

文章编号:1002-4026(2008)06-0072-06

大功率光纤激光器技术及其应用

宋志强

(山东省科学院激光研究所,山东 济南 250014)

摘要:光纤激光器是当今光电子技术研究领域中最炙手可热的研究课题,尤其是大功率光纤激光器,已在很多领域表现出取代传统固体激光器和 CO₂ 激光器的趋势。本文从光纤激光器的结构出发,详细论述了大功率光纤激光器的工作原理和关键技术,重点介绍了应用更为广泛的脉冲型光纤激光器技术,最后简单列举了大功率光纤激光器的优势及其在工业加工、国防、医疗等领域里的应用情况。

关键词:光纤激光器;包层泵浦技术;双包层掺杂光纤;光纤光栅;应用

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

The Development of High-Power Fiber Laser and Its Applications

SONG Zhi-qiang

(Institute of Laser, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract:The technology of fiber lasers is one of research focuses topics in current optoelectronic area, especially for a high-power fiber optic laser that has exhibited a tendency substituting traditional solid state laser and CO₂ laser in many areas. We fully expound its principles and some key technologies from its structure, emphasize the technology of a pulse fiber optic laser that is more widely applied, and enumerate its superiorities and applications in such areas industrial processing, national defense, medical service, etc.

Key words: fiber optic laser; cladding pump; double clad rare-earth doped fiber; fiber Bragg grating; application

所谓光纤激光器就是利用稀土掺杂光纤作为增益介质的激光器,它的发展历史几乎和激光器技术一样长。早在 20 世纪 60 年代初,美国光学公司的 E. Snitzer 等人就已经提出了掺稀土元素光纤激光器和放大器的构想^[1],但直到 20 世纪 80 年代,随着激光二极管泵浦技术的发展和双包层结构光纤的提出^[2],光纤激光器才进入了一个蓬勃发展的阶段。最近十年,适合各种不同应用目的和领域的光纤激光器已雨后春笋般涌现于世^[3-5]。

1 工作原理及关键技术

同其他类型激光器一样,光纤激光器主要由泵浦源、谐振腔和增益介质三要素构成,具体包括泵浦 LD、DCDF、大模场 FBC 和光纤合束器等,如图 1 所示。光纤激光器的所有器件均可由光纤介质制作,因此光纤技术是决定光纤激光器性能的关键因素。

收稿日期:2008-08-23

基金项目:山东省仪器设备改造项目资助(2007GG1TCD4039)。

作者简介:宋志强(1982-),男,硕士,主要研究方向为大功率光纤激光器技术。E-mail:zhiqiangs@gmail.com

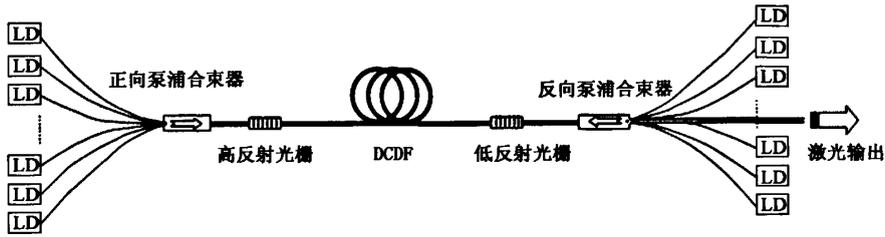


图 1 大功率全光纤激光器结构原理图

1.1 特种光纤技术

起初,光纤激光器采用直径小于 10 μm 的掺杂纤芯作为激光和泵浦光的共同波导,由于 LD 泵浦光只能从面积极小的端面进入纤芯且只能采用单模 LD 泵浦,导致泵浦耦合效率很低,光纤激光器输出功率不高,限制了其应用。1988 年,E. Snitzer 等人提出了基于包层泵浦技术的双包层结构光纤使得这一问题得到解决。

