

文章编号: 0253-2239(2005)06-821-4

室温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的研究

孙国勇 瞿荣辉 杨 敬 王向朝 方祖捷

(中科院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要: 通过在线形谐振腔中引入一段缠绕在压电陶瓷上的单模光纤作为正弦相位调制器, 使得激射波长的损耗不固定, 抑制由于掺铒光纤的均匀展宽效应引起的模式竞争, 从而避免了在室温下不稳定的单波长激射, 实现了多波长掺铒光纤激光器的稳定输出。为了获得平坦的多波长输出, 在谐振腔里使用了一个损耗峰值位于 1530 nm 处的长周期光纤光栅, 以获得较为平坦的增益谱。通过两个 3 dB 耦合器制成的反射型梳状滤波器的滤波作用, 实验中观察到稳定的多波长激射, 相邻波长间隔约为 0.45 nm。中心 9 个波长的输出功率平坦度为 10 dB, 边模抑制比大于 25 dB。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 相位调制; 多波长

中图分类号: TN24 文献标识码: A

Study on Stable Multi-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser at Room Temperature

Sun Guoyong Qu Ronghui Yang Jing Wang Xiangzhao Fang Zujie

(Laboratory for Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: A sinusoidal phase modulator composed of a piece of single-mode fiber around a piezoelectric transducer is inserted in the linear resonant cavity, which makes the loss corresponding to different lasing lines uncertain, the mode competition owing to the homogeneous broaden line in erbium-doped fiber is suppressed and the unstable single-wavelength lasing at room temperature is eliminated. In order to achieve flat multi-wavelength output, a long-period fiber grating with loss peak at 1530 nm is used to obtain flat gain spectrum. The stable output from the multi-wavelength erbium-doped fiber laser is realized. Simultaneous multi-wavelength lasing is observed with 0.45 nm intervals defined by the reflective comb-like filter. In the meantime, there are 9 lasing lines in power differences less than 10 dB and the side-mode suppression ratio is higher than 25 dB.

Key words: laser technique; fiber laser; phase modulation; multi-wavelength

1 引 言

多波长掺铒光纤激光器在光纤传感、光学器件测量以及光纤通信系统中获得广泛应用。激射波长的增加、峰值输出功率平坦度的改善等问题一直是人们研究的方向。尤其是近年来随着密集波分复用器的广泛应用, 作为其中关键器件之一的 C 波段多波长掺铒光纤激光器更是研究的热点。

掺铒光纤在室温下是均匀展宽的增益介质^[1], 为了获得稳定的多波长激光输出, 必须抑制掺铒光纤的均匀展宽效应, 避免由于模式竞争和环境影响造成的不稳定的单波长激射。研究发现, 在低温下

掺铒光纤是非均匀展宽增益介质。将掺铒光纤浸入液氮(77K)中冷却^[2]可以实现稳定的多波长输出, 但这种方法会提高成本, 而且长期运行时系统缺乏稳定性。因此, 人们提出了几种在室温下实现稳定的多波长输出的方法^[3~5]。在环形谐振腔中引入一个声光移频器使得各自波长的损耗发生变化, 可抑制激光器不稳定的单波长激射^[6~8], 室温下获得了稳定的多波长输出。但是声光移频器具有高的插入损耗, 而且需要大约 100 MHz 的频率驱动源。本文通过在线形谐振腔中引入一段盘绕在压电陶瓷上的光纤作为正弦相位调制器^[9], 取代了插入损耗较大

作者简介: 孙国勇(1978~), 男, 湖北应城人, 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室博士研究生, 主要从事光纤激光器与光纤放大器方面的研究。E-mail: caad1437@sohu.com

收稿日期: 2004-06-22; 收到修改稿日期: 2004-11-01

的声光移频器,同样可以抑制由于掺铒光纤的均匀展宽效应引起的模式竞争,避免在室温情况下不稳定的单波长输出,实现了稳定的多波长激励。

2 实验装置

如图 1 所示,一段长度约为 12 m 的掺铒光纤(EDF)作为激光器的增益介质,利用 980 nm 的激光二极管(LD)通过 980 nm/1550 nm 的波分复用器(WDM)对掺铒光纤进行抽运。掺铒光纤在 1530 nm 处的自发辐射峰被一个长周期光纤光栅(LPG)损耗掉,以便在较宽的带宽范围内获得平坦的增益,有利于实现更多的波长同时激励。与此同时,有一段盘绕在压电陶瓷(PZT)上的长度约为 3.5 m 的单模光纤与长周期光纤光栅相连,压电陶瓷在小电压下工作,调制频率可达 50 kHz。给压电陶瓷加上正弦驱动电压后可用作相位调制器(具体见后面分析)。两个 3 dB 光纤耦合器 C_1 与 C_2 被连接成一个反射型梳状滤波器,作为线形谐振腔的一端。线形谐振腔的另一端为一个 30/70 的耦合器 C_3 制成的反射器。通过计算,其反射率为 84%,透射率为 16%。16% 的透射作为激光器的输出口。

