

文章编号 1004-924X(2006)05-0811-04

基于 FBG 的波长可调谐环形掺铒光纤激光器

刘颖刚^{1,2}, 乔学光¹, 贾振安¹, 白燕¹, 邵敏¹

(1. 西安石油大学理学院, 陕西西安 710065; 2. 西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西西安 710069)

摘要:在介绍光纤光栅波长调谐原理的基础上,设计了一种环形腔掺铒光纤激光器。利用光纤光栅(FBG)作为波长调谐元件,在 20~170 ℃ 的温度范围内,实现了输出激光波长在 1 547.7~1 556.5 nm 内的连续可调,调谐线性度达 99.96%,激光光谱的 3 dB 带宽均小于 0.05 nm,20 dB 带宽均小于 0.08 nm,边模抑制比大于 52 dB,输出功率可达 21.2 mW。结果表明:可调谐掺铒光纤激光器具有可用带宽较宽、功率高、线宽窄、与光纤元件天然兼容等优点。

关键词:光纤光学;掺铒光纤激光器(EDFL);光纤光栅(FBG);波长调谐

中图分类号:TN248.8;TN253 **文献标识码:**A

Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser based on FBG

LIU Ying-gang^{1,2}, QIAO Xue-guang¹, JIA Zhen-an¹, BAI Yan¹, SHAO Min¹

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Institute of Photonics & Photon-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Based on introducing the principle of wavelength tuning of FBG, a kind of ring Er-Doped Fiber Laser(EDFL) whose wavelength was tuned by FBG was designed. The output lasing wavelength between 1 547.7 nm and 1 556.5 nm can be tuned continuously within the temperature range from 20 to 170 ℃. The tuning linearity is up to 99.96%, the 3 dB linewidth is less than 0.05 nm and the 20 dB linewidth is less than 0.08 nm. While the side mode suppression ratio(SMSR) is more than 52 dB, the output power of EDFL is up to 21.2 mW. Experimental results show that the tunable EDFL has the advantages of wide bandwidth, high power, narrow linewidth and compatibility to fiber element.

Key words: fiber optics;Er-Doped Fiber Laser(EDFL);fiber Bragg grating;wavelength tuning

1 引言

目前通信用激光器主要是半导体激光器,但半导体激光器存在着成本高,与系统的传输光纤耦合困难等缺点,限制了它在通信系统中的应用,而可调谐光纤激光器的应用除了可大大降低信道

间隔为 25 GHz 的密集波分复用(Dense-Wavelength-Division-Multi Plexing)系统的运营成本 and 备份成本、实现用一个可调谐激光器代替多个固定波长激光器作为备用外,还具有低阈值、泵浦斜率效率高、激光波长位于 1 550 nm 通信窗口与光纤通信系统完全兼容等特点^[1-3]。因此,可调谐光纤激光器将成为未来全光网络(All-Optical-

收稿日期:2005-12-22;修订日期:2006-06-18.

基金项目:国家自然科学基金(No. 69877025);中国石油天然气集团公司应用基础研究项目(No. 20050719);陕西省教育厅产业化培育项目(No. 05JC23);西安市科技局信息技术专项项目(No. ZX05041);西安石油大学科技创新项目(No. 2005-20)

Network)的关键器件,在高速大容量 DWDM 光纤通信系统中可实现以窄线宽激光作为载波有效避免信号失真,同时可以实现全波长变换、光交插连接、光分插复用及基于不同波长的个人虚拟网络(Wavelength-based Virtual Personal Network)等功能^[4]。在光纤光栅传感中作为传感扫描光源,可实现单点、多点及分布式光纤光栅阵列的传感检测,并且随着窄带滤波技术的发展,基于可调谐光纤激光器的波长检测技术将有望成为最具有发展潜力的光纤光栅传感检测技术^[5]。然而,近年来有关可调谐掺铒光纤激光技术的研究工作,主要是围绕掺铒光纤激光器的调谐技术及相关器件研究等方面展开的。在调谐方法上,报道了多种调谐方法,如旋转光栅、调节腔内标准具的角度、利用声光滤波器、电调液晶标准具、光纤光栅调谐、光纤环形镜调谐等。而目前国内外多采用光纤光栅调谐方案,这是因为光纤光栅是全光纤器件,与光纤之间具有天然的兼容性,不仅价格便宜而且具有损耗低、易与其它光纤耦合、对偏振不敏感以及封装简单等特点,用它可实现全光纤型可调谐激光器^[6-7]。但受裸光纤光栅的温度、应变响应灵敏度(0.013 nm/°C、0.001 nm/MPa)的限制,调谐范围很窄,人们致力于寻求各种调谐范围宽、稳定性高、准无啁啾、复用性好的调谐方法,并努力使之技术化。因此,在未来光通信及光纤传感领域中,光纤光栅波长调谐方法的探索及其技术的开发仍将是热点课题之一。