双包层光纤结构如图 2 所示,它是在单包层光纤的基础上围绕掺杂纤芯增加了一个内包层作为泵浦光的传输波导,多模泵浦光可在内包层中传输并不断穿越纤芯而被其中的掺杂离子吸收,而产生的激光仍由纤芯波导传输以保证其高光束质量。双包层光纤的内包层直径一般在 40 ~ 500 μm ,NA 一般在 0.2 ~ 0.5 之间,用以传输大功率多模泵浦光;掺杂纤芯直径一般在 5 ~ 50 μm ,NA 在 0.05 ~ 0.22 之间,对于具有大模场面积的双包层光纤,虽然理论上其纤芯支持多种模式,但可以通过弯曲损耗等方法使其输出单模激光。由于内包层有较大的截面积和数值孔径,可容许千瓦级多模半导体泵浦激光进入其中,从而大大提高了光纤激光器的单模输出功率。纤芯的掺杂浓度以获得高泵浦吸收,避免浓度淬灭效应和热学问题,降低背景损耗为标准。

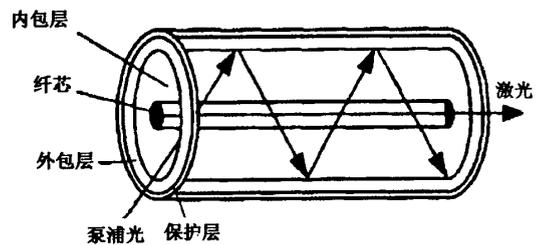


图 2 双包层掺杂光纤结构原理图

另外,由于光纤结构的旋转对称性,双包层掺杂光纤对泵浦光的吸收效率很低。为了打破泵浦光在内包层中的旋转对称性,常用的方法是采用矩形、方形、梅花形、多边形、D 形以及偏心结构等内包层结构,见图 3。圆形内包层结构的双包层光纤易于制备和熔接,但对泵浦光的吸收效率最低。偏心结构以及矩形等非圆形内包层结构的双包层光纤对泵浦光的吸收效率很高,但与常规光纤的熔接很困难。而多边形和 D 形内包层结构的光纤不仅对泵浦光有很高的吸收效率,而且易于与其他光纤低损耗熔接。

近来,人们不断提出了几种更先进结构的特种光纤。英国 Southampton 大学的光电子研究中心提出了一种螺旋状纤芯结构的双包层光纤^[6]。这种光纤能更有效的提高泵浦光吸收系数,并且螺旋状结构的纤芯能有效的抑制大尺寸纤芯中高阶模的产生。多纤芯结构双包层光纤相对于单芯双包层光纤在保证单模输出的情况下提高了输出功率,尤其是在脉冲光纤激光器中得到了体现^[7]。另外,光子晶体光纤(PCF)^[8]凭借其独特的结构,具有很多优点,如:可以设计成具有大的数值孔径(最高达 0.9),对激光器的泵浦非常有利;模场面积根据需要设计的自由度相当大,并保持单模,用大模场面积 PCF 可以研制高功率激光器,而小模场面积 PCF 可以获得低阈值激光器;独特的色散特性——零色散点可推移至可见光波段,使它具有制造可见波段全光纤孤子激光器的潜力;具有非常高的非线性,可以进行拉曼激光器与放大器的研制。

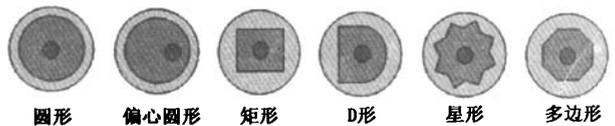


图 3 常见的几种内包层结构示意图

图 3 展示了六种常见的内包层横截面形状：圆形、偏心圆形、矩形、D形、星形和多边形。这些形状旨在打破泵浦光的旋转对称性，提高吸收效率。

1.2 泵浦耦合技术

简单来说,泵浦耦合技术就是如何高效率的将泵浦光耦合到双包层掺杂光纤的内包层中去。为此,人们

提出了很多泵浦光和双包层光纤之间的耦合方法,常见的有采用准直聚焦透镜组整形的端面泵浦耦合,采用V形槽、内嵌反射镜、光纤侧面熔接等方案的侧面泵浦耦合,但分立的端面泵浦和侧面泵浦耦合方案在稳定性和操作性上均有很大的缺陷。从大功率光纤激光器的发展趋势来看,要求泵浦耦合器件在将泵浦光耦合到内包层的同时,尽量不影响和损害双包层光纤的纤芯,因为只有这样才能在不影响激光的产生和传输的情况下实现级联泵浦和超大功率的输出。

