦激光能量在衬底等处造成热损伤的问题。

2)棱镜侧面耦合

棱镜侧面耦合是在双包层光纤上开槽到内包层表面,然后用紫外固化光学胶将用纯石英玻璃制成的微棱镜粘贴在内包层上,泵浦光通过微棱镜折射进入内包层,基本结构如图6(b)所示^[7]。该结构可在双包层光纤上进行多点泵浦,但受光学胶所承受的光功率的限制,单个微棱镜能耦合的泵浦功率不高,且微棱镜尺寸大小加工难度较大。

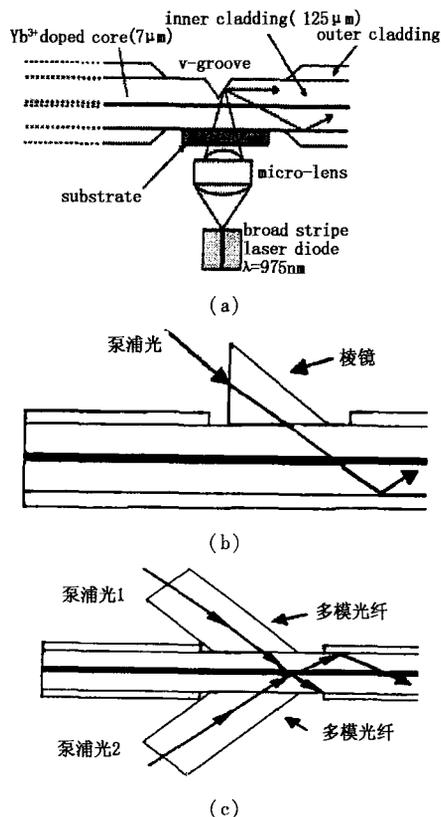


图6 侧面耦合结构示意图

Fig 6 structure diagram of fiber-side-coupled system

3)光纤侧面耦合

光纤侧面耦合是将磨抛成一定角度的光纤端面用折射率相近的光学胶胶合或直接熔接在内包层上,并在熔接处涂覆低折射率的聚合物涂层,结构如

图6(c)所示^[8]。这种方法可以进行多点泵浦,且耦合效率较高,但光纤端面的角度抛磨比较困难。

3.2.3 Taper型光纤耦合

Taper型光纤耦合是利用熔融拉锥形成的锥形多模耦合器,把带有尾纤的多模二极管输出的泵浦光耦合进双包层光纤中,或者利用在输入端有单模光纤的耦合器直接把数个带有尾纤的多模二极管输出的泵浦光耦合进双包层光纤中,光纤光栅刻在单模光纤上,如图7所示。

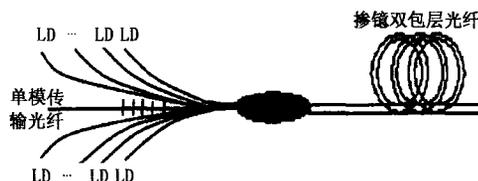


图7 Taper型光纤耦合结构示意图

Fig 7 structure diagram of fiber-taper-coupled system

3.3 光学谐振腔技术

制备合适的光学谐振腔是高功率掺镱双包层光纤激光器又一关键技术。目前,高功率掺镱光纤激光器的谐振腔主要有三种:一是采用双色镜构成谐振腔,这种方法给泵浦光的耦合以及光纤激光器的封装都带来很大困难,不利于光纤激光器的实用化和商品化;二是在光纤端面直接镀膜,这种方式结构简单,但是高功率输出时容易造成膜的损伤;三是采用光纤光栅做谐振腔,这种腔结构消除了腔镜与光纤间的耦合损耗,而且可以实现掺镱光纤激光器的调谐输出;该类腔结构简单、紧凑,可实现全光纤集成,有利于实用化、商品化。

4 高功率掺镱双包层光纤激光器的应用

掺镱双包层光纤激光器以其优越的性能,在高功率激光器的应用方面,已成为首选产品,广泛应用于工业、通信、医疗、军事等领域。

在工业领域,以其高功率、光束质量好、长寿命等特点可被应用于快速打标、切割、焊接、打孔、激光微加工、材料处理等行业;在通信领域,包层泵浦的光纤可以把廉价的多模LD的能量集中起来,使之变为可用的单模高能信号光束,掺镱(或掺铒)光纤在1550nm光通信窗口可直接放大信号;包层泵浦的光纤激光器由于结构紧凑、价格相对低廉和无气体、染料、溶剂等而特别适应于医学应用。瓦级的窄带1083nm掺镱光纤激光器可以通过自旋偏振氦气,对低密度生物组织进行医学成像。光纤激光器倍频光可治疗皮肤癌和去纹身。利用倍频晶体和通过喇曼频移及参量波长变换技术,可以由包层泵浦激光器得到从紫外到中红外任意波长的激光,满足不同医学应用的要求^[9]。另外,掺镱光纤激光器也可以作为掺铒光纤放大器的泵浦源。

