

文章编号: 0258-7025(2007)09-1250-05

一种提高 $\lambda/4$ 相移光纤光栅开关性能的方法

陈建军, 夏光琼, 田剑锋, 林晓东, 邓 涛, 吴正茂*

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

摘要 基于耦合模理论, 利用逆向递推传输矩阵方法, 数值研究了光纤光栅透射输出端面存在反射时 $\lambda/4$ 相移光栅的开关特性, 以及啁啾的引入对其开关性能的影响。研究表明: 对于反射相干叠加加强, 可使 $\lambda/4$ 相移光栅的阈值开关能量得到降低, 但开关对比度将下降; 在 $\lambda/4$ 相移光纤光栅中引入负啁啾, 能使开关对比度得到较大的提高, 但双稳阈值开启能量会增加; 引入正啁啾, 可进一步降低开关阈值, 但开关对比度会下降; 啁啾的引入将对 $\lambda/4$ 相移光栅的双稳环宽度产生较大影响。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; $\lambda/4$ 相移; 双稳; 啁啾

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

An Approach to Improve Switch Performance of $\lambda/4$ Phase-Shifted Grating

CHEN Jian-jun, XIA Guang-qiong, TIAN Jian-feng,
LIN Xiao-dong, DENG Tao, WU Zheng-mao

(School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract Based on the coupled mode theory, by using the reversely recursive transmission matrix method, the switching characteristics of the $\lambda/4$ phase-shifted fiber grating and the influence of introducing chirp on the switching characteristics have been numerically studied when the reflection on the transmission facet is taken into account. For coherent superposition reflection strengthening, it can reduce the threshold switching energy of the $\lambda/4$ phase-shifted grating, but the switching contrast will decline. With the introduction of negative chirp in $\lambda/4$ phase-shifted grating, the switching contrast is greatly improved, but the bistable threshold switching energy will increase. With the introduction of positive chirp in $\lambda/4$ phase-shifted grating, the switching threshold can be further reduced, but the switching contrast will decline. The bistable loop width will be influenced greatly by the chirp.

Key words fiber optics; fiber grating; $\lambda/4$ phase-shift; bistability; chirp

1 引 言

光纤光栅以其独特的非线性特性在全光限制器、光学开关、孤子通信等领域展现了巨大的应用潜力^[1~13]。在光子禁带(PBG)内, 由于非线性折射率、内部能量、入射光与布拉格谐振频率间的失谐量构成的正反馈环导致光子禁带随入射能量的变化而移动, 最终呈现双稳开关效应。光纤光栅中能否观察到光学双稳要受开关能量的限制。在光纤光栅的

中间引入了 $\pi/2$ 相位差的 $\lambda/4$ 相移光纤光栅, 由于具有较低的开关能量而受到人们的格外关注。在不考虑光纤光栅透射端面反射的条件下, 人们对其开关阈值、开关速度、开关对比度等双稳特性进行了大量的研究^[13~16]。但在实际应用过程中, 考虑到与其他光电子元件的集成或连接时, 连接处可能会存在一定的反射, 这势必会对光纤光栅的工作特性产生影响。虽然反射发生在光纤光栅输出的光纤端面, 但考虑到光纤光栅透射端面到连接处光纤的长度较

收稿日期: 2007-04-02; 收到修改稿日期: 2007-05-21

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2006BB2331)和西南大学高新技术培育基金资助项目。

作者简介: 陈建军(1977—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事激光与光纤通信方面的研究。

导师简介: 吴正茂(1970—), 男, 江西人, 教授, 博士, 主要从事激光物理与激光技术、光混沌通信、光纤通信等方面的研究。

E-mail: zmwu@swu.edu.cn (通信作者)

短, 光纤的影响不大, 为便于理论处理可认为反射发生在光纤光栅的输出端面^[17]。因此, 有必要对光栅透射输出端面存在反射时光纤光栅的开关特性进行深入研究。本文基于耦合模理论, 利用逆向递推传输矩阵方法, 研究了光纤光栅透射输出端面存在反射时 $\lambda/4$ 相移光栅的开关特性, 以及啁啾的引入对其开关性能的影响。

