

文章编号: 1001-3806(2003)03-0161-05

光纤激光作为激光武器的能力分析*

楼祺洪 周 军 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

摘要: 简要介绍了高功率光纤激光的发展, 分析了双包层光纤激光器作为激光武器的可能性, 并给出了实现高能单模激光输出的主要技术方案。

关键词: 双包层光纤激光; 激光武器; 模式控制; 相干组束

中图分类号: TN248; E928.9 **文献标识码:** A

Analysis of high-power fiber laser weapons

Lou Qihong, Zhou Jun, Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800)

Abstract: In the paper, the development of high-power fiber lasers is briefly introduced. Then the capabilities of double-cladding fiber laser weapons are analyzed in detail. Finally the advanced fiber laser technique to acquire high-energy single-mode laser output is presented.

Key words: double-cladding fiber laser; laser weapon; mode control; coherent beam combination

引 言

由于高能激光武器具有其它武器所不可比拟的速度和精确性两大优势, 近几年来, 高能激光武器技术取得了迅猛的发展。美国曾在 1997 年 10 月用激光器摧毁了一颗即将退役的气象卫星, 2000 年夏, 美国在白沙导弹靶场拦截卡秋莎火箭, 演示证明了激光武器的近程防空能力, 许多国家对此表现出极大的关注和担心。目前, 美国、俄罗斯、法国、以色列等国都成功进行了各种激光打靶试验, 印度也专门拨出巨款积极开展激光武器研究, 并准备在 2007 年后拥有太空作战的激光武器, 从而具备一定的天战能力。

目前研究的高能激光武器主要是采用 DF 化学激光器, 按照现有的水平, 今后 5 年左右可望在地面和空中平台上部署使用, 用于战术防空、战区反导和反卫星作战等。波长 $3.8\mu\text{m}$ 、输出功率 $200\text{kW} \sim 400\text{kW}$ 的 DF 化学激光器体积和重量都较大, 必须安装在标准集装箱内, 并且利用低功率固体激光对

目标主动照明, 实施精密光学跟踪。众所周知, 空间激光武器系统对激光器的要求是非常苛刻的, 特别是在体积、功耗、冷却几个方面, 而传统的高功率激光器(如 HF 激光器和氧碘激光器)很难摆脱上述几个方面的限制。另外, 激光武器系统对激光光斑质量、发散角等也有非常高的要求。

国际上新近发展的高功率双包层光纤激光器无论在效率、体积、冷却和光束质量等方面, 均比同等功率水平的气体激光器和二极管泵浦全固态激光器有显著改善^[1], 在空间激光武器中有潜在的应用前景, 随着研究的深入, 可望替代现有国防应用中体积庞大的气体激光和常规的固体激光系统。美国近来也在加紧高能光纤激光的研究, 希望在 2007 年通过相干组束的方法实现 100kW 的激光输出。这里首先简要介绍双包层光纤激光的原理、国外高功率光纤激光的发展和作者的主要研究结果, 然后重点分析光纤激光器作为空间武器的可能性, 并给出实现高功率单模激光输出的主要技术方案。

1 双包层光纤激光原理及国内外发展概况

光纤激光器同气体或常规固体激光器相比, 因其具有结构简单、散热效果好、转换效率高、低阈值等优点而倍受青睐。但对于 $1\mu\text{m}$ 左右的波长而言, 典型的纤芯直径小于 $10\mu\text{m}$, 这一芯径远小于透镜

* 上海市科委光科技专项及中科院知识创新工程资助项目。

作者简介: 楼祺洪, 男, 1942 年 7 月出生。研究员, 博士生导师。主要从事光纤激光、短波长激光及其应用研究。
收稿日期: 2002-10-29

聚焦后高斯光束的光斑直径,由于泵浦光是直接耦合进直径低于 $10\mu\text{m}$ 的纤芯,限制了泵浦光的入纤效率,这导致光纤激光器的输出功率较低,限制了其应用范围。

