

文章编号: 0253-2239(2003)11-1315-5

光纤光栅激光器激射波长的研究*

迟荣华 吕可诚 陈胜平 李乙钢 董孝义

(南开大学物理学院光电系, 天津 300071)

摘要: 一般认为,用光纤光栅作选频元件的光纤激光器,激射波长与光纤光栅中心反射波长一致,本文报道了不同的实验研究结果。通过细致的实验研究,发现光纤光栅激光器激射波长相对于光纤光栅中心反射波长有一定的偏移。激射波长可以出现在光栅中心反射波长的长波端,也可以出现在其短波端。对不同腔结构的掺镱、掺铒光纤光栅激光器的深入研究证明,谐振腔的各向异性对激光器的激射波长偏移起到决定性的作用,波长最大偏移量主要受限于光纤光栅的反射带宽。通过激光腔内的偏振控制器改变谐振腔的各向异性,可以在光纤光栅的反射带宽内控制激射波长的位置。

关键词: 导波和光纤光学; 光纤激光器; 光纤光栅; 波长偏移; 各向异性

中图分类号: TN248; TN25 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅因其选频好、线宽窄、插入损耗低和小巧灵活等优点在光纤通信、光纤传感和激光系统中有着重要的应用^[1~3]。掺稀土元素光纤,如掺铒(Er^{3+})、掺镱(Yb^{3+})光纤都拥有很宽的吸收谱和发射谱,采用光纤光栅作选频元件的 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 光纤激光器,可在大于 100 nm 带宽内获得任意波长的激光输出^[4,5]。

在波分复用通信系统中,对发射端光源的输出波长值和波长的漂移量有严格要求。光纤光栅作选频元件的光纤激光器可得到窄线宽的稳定激光^[6],是波分复用通信系统光源的较好选择。一般认为,激光器的激射波长与光纤光栅反射峰值波长是一致的。但是,梁建中等^[7]报导了掺镱光纤激光器中存在激射波长相对于光纤光栅中心反射波长的红移现象。我们在实验中也观察到激射波长偏移的现象,但是激射波长并不总是出现在光栅反射中心的长波端(红移),有时也出现在短波端(蓝移)。实验证明,光纤光栅激光器的偏移现象与腔的各向异性密切相关;偏移量的大小主要受限于所用光纤光栅的反射带宽。因此,为了得到窄线宽的稳定激光,光纤激光器必须选用极窄线宽的光纤光栅选频,而且要严格控制谐振腔的各向异性。

2 实 验

2.1 掺镱光纤光栅激光器激射波长的研究

1) 环形腔掺镱光纤激光器

实验装置如图 1 所示。抽运源为尾纤耦合输出的激光二极管,最大输出功率为 60 mW,中心输出波长为 976 nm。抽运光经由 980-1060 的波分复用器件耦合进入掺镱光纤,光纤长度为 6.5 m。输出耦合器对 1060 nm 波长的分束比为 45:55。所用光纤光栅的中心反射波长为 1060.49 nm,3 dB 线宽为 0.8 nm。实验中用 Advanced Q-8383 光谱仪(最小分辨力为 0.1 nm)观察激光的输出光谱。

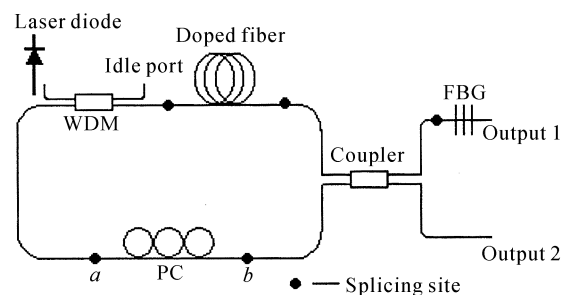


Fig. 1 Experimental setup of Yb^{3+} (Er^{3+})-doped fiber ring laser

实验观察表明,激光器的激射波长相对于光纤光栅的中心反射波长有一定的偏移,有时移至光栅中心反射波长的长波端(红移),有时则出现在短波端(蓝移)。为了详细研究产生激射波长偏移现象的规律和物理机制,在激光腔内加入一个偏振控制器(PC),它是由一段 10 m 长的 H1060 光纤缠绕制成