目前国际上采用较多的实用化方案是将多个 LD 通过尾纤合并到单根匹配光纤输出,来获得高功率的泵浦光,再通过与掺杂光纤熔接对其进行泵浦。ITF 公司率先研制出一种高耦合效率的,适合大功率下工作的光纤合束器^[9],其结构见图 4。由于 7 根和 19 根光纤在合并熔融拉锥后的截面更接近于圆形,因此光纤合束器大多是采用 7×1 或 19×1 的结构。由于光纤合束器是由光纤介质制作,很容易和其它光纤器件无缝连接,因此这种泵浦方法可制成体积小、重量轻、结构坚固、稳定性好的大功率全光纤激光器。

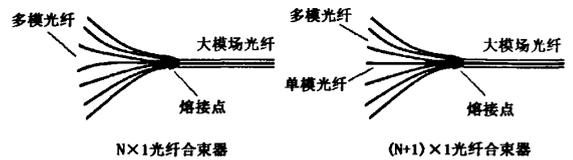


图 4 光纤合束器结构示意图

1.3 FBG 刻写技术

FBG 是一种刻写在光纤纤芯中的 Bragg 光栅,它能够把前向传输的纤芯模式能量耦合给后向传输的纤芯模式,形成在谐振波长附近一定带宽的能量反射。FBG 可达到较高的反射率(100%)和较窄的反射带宽(0.1 nm),作为光纤激光器的谐振腔镜,可使激光器具有更紧凑的结构和更高的稳定性。由于 FBG 本身就是由光纤制作而成,因此在光纤激光器的全光纤化设计中具有明显的优势,是作为大功率双包层光纤激光器腔镜的最佳选择。

1989 年, Gerry Melted 首次提出采用两束波长位于掺 Ge 石英光纤吸收带内的紫外激光相干涉,从光纤侧面写入了一种永久的折射率呈周期性分布的 FBG^[10]。经过几十年的不断发展,目前光纤光栅的制作方法多种多样。采用适当的光纤增敏技术、不同的成栅方法并结合使用合适光源,几乎可以在各种类型的光纤上刻写出光栅。制作应用于全光纤化大功率光纤激光器的 FBG,紫外曝光相位掩模法是相对可行的技术方案^[11]。关键在于光敏双包层光纤的获得,载氢方法虽然可行,但要实现光纤光栅的高稳定性,许多工艺还需要进一步摸索。近年来研究的一个新领域是用飞秒脉冲激光器作为成栅光源^[12],利用该光源并结合全息干涉法、相位掩模法及点点写入法可以制作高质量的光纤光栅,且光栅温度耐受性好,适合用作大功率光纤激光器的腔镜。飞秒激光写入光栅法与紫外曝光法相比有许多优点,因此在光纤激光器的腔镜应用上有很大的发展潜力。

1.4 LD 光纤耦合技术

大功率光纤激光器一般采用光纤耦合输出的 LD 作为泵浦源。LD 的输出光束在垂直于结平面(快轴)方向和平行于结平面(慢轴)方向是非对称的,光参数积相差几百甚至上千倍,光束质量很不均衡,这样的光束不可能通过传统的成像光学系统聚焦成对称的小光斑耦合到光纤中,必须先采用特殊的光学器件对光束进行整形,实现两个方向光束质量的均衡。

LD 与光纤耦合的方案概括起来可分为两大类:(1)采用分立的小型或微型光学元件构成的耦合系统^[13];(2)采用在光纤端面制作成微透镜的耦合系统^[14]。LD 的电光效率仅能达到 40% 左右,大部分的能量都转化成热能,而温度对 LD 中心波长等性能的影响是很大的,因此制冷对其非常重要。对于大功率光纤激光器来说,由于光纤具有良好的散热特性,激光器的制冷主要是针对泵浦源考虑。而随着泵浦合束器技术的发展和 LD 功率的不断提高,已经不再采用需要水冷却的 Bar 条或堆栈结构的大功率 LD 作泵浦,小功率的 LD 通过 $N \times 1$ 光纤合束器合束就可以提供很高的泵浦能量。

