

光纤激光器的研究与发展前景

习聪玲, 乔学光, 贾振安

(西安石油大学 陕西省光电传感测井重点实验室, 西安 710065)

摘要:对光纤激光器的发展背景做了介绍,对光纤激光器的基本结构、工作原理以及研究现状做了详细的阐述。列举了国内目前比较流行的光纤激光器,并对这几种光纤激光器发展现状以及特点做了分析,概述了光纤激光器在光通信、医疗、军事、传感技术和工业等方面的应用。

关键词:光纤激光器; 光纤光栅; 主动锁模; 被动锁模
中图分类号: TN 253 **文献标志码** A

1 引言

在 20 世纪 60 年代 Snitzer 等人提出了光纤在激光器方面的设想,并且不久就用掺杂 Nd^{3+} 玻璃纤维研制出第一台光纤激光器,这些标志着激光器的研究迈上了一个新的舞台——光纤激光器。直到 20 世纪 80 年代中期英国南安普顿大学的研究人员在光纤中掺入杂质 Er^{3+} ,从此光纤激光器的研究进入了实用化阶段^[1]。所以光纤激光器是在 EDFA 技术基础上发展起来的技术。

近年来,随着光纤通信系统的极大的应用和发展,超快速光电子学、非线性光学、光传感等各种领域应用的研究已得到日益重视。光纤激光器在降低阈值、振荡波长范围、波长可调谐性能等方面,已明显取得进步。它是目前光通信领域的新兴技术,它可以用于现有的通信系统,使之支持更高的传输速度,是未来高码率密集波分复用系统和未来相干光通信的基础。目前光纤激光器技术是研究的热点技术之一,下面我们简要介绍光纤激光器的工作原理、分类、结构和前景展望。

2 光纤激光器工作原理

光纤激光器主要由三部分组成:由能产生光子的

增益介质、使光子得到反馈并在增益介质中进行谐振放大的光学谐振腔和可使激光介质处于受激状态的泵浦源装置。光纤激光器的基本结构如图 1 所示。

掺稀土元素的光纤放大器推动了光纤激光器的发展,因为光纤放大器可以通过适当的反馈机理形成光纤激光器。当泵浦光通过光纤中的稀土离子时,就会被稀土离子所吸收,这时吸收光子能量的稀土原子电子就会激励到较高激光能级,从而实现离子数反转。反转后的离子数就会以辐射形式从高能级转移到基态,并且释放出能量,完成受激辐射。从激发态到基态的辐射方式有两种,即自发辐射和受激辐射,其中受激辐射是一种同频率、同相位的辐射,可以形成相干性很好的激光。激光发射是受激辐射远远超过自发辐射的物理过程,为了使这种过程持续发生,必须形成离子数反转,因此要求参与过程的能级应超过两个,同时还要有泵浦源提供能量^[2]。光纤激光器实际上也可以称为是一个波长转换器,通过它可以使泵浦波长光转化为所需的激光波长光。例如掺铒光纤激光器将 980nm 的泵浦光进行泵浦,输出 1550nm 的激光。激光的输出可以是连续的,也可以是脉冲形式的。

光纤激光器有两种激光状态,三能级和四能级激光。三能级和四能级的激光原理如图 2 所示,泵浦(短波长高能光子)使电子从基态跃迁到高能态 E_4 或者 E_3 ,然后通过非辐射方式跃迁过程跃迁到激光上能级 E_3 或者 E_2 ,当电子进一步从激光上能级跃迁到下能级 E_2 或者 E_1 时,就会出现激光的过程。

