

文章编号: 0253-2239(2008)05-0919-04

基于相位采样光栅的双波长光纤激光器

季 恒 杨四刚 张 邺 谢世钟

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 提出一种基于相位采样的分布反馈式双波长光纤激光器, 在不同的空间位置同时引入相位和采样周期的突变。通过理论分析, 这种结构能够实现谐振腔的分离, 使不同波长的光波利用不同空间位置的增益介质, 克服增益介质均匀加宽引起的模式竞争, 实现双波长激光。采用准分子激光器和均匀相位模板, 在掺铒光纤上制作波长差为 0.46 nm 的双波长光纤激光器, 能够实现双波长激光。通过实验, 对激光器输出功率和光栅强度的关系进行研究, 表明输出功率和光栅强度成反比。

关键词 激光器; 分布反馈光纤激光器; 双波长光纤激光器; 光纤光栅; 相位采样

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Dual-Wavelength Er-Doped Fiber Laser Based on Phase Sampled Fiber Bragg Grating

Ji Heng Yang Sigang Zhang Ye Xie Shizhong

(Department Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A dual-wavelength distributed feedback (DFB) fiber laser based on phase sampling is proposed and demonstrated. Change of phase and sampling period is introduced at different positions along a sampling Bragg grating. It is demonstrated theoretically that this structure can provide separate resonant cavities to overcome mode competition caused by gain homogeneous broadening. A 0.46 nm-spaced dual-wavelength DFB fiber laser is achieved on an Er-doped fiber with excimer laser and homogeneous phase plate. Experiments shows that dual-wavelength lasing is achieved and laser power is in reverse proportion with coupling coefficient of the FBG.

Key word lasers; distributed feedback fiber laser; dual-wavelength fiber laser; fiber Bragg grating; phase sampling

1 引 言

全光纤的多波长激光器在波分复用系统, 微波信号产生, 高分辨力光谱仪和光纤传感等领域有着广泛的应用前景, 得到了越来越多的关注。但是, 掺铒光纤中增益介质的均匀加宽会引起模式竞争, 抑制光纤激光器的多波长激光。目前, 人们提出了很多方法来实现双波长光纤激光器, 如利用低温抑制均匀加宽^[1], 利用分布色散腔^[2], 利用偏振烧孔^[3]等, 但是这些方法, 结构比较复杂。分布反馈(DFB)光纤激光器可以通过直接在掺铒光纤上写入光纤光栅来实现^[4], 具有结构简单, 稳定性好, 单纵模, 窄线宽的等优点, 具有广泛的应用前景。

分布反馈光纤激光器的激光波长取决于写入的光纤布拉格光栅(FBG)的结构, 如何设计不同的光栅结构成为了实现双波长分布反馈光纤激光器的关键。利用采样光栅实现双波长分布反馈激光器的方法中^[5,6], 通常只在一1级信道内形成两个透射峰, 不利于实现大的波长间隔。本文提出了一种基于相位采样光栅的分布反馈光纤激光器, 同时利用-1级和+1级信道。在这种结构中, 通过相位采样的方法, 在不同位置改变采样周期, 并引入相位突变, 实现+1级和-1级两个信道内波长的谐振腔在空间上的分离, 克服了增益均匀加宽带来的模式竞争, 实现双波长激光。

收稿日期: 2007-08-14; 收到修改稿日期: 2007-12-12

作者简介: 季 恒(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事双波长分布反馈光纤激光器方面的研究。

E-mail: jih06@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 谢世钟(1947), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速大容量光纤通信、Radio over Fiber 技术等方面的研究。

E-mail: xsz-dee@tsinghua. edu. cn

2 理论分析

单波长分布反馈光纤激光器是在均匀光纤布拉格光栅上引入相移,使两段光栅形成一个等效的法布里-珀罗(F-P)谐振腔。相移在形成谐振腔的同时,在光纤光栅的透射谱上产生一个窄带透射峰,其对应的波长就是激射波长。在分布反馈光纤激光器中,激射光的能量大部分集中在相移区,为克服模式竞争,实现双波长激射提供了可能。如果使两个激射波长的谐振腔在空间上相互分开,使他们利用不同位置的增益介质,就能够克服模式竞争,实现双波长激射。

