

文章编号: 0253-2239(2003)07-0828-6

非对称相移分布反馈光纤激光器的 双向输出波长特性*

范 薇 陈 柏 陈嘉琳 乔启全 李学春 陈兰荣 陈绍和 林尊琪

(高功率激光物理国家实验室,中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘要: 为了得到单频输出的光纤激光器,常采用带有相移的分布反馈结构,但当耦合强度比较大时,基模的激光功率将集中在相移区,这时,如果相移区太偏离光纤光栅的中心位置,由于空间烧孔效应,相移分布反馈激光器的两端会出现不同的输出波长特性。在接近于相移区的一端,输出为在布拉格波长的基模,而在另一端,输出为位于布拉格波长两侧的一阶模。给出了理论分析和相应的实验结果。

关键词: 光纤激光器;相移分布反馈;空间烧孔;非对称
中图分类号: TN248 文献标识码: A

1 引 言

窄带、单频激光光源在光通信、传感、光谱学等领域有着广泛的应用。而光纤激光器同传统的半导体激光器相比,具有与光纤很好的兼容性、极窄的线宽、可提供高输出功率、以及可以比较精确地得到所需要的波长等许多优越性。利用光纤激光器实现单模运转,有几种方案:一是用环形激光器^[1~3],二是用直腔^[4],利用光纤光栅作选频元件,即分布布拉格反射光纤激光器,这种方案简单且可得到稳定性较好的单频输出;而相移分布反馈激光器(PS-DFB)只要一个光栅即可实现光反馈和波长选择,并且避免了有源光纤和无源光纤光栅的熔接损耗^[5]。

相移分布反馈激光器的制作的关键在于相移的产生,但无论是采用遮挡法、两次曝光法,还是直接采用相移掩模板法,都涉及到相移区在光纤光栅中的位置的问题。本文从理论和实验上发现,相移区的位置对激光器的输出特性有很大的影响。当相移区在光纤光栅的中央位置时,称之为对称分布的相移分布反馈激光器;当相移区未制作在光纤光栅的中心位置时,称之为非对称相移分布反馈激光器。对于后者,激光器的两端会表现出不同的输出波长特性。通过理论分析认为,当光纤光栅的耦合强度比较大时,基模的光功率会集中在光纤光栅的相移

区,由于空间烧孔效应,基模只能消耗相移区附近的反转粒子数,因而在其他区域,高阶模可消耗基模未消耗完的粒子数而超过阈值,从而和基模一起振荡。但由于基模的输出具有方向选择性(即在接近于相移区的输出端的输出功率比远离相移区的输出端的输出功率要高^[9]),高阶模的输出也会有和基模恰好相反的方向选择性,这就造成了激光器的两端表现出了不同的输出波长特性。本文将对这一现象进行理论分析,并给出相应的实验结果。

2 理论分析

由于在阈值以下的光栅光谱的透射峰或反射峰所对应的波长和根据分布反馈激光器的阈值理论计算得到的模式的波长相吻合^[6],所以首先分析在阈值以下的相移分布反馈激光器的光谱特性。

这里所用的方法为传输矩阵法,具有增益的均匀光栅的基本耦合方程为^[7]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA}{dz} &= k \exp[i(2\Delta\beta z - \phi)]B + gA, \\ \frac{dB}{dz} &= k \exp[-i(2\Delta\beta z - \phi)]A - gB, \\ \Delta\beta &= \beta - \beta_B = \beta - \pi/\Lambda, \\ k &= \pi\delta n/\lambda_B, \end{aligned} \right\} (1)$$

这里 $\Delta\beta$ 是 z 方向上的传播常量 β 与光栅周期 Λ 的布拉格频率 (π/Λ) 的差。 k 是前向波与后向波的耦合常数, δn 为光纤光栅折射率的调制幅度, g 是单位长度的增益, ϕ 是光栅的相位。