近年来,国际上发展的以双包层光纤为基础的包层泵浦技术为提高光纤激光器的输出功率提供了解决途径,改变了光纤激光器只是一种小功率光子器件的历史。利用这种技术,光纤激光器的转换效率可达 50% 以上,输出功率可提高几个数量级,并且有着接近衍射极限的光束质量和小巧、全固化、低阈值等显著优点。因而,双包层掺镱光纤激光器成为近几年人们研究的热点,引起广泛的关注,并已经在光通信、材料加工与处理、医学、印刷等领域展现出诱人的应用前景,呈现出逐步替代现有传统高功率激光器的趋势。

1.1 基本原理

为了突破常规光纤激光器的对转化效率和输出功率的限制,Snitzer 等人巧妙地提出设计了双包层光纤^[2],其结构如图 1 所示。双包层光纤是一种具有特殊结构的光纤,它比常规光纤增加了一个内包层(最早的内包层形状为圆形),内包层的横向尺寸和数值孔径均远大于纤芯,纤芯中掺杂了稀土元素(Yb, Nd, Er, Tm 等),由于内包层包绕在单模纤芯的外围,泵浦光在内包层中反射并多次穿越纤芯被掺杂离子所吸收,从而将泵浦光高效地转换为单模激光。双包层光纤结构对光纤激光器来说是一个具有重大意义的技术突破。一般来说,内包层的尺寸都应大于 $100\mu\text{m}$,从而经耦合透镜聚焦后的焦斑为 $100\mu\text{m}$ 左右的泵浦光可以有效地耦合进单模光纤中,并且内包层的数值孔径较大一般大于 0.36,收集泵浦光的能力强,从而可以保证高能泵浦光高效地耦合进入内包层。

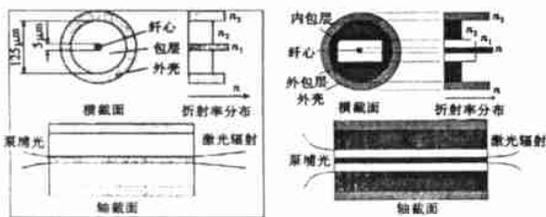


图 1 常规光纤和双包层光纤(矩形内包层)的结构及激光产生示意图

1.2 发展概况

双包层光纤技术最早开始于 20 世纪 80 年代后期,由美国麻省 Polaroid 公司的 Snitzer 等人提出,此后,基于这种技术,光纤激光器获得了迅速发展,输出功率得到逐步提高,由几百毫瓦上升到几十瓦,

并开始了在光通信、印刷、微加工等行业中的应用^[3,4]。1999 年, Dominic 等人报道了他们的输出功率高达 110W 的掺镱双包层光纤激光器^[5]。2002 年的 CLEO 会议上报道了 Yb/ Nd 共掺的双包层光纤激光连续输出达 150W^[6]。日本的一个研究小组借助于双包层光纤激光器包层泵浦的思想,提出并实现了一种称为可以为“任意形状”的光纤激光器,他们认为这种器件可实现近千瓦的连续激光输出^[7],这些进展对光纤激光在激光加工和军事领域的应用起到巨大的推进作用。

现在,双包层光纤激光器国外已有产品出售,但也只有 IPG Photonics, JDS Uniphase 和 SDL 以及 IRE Polus 等几家公司能提供这种产品。它们所用的都是石英双包层掺杂光纤,由于石英双包层光纤的原料制备复杂、要求纯度高、拉丝困难,并且不能作到高掺杂,从而使得光纤激光器所需的光纤较长,由于非线性效应的限制,这种低掺杂光纤不利于高功率激光的输出。

近年来,国内上海光机所、南开大学等单位也对双包层光纤激光器进行了理论和实验研究^[8,9]。上海光机所在双包层光纤激光器理论和实验研究方面取得了较大进展,在实验上研制成功连续输出功率为 5W 量级、波长为 1110nm 的双包层光纤激光器,斜率效率近 50%。并且由于采用半导体制冷器对半导体激光器进行温度制冷控制,整个系统小巧、稳定、高效。在理论上,作者提出一种具有新型内包层形状的双包层光纤,这种光纤相对于其它常规内包层形状的光纤,可以大大提高对泵浦光的吸收效率,同等条件下,可使得所用光纤较短^[10]。