提出一种如图 1 所示的基于相位采样结构的光纤光栅,在掺铒光纤上写入这种结构的光栅,实现了两个波长的谐振腔在空间上的分离。

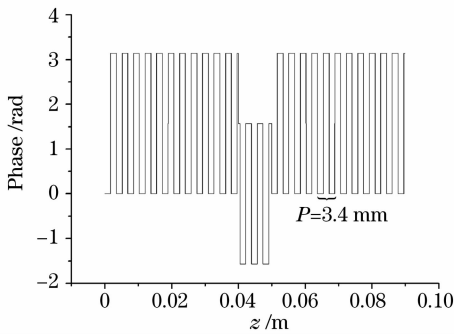


图 1 基于相位采样的双波长分布反馈光纤激光器的光栅结构

Fig. 1 FBG Structure of the dual-wavelength distributed feedback fiber laser based on phase sampling

相位采样是指光栅的相位随着光栅位置周期性的变化。相位采样光纤光栅的折射率调制为^[7,8]:

$$\Delta n(z) = \frac{1}{2} A_c \exp \left[j \frac{2\pi}{\Lambda} z + j\varphi(z) \right] \times \exp [j s(z)] + c. c, \quad (1)$$

式中 Λ 为光栅周期, A_c 为折射率变化的最大值, $\varphi(z)$ 为相位变化, $s(z)$ 为周期函数, 代表相位的采样。 $\exp [j s(z)]$ 是一个周期函数, 周期和 $s(z)$ 相同。当采样周期为 P 时, 将 $\exp [j s(z)]$ 用傅里叶级数展开为

$$\Delta n(z) = \sum_m \frac{1}{2} F_m A_c \exp \left[j \frac{2\pi}{\Lambda} z + j\varphi(z) \right] \times \exp \left(\frac{2m\pi z}{P} \right) + c. c = \sum_m \Delta n_m(z), \quad (2)$$

式中 F_m 为傅里叶展开的系数。将(2)式代入(1)式, 可得相位采样光栅的折射率调制为

$$\Delta n_m(z) = F_m \exp [j\varphi(z)] \exp \left(j \frac{2\pi}{\Lambda} z + j \frac{2m\pi z}{P} \right) + c. c.$$

根据光纤光栅的叠印模型^[7], 采样光栅可以看作是各个子光栅 Δn_m 的谱的叠加, 我们将第 m 个光栅称为第 m 级信道。 m 级信道的布拉格波长为

$$\lambda_m = \frac{2n_{\text{eff}} P \Lambda}{P + m\Lambda},$$

其中 n_{eff} 为有效折射率。

通过使采样周期在某个位置发生突变, 就可以在各级信道中引入相移。例如, 在 z_0 位置使采样周期增加 ΔP , 各级信道的折射率调制为

$$\Delta n_m(z) = \begin{cases} F_m \exp \left[j \frac{2\pi z}{\Lambda} + j \frac{2\pi m z}{P} + j\varphi(z) \right] + c. c, & z < z_0 \\ F_m \exp \left[j \frac{2\pi z}{\Lambda} + j \frac{2\pi m z}{P} - j\theta + j\varphi(z) \right] + c. c, & z > z_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\theta = 2\pi m(\Delta P/P)$ 。

$$\text{假设 } \varphi(z) = \begin{cases} \varphi_0, & z < z_0 \\ \varphi_1, & z > z_0 \end{cases}$$

通过改变采样周期就可以在各信道内中引入大小为 $\Delta\varphi_m = -2\pi m \frac{\Delta P}{P} + \varphi_1 - \varphi_0$ 的相移。一般情况下, 这种方法会同时在 $+1$ 和 -1 级信道中引入相移, 形成窄带透射峰。但是两个波长的光波的谐振腔都位于周期突变的位置, 由于模式竞争, 二者不能同时激射。不过通过 $\varphi(z)$ 的变化, 可以消除某一信道内的透射峰。

令 $\Delta P = P/4$, $\varphi_1 - \varphi_0 = \pi/2$, -1 级子光栅的相

移为 $\Delta\varphi_{-1} = 2\pi \frac{\Delta P}{P} + \varphi_1 - \varphi_0 = \pi$, $+1$ 级子光栅