* 国家自然科学基金(61037010)资助课题。

E-mail: kecheng-lu@eyou.com

收稿日期:2002-06-24; 收到修改稿日期:2002-11-11

的三片式偏振控制器。该偏振控制器的三个绕纤盘上缠绕的光纤圈数分别构成 $1/4$ 、 $1/2$ 和 $1/4$ 波片^[8]。适当调节偏振控制器波片的相对夹角,可以得到十分丰富的激光波长偏移现象。

当偏振控制器处在某一状态,在抽运功率低于激光器的振荡阈值时,从端口 1 观察到的是光纤光栅的透射光谱,如图 2(a)右下角的曲线所示。可以看到,该 1060 nm 的光纤光栅除主透射谱外还存在一个很强的旁瓣。测量表明主透射谱的中心波长为 1060.49 nm。当抽运功率刚刚超过激光器的振荡阈值时,调节偏振控制器,由端口 1 探测到的光谱如图

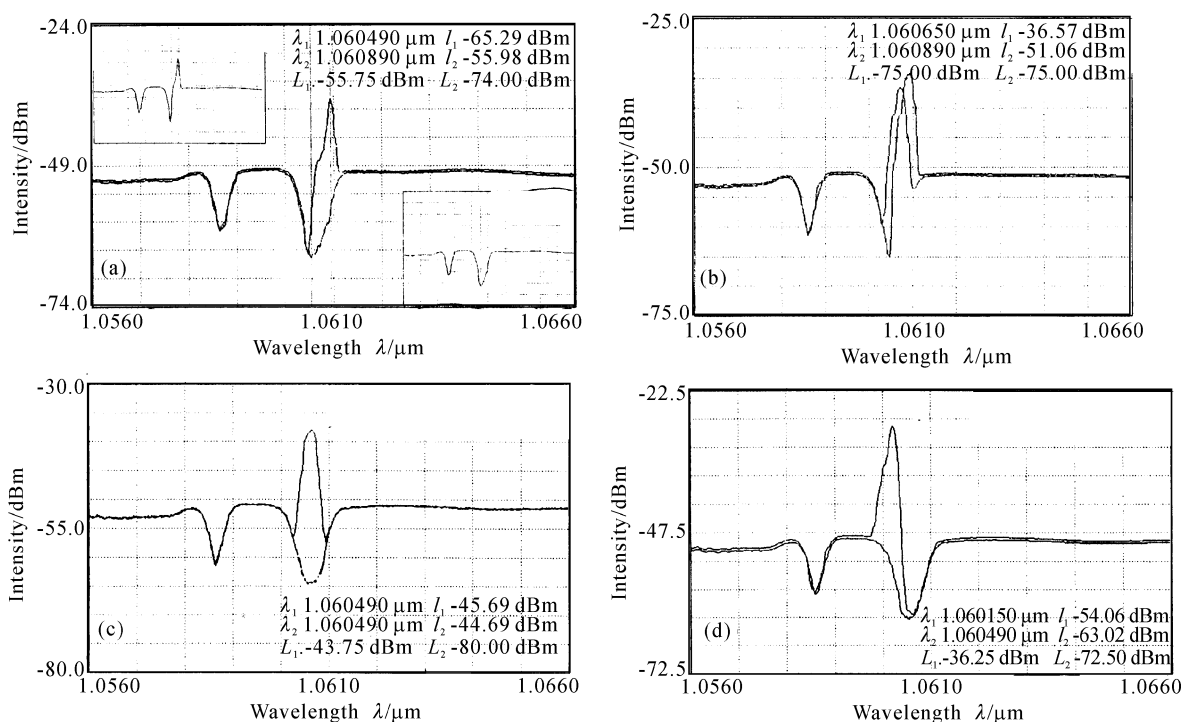


Fig. 2 Transition from red shift to blue shift by adjusting the polarization controller

保持偏振控制器的状态不变,从激光器的振荡阈值开始逐渐增加抽运功率,光纤光栅的透射光谱逐渐消失,但激光谱的中心波长保持不变,即激光器的激光波长相对于光纤光栅中心反射波长偏移量的大小与抽运功率的大小无关。因此,为了便于对比测量,以下的实验研究工作在激光阈值附近进行。

实验保持偏振控制器两边的 $1/4$ 波片方位不变,仅改变中间 $1/2$ 波片的相对角度,可观察到激光的峰值相对于光栅反射中心波长由红移变到蓝移或由蓝移变到红移的全过程。以红移变蓝移为例:先改变中间波片的角度找到红移最大偏移量,即图 2(a)主图所示,红移量为 0.4 nm。然后,改变偏振控制器中间波片的角度,使红移量逐渐减小至 0.16 nm 左右[见图 2(b),该图为两种红移谱图的合成图];继续沿此方向改变中间波