2 理论模型

考虑到光纤光栅的结构, 其折射率沿轴向分布表示为^[15]

$$n(z) = n_0 + n_1(z) \cos[2\beta_B(z)z + \Omega(z)] + n_2 |E(z)|^2, \quad (1)$$

式中 $E(z)$ 为光栅内部电场振幅, $\beta_B(z)$ 为布拉格波数, $\Omega(z)$ 为光栅中的相移, n_0 , $n_1(z)$ 以及 n_2 分别为光栅的有效模式折射率、线性折射率周期变化振幅以及非线性折射率系数。

考虑光栅中包括前向和后向传播的光, 所以光场 $E(z)$ 可表示为

$$E(z) = E_+(z) \exp\{i[\beta_B(z)z - \omega t]\} + E_-(z) \exp\{-i[\beta_B(z)z + \omega t]\}, \quad (2)$$

式中 ω 为光载波的中心角频率, t 为时间, E_+ 和 E_- 分别为光栅中前向和后向波的慢变振幅包络函数。考虑入射波为连续波或准连续波, 或者脉冲宽度比其在光栅中的传输时间大得多的情况, 从麦克斯韦波动方程出发, 并结合(1), (2)式, 忽略光纤光栅的损耗及材料色散^[5], 并假设材料非线性响应速度特别快, 以及载波波长接近光栅的布拉格波长, 就可得到非线性耦合模方程^[18]

$$\frac{\partial E_+}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_+}{\partial t} = i[\gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2)E_+ + \delta\beta E_+ + \kappa E_-], \quad (3a)$$

$$-\frac{\partial E_-}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_-}{\partial t} =$$

$$i[\gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2)E_- + \delta\beta E_- + \kappa E_+], \quad (3b)$$

式中 v_g 为光在光栅中传播的群速度, $\kappa = \pi n_1(z)/\lambda_B$ 为线性耦合系数, $\gamma = \pi n_2/\lambda_B$ 为非线性参数, $\delta\beta = \beta - \beta_B(z) = \frac{n_0\omega}{c} - \beta_B(z)$ 为频率失谐量。 c , $\lambda_B = 2n_0\Lambda$ (Λ 为光栅周期)分别为真空中光速和布拉格波长。

考虑实际应用过程中, 光纤光栅与其他光电子元件集成或连接时, 连接处可能会存在一定的反射。如前所述, 为便于理论处理, 忽略光栅与其他器件相

连之间的光纤的影响。此时慢变振幅满足边界条件

$$z = 0: E_+(0, t) = E_i(0, t), \\ E_r(0, t) = E_-(0, t), \quad (4a)$$

$$z = L: E_D = DE_+(L, t), \\ E_-(L, t) = rE_+(L, t) \exp(i\theta_L), \quad (4b)$$

式中 E_i , E_r 和 E_D 分别为入射波、反射波及透射波的慢变振幅, L 为光栅长度, r , D 分别为输出端面的反射及透射系数, $\theta_L = \theta_-(L) - \theta_+(L)$ 为光在透射端面由于反射引起的相移。

如果在光纤光栅中引入啁啾, 其布拉格波数 $\beta_B(z)$ 将随轴向变化, 即^[15]

$$\beta_B(z) = \bar{\beta}_B + \frac{C}{L^2} \left(z - \frac{L}{2} \right). \quad (5)$$

考虑稳态情况, 可采用传输矩阵法 (TMM) 对耦合模方程进行数值求解^[19]。将非均匀光栅分成 K 个近似均匀的子段, 用 E_{+j} (E_{-j}) 及 $E_{+(j+1)}$ ($E_{-(j+1)}$) 表示第 j 段 ($j = 1, 2, \dots, K$) 前后的光场, 且

$$\begin{bmatrix} E_{+(j+1)} \\ E_{-(j+1)} \end{bmatrix} = E_j^p \begin{bmatrix} E_{+j} \\ E_{-j} \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