2 光纤激光作为空间激光武器的能力分析

激光技术的发展使许多具有重大应用背景项目成为可能,而这些应用的牵引则要求发展性能更优越的新型激光器。同其它高功率激光系统相比,上述的高功率双包层光纤激光器无论在效率、体积、冷却和光束质量等方面,均有明显的优势,在国防军事领域有着广阔的应用前景。因此,开展高功率光纤激光系统的研究对推动我国激光在军用领域的发展具有重要战略意义。

双包层光纤激光器由于光纤本身作为激光介质,谐振腔由光纤的 2 个端面粘胶片构成^[5],或者直接在光纤上刻写光纤布喇格光栅作为谐振腔^[11],腔体结构简单,并且光纤柔软几乎可以弯曲盘绕成任意形状(在最小曲率半径的限制下)。泵浦源也是采

用体积小模块化的高功率半导体激光器,因此,这种激光器结构简单、体积小、重量轻,并且是光纤输出,使用灵活方便。

选择发射波长和光纤吸收特性相匹配的半导体激光器为泵浦源。对于掺 Yb 的双包层光纤,一般选择 915nm 或 975nm 的高功率半导体激光器。由于双包层光纤内包层的横截面尺寸和数值孔径都足够大,半导体激光通过光束整形后,可以高效地耦合入内包层,通过选择合适的内包层参数和形状,实现高效、高功率激光输出,斜率效率一般在 50% 以上。

固体激光器实现高功率激光输出的主要困难在于激光介质的热效应引起光束质量及效率下降,为了有效散热需要专门的技术和系统对固体激光介质进行冷却,这对于空间激光武器显然是非常不利的。而双包层光纤激光系统是采用细长的掺杂光纤本身作为增益介质,表面积/体积比很大(至少是固体激光介质的 1000 倍以上),因此散热性能非常好。对于连续输出 110W 的光纤激光来说,若将光纤盘绕成环状,只需一小风扇风冷即可^[5]。

在光束质量方面,双包层光纤激光器的输出光束质量由于光纤纤芯的波导结构(纤芯直径 d 和数值孔径 NA) 决定,不会因热变形而变化,因此易于达到单横模激光输出。例如对于连续输出功率为 100W 的掺 Yb 双包层光纤激光器,输出激光的光束质量因子 M^2 接近于 1。而对于半导体激光泵浦的 Nd:YAG 固体激光器, M^2 接近于 1 的百瓦级器件在技术上目前仍不成熟。

对于双包层光纤激光泵浦功率在内包层波导内传输,不扩散,有利于保持高功率密度光泵。这对于上转换激光是十分有利的,亦是光纤激光实现波长上转换的重要原因。通过在纤芯中掺杂不同的稀土离子,可以实现蓝光(掺 Tm)、绿光(掺 Er)和红光(Pr)的激光输出,而无需象固体激光那样通过倍频来获得可见激光输出。

正是由于双包层光纤激光器在体积、效率、重量等方面的显著优势,已被广泛应用于汽车、医疗、半导体、通信等工业上,全球销售额已高达几十亿美元。在军事、国防和能源领域等领域,美国、德国等国家也在进行积极研究,他们希望在 2007 年光纤激光能获得百千瓦量级的相干输出,以期替代现有的体积庞大的气体或固体激光系统。表 1 列出了可用于高能激光武器的在研新一代激光器。美国《每日宇航》2002 年 6 月 6 日报道,美空军研究实验室(AFRL)定向能源部与洛克希德·马丁公司在 2002

年 5 月 31 日签定合作意向书。研究“空对空激光武器装备于联合攻击战斗机”的可能性。方案 1 为采用氧碘激光器(COIL),已安装在波音 747 上进行验证实验;方案 2 为通过捆扎式光纤激光技术研究几百磅重的高能激光武器。实际上,多束光纤激光并联组合的捆扎式技术在使激光的能量提高的同时,光束质量也有所变差,但相对于气体或其它固体激光系统,仍具有非常显著的优点。通过采用光纤激光组合相干的方法,可望获得高功率的相干激光输出。美国近来鼓励支持开展光纤激光的相干叠加研究,并希望在 2003 年获得 1kW,2007 年获得 100kW 的相干激光输出。这种高能光纤激光系统的实现,可取代空军目前在飞机上现役的化学激光器,或作为地基防空武器,消灭地平线以上范围空中一切目标,用这种战术高能激光器拦截飞机、击落短程火箭、弹道导弹、巡航导弹及打击天基武器。