2(a)左上角曲线所示,此时激光还很微弱,所以光纤光栅的透射光谱和激光器的激光光谱同时出现在光谱图面上。因为激光的带宽小于光纤光栅的带宽,因此光纤光栅的主透射谱中只有一部分转换为激光光谱,激光峰值波长为 1060.89 nm。两条曲线的合成结果如图 2(a)主图所示。可以清楚地看到,激光波长相对于光纤光栅中心反射波长红移了。由于随着环境温度和激光器运转条件的变化,光纤光栅中心反射波长会有微小的改变,因此合成图的绘制和测量是在尽量保持环境温度和激光器的运转条件一致的情况下快速完成的。

片的角度,激光出现在光栅主透射峰附近[图 2(c)],此时激光峰值相对于光栅反射中心波长没有偏移;继续沿相同方向改变波片的角度,蓝移清晰可见;随着波片同方向调节角度的增大,蓝移量逐渐增大至最大值[图 2(d)],测得此时激光峰值波长为 1060.15 nm,相对于光栅中心反射波长蓝移了 0.34 nm。

实验还表明,当两边的波片处于合适的角度,精心调节中间波片的角度,以上过程可以逆转,即从蓝移最大→蓝移减小→无偏移→红移较小→红移最大。

2) 线形腔掺镱光纤激光器

实验装置简图示于图 3。由于掺镱光纤的增益很高,用反射率约 4% 的光纤端面作输出腔镜是合适的^[9]。研究方法与上节研究环形激光腔的方法完全相同。偏振控制器仍用 10 m 长的 H1060 光纤缠绕制成,

即偏振控制器处于增益介质外。保持两个 $1/4$ 波片的方位不变, 改变 $1/2$ 波片的角度, 可以得到激光激光波长相对于光纤光栅反射峰由红移至蓝移或由蓝移至红移的全过程[图 2(a)→图 2(d)或图 2(d)→图 2(a)]。与环形腔一样, 得到的最大红移偏移量和最大蓝移偏移量分别为 0.4 nm 和 0.34 nm 。

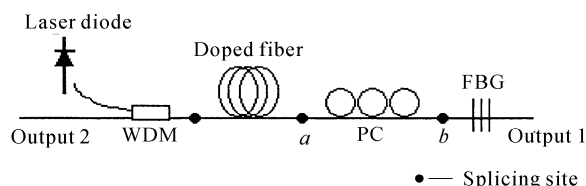


Fig. 3 Experimental setup of Yb^{3+} -doped linear cavity fiber laser

为了研究偏振控制器处于谐振腔内不同位置对“偏移现象”的影响, 实验中去掉绕在偏振控制器上的 10 m 长的 H1060 光纤, 并将实验装置图中 a 、 b 两点直接熔接在一起, 改用掺镱光纤绕制偏振控制器, 即偏振控制器在增益介质内。调整偏振控制器的相对夹角, 仍然可以观察到上述实验结果。

2.2 掺铒光纤激光器

1) 环形腔掺铒光纤激光器

实验装置基本框架与掺镱光纤激光器相同

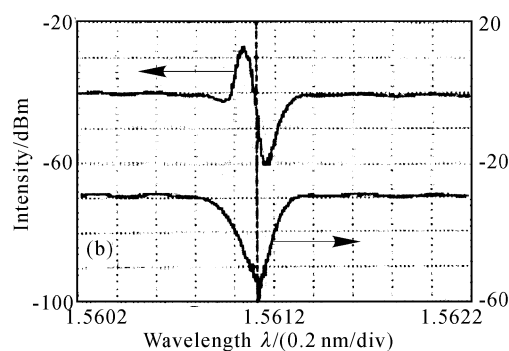
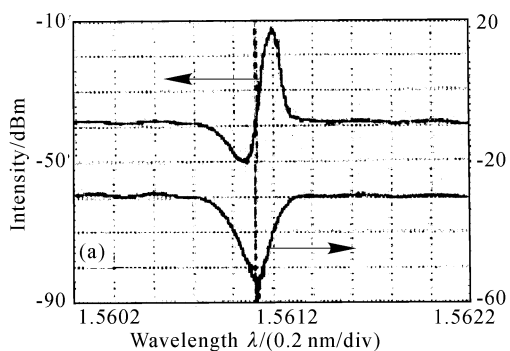


Fig. 4 Lasing wavelength shift with respect to λ_g of Er^{3+} -doped fiber grating laser with a grating bandwidth of 0.24 nm .