2 脉冲型光纤激光器

目前,大功率光纤激光器已实现窄线宽、单偏振、波长可调谐和脉冲运转等方式,而实现脉冲运转主要通过主振荡功率放大器(MOPA)、调Q和锁模等方案。具有高能量(mJ)、高峰值功率(kW)、高重复频率(kHz)、高亮度(近衍射极限)的光纤激光器已得到广泛应用。

通过双包层光纤获得高光束质量高能量脉冲普遍采用的方法是主振荡器提供种子脉冲,然后注入到双包层光纤 MOPA 模块中来获得,主振荡光脉冲放大的关键是选择合适的振荡器(MO)和吸收效率高的增益介质。一种更为简单的方法是采用调Q技术即直接在双包层光纤激光腔内插入调Q器件,来获得高峰值功率高能量的激光脉冲。光纤型Q开关有光纤 Mach-Zehnder 干涉仪、光纤 Michelson 干涉仪和利用光纤的受激布里渊散射(SBS)被动调Q等。根据锁模方式不同,锁模光纤激光器可分为主动锁模和被动锁模。由于主动锁模调制能力有限,限制了锁模脉冲的宽度,脉冲宽度通常为飞秒量级。被动锁模或自锁模光纤激光器是利用光纤或其他元件中的非线性光学效应实现锁模的,激光器结构简单,在一定条件下不需要插入任何调制元件就可以实现自启动锁模工作。通常自启动被动锁模光纤激光器可以输出 fs 量级的超短脉冲。

超短脉冲激光技术在激光制导、激光卫星定位、激光受控热核反应、强场物理等很多领域都有着重要应用。可输出超短脉冲的光纤激光器主要有锁模环形光纤激光器、光纤光栅激光器和超连续脉冲发生器。2002年,L.Lefort和A.Albert等人提出一种低噪声展宽脉冲掺镱光纤激光器^[15],采用光纤和光栅分别提供正负色散,在腔内交替的对光脉冲进行展宽和压缩,该方案在1056 nm处获得了平均功率3 mW,脉宽为108 fs的脉冲。1996年,Fermann等人采用腔内插入2个用于控制脉冲宽度的啁啾光纤光栅被动锁模激光器,获得了最大平均功率为170 mW,脉宽为4 ps的超短脉冲。近年,光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)凭借其特殊的色散特性和非线性结构,吸引了人们极大的研究兴趣。与传统光纤相比,PCF能够在波长低于1.3 μm时获得反常色散,同时保持单模,这种奇异的色散特性为短波长光孤子传输提供了可能,也为超短脉冲激光器提供了一种新型的光纤材料。2005年,德国Friedrich-Schiller大学的研究人员采用大模面积(LMA)光纤技术与非线性脉冲压缩结合的方法,在LMA-PCF中产生了中心波长为1038 nm、重复频率为73 MHz的50 fs光脉冲^[16]。

3 大功率光纤激光器的优势及应用

3.1 优势

与同等功率水平的传统固体激光器或气体激光器相比,光纤激光器无论在光束质量、工作效率、结构体积和系统维护等方面,均占有明显的优势,具体表现在:(1)由于双包层光纤独特的波导结构,使得输出激光具有光斑小、亮度高、接近衍射极限的光束质量。(2)光纤的损伤阈值高(一般为 $1.5 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ^[17]),易于达到高功率,转换效率高,通过选择不同的稀土掺杂光纤或不同反射特性的光纤光栅,可以得到很宽工作波长范围的光纤激光器。(3)由于表面积与活性介质体积比高,其散热性能好,不需要特殊制冷。百瓦量级的光纤激光器采用简单的风冷即可。(4)结构简单、体积小、重量轻、性能稳定、可靠性好,对灰尘、震荡、冲击、湿度等具有很高的容忍度,使用灵活方便。(5)造价不断降低。