表 1 新一代高功率激光器

激光器类型	研制时间	输出功率	备注
DPL	2002	10kW	已在白沙导弹靶场作激光与靶相互作用实验
	2003	100kW	参见 Defense Rev.2000(8):34.
FOL	2003	1kW	效率高、尺寸小、重量轻、成本低
	2007	100kW	组合相干输出
电-化学	2003	30kW	
E-COIL	2007	100kW	

双包层光纤激光器除了直接作为激光武器外,因其小巧高效,还可以作为军用多功能激光器,如用于激光测距、激光目标指示器、激光制导、光电对抗、激光有源干扰、激光雷达等,此外,光纤激光系统还是激光武器理想的信标光源。

3 高能光纤激光新技术

从应用目标出发时,连续工作的光纤激光能提供的靶面功率密度较低,脉冲工作的光纤激光或许更为有用。双包层激光虽然具有散热好、体积小、效率高、光束质量好等优点,但目前常规脉冲双包层光纤的激光单脉冲输出能量仍远低于高能的气体或固体激光器,不到 1mJ^[12]。其存在于光纤本身的原因主要有以下 3 点:(1)双包层光纤激光器纤芯增益介质中的储存的能量受限于纤芯截面积;(2)由于纤芯横截面积较小,高功率运转时会出现诸如受激喇曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)等非线性光学

效应;(3)高脉冲能量密度对光纤端面的破坏作用也使得输出功率难以提高。

尽管目前具有 $9\mu\text{m}$ 纤芯的双包层光纤的连续输出已经可达 110W ,但普通脉冲双包层光纤放大器或激光器无法实现高光束质量、高脉冲能量的脉冲激光(对 $1\mu\text{m}$ 的激光波长,保证单模输出,掺 Yb 纤芯 $9\mu\text{m}$,单脉冲能量小于 1mJ)。因此,对于双包层光纤激光,必须在保持其体积小、效率高、冷却散热方便、光束质量好等优点的同时,实现更高能量的激光输出,才可以应用于空间激光武器中,逐步替代现有的体积庞大的激光系统。高能相干光纤激光的实现,有以下几种新技术方案可供选择。

3.1 研制开发具有低数值孔径纤芯的双包层光纤

双包层光纤激光器能否实现单模激光输出,取决于纤芯的直径 d 和数值孔径 NA_0 ,要求归一化频率小于 2.4 ,即:

$$V = d \cdot NA_0 < 2.4 \quad (1)$$

式中, $NA_0 = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = \sqrt{2n_1 n_2}$, n_1 和 n_2 分别为内包层和纤芯的折射率。

大家知道,当纤芯掺杂浓度和内包层尺寸一定时,增大纤芯 d 有利于对泵浦光的吸收,所以,为保证单模激光输出,折射率的选择应使得 NA_0 较小为宜。但实际上,当 $2.4 < V < 4$ 时,高阶模损耗仍较大,可以得到单模激光输出。

由以上分析可知,对于波长 $1\mu\text{m}$ 的激光,常规双包层光纤纤芯的数值孔径单模 NA_0 约 $0.1 \sim 0.15$,光纤芯径不到 $10\mu\text{m}$,其模体有限,单脉冲能量不能太大(能得到高平均功率的器件);若降低纤芯的数值孔径 NA_0 ,就可以保证在较粗纤芯的情况下,依然为单模模式。这样一方面纤芯横截面积增大可以使得非线性效应阈值升高,另一方面纤芯的数值孔径变小也降低了自发辐射,最终使得掺杂纤芯的储能增加,破坏阈值升高,实现 M^2 近于 1 、单脉冲能量大于 1mJ 的脉冲激光输出。今年的 CLEO 会议上已有采用数值孔径为 0.06 ,纤芯直径为 $30\mu\text{m}$ 的双包层光纤作放大器的报道,获得单脉冲能量 2.5mJ (20kHz), 1mJ (50kHz),平均功率 50W 的脉冲激光输出^[13]。但由于受光纤材料成分选择的限制,纤芯数值孔径也不能太小。