(a) Red shift of 0.08 nm ; (b) Blue shift of 0.07 nm

光纤光栅重复进行。改变偏振控制器三个波片的相对角度, 可得到激光波长相对于光栅中心反射波长的红移或蓝移现象。其变化规律仍然与上述相同。这里只给出最大偏移状态下的谱图(图 5), 测得的最大红移为 0.28 nm [图 5(a)], 最大蓝移为 0.38 nm [图 5(b)]。

2) 线形腔掺铒光纤激光器

(图 1)。只是增益光纤为掺铒光纤(长 5 m), 因此波分复用器、耦合器和光纤光栅也都与 1550 nm 波段(C 波段)对应, 耦合器对 1550 nm 波长的分光比为 $1:1$ 。实验中选用了两种不同带宽的光纤光栅, 第一个光纤光栅的中心反射波长和 3 dB 带宽分别为 1561.12 nm 和 0.24 nm ; 第二个光纤光栅的中心反射波长和 3 dB 带宽分别为 1548.72 nm 和 0.7 nm 。偏振控制器用 2 m 标准商用 1550 nm 单模光纤(G. 652)缠绕, 使其三个绕纤盘分别等效于 $1/4$ 、 $1/2$ 和 $1/4$ 波片^[8]。实验步骤与掺镱光纤激光器的研究基本相同。

实验先用 3 dB 带宽较窄(0.24 nm)的第一个光纤光栅进行。调节偏振控制器三个波片的相对角度从而改变腔内各向异性时, 从 1 端口用光谱仪可观察到激光波长相对于光栅中心反射波长的红移或蓝移现象, 其变化规律与掺镱光纤激光器相同。图 4 是最大红移[图 4(a)]和最大蓝移[图 4(b)]时的谱图(合成图)。测得最大红移偏移量为 0.08 nm , 最大蓝移偏移量为 0.07 nm 。因为实验中所用光谱仪的最小分辨力为 0.1 nm , 所以测得的最大红移偏移量 0.08 nm 和最大蓝移偏移量 0.07 nm 都是不准确的, 但是可以说最大偏移量在 0.1 nm 附近。

实验改用 3 dB 带宽较宽(0.7 nm)的第二个光

实验装置示于图 6, 掺铒光纤的长度仍为 5 m , 波分复用器件、光纤光栅也都与 1550 nm 波段(C 波段)对应。鉴于掺铒光纤的增益较小, 我们用光纤反射环镜^[10]作为激光谐振腔的宽带反射镜, 光纤光栅作为另一反射镜。用上述环形腔掺铒光纤激光器中使用过的两个光纤光栅分别进行实验研究, 观察到的“偏移现象”与上述环形腔结构的情况相同。

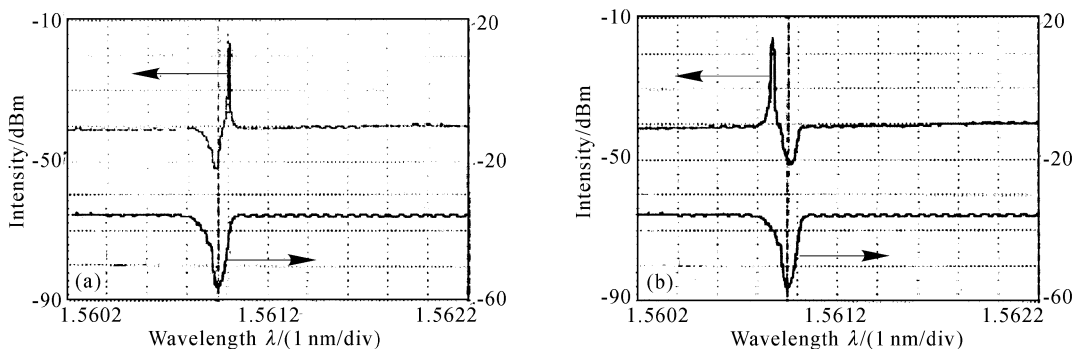


Fig. 5 Lasing wavelength shift with respect to λ_g of Er^{3+} -doped fiber grating laser with a grating bandwidth of 0.7 nm. (a) Red shift of 0.28 nm; (b) Blue shift of 0.38 nm