$\Delta\varphi_{+1} = -2\pi \frac{\Delta P}{P} + \varphi_1 - \varphi_0 = 0$ 。所以, 通过同时改变采样周期和相位, 可以只在 -1 级子信道内引入相移。同理, 在 $z = z_1$ 位置同时改变采样周期和改变相位, 可以只在 $+1$ 级信道中引入相移, 如图 1 所示的结构, 横坐标表示光纤上不同的位置, 纵坐标表示相位的变化。图 2 为利用耦合模理论计算的该光栅的透射谱, 采样周期为 3.4 mm, 折射率调制为 6×10^{-5} , 长度为 9 cm, 分别在 4 cm 和 5 cm 处加入相位和采样周期的突变。

利用具有增益系数的耦合模理论^[9]对这种结构的激光器进行仿真,可以得到-1级和+1级信道对应波长的光强沿光纤的分布,如图3所示。不难看出,与-1级信道对应的光波 λ_{-1} 的光强集中在 z_0 附近,与+1级信道对应的光波 λ_{+1} 的光强集中在 z_1 附近。两个不同波长的光的谐振强度在空间上被分离。虽然两个波长的光的谐振腔仍然有一定的交叠,只要使相位突变的位置离得足够远,就能够克服模式竞争。

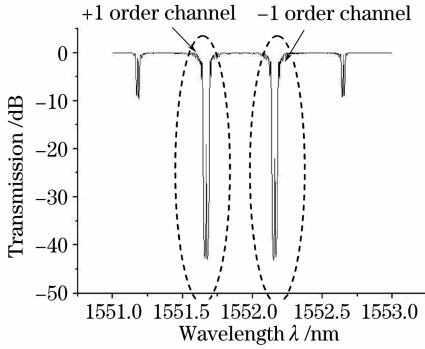


图 2 相位采样光栅的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of phase sampled grating

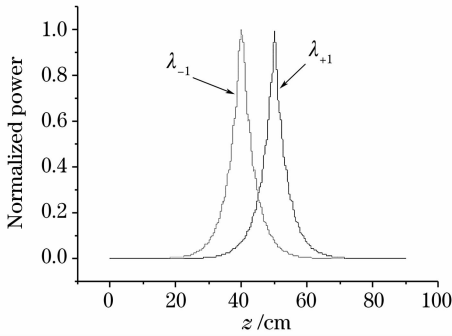


图 3 光功率分布

Fig. 3 Distribution of laser power

3 实验结果

利用准分子激光器和相位模板在掺铒光纤上写入上述结构的光纤光栅,利用压电陶瓷(PZT)移动模板,实现相位的变化。在掺铒光纤上写入一段 9 cm 长的光栅,在 4 cm 和 5 cm 处引入周期变化和相位突变,写入时间为 20 min。图 4 为用光谱仪测得的光栅透射谱,由于透射峰很窄,已经很难观察到。但是当抽运光功率为 100 mW 时,得到的激光光谱如图 5 所示。两个激光波长分别为 1551.09 nm 和 1551.55 nm,波长差约为 0.46 nm。值得注意的是,沿着光纤可以观察到绿色的激发态荧光。在采样周期变化的位置,荧光很强。说明两个波长的激光光