3.2 采用光纤激光模式控制技术

较粗的多模纤芯(如 $90\mu\text{m}$)的双包层光纤,可以高功率激光输出,但模式非常差,不是单模输出。通过光纤激光模式选择技术,可以利用多模纤芯实现单模高功率激光输出。利于光纤本身实现模式控

制有两种方案可供选择。

模式控制方式之一为在多模纤芯双包层光纤激光的输出端一定距离处放置一合适的小腔片作输出镜(见图2),使得受激光中与纤芯轴线成小角度的光线(即低数值孔径的光线) Q 值大,可以形成激光振荡;而大角度光线(高数值孔径的光线) Q 值小,不能形成激光振荡。实现对光纤激光输出模式的选择,达到高功率高光束质量的目的。

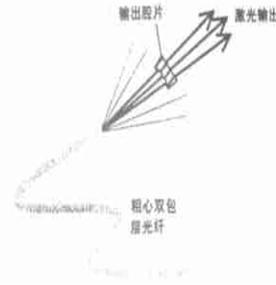


图2 输出端置腔片实现模式控制

模式控制方式之二是将具有多模纤芯的双包层光纤弯曲,缠绕在一定半径的圆柱体上,圆柱的半径正好使得掺杂纤芯的基模 LP_{01} 损耗最小,而 LP_{11} 和其它高阶模的损耗较大,由于模式竞争,最后只输出基模 LP_{01} ,光纤弯曲的目的实际上起到了分布式空间滤波器的作用^[14]。

采用上述两种模式控制技术,纤芯为较粗多模纤芯,不再受单模条件 ($V < 2.405$) 的限制,对于 $1\mu\text{m}$ 的激光波长,纤芯直径大于 $50\mu\text{m} \sim 90\mu\text{m}$ 的双包层光纤依然可以实现单模输出。对应较粗的纤芯也可以适当增大内包层的尺寸,提高泵浦功率,并且降低了对泵浦半导体激光聚焦光斑的要求。

3.3 多束光纤激光的并联组合技术

单根光纤激光通过上述技术可以提高输出功率,但输出能量毕竟有限。将多个光纤激光器并联组合,可以提高总的输出功率。定义光束参数积(BPP:beam parameter product)为:

$$P_{BPP} = w_0 / 2 \approx M^2 / \quad (2)$$

式中, w_0 为光腰半径; θ 为远场发散角。若将 N 个输出激光参数完全相同的光纤激光器按环状对称排列,如图3,通过合适的光学耦合系统,并联组束到



图3 多束光纤激光并联组束示意图

一根直径为 D ($\approx 1\text{mm}$) 的粗光纤中, 光束参数积 P_{BPP} 可写为:

$$(P_{\text{BPP}})_N = \sqrt{4(N-1)/3} P_{\text{BPP}_0} \quad (3)$$

则组束后激光的光束质量可以由此得出。对于 N 个 M^2 为 1.1, 纤芯直径为 $10\mu\text{m}$, 功率 100W 的光纤激光, 通过并联组束后输出激光的参数变化列于表 2。

表 2 光纤激光并联组束后 M^2 的变化

光纤激光 个数 N	传输光纤 直径 D	组束后 输出功率	组束后 M^2 增大为
25	$50\mu\text{m}$	2.5kW	5.6 倍
100	$200\mu\text{m}$	10kW	11.5 倍
250	$400\mu\text{m}$	25kW	18.2 倍