从耦合波方程(1)式,可得到周期分布反馈的 F

* 国家高技术 863-416 主题资助课题。

E-mail: fanweil@siom.ac.cn

收稿日期: 2002-04-25; 收到修改稿日期: 2002-08-15

矩阵,在周期波导的情况下, k 、 $\Delta\beta$ 和 g 都与 z 无关。令前向传输波和后向传输波的复振幅分别为 $A = E_A$ 和 $B = E_B$ 。假设在 $z = 0$ 和 $z = L$ 处(L 为光纤光栅的长度),前向波和后向波是连续的,利用边界条件,则 $E_A(0)$ 、 $E_B(0)$ 和 $E_A(L)$ 、 $E_B(L)$ 的传输矩阵 F 为

$$\begin{bmatrix} 1 \\ E_B(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A(L) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

我们把整个光纤分成 N 段, $L = \sum_{j=1}^N \delta l_j$,

$$\begin{bmatrix} 1 \\ E_B(0) \end{bmatrix} = [F^N] \cdots [F^j] \cdots [F^1] \begin{bmatrix} E_A(L) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中

$$F_{11}^i = [\cosh(\gamma\delta l_j) + i\Delta\beta' L \sinh(\gamma\delta l_j)/(\gamma L)] \exp(i\Delta\beta\delta l_j),$$

$$F_{12}^i = -kL \sinh(\gamma\delta l_j) \exp[-i(\Delta\beta\delta l_j + \phi_j)]/(\gamma L),$$

$$F_{21}^i = -kL \sinh(\gamma\delta l_j) \exp[i(\Delta\beta\delta l_j + \phi_j)]/(\gamma L),$$

$$F_{22}^i = [\cosh(\gamma\delta l_j) - i\Delta\beta' L \sinh(\gamma\delta l_j)/(\gamma L)] \exp(-i\Delta\beta\delta l_j),$$

这里,

$$\gamma^2 = k^2 - (\Delta\beta')^2,$$

$$\Delta\beta' = \Delta\beta + ig,$$

$$\Gamma_1 = i\Delta\beta - \gamma,$$

$$\Gamma_2 = i\Delta\beta + \gamma,$$

对相位连续的光栅,

$$\phi_j = \phi_{j-1} + 2\beta_B \delta l_{j-1}.$$

相移光栅可看作是由两段周期光栅组成的,这两段光栅之间的相位是不连续的,它们之间的相移为

$$\Delta\phi_j = \phi_j - \phi_{j-1} - 2\beta_B \delta l_{j-1}, \quad (4)$$

光纤光栅的反射率 R 和透射率 T 分别为

$$R = |1/F_{11}|^2, \quad T = |F_{21}/F_{11}|^2. \quad (5)$$

图 1 所示为在不同的增益条件下, π 相移($\Delta\phi = \pi$)光纤光栅的归一化的透射谱(虚线)和反射谱(实线),这里耦合强度 $kL = 5.5$ 。

图 1(a)所示为当增益为零时,相移区位置在光纤光栅的 $0.35L$ ($Z_p = 0.35L$)或 $0.65L$ 处($Z_p = 0.65L$)时,光纤光栅的归一化的透射谱和反射谱(当增益为零时,光纤光栅的透射光谱和反射光谱是对称的)。

图 1(b)~图 1(e)给出了在增益不为零的条件下,相移区在光纤光栅的 $0.65L$ 和 $0.35L$ 处时,光纤光栅的反射谱和透射谱。表格 1 总结了在这两种情况下,光纤光栅的透射谱和反射谱的输出波长特征。