这里

$$E_j^p = d_j \times \begin{bmatrix} \cosh(\mu_j l) - \frac{\Delta_j}{\mu_j} \sinh(\mu_j l) & -i \frac{\kappa_j}{\mu_j} \sinh(\mu_j l) \\ i \frac{\kappa_j}{\mu_j} \sinh(\mu_j l) & \cosh(\mu_j l) + \frac{\Delta_j}{\mu_j} \sinh(\mu_j l) \end{bmatrix}, \quad (6b)$$

其中

$$d_j = \exp\left[\frac{i\gamma}{2} \int_l (|E_-|^2 - |E_+|^2) dz\right],$$

$$\mu_j^2 = \Delta_j^2 + \kappa_j^2,$$

$$\Delta_j = \frac{i}{2l} \int_l [2\delta\beta + 3\gamma(|E_+|^2 + |E_-|^2)] dz,$$

式中 l 为空间步长。从边界条件(4b)式出发, 循环使用(6a)~(6b)式, 再利用边界条件(4a)式, 即可求出非均匀光栅的稳态输入-输出特性曲线。

就相移光栅而言, 传输矩阵应在相应的相移子段乘以矩阵 T ^[20]

$$T = \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_{sh}) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi_{sh}) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 ϕ_{sh} 为非线性光纤光栅内的相移大小。

3 结果与讨论

为便于叙述, 在以下的讨论中将初始失谐量 $\delta\beta$, 输入光强 I_i 及输出光强 I_D 分别归一化为 $\delta\beta L$,

I_i/I_c 和 I_D/I_c , 其中 $I_c = 4\lambda_0/(3\pi n_2 L)$ 为临界光强^[12]。在本文中, 只考虑反馈相干叠加增强的情形, 即 $\theta_L = \pi$ 。计算时所用的其他数据为: $\lambda_B = 1.55 \mu\text{m}$, $n_0 = 1.46$, $n_2 = 6.90 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$, $\kappa L = 4$, $\eta = 0.8$ ^[6]。

3.1 输出端面存在反射对 $\lambda/4$ 相移光纤光栅双稳特性的影响

图 1 给出了透射输出端面无反射时, 不同失谐量下 $\lambda/4$ 相移光栅的稳态输入 - 输出曲线, 相移 $\phi_{sh} = \pi/2$ 取在光栅中心处, 其开关阈值可以比均匀光栅减少两个数量级甚至更多^[13], 开启双稳的失谐量 $\delta\beta L$ 约为 -0.3 。下面讨论 $\delta\beta L$ 取 -0.50 。

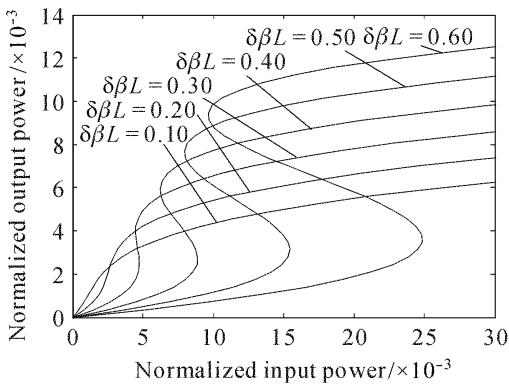


图 1 输出端面不存在反射时, 不同失谐量下 $\lambda/4$ 相移光纤光栅的稳态输入-输出曲线

Fig. 1 Stable input-output characteristics of $\lambda/4$ phase-shifted grating without reflectivity on the transmission facet for various initial detuning

