

国外光纤激光器技术的发展分析^{*}

杨 云

(东北电子技术研究所 锦州 121000)

摘 要 国外光纤激光器技术在现代战争中发挥着越来越重要的作用。文章介绍了光纤激光器技术的发展历程以及装备的研制、改进情况,指出了在现代战争中发展光纤激光器技术的优势和重要性,重点探讨了几种光纤激光器技术的性能及其特点,最后论述了光纤激光器技术的发展动向与分析。

关键词 光纤激光器;发展分析

中图分类号 TN97

Development Analysis of the Fiber Laser Technology

Yang Yun

(Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou 121000)

Abstract The abroad fiber laser technology play more and more roles in the war today. The process of development of the fiber laser technology and equipments in all countries over the world and its modification are described. The technique performance and properties of several fiber laser technology seekers are analyzed, and development trend and analysis of the fiber laser technology are discussed.

Key words fiber laser, development analysis

Class Number TN97

1 引言

目前,掺镱双包层光纤激光器是国际上新近发展的一种新型高功率激光器件,由于其具有光束质量好、效率高、易于散热和易于实现高功率等特点,近年来发展迅速,并已成为高精度激光加工、激光雷达系统、光通信及目标指示等领域中相干光源的重要候选者。双包层掺镱激光器的主要激光增益介质是双包层掺镱光纤,因此双包层掺镱光纤的性能直接决定了该类激光器的转换效率和输出功率。例如,美国 IPG 公司已开发出 700W 的掺镱双包层光纤激光器,现已推出 2000W 的光纤激光器^[1]。

2 光纤激光器

光纤激光器是指用掺稀土元素玻璃光纤作为

增益介质的激光器,光纤激光器可在光纤放大器的基础上开发出来;在泵浦光的作用下光纤内极易形成高功率密度,造成激光工作物质的激光能级“粒子数反转”,当适当加入正反馈回路(构成谐振腔)便可形成激光振荡输出^[2]。

2.1 光纤激光器的类型

按照光纤材料的种类,光纤激光器可分为:

- 1) 晶体光纤激光器。工作物质是激光晶体光纤,主要有红宝石单晶光纤激光器和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 单晶光纤激光器等。
- 2) 非线性光学型光纤激光器。主要有受激喇曼散射光纤激光器和受激布里渊散射光纤激光器。
- 3) 稀土类掺杂光纤激光器。光纤的基质材料是玻璃,向光纤中掺杂稀土类元素离子使之激活,而制成光纤激光器。

* 收稿日期:2009 年 6 月 8 日,修回日期:2009 年 7 月 11 日
作者简介:杨云,男,工程师,研究方向:电子工程技术。

4) 塑料光纤激光器。向塑料光纤芯部或包层内掺入激光染料而制成光纤激光器。

2.2 光纤激光器的优势

光纤激光器作为第三代激光技术的代表,具有以下优势:

1) 玻璃光纤制造成本低、技术成熟及其光纤的可饶性所带来的小型化、集约化优势。

2) 玻璃光纤对入射泵浦光不需要像晶体那样的严格的相位匹配,这是由于玻璃基质 Stark 分裂引起的非均匀展宽造成吸收带较宽的缘故。

3) 玻璃材料具有极低的体积面积比,散热快、损耗低,所以上转换效率较高,激光阈值低。

4) 输出激光波长多:这是因为稀土离子能级非常丰富及其稀土离子种类之多。

5) 可调谐性:由于稀土离子能级宽和玻璃光纤的荧光谱较宽。

6) 由于光纤激光器的谐振腔内无光学镜片,具有免调节、免维护、高稳定性的优点,这是传统激光器无法比拟的。

7) 光纤导出,使得激光器能轻易胜任各种多维任意空间加工应用,使机械系统的设计变得非常简单。

8) 胜任恶劣的工作环境,对灰尘、震荡、冲击、湿度、温度具有很高的容忍度。

9) 不需热电制冷和水冷,只需简单的风冷。

10) 高的电光效率:综合电光效率高达 20% 以上,大幅度节约工作时的耗电,节约运行成本。

11) 高功率,目前商用化的光纤激光器是六千瓦。

2.3 高功率的光纤激光器

高功率的光纤激光器采用双包层光纤泵浦技术。包层泵浦技术,由四个层次组成:光纤芯、内包层、外包层、保护层。将泵光耦合到内包层(内包层一般采用异形结构,有椭圆形、方形、梅花形、D 形及其六边形等等),光在内包层和外包层(一般设计为圆形)之间来回反射,多次穿过单模纤芯被其吸收。这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,可大大提高泵浦效率。