利用这种光纤激光的并联组束在技术上, 通过合理设计耦合光学系统, IPG 已经实现 700W 的光纤激光输出, 其光束参数积 $P_{\text{BPP}} < 1.4\text{mm} \times \text{mrad}$; 而对于千瓦级商业的 DPSSL 和 CO_2 激光器, 其 $P_{\text{BPP}} > 121.4\text{mm} \times \text{mrad}$ 。因此, 即使并联组束光纤激光的输出功率低于 DPSSL 或 CO_2 激光器, 在激光与材料的相互作用中效率也是它们高。

虽然这种技术比常规高功率激光技术有优势, 但对于要求更高激光功率的场合, 光束质量变差, 其应用也会受到限制。光束质量变差的原因在于这 N 个光纤激光是非相干的, 因此, 有必要研究光纤激光的组合相干叠加技术, 获得千瓦级以上的相干激光输出, 这对于高能光纤激光武器的发展是非常有益的, 美国近来也在鼓励和资助光纤激光的相干组束技术研究。

高能光纤激光的相干组束可以采取以下两种技术。

3.4 研制开发多芯双包层光纤

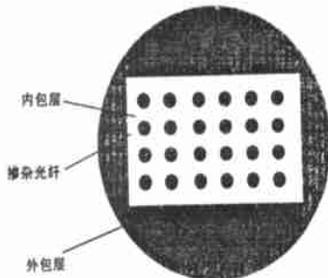


图 4 多芯双包层光纤

多芯掺杂双包层光纤如图 4 所示, 在较大的内包层中有多个掺杂纤芯, 每个纤芯的直径、掺杂浓度

等均相同, 且均为单模, 纤芯之间的距离较近。由于纤芯间的距离很近, 由于振荡激光瞬逝波的耦合, 使得各纤芯受激发射的激光相互作用, 达到同相位激光输出。采用这种技术, 就可以在保持高光束质量的同时, 达到高能激光输出。

3.5 光纤激光相干组束技术

将很多个相同的光纤互相靠近, 排成致密的阵列, 在其输出端共用一个腔片作为激光输出镜。由于各个光纤激光衍射的耦合作用, 获得高能相干激光输出。

4 结束语

综上所述, 高功率双包层光纤激光的研究在国际上目前还处于起步阶段, 但由于其具有效率高、尺寸小、重量轻、成本低等优点, 非常适合用于激光武器, 在军事国防领域有着非常重要的应用前景。随着新的双包层光纤激光技术(如多芯光纤技术、相干组束技术等)的发展, 实现千瓦到百千瓦量级高光束质量的高能光纤激光, 替代高功率气体或固体激光系统将是空间激光武器发展中最有潜力的方向之一。

参 考 文 献

- [1] Di Giovanni D J, Muendel M H. Opt Photon News, 1999, 10: 26 ~ 30.
- [2] Snitzer E, Po H, Hakima F *et al.* OSA Technical Digest Series, 1988, 2: Paper PD5.
- [3] Rossi B. Laser Focus World, 1997(5): 143 ~ 149.
- [4] Muendel M H. SPIE, 1998, 3264: 21 ~ 29.
- [5] Dominic V, McCormack S, Waarts R *et al.* Electron Lett, 1999, 35(14): 1158 ~ 1160.
- [6] Limpert J, Liem A, Hofer S *et al.* CLEO, 2002, CThX3: 590 ~ 591.
- [7] Ueda K. Oyo-butsumi, 1998, 67: 513.
- [8] 楼祺洪, 周 军, 李铁军 *et al.* 中国激光, 2002, 29(4): 306.
- [9] 宁 鼎, 王文涛, 阮 灵 *et al.* 中国激光, 2000, A26(11): 986 ~ 991.
- [10] Lou Q H, Zhou J, Wang Zh J. SPIE, 2002, 4914: 131 ~ 161.
- [11] Oldberg L G, Cole B, Snitzer E. Electron Lett, 1997, 33(25): 2127.
- [12] Chen Z J, Grudinin A B, Porta J *et al.* Opt Lett, 1998, 23(6): 454 ~ 456.
- [13] Limpert J, Liem A, Zellmer H *et al.* CLEO, 2002, CThX3: 591 ~ 592.
- [14] Koplou J P, Kliner D A V, Goldberg L. Opt Lett, 2000, 25(7): 442 ~ 444.