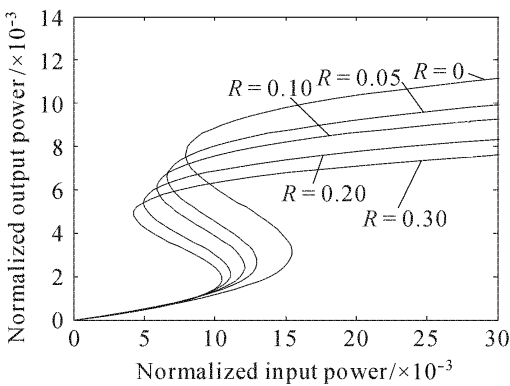


图 2 不同端面反射率时, $\lambda/4$ 相移光栅的稳态输入-输出曲线

Fig. 2 Stable input-output characteristics of $\lambda/4$ phase-shifted grating for various transmission facet reflectivity

图 2 给出了 R 取不同值时, $\lambda/4$ 相移光栅的稳态输入 - 输出曲线。从图中可以看出, 随着 R 的增加, 双稳环的开启阈值能量将降低, 但同时开关对比度也会降低。这是因为对于端面反射相位 $\theta_L = \pi$, 此时对应反馈相干叠加增强, 随着端面反射率的增加,

反馈效应也逐渐增强, 更多的后向传输光被耦合进光栅, 非线性效应更明显, 从而导致双稳开启阈值的下降和开关对比度的劣化。

3.2 啁啾的引入对 $\lambda/4$ 相移光纤光栅双稳特性的影响

图 3(a), (b) 分别给出了 $\theta_L = \pi$, R 取不同值时, 双稳开关阈值能量和开关对比度随啁啾系数 C 的变化。从图中可以看出: 对于反馈相干叠加增强的情形 (即 $\theta_L = \pi$), 啁啾的引入对光栅的阈值开关能量以及开关对比度都有一定的影响。负啁啾的引入, 可使光栅开启阈值能量增加, 但随着反射率的增加, 光栅内部非线性效应逐渐增强, 导致其对开启阈值能量产生一定影响, 其阈值能量会随反射率的增加而降低; 但同时负啁啾的引入对于光栅的开关对比度却有较大的提高; 而正啁啾的引入, 会导致双稳开启阈值进一步降低, 但同时其开关对比度会更加劣化。其原因是因为正、负啁啾使光栅周期沿轴向的变化是相异的, 导致光栅内部光场分布不同, 从而导致其对双稳特性的影响也相背。

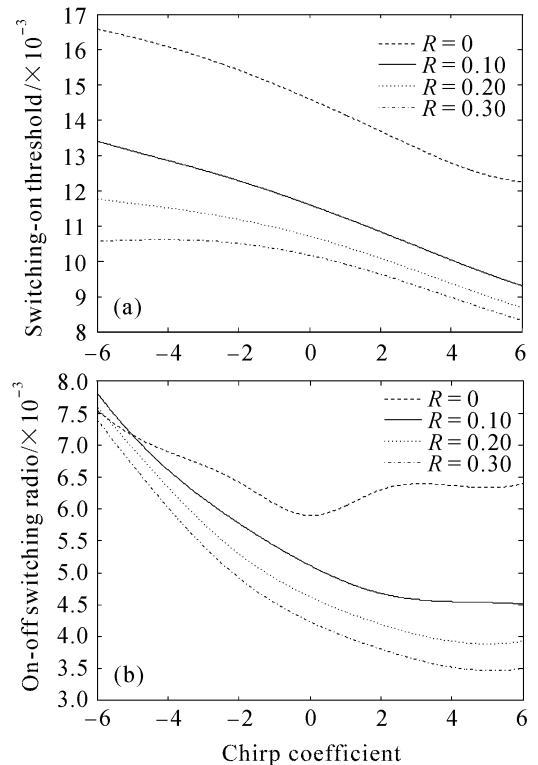


图 3 端面反射率取不同值时, $\lambda/4$ 相移光纤光栅双稳开启阈值能量(a)以及开关对比度(b)随啁啾系数 C 的变化

Fig. 3 Dependence of the switching-on threshold (a) and on-off switching ratio (b) of bistability of $\lambda/4$ phase-shifted grating on the chirp coefficient C for various reflectivity on the transmission facet