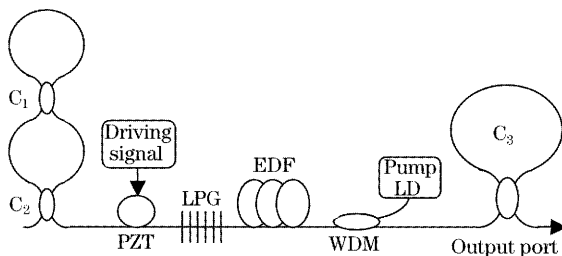


图 1 多波长掺铒光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the multiwavelength erbium-doped fiber laser

3 理论分析

通常情况下,由两个 3 dB 耦合器构成的马赫-曾德尔滤波器是透射型滤波器,如图 2 所示。从端口 1 入射的光,经过第一个 3 dB 耦合器 C_1 被分为

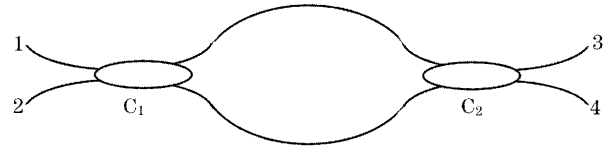


图 2 马赫-曾德尔滤波器

Fig. 2 Mach-Zehnder comb filter

两束强度相等的光,经过不同的相位延迟后在第二个 3 dB 耦合器 C_2 处发生干涉,从端口 1 到端口 3 的透射率 T_3 随波长 λ 的变化关系为

$$T_3 = \frac{1}{2}[1 - \cos(2n\pi\Delta L/\lambda)], \quad (1)$$

其中 n 为单模光纤的有效折射率, ΔL 为连接 C_1 与 C_2 的两臂的臂长差。从(1)式可以得出这种马赫-曾德尔滤波器的自由光谱范围为 $\Delta\lambda = \lambda^2/(n\Delta L)$ 。若将该透射型滤波器的 1 与 3 端口接入线形谐振腔,光在每次往返时会从端口 2 与 4 输出,增加了腔内损耗。为了减小腔内损耗,将端口 1 与 2 相连使其变为反射型滤波器,通过计算可以得到从端口 3 入射的光会被反射,反射率 R_3 随波长的变化关系为

$$R_3 = \frac{1}{2}[1 - \cos(4n\pi\Delta L/\lambda)], \quad (2)$$

可以看出,自由光谱范围为端口 1 与 2 未连接时的一半。该反射型滤波器在线形谐振腔中同时起到反射与滤波的作用,简化了结构。不仅如此,激光在腔内往返一次时仅通过端口 4 一次,降低了腔内损耗。

假设激光器运行时,从掺铒光纤入射进压电陶瓷的光信号为 $\exp(j\omega_0 t)$,其中 ω_0 为角频率, j 为复数虚因子。当周期性的正弦调制信号驱动压电陶瓷时,若光信号经过绕在压电陶瓷上的单模光纤,其相位将随时间按 $\phi(t) = \eta\cos(\omega_m t)$ 发生周期性的变化,其中 ω_m 为调制信号的角频率, η 为调制幅度。从反射型梳状滤波器返回的光再次经过压电陶瓷进入掺铒光纤中,此时的光信号为 $\sqrt{R_3}\exp\{j[\omega_0 t + 2\phi(t)]\}$ 。其中梳状滤波器引起的相位改变由于不随时间变化可以忽略,同理也可以忽略光第二次到达压电陶瓷时的传输延迟。 $\exp[j2\eta\cos(\omega_m t)]$ 可以展开为

$$\exp[j2\eta\cos(\omega_m t)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k J_k(2\eta)\exp(jk\omega_m t) = J_0(2\eta) + [jJ_1(2\eta)\exp(j\omega_m t) - J_2(2\eta)\exp(j2\omega_m t) + \dots] + [jJ_1(2\eta)\exp(-j\omega_m t) - J_2(2\eta)\exp(-j2\omega_m t) + \dots], \quad (3)$$