5 高功率掺镱双包层光纤激光器的研究进展

自 1988 年 Snitzer 等人提出双包层光纤之后, 基于该技术的光纤激光器, 特别是掺镱双包层光纤激光器获得了快速的发展。1994 年 H. M. Pask 等首先在掺 Yb^{3+} 的石英光纤中实现包层泵浦, 得到了 0.5W 的最大激光输出, 斜效率达到 80%^[10]; 1997 年报道了 35.5W 的波长为 1100nm 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器^[11]; 2002 年 IPG 公司公布了 2000W 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器; 2004 年建成 10kW 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器; 2005 年, 推出了 2000W 单模光纤激光器, 17kW 光纤激光器进入生产线; 最近, IPG 公司宣布在柏林成功为 BAM 安装了一台 2 万瓦掺镱光纤激光系统; 现在 IPG 生产、销售连续掺镱光纤激光系统, 功率可高达 50kW, 主要应用于不同的工业领域中各种材料加工^[12]。

国内关于双包层光纤激光器的研究始于 20 世纪 90 年代末。1999 年, 南开大学与电子 46 所成功的合作研制出国内第一根大包层尺寸、大数值孔径的掺 Yb^{3+} 双包层光纤, 并进行了一系列的实验研究^[13]; 2000 年, 上海光机所首次报道了输出功率 3.84W, 斜效率 55% 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的实验结果^[14]; 2002 年, 南开大学报道了国内第一台全光纤掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 输出功率 1.2W; 2004 年, 清华大学报道了双端侧向泵浦掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 实现 137W 的激光输出; 2004 年底, 上海光机所与烽火科技公司合作, 采用掺镱 D 形双包层光纤, 获得了 444W 的激光输出, 转化效率 70% 以上^[15], 这是国内已报道的输出功率最高的掺镱光纤激光器。另外, 长春光机所、深圳大学、复旦大学等科研机构 and 高校也开展了这方面的研究工作。

6 展 望

高功率掺镱双包层光纤激光器作为新一代高功率激光器的代表, 其发展方向主要表现在以下几个方面:

(1) 进一步提高单根光纤输出功率, 输出功率从百瓦级向千瓦级发展;

(2) 进一步提高光纤激光器的性能, 从连续光纤激光器向高功率脉冲激光器发展, 从常规的组束技术向相干组束技术发展, 以保持高功率光纤激光良好光束质量;

(3) 高功率光纤激光器的实用化研究, 提高稳定性, 使其更加小巧紧凑。

高功率掺镱光纤激光器的发展异常迅速, 国外一些公司不断推出更高功率的产品, 实际应用愈来愈广泛。据 Laser Focus World 报道, 光电子工业将是一支重要产业, 在未来几年, 其产值预计可达 400 亿美元。可见, 激光技术的应用具有广阔的前景。

由于掺镱光纤激光器的优良的性能, 决定了体积庞大的其他传统的高功率激光器 (比如高功率 CO_2 激光器和 YAG 激光器) 势必被这种高功率、高效率、长寿命、小体积、灵活小巧的光纤激光器所替代, 而应用于大型的激光加工 (包括切割、焊接、打孔等)、材料处理、医疗等众多领域。而且可使设备体积减小, 节约空间, 降低费用。因而, 这种新型高功率光纤激光器具有非常广阔的潜在市场和美好的应用前景, 并将逐步取代传统的激光器。

参考文献:

- [1] Fan Y X, Lu F Y, Hu S L, et al 105kW peak power double clad fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15 (5): 652 - 654.
- [2] 吕可诚, 刘伟伟, 吕福云, 等. 包层泵浦光纤激光器 [Z]. 中国科学基金, 1999, (5): 288 - 292
- [3] Dominic V, MacComack S, Waarts R, et al 110W fiber laser[J]. Electronics Lett, 1999, 35 (14): 1158 - 1160
- [4] Reichel V, Unger S, Hagemann V, et al 8W highly-efficient Yb-doped Fiber Laser [A]. Proceeding of SPIE, 2000, 3889: 160 - 169.
- [5] Y Jeong, J K Sahu, S Baek, et al Cladding-pumped ytterbium-doped lager-core fiber laser with 610W of output power[J]. Optics Communications, 2004, 234: 315 - 319.
- [6] D J Ripin, L Goldberg High efficiency side coupling of light into optical fibers using imbed v-grooves[J]. Electronics Letters, 1995, 39, (25): 2204 - 2205.
- [7] Th Weber, W Luthy, H P Weber, et al A longitudinal and side-pumped single transverse mode doubled-clad fiber laser with a special silicone coating[J]. Optics Communications, 1995, 115: 99 - 104.
- [8] V Gapontsev, W Knpke Fiber lasers grow in power[J]. Laser Focus World, 2002, 38 (8): 83 - 87.
- [9] 陈晓燕. 光纤激光器的发展与应用 [J]. 电子元件应用, 2004, 6 (11): 3.
- [10] H M Pask, J L Archambault, D C Hanna, et al Operation of cladding-pumped Yb^{3+} -doped silica fiber lasers in 1 μm region[J]. Electron Lett, 1994, 30 (11): 863 - 865.
- [11] M Muedel, B Engstrom, et al 35-W at CW single mode ytterbium fiber laser at 1.1 μm [A]. Tech Dig CLEO '97 [C]. Post deakline CPD 30, 1997.
- [12] <http://www.ipgphotonics.com/news> [OL]. newsletter htm. Winter 2005.
- [13] 宁鼎, 王文涛, 阮灵, 等. 掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤的研制及其激光特性 [J]. 中国激光, 2000, A27 (11): 987 - 991.
- [14] 陈柏, 明海. LD 抽运的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器 [J]. 中国激光, 2000, A27 (2): 101 - 104.
- [15] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 国产双包层掺镱光纤实现 440W 的连续高功率激光输出 [J]. 中国激光, 2005, 32 (1): 20.