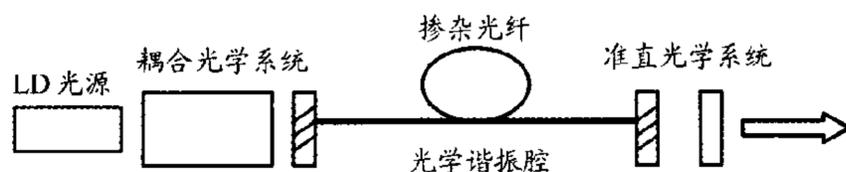


图 1 光纤激光器的基本机构图

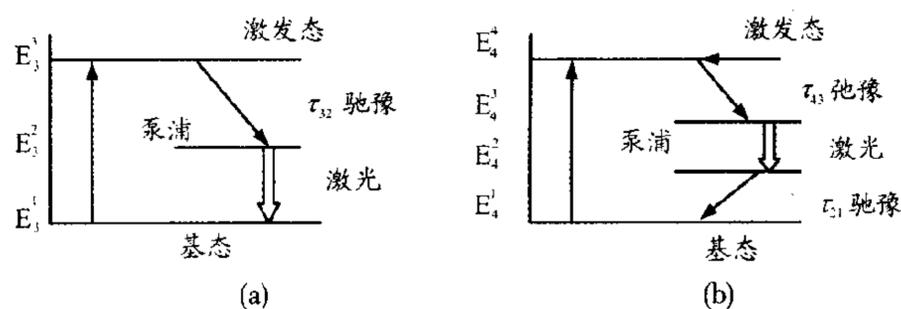


图 2 三能级和四能级激光能级图

收稿日期:2005-10-10。

基金项目:国家“863”计划项目(2002AA313150)资助;国家自然科学基金项目(60177028)资助;陕西省科技攻关项目(2003K05-G23)资助;陕西省教育厅项目(02JK158)资助。

作者简介:习聪玲(1979-),女,硕士研究生。

研究方向:光纤传感与光纤通信技术。

3 目前比较流行的几种光纤激光器

3.1 双包层光纤激光器

双包层光纤激光器是新型光纤激光器发展的代表,它的优点在于不需要将泵浦能量直接耦合到模场直径相对较小的光纤中去,它可以采用低成本的、大模场(多模)、高功率的半导体激光器作为泵浦源。因为这个优势,近几年来,双包层光纤激光器研究受到了极大的关注。双包层光纤激光器在提高功率方面,采用将多个光纤激光器的输出合并,来满足工业和军事需要的几个千瓦或者几百个千瓦功率的激光器。

双包层光纤激光器是由同心的纤芯、内包层、外包层以及保护层组成,内包层和外包层有同心的圆截面结构,双包层的直径远大于纤芯的直径,结构如图3所示。纤芯中掺入稀土元素铒、镱、铕等与单模光纤纤芯一样,具有很大的折射率,其用来传输单模信号光。内包层具有和普通光纤的纤芯相同的材料,它的折射率处于纤芯和外包层之间,它用来传输多模泵浦光。外包层的折射率最小。内包层和纤芯构成一个大的纤芯,用来传输泵浦光,其以折线方式反复穿过纤芯并被掺杂吸收,这样在纤芯中传播光的比例就会增加。它的光源使用多个多模激光二极管 LD 组成。

3.2 窄线宽光纤激光器

窄线宽光纤激光器已经在传感和高精度光谱方面取得卓越的成就,它是光纤激光器研究的一个热点,该传感器在应用方面具有结构简单、体积小、抗电磁干扰能力强以及可远程控制等优点,在军事应用上它具有高的灵敏度和波分复用的多路传输的性能。现在可以实现的单纵模输出带宽为 2kHz 以下,功率超过 100mW。在相干通讯、频率锁定以及大功率激光器的优良光源。并且窄线宽光纤激光器还具有窄线宽、低噪声等优点。

窄线宽光纤激光器一般的实现方法是在光纤纤芯里写入 Bragg 光栅,作为激光腔镜,完成激光的窄带输出。这种技术是基于 1991 年 Ball^[9]等人第一次在掺铒光纤中采用 Bragg 反射镜(FBR)实现 1550nm 激光的单模输出的基础上的又一次飞跃^[10]。它的波长选定

是通过波长选择器,例如 F-P 标准具、可调滤波器和 Bragg 光栅来完成的。其波长选择器可以增益谱内起振的纵模数,只让特定条件的几个模发生震荡,通过这样的途径来实现窄线宽光纤激光器。如果让一个纵模震荡,就成了单频激光器,输出的光具有很好的时间相干性,它常用的腔为短直腔和复合腔。