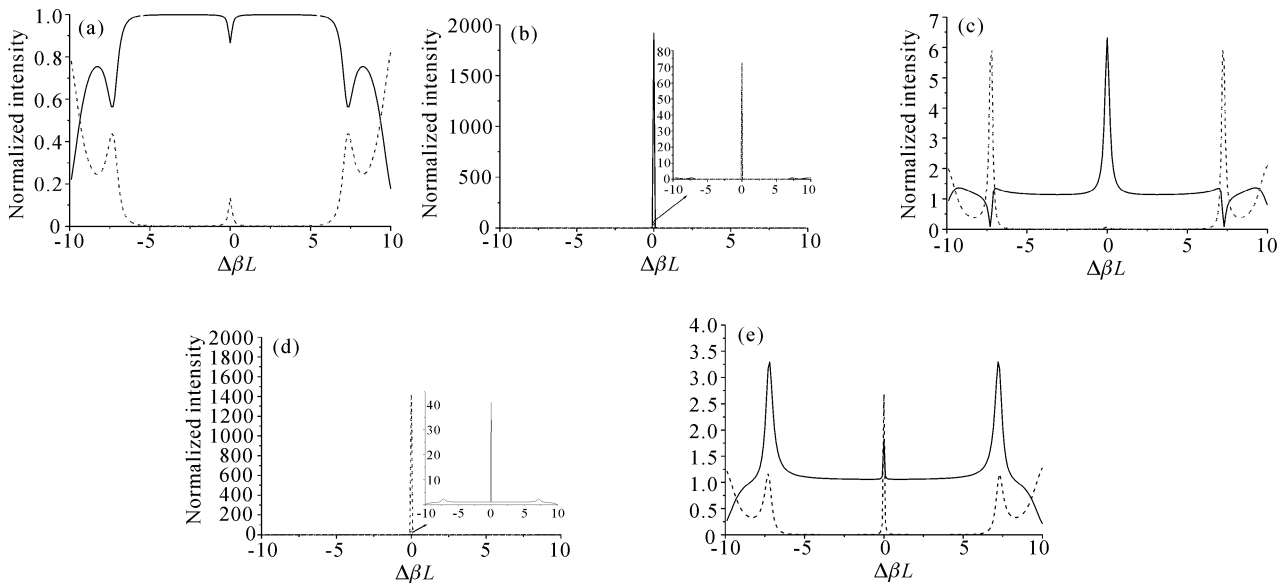


Fig. 1 The transmission (dash line) and reflection (solid line) spectra of the fiber grating with the different gain and different phase shift position. (a) $gL=0$; (b) $gL=0.12$, $Z_p=0.35L$; (c) $gL=0.3$, $Z_p=0.35L$; (d) $gL=0.12$, $Z_p=0.65L$; (e) $gL=0.15$, $Z_p=0.65L$

可以看出,当相移区在光纤光栅的 $0.35L$ (也就是接近于抽运端),增益为 0.12 时如图 1(b)所示,无论是透射谱还是反射谱,在布拉格波长处都出现了一个峰,这个峰恰好对应于相移分布反馈激光器的具有最低阈值的基模,当达到阈值时,这个峰将趋近于无穷大。根据增益阈值公式计算^[8],得到的基模的增益阈值为 0.1212 。将增益增大到 0.3 时如

Table 1 The peak wavelength characteristics of transmission and reflection spectrum with different gain and different phase shift position

Position of P-S region	Gain	The peak wavelength characteristics of transmission spectrum	The peak wavelength characteristics of reflection spectrum
$0.35L$	0.12	Located at the Bragg wavelength	Located at the Bragg wavelength
	0.30	On either side of the Bragg wavelength	Located at the Bragg wavelength
$0.65L$	0.12	Located at the Bragg wavelength	Located at the Bragg wavelength
	0.15	Located at the Bragg wavelength	On either side of the Bragg wavelength

同样,当相移区在光纤光栅的 $0.65L$ 处(也就是远离于抽运端),增益为 0.12 时如图 1(d)所示,无论是透射谱还是反射谱,在布拉格波长处都出现了一个峰,这个峰也对应于相移分布反馈激光器的基模,同样根据增益阈值公式计算^[8],得到的基模的增益阈值为 0.1255 。这个值略大于相移区在光纤光栅的 $0.35L$ 时的情况。将增益增加到 0.15 如图 1(e)所示,在光纤光栅的透射谱中,仍然是在布拉格波长处的峰占绝对优势,而在它的反射谱中,对称的两侧出现了两个峰,这两个峰对应于 ± 1 阶高阶模。而对于同样的增益 0.15 ,当相移区在光纤光栅的 $0.35L$ 处时,无论是透射谱还是反射谱,都是处于布拉格波长处的峰占绝对优势。