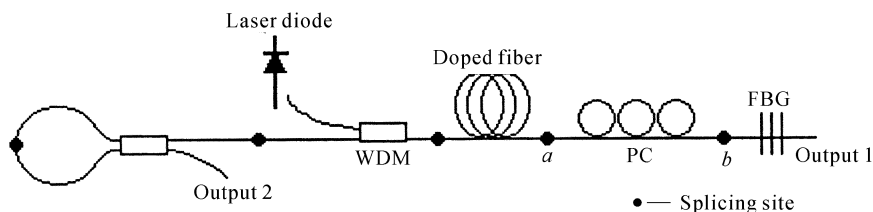


Fig. 6 Experimental setup of Er^{3+} -doped linear cavity fiber laser

3 实验结果分析

实验研究了光纤光栅作选频元件的掺镱、掺钕光纤激光器激光波长相对于光栅中心反射波长的偏移现象,得到了较丰富的实验资料。以下讨论几个有关问题。

1) 激光模式偏振方向的竞争效应是导致“偏移现象”的主要原因。

实验中用三片式偏振控制器改变激光腔的各向异性。调节其绕纤盘方位将会诱导光纤的双折射效应,使光纤中双折射轴主平面的方向发生变化,其效果与转动波片的偏振轴的方向是相同的。适当调节绕纤盘的相对角度,就可以获得任意方向的偏振光^[8]。尽管作为选频元件的光纤光栅的带宽只有 0.2~0.8 nm,但是,因为激光器的腔长在 10^1 m 量级,其相邻纵模的间隔量级为 10^{-14} m,即只有约 10^{-5} nm,因此在光纤光栅的带宽内仍可容纳许多个纵模,这就导致振荡模式的强烈竞争效应^[11~13]。实验中可以观察到这种模竞争效应,当偏振控制器的三个绕纤盘调节到某一特定位置,精心微调中间 1/2 波片的角度可出现两个或多个腔模同时振荡的瞬态情况。由于此时几个模式的损耗相近,竞争激烈,处于十分不稳定的状况,图 7 示出快速捕获的瞬态模谱。这种振荡模式竞争效应的最终结果只有一个模式稳定下来。

调节绕纤盘的角度,可使光栅反射带宽内不同模的损耗发生变化,在某一偏振状态下,处于光纤光栅反射谱内、某一损耗最小的模获得稳定振荡,激光某一特定的波长,如果该优势模的波长处于光纤光栅反射峰的长波端,即出现红移;改变绕纤盘的相对夹角,导致另一腔模获得稳定振荡,激光另一特定的波长,如果它处在光纤光栅反射峰的短波端,就出现蓝移现象。

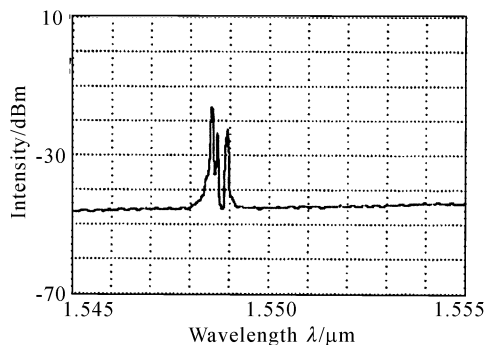


Fig. 7 Mode competition of fiber grating laser

从原理上讲,这种“偏移现象”还应该与增益介质(掺镱光纤、掺钕光纤)和激光器的腔长(纵模间隔)有关,这种关系反应在模竞争的过程中。实验中测量瞬态多模的振荡模的最小间隔在 0.1 nm 左右(图 7)。因此限于所用仪器的测量精度,本实验没有能够对这种关系作更深入的研究。根据现有的实验资料,可以得出结论,“偏移现象”主要由激光模式偏振方向的竞争效应引起。