3.3 超短脉冲光纤激光器

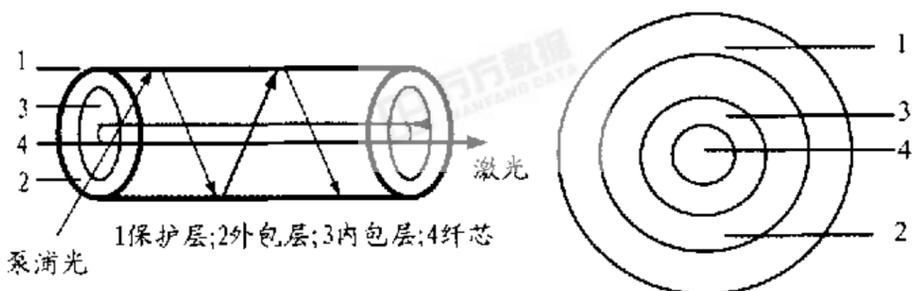
超短脉冲激光器也是目前光纤激光器研究的一个热点,它主要应用的是被动锁模技术。与固体激光器相同,光纤激光器也是根据锁模原理产生短脉冲的激光输出。当光纤激光器在增益带宽内大量纵模上运转时,当每个纵模相位同步,任意相邻纵模相位差为常数时,就会实现锁模。谐振腔内循环的单个脉冲经过输出耦合器输出能量。光纤激光器分为主动锁模光纤激光器和被动锁模光纤激光器。主动锁模调制能力限制了锁模脉冲的宽度,它的脉冲宽度一般是 ps 量级。被动锁模光纤激光器是利用了光纤或者其它的光学元件的非线性光学效应实现锁模的。激光器结构简单,在一定条件下不需要任何调制元件就可以实现自启动锁模工作^[11]。启用被动锁模光纤激光器可以输出 fs 量级的超短脉冲^[12]。

超短脉冲激光器已经用在超快光源上,形成多种时间分辨光谱技术和泵浦技术。超短脉冲发生技术是实现超高速光时分复用(OTDM)的关键技术。超短脉冲光纤激光器几乎遍及材料、生物、医学、化学、军事等各个领域^[13]。

3.4 光子晶体光纤(PCF)激光器

PCF 可以称为多孔光纤,它主要是在石英光纤中沿光纤轴向有规律排列着空气孔。光纤的核心是一个破坏折射率调制周期性的空气孔构成的缺陷,也可以用石英或者掺杂的石英代替,构成 PCF 的纤芯。光子晶体激光器主要体现在独特的光学特性和巧妙的设计上,它主要利用光子晶体光纤的零色散点可以选择近红外和可见光区域这一区别于常规光纤的显著特点,目前已经研制出性能比较卓越 PCF 光孤子脉冲激光器^[14]和 PCF 超连续谱激光光源^[15]。PCF 光纤激光器优点体现在利用大模面积稀土掺杂 PCF,已经研制出功率很高的大功率光纤激光器;同时它还提高了单模输出的能力。

因为 PCF 光纤中存在很多不利于光纤焊接的空气孔,所以说环行结构的 PCF 很难实现,现在一般采用的大多数都是线形腔结构,如图 4 所示。它与常规的光纤结构不同,PCF 不仅灵活的设计纤芯的形状和



(a) 双包层光纤结构纵向示意图 (b) 双包层光纤结构截面图

图 3 双包层光纤结构图

光纤激光器的研究与发展前景

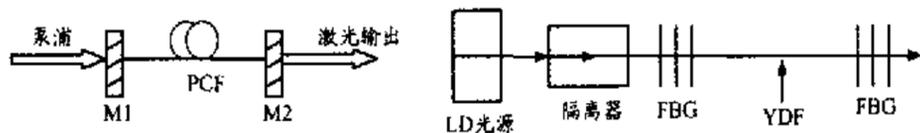


图4 PCF激光器基本结构示意图

图5 光纤光栅激光器示意图

位置而且还可以根据需求改变空气的包层结构^[12]。这样就提高了对泵浦光的耦合和吸收,通过减短光纤的长度来减少再吸收的影响并且增加了光纤激光器的调谐范围。

3.5 基于光纤光栅的高功率光纤激光器

选择合适的光学谐振腔是实现高功率光纤激光器的关键技术,通常采用光学二色镜或者在光纤端面镀膜构成谐振腔,但这种方法在泵浦光的耦合和光纤的封装方面都造成一定程度的麻烦,不利于光纤激光器的实用化和商品化,所以采用光纤光栅做谐振腔^[13]。光纤光栅是一种低损耗的元件,具有很好的波长选择性,它的采用简化了激光器结构,并且提高了光纤激光器的信噪比和可靠性,输出光稳定性好,提高了光束的质量。另外用光纤光栅做谐振腔我们可以把抽运源的尾纤和增益光纤有机的熔接在一起,这样就避免了用二色镜和透镜组提供激光反馈带来的损耗,从而降低了光纤激光器的阈值,提高了输出激光的斜率效应。采用光纤光栅做谐振腔的结构如图5所示。