对于阈值以下的光栅光谱的透射谱和反射谱的分析总结如下:1)当相移区在远离于抽运端($0.65L$)比相移区在接近于抽运端时($0.35L$),基模的增益阈值略有增大,而对应于 ± 1 阶模的两个峰的出现及其占主要优势所要求的增益有所减小。2)无论从远离于相移区抽运,还是从接近于相移区抽运,在远离相移区一侧的输出端,对应于 ± 1 阶高阶模的两个边峰的出现及占主要优势所要求的增益比接近于相移区一侧的输出端要小。也就是说,对于非对称相移分布反馈激光器, ± 1 阶高阶模具有方向选择性输出特性。

已经知道,对于相移分布反馈激光器,基模的输出特性具有方向选择性,在接近于相移区一侧的基模的输出要比远离于相移区一侧的输出大^[9]。图 2 所示的为当相移区接近于抽运端($0.35L$,实线)和远离于抽运端($0.65L$,虚线)时,相移分布反馈激光

器(图 1(c)所示,在光纤光栅的透射谱中,布拉格波长处的峰几近消失,而在它对称的两侧出现了两个峰,这两个峰对应于最接近于基模的 1 阶高阶模;而在反射谱中,仍然只有布拉格波长处的一个峰。继续增大增益,在透射谱和反射谱中,在布拉格波长对称的两侧,都会出现两个峰。

器的信号光基模的功率在腔中的分布。其中所用参量为:耦合强度 $kL=5.5$,布拉格波长为 1053 nm ,抽运光波长为 980 nm ,掺镱(Yb^{3+})光纤在抽运波长的吸收截面和发射截面都为 $600 \times 10^{-27}\text{ m}^2$,吸收系数为 50 dB/m ,在信号光波长的吸收截面和发射截面分别为 $15 \times 10^{-27}\text{ m}^2$ 和 $420 \times 10^{-27}\text{ m}^2$,抽运功率为 80 mW 。计算方法如文献^[10]。如图中所示,在这两种情况下,信号光基模的功率在腔中的分布并不对称,且对于远离于相移区的情况,其在腔中的最大功率比抽运端接近于相移区时的最大功率要小,这是因为由于抽运光在腔中为指数衰减,在相移区远离于抽运端的情况下,它所获得的实际的抽运功率比相移区接近于抽运端时的要小,因而所获得的光子数也越少的缘故^[11]。可以看出,无论相移区是在接近于抽运端($0.35L$)还是在远离于抽运端($0.65L$),在接近于相移区的那个端口输出的基模

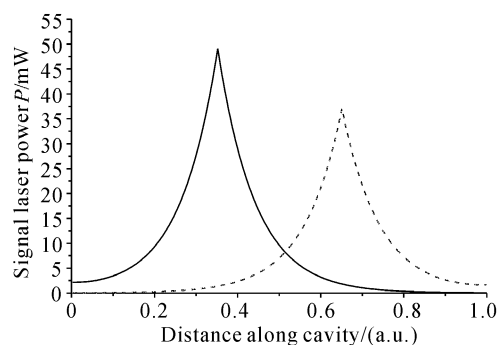


Fig. 2 Power distribution inside the fiber laser along the cavity. Solid line: the phase shift position is at $0.35L$; dashed line: the phase shift position is at $0.65L$

的光功率都要大于远离于相移区的那个端口。

图 3 所示为相移区在光纤光栅的 $0.35L$ (实线) 和 $0.65L$ (虚线) 处时的基模所消耗的粒子数反转与在光纤光栅中的位置的关系。可以看出,基模只能消耗相移区附近的反转粒子数,在其他位置,反转粒子数远没有被耗尽,在这些位置上,反转粒子数能够继续增长^[11],于是,开始时具有较低增益的高阶模利用了基模未曾抽空的那些区域的反转粒子数,而获得足够的增益来达到阈值。因此高阶模可以和基模一样振荡。但是,恰恰和基模相反,由于它所消耗的反转粒子数主要集中于远离相移区的那一侧,因而在远离于相移区那一端的输出功率要大于接近于相移区那一端的输出功率。