3.2 应用举例

大功率光纤激光器凭借其一系列优点,以及可达几十千瓦的输出功率,使其应用范围逐渐从光通信领域扩展到工业加工、材料处理、生物医学、国防军工等越来越广泛的领域中。

在通讯领域,应用最多而且对光纤激光器推动最大的就是全光通讯网络。掺铒光纤激光器提供的1.30 μm和1.55 μm波段的激光,处于光通讯的两个低损耗窗口上。双包层掺镱光纤激光器的出现,解决了拉曼光纤放大器的泵浦源问题^[18],这种拉曼光纤放大器可以工作在光通信窗口的任意波长处,并对光信号进行在线放大,是长距离、超长距离通信实现信号放大的理想选择。大功率光纤激光器另一个发展方向是将

其应用到光孤子通讯和空间通讯领域,实现远距离、无差错通信。

在工业加工方面,激光加工技术是利用激光与物质相互作用的特性对材料进行切割、焊接、表面处理、打孔及微加工等的一门加工技术,它是大功率光纤激光器市场前景最广阔的应用领域。与机械加工相比,激光加工具有加工对象广、非接触加工、公害小、速度快、可自动控制等优点,被誉为“未来制造系统的共同加工手段”^[19]。

与传统高功率激光器相比,工作波长在 1060 ~ 1200 nm 范围内的掺镱大功率光纤激光器,具有转换效率高、光束质量好、维护周期长、运行费用低等优点,其极高的效率和功率在材料加工方面可与传统的 YAG 激光器相媲美。在激光打标领域,由于光纤激光器具有高的光束质量和定位精度,集成电路制造商开始用光纤激光打标系统取代效率不高的 CO₂ 激光和闪光灯泵浦的 Nd:YAG 脉冲激光打标系统,在半导体芯片和包装上制作小铭牌,它也常用于在塑料和金属上打标;在焊接领域,激光软焊和烧结所需的功率为 50 ~ 500 W,金属焊接和硬焊为 5 ~ 20 kW,大功率光纤激光器完全能够满足要求。2008 年,德国宝马汽车公司从 IPG 公司订购了 16 台千瓦级连续光纤激光器用于车门焊接生产线。

在国防军工方面,功率高、光束质量好的激光武器一直是军事领域研究的重点,高功率光纤激光器以其亮度高、照射面积小、体积小、使用灵活方便等优点越来越受到重视。作为攻击武器,高功率光纤激光器的输出能量高度集中,光功率密度可达到 MW/cm² 量级,足以摧毁任何坚固的目标。它以 3×10^8 m/s 的速度在空气中传播,瞄准目标时不需计算提前量,且射击时没有后坐力,可随机变换射击方向,精确打击目标要害部位。而作为防御武器,美国军方使用 IPG 公司生产的 2 000 W 多模光纤激光器,在阿富汗恶劣环境下成功执行了扫雷任务。

在医疗方面,光纤激光器用作止血和手术刀已出现在许多内外科手术中,并逐渐被广大医学工作者认同。高功率光纤激光器的引进,使组织脱落和光致凝结手术的时间大大缩短。在眼科手术中,连续掺铒光纤激光器能使角膜成形手术成功率更高,同时还可以治疗远视、近视等眼科疾病。在心血管手术中,利用光纤的柔韧性和光纤激光器光束质量好,可以使光纤进入人体内排除肿瘤和各种淤积物^[20]。在整形美容手术中,2 μm 波长光纤激光器在治疗皮肤癌和去纹身方面已取得了良好效果。另外,功率超过几瓦的掺铒光纤激光器则在显微外科手术中扮演了十分重要的角色,它能为外科手术提供较大的高能辐射,同时在红外保健方面也有着应用空间。