包层泵浦技术特性决定了该类激光器有以下几方面的突出性能:

1) 高功率。一个多模泵浦二极管模块组可辐射出 100 瓦的光功率,多个多模泵浦二极管并行设

置,即可允许设计出很高功率输出的光纤激光器。

2) 无需热电冷却器。这种大功率的宽面多模二极管可在很高的温度下工作,只须简单的风冷,成本低。

3) 很宽的泵浦波长范围。高功率的光纤激光器内的活性包层光纤掺杂了铒/镱稀土元素,有一个宽且又平坦的光波吸收区(930~970nm),因此,泵浦二极管不需任何类型的波长稳定装置。

4) 效率高。泵浦光多次横穿过单模光纤纤芯,因此其利用率高。

5) 高可靠性。多模泵浦二极管比起单模泵浦二极管来其稳定性要高出很多。其几何上的宽面就使得激光器的断面上的光功率密度很低且通过活性面的电流密度亦很低。这样一来,泵浦二极管其可靠运转寿命超过 100 万小时。

目前,实现包层泵浦光纤激光器的技术概括起来可分为线形腔单端泵浦、线形腔双端泵浦、全光纤环形腔双包层光纤激光器三大类,不同特色的双包层光纤激光器可由该三种基本类型拓展得到。

3 发展动向

1) 德国 DILAS 一体化半导体工业激光系统以传导冷却半导体激光 BAR 条为基础,集成波长 980nm,光纤 400 μ m,功率高达 500W 的模块。此系统采用水冷模式,具有完善的电源和控制系统,并通过 24V 接口控制^[3]。

500W@400 μ m 的 COMPACT 系统使用 QBH 高功率光纤输出,光纤外包层几乎没有激光能量的损耗,是全光结构光纤激光器的理想泵浦源。在 COMPACT 系列中,输出功率不高于 100W 的激光器系统可采用 SMA 光纤输出和全风冷结构。基于同样的结构,德国 DILAS 一体化半导体激光器系统 COMPACT 系列可提供波长从 640nm 到 2200nm 的各种一体化半导体激光器系统。此外,COMPACT 系统提供了 5m 金属铠装光纤、光学成像系统和激光安全指示灯。

2) 美国 StockerYale 公司研制稀土光纤激光器 OEM 子系统。美国《军事与航空航天电子学》2009 年 4 月 12 日报道:美国 StockerYale 公司正在为一种掺杂稀土光纤激光器(rare-earth-doped fiber laser)技术提供子系统设计 and 制作样机服务。

StockerYale 公司将为这种光纤激光器交付一系列 OEM 子系统,其中包括用于种源放大的光纤预放大器(pre-amps)、高功率光纤放大器、调 Q 光

纤激光器子系统、增益可调光纤激光器子系统、ASE光源、以及光纤激光器其他子系统。光纤中掺杂的元素包括铒、镱、钕、钐、以及其他稀土族元素。

3) 美国 Raydiance 公司向海军交付先进飞秒光纤激光器。美国《西部防务》2009年4月21日报道:美国 Raydiance 公司曾经开发出了世界上第一台商用超快速激光器。2009年4月21日,该公司宣布向美国海军部交付了一台飞秒光纤激光器,其脉冲能量超过每个脉冲 $50\mu\text{J}$,脉冲时间长达 500 飞秒,创造了 1552nm 人眼安全波长的世界纪录。这台激光器是 Raydiance 公司根据与美国海军海上系统司令部(NAVSEA)之间一份价值几百万美元的合同开发并制造的。

据 Raydiance 公司总裁斯科特·戴维森(Scott Davison)介绍:“这种高能激光系统的交付不但是本公司,而且也是超快激光器业界的一座里程碑,它将开启一系列新的防务和商业应用领域。我们的工程和制造团队已经证明了,他们可以利用本公司的核心 Discovery 平台技术来实现高脉冲能量,同时还能得到基于光纤的紧凑结构。我们视之为一项重大突破,它将推动紧凑光纤激光器产业向着毫焦级能量和千兆瓦峰值功率的性能迈进。”