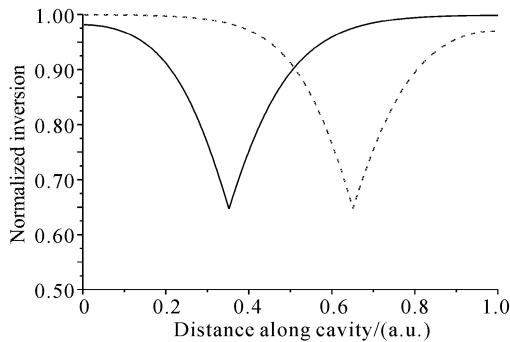


Fig. 3 Normalized inversion vs the distance along the cavity. Solid line: the phase shift position is at $0.35L$; dashed line: the phase shift position is at $0.65L$

对于非对称相移分布反馈激光器,两侧输出的功率不同的原因也有可能是由于在相移区两侧,由于光纤的长度不同,而造成两端的反射率不同,因而在接近于相移区一侧的输出功率较大,但如果是这样,对高阶模来说,也应该是在接近于相移区一侧的输出功率较大。从下面的实验结果看出,事实并非如此。

3 实 验

实验所用的光纤是武汉邮电科学研究院研制的。光纤参量如下:光纤芯径为 $6.10 \mu\text{m}$,截止波长为 $907 \mu\text{m}$ 。相移光纤光栅是用 193 nm 的准分子激光,采用相位掩模法及二次曝光法,在 35 cm 长的掺 Yb^{3+} 光纤上刻写的,光栅刻在整个光纤的中间,光栅周期为 724 nm ,长度为 10 cm ,相移区的位置在离 A 端 6.5 cm 处,除相移区外,光纤光栅为周期均匀分布。

实验所用抽运源为波长为 980 nm 的带尾纤的半导体激光器(LD),抽运光经波分复用器(WDM)进入分布反馈光纤激光器(DFB),实验装置如图 4 所示。

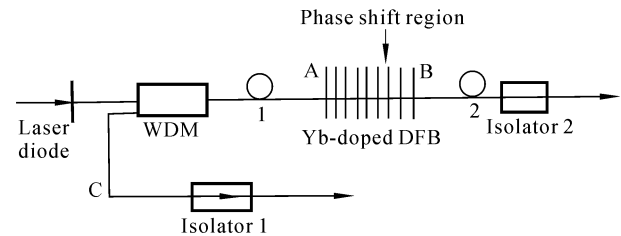


Fig. 4 Experimental setup. 1, 2: 12.5 cm Yb^{3+} -doped fiber; A, B: the 10 cm Yb^{3+} -doped phase-shifted DFB fiber, the phase shift region is 3.5 cm away from port B

首先从 A 端抽运。为减小端面反射,B 端和 C 端均接隔离器输出。隔离度均大于 20 dB 。先测 B 端的输出波长情况,在抽运源的电流为 70 mA 时,开始有激光输出,激光波长为布拉格波长 1052.93 nm 。继续增大抽运光强,直到最大 139 mA 时,激光输出都为 1052.93 nm ,如光谱图图 5(a)虚线所示。