在石油矿产领域,高功率光纤激光器能够通过光纤向井下提供所需要的能量,在建井和完井作业中出色的发挥作用。与常规工业激光器相比,它的工作效率更高,光束质量更好,机动性更强,在使用寿命期间基本上不用维修。将其代替常规的射孔弹,能够降低或消除射孔损害并显著提高产量和总体经济回报。2003 年开始,美国天然气技术研究所(GTI)应用 5.34 kW 高功率激光器进行了井下射孔应用研究。试验表明,对光束质量进行更好的控制,则激光器能够破碎任何岩石,而高功率光纤激光器将在此领域体现出其应用优势。

4 总结与展望

激光的应用是人类使用工具的第三次飞跃,而光纤激光技术的成熟使得大功率光纤激光器从实验室真正进入大规模工业应用。在能源日益短缺的时代,大功率光纤激光器正在大幅度减少能耗,节约资源等方面做出越来越多的贡献。

预计到 2010 年,光纤激光器将至少占领工业激光器 28 亿美元市场份额的四分之一。光纤激光器的销售量将以年增幅超 35% 的速度攀升,从 2005 年的 1.4 亿美元增至 2010 年的 6.8 亿美元。而同期,工业激光器市场每年增幅仅 9%,2010 年达到 28 亿美元。“十一五”期间,中国光纤激光器市场年需求将在 5000 台以上,假如能突破关键技术,国产产品售价可控制在进口产品的 60% 以下,直接降低成本 4 亿元。因此,全力发展我国的光纤激光产业将具有重要的经济价值和战略意义。

参考文献:

- [1] SNITZER E. Optical Maser Action of Nd³⁺ in a Barium Crown Glass[J]. Physical Review Letters, 1961, 7(12):444 - 446.
- [2] SNITZER E, PO H, et al. Double-Clad Offset Core Nd Fiber Laser[J]. Proc Conf Optical Fiber Sensors, 1988, Post deadline paper PD5,41.
- [3] PASK H M, ROBERT J, et al. Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1 ~ 1.2 μm Region[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, 1(1): 2 - 13.
- [4] LI Yigang, LIU Yange, et al. High Power Cladding-Pumped Fiber Lasers and Their Applications[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 6028: 1 - 10.
- [5] 楼祺洪, 周军, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135 - 138.
- [6] WANG P, COOPER L J, SAHU J K, et al. Efficient Single-mode Operation of a Cladding-Pumped Ytterbium-Doped Helical-Core Fiber Laser[J]. Opt Lett, 2006, 31:226 - 228.
- [7] WRAGE M, GLAS P, FISCHER D, et al. Phase Locking in a Multicore Fiber Laser by Means of a Talbot Resonator[J]. Opt Lett, 2000, 25(19):1436 - 1438.
- [8] 孙青, 毛庆和, 明海. 空芯光子晶体光纤研究新进展[J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 433 - 439.
- [9] JOHNSON D C, KAWASAKI B, HILL K O. Low-Loss Star Coupler for Optical Fiber Systems[P]. USA 专利: 4330170, 1982.
- [10] MELTED G, MOREY W, GLENN W H. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method[J]. Opt Lett, 1989, 14(3):823.
- [11] 刘全, 吴建宏, 隋刚. 制作光纤光栅用相位掩模的衍射行为研究[J]. 光通信研究, 2006, 3: 58 - 60.
- [12] 江超, 王又青. 飞秒激光脉冲制作长周期光纤光栅的研究进展[J]. 电加工与模具, 2008, 3: 7 - 11.
- [13] HEINEMANN S, LEININGER L. Fiber Coupled Diode Lasers and Beam-Shaped High-Power Stacks[C]//Proceedings of SPIE, 1998, 3267:116 - 124.
- [14] 牛岗, 樊仲维, 王家赞. 大功率半导体激光光纤耦合技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3):34-38.
- [15] LEFORT L, PRICE J H, RICHARDSON D J, et al. Practical Low-Noise Yb³⁺ Doped Fiber Laser[J]. Opt Lett, 2002, 27(6):291 - 293.
- [16] ROSER F, ROTHARD J, ORTAC B, et al. 131W 220 fs Fiber Laser System[J]. Opt Lett, 2005, 30(20):2754 - 2756.
- [17] KANE B, SMOLIAR T J, et al. > 10W Fiber Laser Source with 0.5 ~ 5 MHz Repetition Rate and 0.5 ~ 1.5 nm Pulse Width[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5662: 496 - 500.
- [18] WANG Y. Dynamics of Stimulated Raman Scattering in Double-Clad Fiber pulse Amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum electronics, 2005, 41(6): 779 - 788.
- [19] 吴秀丽. 激光加工的现状与发展趋势[J]. 光机电信息, 2000, 17(10): 23 - 25.
- [20] JACKSON S D, LAUTO A. Diode-Pumped Fiber Lasers: A New Clinical Tools[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2002, 30: 184 - 190.