2 FBG 温度调谐原理

所谓光纤光栅(FBG)的波长调谐是指对制作好的 FBG 通过不同的物理效应(热膨胀效应、热光效应及弹光效应)改变 FBG 的光栅周期及光栅的折射率分布,使反射波长产生一定量的漂移,以达到调谐 FBG 反射(或透射)波长的目的。

光纤光栅是光纤纤芯中的一种特殊的、周期性折射率调制的光波导。由耦合模理论得到光纤布喇格光栅的中心射波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为导模的有效折射率, Λ 为光栅的周期。当外界温度改变时,由于光栅反射的 Bragg 波长受温度影响的相对变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_t \Delta t, \quad (2)$$

式中 $K_t = \frac{1}{\lambda_B} \times \frac{d\lambda_B}{dt} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \times \frac{dn_{\text{eff}}}{dt} + \frac{1}{\Lambda} \times \frac{d\Lambda}{dt}$, 其中 $\frac{1}{n_{\text{eff}}} \times \frac{dn_{\text{eff}}}{dt}$ 代表光纤光栅的热光系数,用 ξ 表示; $\frac{1}{\Lambda} \times \frac{d\Lambda}{dt}$ 代表光纤光栅的热膨胀系数用 α 表示。由以上式得 $K_t = \xi + \alpha$, 在常温范围内,掺 Ge 光纤的热膨胀系数 α 约为 $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 热光系数 ξ 约为 $7.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 均可视为不变,所以裸光栅的温度影响(灵敏度)系数为 $K_t = 8.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 即温度对波长改变量的影响与温度变化量成线性关系,其温度灵敏度为 $0.013 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 但这对于激光的波长调谐而言显然太小, 100°C 的变化调谐范围仅为 1.3 nm , 限制了它在波长调谐和传感方面的应用。为了使得 FBG 在有限的温度变化范围内有更宽的调谐范围,可采用 FBG 温度敏感材料粘帖、聚合物封装等方法来提高光纤光栅的温度响应灵敏度,实现较大范围的调谐。

当温度变化时,材料由于热膨胀效应进行应变传递,施加应力于光栅并带动光栅周期变化,增加了光纤光栅的温度响应灵敏度。理论上可得其波长改变量与温度变化量间的关系^[8]

$$\Delta\lambda = \lambda_B [8.4 \times 10^{-6} + 0.786(\alpha_s - \alpha)] \Delta t, \quad (3)$$

式中 α_s 为所选金属或聚合物材料的热膨胀系数, α 为裸光纤光栅的热膨胀系数。因为金属、聚合物的热膨胀系数大于石英的热膨胀系数,显然经处理以后的 FBG 的温度灵敏度系数比裸栅大,在同样的温度变化范围内波长调谐范围增加,而且波长漂移量与温度变化量间具有线性关系。

3 实验装置及其工作原理

可调谐掺铒光纤激光器是基于掺铒光纤荧光放大原理,在光纤激光器回路中加入可调谐滤波器形成波长反馈,控制激光器的激射波长实现波长调谐的。

图 1 是以反射波长可调的光纤光栅作为端面反射镜的环形结构的掺铒光纤激光器结构图。所用器件包括 $1480 \text{ nm}/1550 \text{ nm}$ 波分复用器(WDM)、光隔离器(ISO)、掺铒光纤(EDF)、宽带耦合器(BBC)及波长可调的光纤光栅(FBG)。实验中的抽运光源为 1480 nm 激光二极管(LD),其中心波长为 1473.92 nm , 阈值电流为

24.8 mA,允许最大抽运电流为 1 300 mA。所用掺铒光纤(EDF)型号为 XP0003(Er05)-3E,其长度为 7.5 m,截止波长为 853.5 nm,掺铒浓度为 700×10^{-6} ,在 1 480 nm 处的峰值吸收系数为 2.8 dB/m,数值孔径 ≥ 0.2 ,模场直径为 $6.68 \mu\text{m}$ 。光纤光栅的调谐是通过将其粘贴于双金属片的主动膜表面层,当环境的温度发生变化时,由于主动膜的热膨胀系数大于被动膜的热膨胀系数,金属片将发生弯曲并凸向主动膜,从而施加应变在光纤光栅上,使得光纤光栅的反射波长发生漂移,实现光纤光栅的温度调谐。通过温度控制系统调节 FBG 的反馈波长,可以实现不同波长光的激励。环形腔中光隔离器的作用是使光单向循环,避免双向激励,发生模式竞争,折射率匹配液(IMG)的作用是防止光纤的端面反射。通过对输出耦合器分光比的选择可实现高功率的激光输出。