其中 $J_k(2\eta)$ 为第一类 k 阶贝塞尔函数, $|J_k(2\eta)|^2$ 是对应于角频率为 $\omega_0 \pm k\omega_m$ 的光强。通过如图 3 所示的

第一类 k 阶贝塞尔函数的特性可以看出, $|J_k(2\eta)|^2$ 的大小不仅与 k 有关,而且还随着调制幅度 η 的变化

呈起伏型的变化。由(3)式可知,正弦相位调制器使 J_0 对应波长的能量传递给旁瓣 J_1, J_2 等等对应的波长,使得每个激射的波长都没有固定的损耗,而且调制幅度直接决定了 J_0, J_1, J_2 等的相对大小,对于较高功率对应的波长经过压电陶瓷时,其功率损耗大,较低功率对应的波长经过压电陶瓷时,损耗相应较小,从而避免了对于均匀展宽介质来说,损耗固定导致的模式竞争在外界环境的影响下引起不稳定的激射波长,有利于在室温下获得稳定的多波长输出。

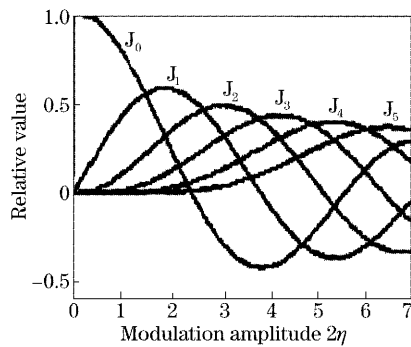


图3 不同调制幅度下每个频谱分量的相对大小

Fig. 3 Relative value of the different sidebands generated by the phase modulation versus modulation amplitude

4 实验结果与讨论

图4为反射型梳状滤波器的反射谱。虽然它们的精细度较小,但是易于制作,而且平坦的滤波特性与通过长周期光纤光栅增益平坦后的激光介质相结合有利于获得较多的激射波长以及平坦的多波长输出功率分布。

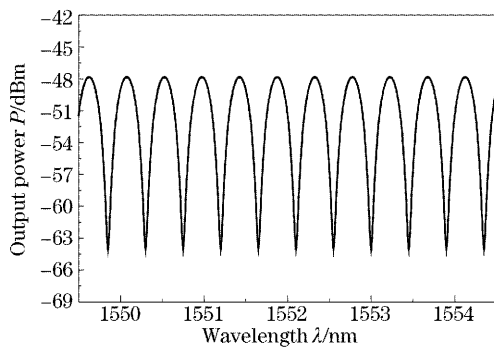


图4 反射型梳状滤波器的反射谱

Fig. 4 The reflected spectrum of the reflection comb filter

当压电陶瓷没有加上驱动电压时,在室温下由于掺铒光纤的均匀展宽效应引起的模式竞争,在外界环境的影响下会引起不稳定的激射,如图5所示,此时抽运功率为32 mW。

当加上幅度为15 V的正弦驱动电压时,实验发现,驱动电压信号的频率增加到5 kHz时,获得了稳定

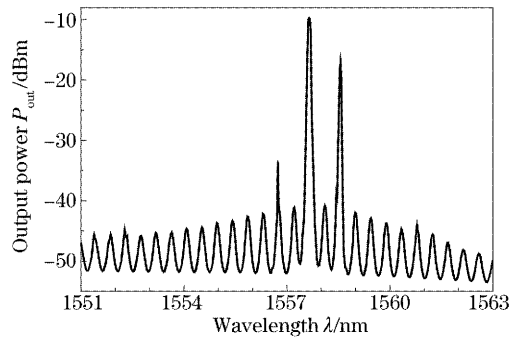


图5 未加驱动电压调制压电陶瓷时的输出光谱

Fig. 5 Laser output spectrum without modulating PZT

的多波长输出,如图6所示。当调制频率继续增加时,使得在谐振腔里运行的激射波长每次通过压电陶瓷时更快地偏离反射型梳状滤波器的反射峰值处,等效于增加腔内的损耗,提高了阈值抽运功率。阈值抽运功率的上升增加了小信号增益,降低了阈值时掺铒光纤的饱和度,减小了掺铒光纤对短波长的吸收,减少了单波长对长波长的抽运作用,使得短波长处的增益增加量大于长波长。