作者: [宋志强](#), [SONG Zhi-qiang](#)
作者单位: [山东省科学院激光研究所, 山东, 济南, 250014](#)
刊名: [山东科学](#)
英文刊名: [SHANDONG SCIENCE](#)
年, 卷(期): 2008, 21(6)

参考文献(20条)

1. JACKSON S D;LAUTO A [Diode-Pumped Fiber Lasers:A New Clinical Tools](#) 2002
2. 吴秀丽 [激光加工的现状与发展趋势](#)[期刊论文]-[光机电信息](#) 2000(10)
3. JOHNSON D C;KAWASAKI B;HILL K O [Low-Loss Star Coupler for Optical Fiber Systems](#) 1982
4. 孙青;毛庆和;明海 [空芯光子晶体光纤研究新进展](#)[期刊论文]-[量子电子学报](#) 2006(04)
5. WRAGE M;GLAS P;FISCHER D [Phase Locking in a Multicore Fiber Laser by Means of a Talbot Resonator](#)
[外文期刊] 2000(19)
6. WANG P;COOPER L J;SAHU J K [Efficient Single-mode Operation of a Cladding-Pumped Ytterbium-Doped Helical-Core Fiber Laser](#)[外文期刊] 2006(2)
7. 楼祺洪;周军 [高功率光纤激光器研究进展](#)[期刊论文]-[红外与激光工程](#) 2006(02)
8. LI Yigang;LIU Yange [High Ower CLadding-Pumped Fiber Lasers and Their Applications](#) 2005
9. PASK H M;ROBERT J [Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers:Versatile Sources for the 1 ~ 1.2 μm Region](#)[外文期刊] 1995(01)
10. SNITZER E;PO H [Double-Clad Offset Core Nd Fiber Laser](#) 1988
11. WANG Y [Dynamics of Stimulated Raman Scattering in Double-Clad Fiber pulse Amplifiers](#)[外文期刊] 2005(06)
12. KANE B;SMOLIAR T J [10W Fiber Laser Source with 0.5~5 MHz Repetition Rate and 0.5~1.5 nm Pulse Width](#)[外文期刊] 2004
13. ROSER F;ROTHHARD J;ORTAC B [131W 220 fs Fiber Laser System](#)[外文期刊] 2005(20)
14. LEFORT L;PRICE J H;RICHARDSON D J [Practical Low-Nnise Yb+ Doped Fiber Laser](#)[外文期刊] 2002(06)
15. 牛岗;樊仲维;王家赞 [大功率半导体激光光纤耦合技术进展](#)[期刊论文]-[激光与光电子学进展](#) 2004(03)
16. HEINEMANN S;LEININGER L [Fiber Coupled Diode Lasers and Beam-Shaped High-Power Stacks](#)[外文期刊] 1998
17. 江超;王又青 [飞秒激光脉冲制作长周期光纤光栅的研究进展](#)[期刊论文]-[电加工与模具](#) 2008(03)
18. 刘全;吴建宏;防刚 [制作光纤光栅用相位掩模的衍射行为研究](#)[期刊论文]-[光通信研究](#) 2006(03)
19. MELTED G;MOREY W;GLENN W H [Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method](#) 1989(03)
20. SNITZER E [Optical Maser Action of Nd³⁺ in a Barium Crown Glass](#)[外文期刊] 1961(12)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdqx200806018.aspx