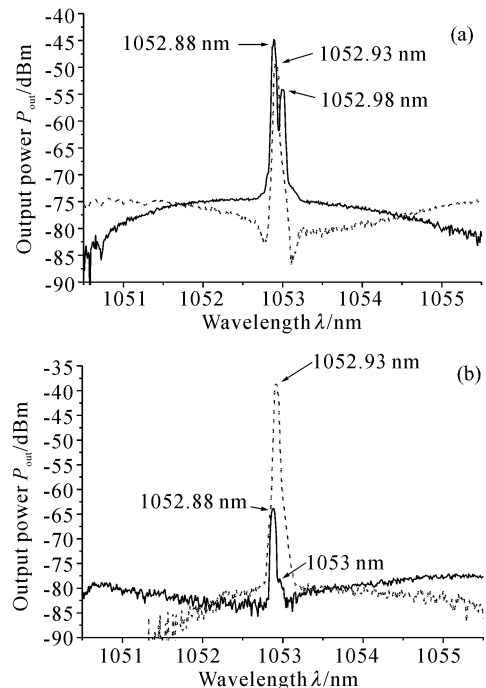


Fig. 5 (a) The output spectrum when pumped from A (the output from B: dashed line; the output from A: solid line); (b) The output spectrum when pumped from B (the output from B: dashed line; the output from A: solid line)

然后我们测 C 端输出波长情况(也就是 A 端输

出情况),抽运源为 70 mA 时,C 端开始有激光输出,激光波长为 1052.88 nm,当增大到 80 mA 时,1052.88 nm 和 1052.98 nm 的模同时起振,这两个模恰好分布在 1052.93 nm 的两侧,继续增大抽运功率,这两个模都同时存在。如光谱图图 5(a)实线所示。但未见在布拉格波长处的模。

由于我们在 B 端和 C 端都加了隔离器,因此并不存在菲涅耳反射现象,而都是分布反馈激光器本身发出的激光。

换一个方向抽运分布反馈激光器,即从 B 端抽运。先测 A 端输出情况,这时,当抽运源的电流小于 110 mA 时,未见到激光输出,当抽运电流为 110 mA 时,A 端输出 1052.88 nm 的激光,增大抽运源的电流,直到 139 mA 时,1053 nm 的激光也开始起振,但比 1052.88 nm 的激光弱的多,如光谱图图 5(b)实线所示(这里,阈值为 110 mA,远高于 70 mA,与表 1 中,增益阈值 0.3 大于 0.12 是一致的)。

在 C 端测激光输出(也就是 B 端输出情况),在抽运功率为 60 mA 时,无激光输出,抽运功率为 70 mA 时,激光输出为 1052.93 nm,继续增大抽运功率,激光输出波长不变。如光谱图图 5(b)虚线所示。

以上实验结果总结于表 2。

Table 2 Bidirectional output wavelength of the FB fiber laser with different pump port

Unit: nm

Pump port	A(0.65L)		B(0.35L)	
	Output A	Output B	Output A	Output B
70 mA	1052.88	1052.93	No laser	1052.93
80 mA	1052.88 1052.98	1052.93	No laser	1052.93
110 mA	1052.88 1052.98	1052.93	1052.88	1052.93
139 mA	1052.88 1052.98	1052.93	1052.88 1053.00	1052.93

总结以上实验,该分布反馈激光器的两端输出波长是不一致的,在接近于相移区的一端(B 端)输出的是布拉格波长,即激光器的基模;而另一端(A 端)输出的是在布拉格波长的两侧,即激光器的最低阶高阶模,其中短波方向的模首先起振。这一现象并不因为抽运方向的改变而有所改变。而且,从 A 端抽运,A 端输出的基模与 B 端输出的高阶模的增益阈值差比从 B 端抽运的增益阈值差要小。在 B 端抽运,A 端输出激光的增益阈值要远高于 B 端的

增益阈值,这和表 1 所示的理论结果是一致的。

我们还发现,在远离于相移区的一端,短波方向的模总是先达到阈值而起振。激光器总是在短波方向起振的原因有两个;一是由于相移的大小可能不是严格意义上的 π 相移,而使得在布拉格波长两侧的高阶模具有不同的增益阈值所致^①;二是即使是严格意义上的相移,由于对掺 Yb³⁺ 光纤,在 1053 nm 附近,短波方向的发射截面要大于长波方向的发射截面,因此即使两个高阶模具有相同的增益阈值,由于他们的发射截面不同,而使得它们所获得的增益也不同,具有较大的发射截面的波长可获得更大的增益而首先达到增益阈值,从而首先起振。