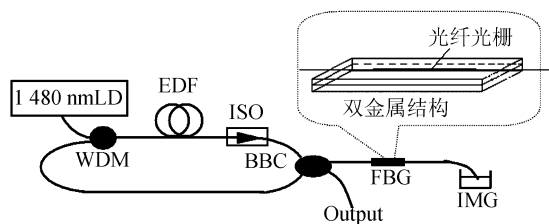


图 1 可调谐掺铒光纤激光器结构图

Fig. 1 Configuration of tunable erbium-doped fiber laser

此结构的光纤激光器基本原理是:掺有 Er^{3+} 的光纤在 1 480 nm 激光二极管抽运光作用下, Er^{3+} 粒子发生能级跃迁形成粒子数反转。在没有激励信号光的情况下,部分粒子将衰变回到基态,形成自发辐射。自发辐射产生的荧光通过 FBG 反射形成窄带光并被反馈进入掺铒光纤充当信号光,由于 1 480 nm LD 抽运的 Er^{3+} 是二能级结构,所以信号光将引起 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{15/2}$ 能态的受激发射与受激吸收,当满足粒子数反转且受激发射大于受激吸收时,信号光将被放大,再经过在增益介质-掺铒光纤中的往复传播放大便形成激光。而且粒子数反转程度越高,放大能力就越强,输出激光功率也会越高。若通过温度变化调谐光纤光栅的反射波长达到改变反馈信号光的波长时,便可形成不同波长的单纵模激光输出,实现该掺铒光纤激光器输出波长的可调谐性。

4 实验结果及分析

实验中,首先测量了 LD 尾纤实际输出光功率与驱动电流的关系,如图 2 所示。当驱动电流大于 30 mA 时,开始有功率输出,而且随着驱动电流的增大,LD 输出功率基本呈线性增加,当达到 800 mA 后逐渐趋于饱和。为了保护二极管,实验中只测到 900 mA,但足以显示该激光二极管的功率特性和最佳工作区。

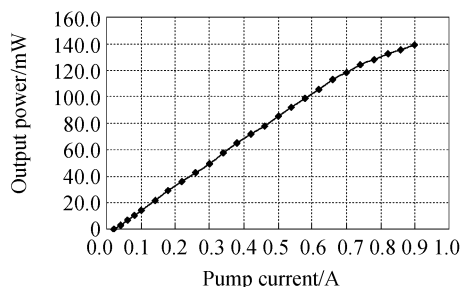
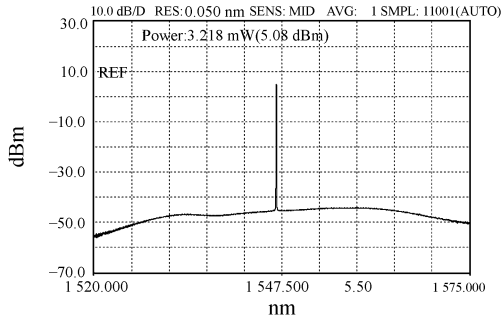


图 2 LD 输出功率与驱动电流关系

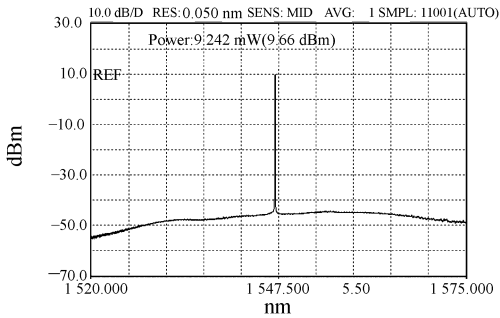
Fig. 2 Relationship between output power of LD and pump current

其次采用图 1 所示原理图,考虑到让泵浦激光二极管工作在最佳工作状态,实验中将 LD 的驱动电流固定在 500 mA (输出泵浦功率为 85 mW)。换用不同分光比的光耦合器在室温条件下测量了激光的输出功率,其光谱如图 3 所示。其中 c 图是在分光比为 30 : 70 的耦合器的 70% 端测得的光谱图,其输出功率为 12.5 mW (10.97 dBm),比相同条件下采用 70 : 30 (将 30 : 70 耦合器的 30% 端作为输出端)、50 : 50 耦合器输出功率均大,而且荧光噪声相对小一些。这主要因为光纤型激光器具有较低的阈值功率,当增益大于损耗时,较大的泵浦功率将使激光器的增益趋于饱和,若增大输出耦合比,虽然反馈进入光腔的信号功率减小,但依旧能形成较强的激光,随着输出耦合比的增加输出功率也将增加。但当输出耦合比大到一定程度时,由于反馈信号较弱不足以保证较强的激光振荡,激光输出功率反而下降,严重时甚至会停止振荡致使无激光输出,同时实验发现随着输出耦合比的增加,激光器的稳定性变差。