2) 激光波长相对于光纤光栅中心反射波长的最大偏移量主要受限于光纤光栅的带宽。

实验中掺铒光纤激光器所用光栅 3 dB 带宽为 0.8 nm, 激光波长相对于光栅中心反射波长最大红移为 0.4 nm[图 2(a)], 最大蓝移为 0.34 nm[图 2(d)]。文献[7]报道所用光纤光栅 3 dB 带宽为 0.2 nm, 激光波长最大偏移量不超过 0.1 nm。我们实验中掺铒光纤激光器所用两个光纤光栅 3 dB 带宽分别为 0.24 nm 和 0.7 nm, 前者的实验结果是激光波长最大偏移为 0.1 nm 左右(图 4), 后者激光波长最大红移为 0.28 nm[图 5(a)], 最大蓝移为 0.38 nm[图 5(b)]。可以看到, 光纤光栅的带宽限制了激光波长相对于光栅中心反射波长的最大偏移量。实验数据还表明, 红移和蓝移并不对称, 除了测量误差的影响外, 主要是由于光栅写入过程的不完善导致光纤光栅透射谱(反射谱)相对于中心波长不对称造成的。

3) 实验采用线形腔和环形腔两种腔结构, 偏振控制器的位置处于增益介质内或增益介质外, 得到了完全相同的实验结果, 说明“波长偏移”现象及其规律与激光器的结构形式和偏振控制器在腔内的位置无关。

结束语 实验研究表明, 在光纤光栅作选频元件的光纤激光器中, 激光波长相对于光纤光栅中心反射波长有一定的偏移。这种偏移与激光谐振腔的各向异性密切相关, 最大偏移量主要受限于所用光纤光栅的带宽。因此, 在实际应用中, 为了得到波长较稳定的激光输出, 就必须使用窄线宽的光纤光栅选频, 同时要采取必要的措施控制激光器谐振腔的各向异性。

参 考 文 献

- 1 Guan Bai'ou, Liu Zhiguo, Tang Tao *et al.*. Study on multiplexed fiber Bragg grating temperature sensors. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9):1203~1206 (in Chinese)
- 2 Dong Xiaoyi, Jun Fahong, Sheng Qiuqin *et al.*. Optical fiber grating, all-fiber photonics device and its integration in the optical communication. *Opt. Commun. Technol.* (光通信技术), 1996, **20**(1):6~12 (in Chinese)
- 3 Hill K O, Metlz G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1263~1276
- 4 Liaw Shien-Kuei, Lee Chien-Chung, Ho Keang-Po *et al.*. Power equalized wavelength-selective fiber lasers using fiber Bragg grating. *Opt. Commun.*, 1998, **155**(4~6):255~259
- 5 Pask H M, Carman R J, Hanna D C *et al.*. Ytterbium-doped silica fiber lasers: Versatile sources for the 1~1.2 mm region. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1995, **1**(1):2~13
- 6 Guo Yubin, Kikuchi Kazuro. Er³⁺-doped fiber laser based on fiber Bragg grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(7):581~585 (in Chinese)
- 7 Liang Jianzhong, Hu Yimei, Sun Diechi *et al.*. Lasing wavelength red-shifted from reflection center of a Yb doped fiber grating laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):976~979 (in Chinese)
- 8 Yao Yi, Shi Kun, Lu Weidong *et al.*. In-line single mode fiber polarization controller. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(5):636~640 (in Chinese)
- 9 Fu Chengpeng, Li Yigang, Liu Weiwei *et al.*. The research on conversion efficiency of double-clad fiber laser. *Proc. SPIE*, 2000, **4225**:160~163
- 10 Mortimore D B. Fiber loop reflectors. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7):1217~1224
- 11 Lu Kecheng, Ba Enxu, Zhang Chunping. Competition effect of polarization in two-mode internal mirror He-Ne lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1984, **4**(1):44~49 (in Chinese)

Research on Lasing Wavelength of Fiber Grating Laser

Chi Ronghua Lü Kecheng Chen Shengping Li Yigang Dong Xiaoyi
(Department of Photo-Electronic Information Science, Institute of Physics,
Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 24 June 2002; revised 11 November 2002)

Abstract: In the research work of fiber Bragg grating (FBG) based lasers, it was found out that the lasing light shifted away from the Bragg wavelength of the FBG. The lasing wavelength can either be longer or shorter than the Bragg wavelength of the FBG. Further study on erbium- and ytterbium-doped fiber grating lasers with both ring and linear cavity has shown that, the phenomenon of wavelength shift was caused by the anisotropy of the laser cavity. The maximum wavelength shifting value was limited mostly by the bandwidth of the fiber grating. Through the online polarization controller, the lasing wavelength can be controlled within the bandwidth of the FBG.

Key words: fiber optics; fiber laser; fiber Bragg grating; wavelength shift; anisotropy