结论 本文首先从理论上分析了当相移分布反馈激光器为非对称分布时,在低于阈值时,光栅的光谱行为,从光栅的光谱可以得出这样的结论:当相移区在远离于抽运端时(0.65L), ± 1 高阶模所要求的增益阈值要比相移区在接近于抽运端时(0.35L)小。除此之外,无论从远离于相移点抽运,还是从接近于相移点抽运,在远离相移区一侧的输出端, ± 1 阶高阶模比接近于相移区一侧的输出端更容易起振。

其次,根据分布反馈激光器基模的光功率在腔中的分布,以及基模所消耗的反转粒子数在腔中的分布,认为在非对称分布反馈激光器中,由于空间烧孔效应,在分布反馈激光器两端会得到不同的模式输出,在接近于相移区一端,输出主要为位于布拉格波长的基模,而在另一端,输出主要为位于布拉格波长两侧的一阶高阶模,实验和理论得出的结果相符合。

参 考 文 献

- 1 Cheng Y, Kringlebotn J T, Loh Y H *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fibre loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(4):875~877
- 2 Guy M J, Taylor J R, Kashyap R. Single-frequency erbium fibre ring laser with intracavity phase-shifted fibre Bragg grating narrowband filter. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(22):1924~1925

^① 对于相移分布反馈激光器,当相移恰好为 π 时,位于布拉格波长的基模具有最低的增益阈值,对称的分布在布拉格波长两侧的高阶模具有较高的增益阈值,阶次越高,增益阈值越大,同阶次的对称分布在布拉格波长两侧的模具有相同的增益阈值;当相移偏离 π 时,基模所对应的波长将偏离布拉格波长,而同阶次的高阶模将不再具有相同的增益阈值^[8]。

- 3 Demeis R. Tunable gratings stabilize fiber ring laser. *Laser Focus World*, December 1996. 27~29
- 4 Zyskind J L, Mizrahi V, DiGionvanni D J *et al.*. Short single frequency Erbium-doped fiber laser. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15):1385~1387
- 5 Asseh A, Storoy H, Kringelbotn J T *et al.*. 10 cm Yb DFB fiber laser with permanent phase shifted grating. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(12):969~970
- 6 Soda H, Imai H. Analysis of spectrum behavior below the threshold DFB lasers. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(5):637~641
- 7 Yamadam, Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slabwaveguide via a fundamental matrix approach. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(16):3474~3478
- 8 Fan Wei, Li Xuechun, Chen Bai *et al.*. Gain threshold of phase-shifted fiber distributed feedback lasers. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2002, **31**(2):220~222 (in Chinese)
- 9 Masashi Usami, Shigeyuki Akiba, Katsuyuki Utaka. Asymmetric-shifted InGaAsP/InP DFB lasers. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-23**(6):815~821
- 10 Fan Wei, Li Xuechun, Chen Bai *et al.*. Theoretical analysis of Yb³⁺-doped phase-shift fibre distributed feedback lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(16):709~712 (in Chinese)
- 11 Svelto O. *Principles of Lasers*. Transl. by Lü Yunxian, Chen Tianjie, Sun Taoheng, Beijing: Science Press, 1983. 127, 163~166 (in Chinese)

Bidirectional Output Wavelength Characteristics of Asymmetric Phase-Shifted Distributed Feedback Fiber Lasers

Fan Wei Chen Bai Chen Jialin Qiao Qiquan Li Xuechun
Chen Lanrong Chen Shaohe Lin Zunqi

(*National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 25 April 2002; revised 15 August 2002)

Abstract: The π phase-shifted distributed feedback fiber lasers, in which the power would focus on the phase-shift region if the coupling strength is high enough, is often used to acquire single frequency output. But due to the spatial hole burning, the output wavelength would be different for the two output ports. The fundamental mode focuses on the port near the phase shift region while the ± 1 modes would focus on the other port if the phase shift region is far away from the center of the grating. Both the theoretical analysis and experiments are presented.

Key words: fiber lasers; phase-shifted distributed feedback; spatial hole burning; asymmetric