的光强分别集中在周期突变处,利用了不同空间位置的增益介质。图 6 为室温下,每 15 min 测试一次,连续测试 8 次的激光光谱。

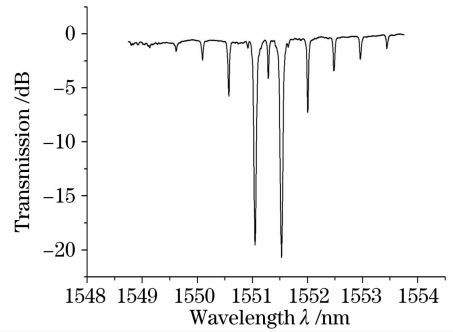


图 4 光纤激光器的透射谱测量结果

Fig. 4 Measured transmission spectrum of fiber laser

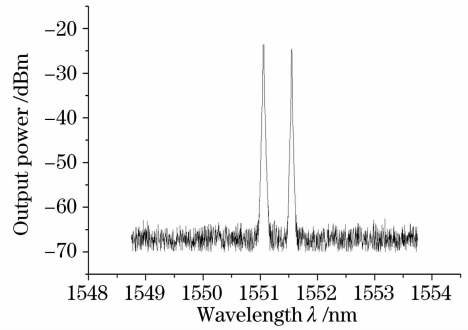


图 5 激光光谱测量结果

Fig. 5 Measured spectrum of the laser

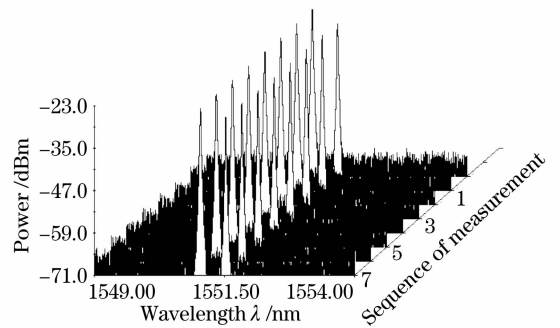


图 6 连续扫描激光光谱

Fig. 6 Continuously measured spectrum

在四段掺铒光纤上写入同样长度的光栅,写入时间分别为 20 min,18 min,16 min 和 11 min。图 7 为抽运功率为 100 mW 时,输出光功率与写入时间的关系。可见,输出光功率随着写入时间的减小而线性增加。但是写入时间过小会导致光栅很弱,透射损耗增大而无法激射。因此要控制光栅的强度,使得激光器激射的同时,获得较高的输出功率。另外,两个波长光功率存在一定的差异,与抽运光入射

方向, 激光光输出方向有关。

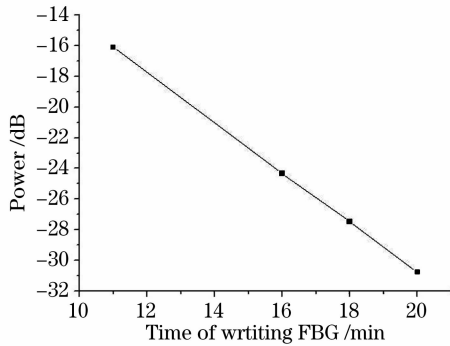


图 7 输出光功率与写入时间的关系

Fig. 7 Output power evolution versus time of writing FBG

4 结 论

提出了一种基于相位采样光栅的分布反馈双波长光纤激光器, 利用这种结构可以使不同波长的谐振腔在空间上分离, 不同波长的激光光利用不同位置的增益介质, 克服了由于增益介质的均匀加宽引起的模式竞争, 实现了双波长激光。通过实验, 在掺铒光纤上实现了波长差为 0.46nm 的双波长光纤激光器, 是目前具有最大波长差的分布反馈双波长光纤激光器。还对输出光功率与光栅强度的关系进行了分析, 从实验结果可以看出: 随着写入时间的增大, 光栅强度变大, 光栅对光的限制增加, 输出功率随之减小。输出的光功率与写入时间成反比关系。

参 考 文 献

- 1 Jong Chow, Graham Town, Ben Eggleton *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 60~62
- 2 Shilong Pan, Caiyun Lou. Multiwavelength pulse generation using an actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser based on distributed dispersion cavity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(4): 604~606
- 3 Feng Xinhuan, Sun Lei, Liu Yage *et al.*. Switchable and spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **32**(2): 145~148
冯新焕, 孙磊, 刘艳格等. 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 145~148
- 4 Liu Haitao, Chen Jianping, Chen Xiangfei *et al.*. Fabrication of distributed feedback Bragg fiber laser on regular Er-doped fiber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 873~876
刘海涛, 陈建平, 陈向飞等. 低掺杂铒纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 873~876
- 5 Jie Sun, Yitang Dai, Yejin Zhang *et al.*. Dual-wavelength DFB fiber laser based on unequalized phase shifts[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(23): 2493~2495
- 6 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Jie Sun *et al.*. Dual-wavelength DFB fiber laser based on a chirped structure and the equivalent phase shift method[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(18): 1964~1966
- 7 Dai Yitang. Research on the Thoery and Application of the Novel Fiber Bragg Gratings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 24~25
戴一堂. 新型光纤布拉格光栅的研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2004. 24~25
- 8 Zou Xihua, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Reflection peak wavelengths for sampled fiber Bragg gratings without chirp[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 971~976
邹喜华, 潘炜, 罗斌等. 非啁啾取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 971~976
- 9 Vibeke C. Lauridsen, Thomas sondergaard, Poul Varming. Design of distributed feedback fiber lasers[C], ECOC'97 Tech. Dig., Edinburgh, U. K., 1997. We. 1. C.