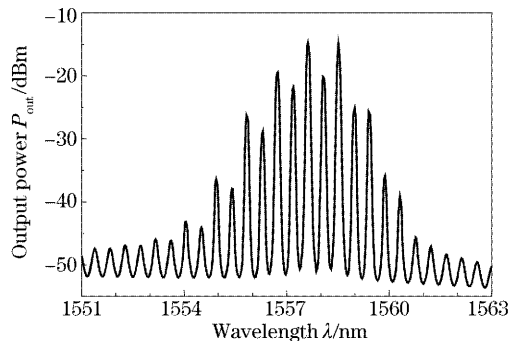


图6 加上驱动电压调制压电陶瓷时的输出光谱

Fig. 6 Output power spectrum with sinusoidal modulation feedback

图7为调制频率增加到20 kHz时的激光输出光

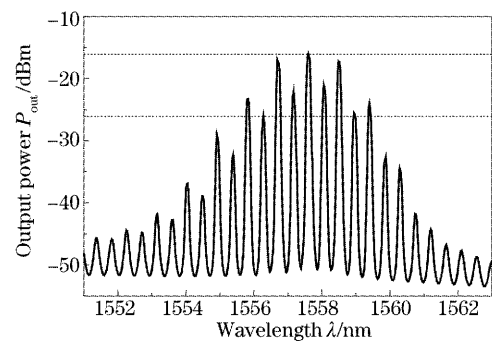


图7 加上幅度15 V,频率20 kHz的驱动电压调制压电陶瓷时的输出光谱

Fig. 7 Output spectrum with 20 kHz modulation frequency and 15 V modulation voltage

谱。比较图 6 与图 7 可以看出,短波长处的输出功率增加量高于长波长处的输出功率增加量,从而提高了输出光谱的平坦度。实验中获得了稳定的多波长激光,相邻波长间隔约为 0.45 nm。中心 9 个波长输出功率的平坦度为 10 dB,边模抑制比大于 25 dB。图 8 所示为连续 8 次扫描时输出光谱中三个激光波长的峰值功率,可以看出获得了稳定的激光输出。

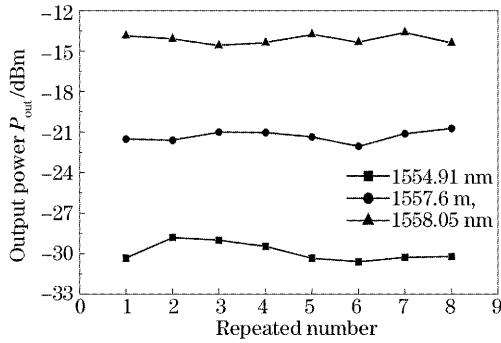


图 8 三个不同激光波长连续 8 次扫描时的输出峰值功率
Fig. 8 Output peak power of continuous eight times at three different lasing wavelengths

5 结 论

从理论上分析并从实验上获得了一种能在室温下实现稳定的多波长掺铒光纤激光器的方法。实现了多波长掺铒光纤激光器的稳定输出。通过反射型梳状滤波器的滤波作用,实验中观察到稳定的多波

长的同时激励。

参 考 文 献

- Goldstein E. L., Eskilden L., da Silva V. *et al.*. Inhomogeneously broadened fiber-amplifier cascades for transparent multiwavelength lightwave networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5): 782~790
- Chow J., Town G., Eggleton B. *et al.*. Multiwavelength generation of erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 60~62
- Hubner J., Varming P., Kristensen M. Five wavelength DFB fiber laser source for WDM systems[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(2): 139~140
- Abraham D., Nagar R., Ruberto M. N. *et al.*. Intracavity-diode-pumped erbium doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(19): 1830~1832
- Alistair J. Poustie, Neil Finlayson, Paul Harper. Multiwavelength fiber laser using a spatial mode beating filter[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10): 716~718
- Bellemare A., Karasek M., Rochette M. *et al.*. Room temperature multiwavelength erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 825~830
- Kim S. K., Chu M. J., Lee J. H. Wideband multiwavelength erbium-doped fiber ring laser with frequency shifted feedback[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**(): 291~302
- Slavik R., LaRochelle S., Karasek M. High-performance adjustable room temperature multiwavelength erbium-doped fiber ring laser in the C-band[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**(): 365~371
- Sun Guoyong, Qu Ronghui, Fang Zujie *et al.*. Study on multi wavelength erbium-doped fiber laser with sinusoidal phase modulator [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1293~1295 (in Chinese)
孙国勇, 瞿荣辉, 方祖捷 等. 正弦相位调制下多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1293~1295