4 光纤激光器的应用展望

激光器是激光技术的核心,未来光纤激光器的发展方向将会是:进一步提高光纤激光器的性能,如继续提高输出功率、提高光束质量;扩展新的激光波段、拓展激光器的可调谐范围;压窄激光谱宽;开发极高峰值的超短脉冲(ps和fs量级)高亮度激光器;进行整体小型化、实用化、智能化的研究。而近几年的发展主要集中在3个方面:(1) 光纤布喇格光栅的性能的提高,让其很好的应用在光纤激光器中;(2) 光纤激光器在脉冲和谱线宽度更窄,输出功率更高,调谐范围更广等;(3) 光纤激光器发展的更实用化。

◆在工业上 光纤激光器在工业方面的应用最引人注目的是材料处理,随着它的功率不断提高,光纤激光器在工业切割方面已经开始规模化应用。光纤激光器是金属和非金属材料切割,加工与处理的理想设备,可利用光纤激光器进行激光产品定标、精密切割、激光雕刻、激光焊接、精密打孔、激光检测、微弯曲、激光测量等技术方面。

◆在通信上 为了满足目前通信的大容量要求,光纤激光器的应用便成为通信中的一项新兴的技术。

今后的通信技术将会由电通信逐步转化为光通信。光纤激光器不仅能产生连续的激光输出,而且可以产生皮秒(ps)甚至飞秒(fs)的超短激光脉冲。光纤激光器已经在降低阈值,加宽波长范围,波长可调谐性能方面取得了很大的发展。其中光孤子通信是走向实用化的主要技术,光孤子通信传输距离可达到百万 km,传输速率可以达到 20Gb/s,误码率低于 10^{-13} ,实现了信号传输的高速度和高质量。

◆在军事方面的应用 由于光纤激光器功率的不断提高,其在军事方面的应用也越来越广泛。为了达到定向能武器的目的,把几个光纤激光器组合成为同相位阵列结构,这样可以提高光纤激光器的功率。在美国空军研究实验室,目前正在研究着 100kW 级的光纤激光器。这样才能达到军事应用的目的。

目前国内的光纤激光器的发展才处于初期发展阶段,但是输出功率已经有了大幅度的提高。单根光纤输出接近衍射极限光束功率已经上升到 1000W 以上。高功率光纤激光器技术的突破主要受益于大模区光纤的出现和高亮度半导体抽运源技术的成熟^[14]。但是国内的光纤激光器技术相比于国外还是很落后的,可见国内在研究如何提高光纤激光器的功率方面还须进一步努力。

5 结束语

随着双包层光纤激光器、窄线宽光纤激光器、超短脉冲光纤激光器、光子晶体光纤激光器以及基于光纤光栅的高功率光纤激光器的出现,光纤激光器得到了迅速的发展,其中超短脉冲技术是未来光通信的关键技术。光纤激光器的发展正向多功能、实用、简便的方向发展。要提高光纤激光器的性能,使其更实用化,我们应该不断提高泵浦光耦合技术,研制合适的光学谐振腔。光纤激光器展现出的巨大功能已经成为了 LD 光源的有力竞争对手。它将会在未来的光通信中发挥着越来越大的作用。光纤激光器的研究、开发以及各种应用,将会变的更受人们的关注。

参考文献:

- [1] HAUS H A, et al. Stretched-pulse mode-locking in fiber ring laser: theory and experiment [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(3): 591-598.
- [2] RICHARDSON D, et al. Fiber Laser systems shine brightly [J]. Laser Focus World, 1997, (9): 87-96.
- [3] 明海, 张国平, 谢建平. 光电子技术. 中国科学技术大学出版社, 1998年1月第一版.
- [4] 杨小丽. 光电子学基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.

(版面原因, 其它参考文献从略)