传统的超快速系统造价昂贵、笨重,并且除了在受控实验室之外很难应用于其它环境。Raydiance 公司利用软件控制、光纤结构和计算技术,实现了适用于制造环境和野外部署的坚固而紧凑的平台。为海军交付的这种高能系统所包含的技术可以应用于 Raydiance 公司即将推出的民用产品。

4 发展分析

目前,高功率光纤激光器技术所取得的进展与高亮度光纤耦合激光二极管的进步紧密相关。基于标准商用光纤、组件和 976nm 激光二极管,实现输出波长为 $1\mu\text{m}$ 的千瓦级光纤激光器。人眼安全光纤激光器技术的发展,基于掺铒光纤和 790nm 泵浦激光二极管技术,工作在 $2\mu\text{m}$ 时,可实现千瓦级光纤激光器^[4]。

1) 高功率激光二极管泵浦模块。激光二极管泵浦模块与光纤激光器间的常用接口是直径 $100\sim 200\mu\text{m}$ 的光纤尾纤,其典型的数值孔径为 $0.12\sim 0.22$ 。这些二极管尾纤通常被接入光纤合束器,以进一步提高泵浦功率。

为了实现千瓦级的输出功率,光纤激光采用主

振荡功率放大(MOPA)结构,这需要具有更高功率(大于 200W)的泵浦模块。通过光学叠加和偏振耦合,可将多个单元(6~10个)耦合到单根直径为 $200\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.2 的光纤中。例如,一个具有四个激光二极管阵列的 976nm 光纤耦合模块,能通过 $200\mu\text{m}$ 的光纤实现超过 200W 的功率输出。

2) $1\mu\text{m}$ 高功率光纤激光器。基于商用光纤、泵浦合束器以及泵浦激光二极管的千瓦级高功率 MOPA 系统,可以实现 225W 的功率输出。六个泵浦模块的总功率为 1.2kW,并被组合入一个锥形光纤束,然后泵浦一根掺铒(Yb)双包层光纤,该光纤直径为 $400\mu\text{m}$,数值孔径为 0.46。基于模块的高斜率效率泵浦,这种光纤激光器比较容易实现具有单模光束质量,超过 1kW 的功率输出。

目前的千瓦级光纤放大器已在 8GHz 线宽下进行了测试,随着受激布里渊散射技术被应用到更高的功率水平,千瓦级光纤放大器很可能将实现单频线宽输出。例如,高亮度 976nm 二极管的电光转换效率约为 45%,由此获得的放大器总的电光转换效率约为 35%。

3) 人眼安全光纤激光器。工作在人眼安全波段(波长约大于 $1.4\mu\text{m}$)的高功率、高效率光纤激光器。目前,工作在 $2\mu\text{m}$ 左右的掺铒(Tm)光纤激光器所取得的进展,已经使单个光纤激光器的输出功率接近 1kW。

实现上述 1kW 功率的关键在于:对泵浦掺铒光纤的 790nm 激光二极管进行优化,特别是在较高的电光效率下实现所需的高功率和高亮度。例如,793nm 的高亮度激光二极管的输出功率超过 20W,耦合到直径为 $105\mu\text{m}$ 的光纤中,电光效率高达超过 40%。这种泵浦源加上 Nufern 公司有效的掺铒光纤技术(60%的斜率效率),使人眼安全光纤激光器首次达到 25%的(功率转换)效率。

这种泵浦技术与高效率掺铒光纤的最新进展相结合,已经使人眼安全光纤激光器技术达到 25%的(功率转换)效率。

5 结语

光纤激光器作为第三代激光技术的代表,具有其他激光器无可比拟的技术优越性。不过,我们认为,在短期内,光纤激光器将主要聚焦在高端用途上。随光纤激光器的普及,成本的降低以及产能的

(下转第 106 页)

小,这符合干扰对数字信号的影响。但是同时我们发现相同干扰条件下,选取不同的滤波器及其滚降系数,会出现不同的眼图参数发生变化的情况,这样势必对眼图的分析产生影响,如何改变这种影响?这是论文研究的重点。