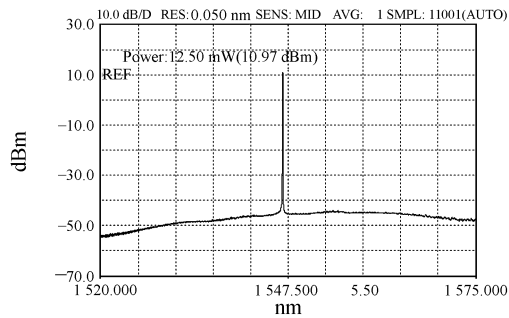
考虑到输出耦合比对激光稳定性及调谐带宽的影响^[9],为使该结构的激光器还具有较高的激



(a)70 : 30



(b)50 : 50



(c)30 : 70

图 3 选用不同分光耦合比时光纤激光器的输出光谱

Fig. 3 Output spectra of fiber laser with different coupling ratios

光输出和调谐带宽,最终选用 30 : 70 的光耦合器,并在 70% 端口进行光谱测量。当改变泵浦功率大小时,测得激光器的输出功率随着泵浦功率的增加基本成线性关系,如图 4 所示,其阈值抽运功率约为 12 mW,最大输出功率为 21.2 mW,功率转换的斜效率为 17.3%。其功率的斜效率不高的原因是斜率效率与泵浦功率、掺铒光纤长度耦合器的分光比等因素有关,它们之间存在最优关系,可以通过实验优化确定光纤的最优长度,实现激光器输出的高斜效率。

在保持激光器结构不变、驱动电流固定在 500 mA(输出泵浦功率为 85 mW)情况下,使用

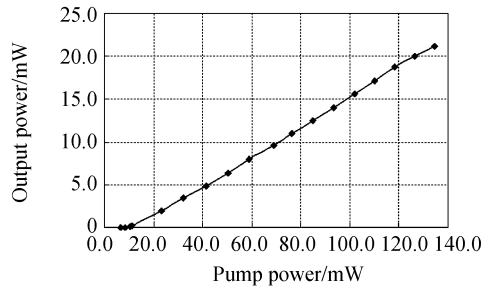


图 4 激光器输出功率与泵浦功率关系

Fig. 4 Relationship between output power and pump power

粘贴在双金属片主动膜表面的光纤光栅作为激光器的端面反射镜以实现波长反馈,并将其放入温控箱中改变温度,利用 AQ6319 型光谱仪对激光器的输出光谱进行监测,测得激光器输出光谱的峰值波长与温度变化曲线如图 5 所示。在 20~170 °C 的温度变化范围内,波长的调谐范围为 8.8 nm,线性度为 99.96%。同时观察到:在对光栅的调谐过程中,不同波长的输出激光谱形状基本保持图 6(58.9 °C 时的输出激光谱)所示谱型,没有发现多波长激光现象,激光光谱的 3 dB 带宽均小于 0.05 nm,20 dB 带宽均小于 0.08 nm,边模抑制比大于 52 dB,功率稳定性优于 0.2 dBm。经过多次重复测量,其测量结果基本与前面测量结果相同,误差在仪器测量误差范围之内,而且具有较高的线性度、较好的重复性,还具有保持功率输出的平坦性等特点,在众多的调谐方法中,可以说是一种简单且有效的调谐方法。

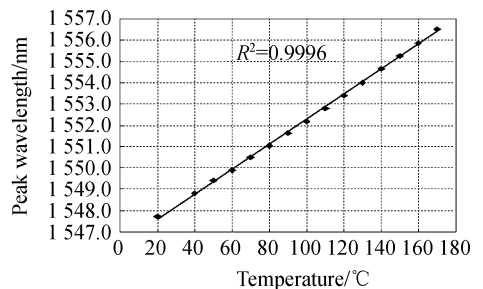


图 5 光纤激光器的波长调谐曲线

Fig. 5 Tunable curve of wavelength on fiber laser

若将实验中的光纤光栅换用具有不同中心波长的光纤光栅作为端面反射镜,便可实现输出波长在 1 525~1 565 nm 范围内的输出,覆盖通信