我们针对不同滤波器的滚降系数和不同干扰强度下眼图的变化情况进行了具体的分析^[3]。分析结果表明,同一干扰情况下,不同的特征参数(滚降系数分别为 0.25,0.5,0.75 三种情况)情况下眼图的变化具体情况如图 7~图 8 所示。

我们遵循最大限度减小码间串扰对数字通信的影响的原则,从眼图的变化和信噪比的对应关系文中选择了 FIR 滤波器滚降系数 0.5 进行分析,完成滤波器的选择,为基于眼图分析的数字信号干扰效果评估方法研究提供了依据。通过上述分析可知,一个确定的数字序列在眼图空间对应固定的眼图结构。在不同干扰强度的情况下,基带信号对应的眼图结构会出现不同程度的变化,即干扰强度的不同会在眼图结构中得以体现。

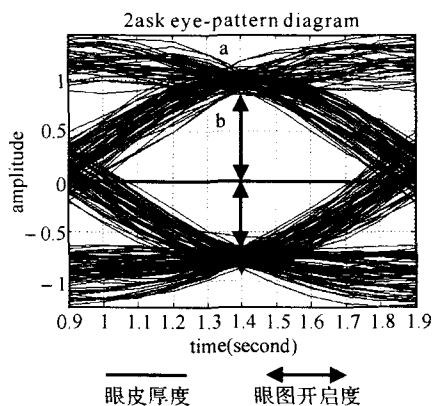


图 9 受干扰时眼图

结合上述图形及不同干扰情况下的眼图变化情况进行分析,可以发现:当干扰强度相同的情况

下由于选取不同的滤波器及其滚降系数会出现不同的眼图情况,即反应数字信号受干扰变化的眼皮的厚度、眼图的开启度(如图 9,a,b 所示)发生变化,这对我们建立的基于眼皮的厚度和开启度两个特征参数的数字信号的干扰效果的评估方法是有影响的,即选择不同的滤波器及其参数会得到不同的评估结果。通过上面的分析和结果仿真描述,为我们选取滤波器种类及其特征参数提供了依据。

4 结语

数字通信干扰效果评估方法研究是数字干扰效果评估方法的进一步的拓展和完善,文章分析了影响眼图变化的诸多因素的,并在确定成型滤波器和滚降系数的基础上,对眼图受干扰后的变化情况进行分析,即在排除其它因素的基础上,通过采用相应的能够反应眼图变化的眼图特征参数(眼皮厚度、眼图的开启度),为今后分析数字信号干扰效果的正确评估提供了可靠的依据。

参考文献

- [1] [美]Rodger E, Ziener William H. Tranter, 著. 袁东风, 江铭炎, 译. 通信原理—系统、调制与噪声[M]. 北京:高等教育出版社,2004:367~372
- [2] 王秉钧. 现代通信系统原理[M]. 天津:天津大学出版社,1999:177~179
- [3] 周涛. 通信信号成形方式识别与最佳接收[D]. 中电科技集团第五十四研究所硕士研究生学位论文,2005
- [4] 王红星,曹建平. 通信侦察与干扰技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006,7:8~10
- [5] 梅杓春,王勇. 现代电信仪表原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1998:112~115
- [6] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007:156~158

(上接第 35 页)

提高,最终将会替代掉全球大部分高功率 CO₂ 激光器和绝大部分 YAG 激光器^[5]。

参考文献

- [1] 樊亚仙,吕福云,胡姝玲,等. 包层泵浦调 Q 光纤激光器的研究进展[J]. 光电子·激光,2002,(8):872~875
- [2] 侯静,肖瑞,刘泽金,等. 两种方法实现对掺镱光纤放大器的

相位校正[J]. 强激光与粒子束,2006,(11):1779~1782

- [3] 喻洪波,廖延彪,靳伟,等. 光纤化的气体传感技术[J]. 激光与红外,2002,(3):65~68
- [4] 黄章勇. 光纤通信用光电子器件和组件[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001:252~258
- [5] 肖瑞,周朴,侯静,等. 激光器的部分相干性对光纤激光器阵列相干合成远场图样的影响[J]. 物理学报,2007,(2):819~823