图 4 给出了 $\theta_L = \pi$, 啁啾系数 C 取不同值时, 双稳环宽度随反射率的变化。从图中可以看出, 当 R 较小时, 双稳环宽度随 R 的增大急剧减小; 当 R 增大到一定程度时, 双稳环宽度随 R 的变化变得缓慢。另外, 从图中还可以看出: 当 R 较小时 (如图中 $0 \sim 0.025$, 对于不同的 C , 该区域会有所变化), 通过引入负啁啾, 可以使双稳环的宽度增加; 当 R 的值超过一定范围时, 无论是引入正啁啾还是负啁啾都将使双稳环的宽度小于无啁啾时的情形, 且同样大小的正啁啾和负啁啾的引入, 双稳环宽度的差异不大。

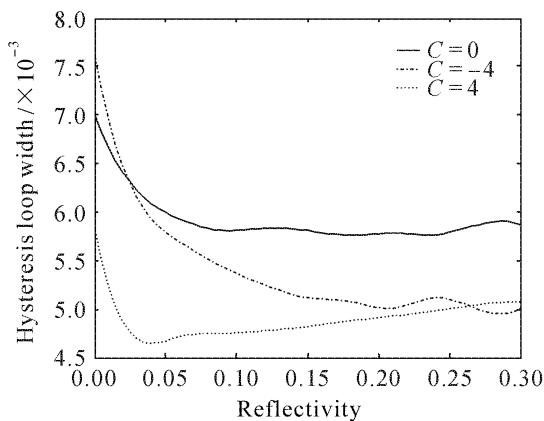


图 4 啁啾参数 C 不同时, 双稳环宽度随反射率的变化

Fig. 4 Dependence of the bistable loop width on the reflectivity of transmission facet for various chirp coefficient C

因此, 在实际应用过程中, 可根据需要引入合适的啁啾, 以期满足对光栅双稳的开关阈值、开关对比度和双稳环宽度的要求。

4 结 论

从非线性耦合模理论出发, 利用传输矩阵法数值分析了实际应用过程中, 光栅输出端面存在反射时, $\lambda/4$ 相移光栅的双稳特性以及啁啾的引入对其开关特性的影响。研究结果表明, 对于反馈相干叠加增强的情形, 随着端面反射率的增加, 双稳开启阈值减小, 开关对比度劣化。为了满足在实际应用过程中对开启阈值和开关对比度的要求, 可在相移光栅中引入不同的啁啾。引入正啁啾, 可进一步降低其开关阈值, 但同时会导致开关对比度的劣化; 引入负啁啾, 可使开关对比度得到优化, 但开关阈值有所下降; 啁啾的引入对双稳环宽度也有较大的影响。另外, 需要指出的是, 本文的研究结果是针对反射相干叠加增强的情况。对反射相干叠加减弱的情形, 正、负啁啾对开关性能的影响与文中所得结果相反。

参 考 文 献

- 1 D. Pelinovsky, J. Sears, L. Brzozowski *et al.*. Stable all-optical limiting in nonlinear periodic structures. I. Analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(1):43~53
- 2 N. G. R. Broderick, D. Taverner, D. J. Richardson. Nonlinear switching in fibre Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(11):447~453
- 3 B. J. Eggleton, C. M. de Sterke, R. E. Slusher. Bragg solitons in the nonlinear Schrödinger limit: experiment and theory [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(4):587~599
- 4 N. M. Litchinitser, B. J. Eggleton, C. M. de Sterke *et al.*. Interaction of Bragg solitons in fiber gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1):18~23
- 5 Tian Jianfeng, Wu Zhengmao, Xia Guangqiong. Influence of introducing chirp on bistable characteristics of linear negative tapered Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12):6419~6423
田剑锋, 吴正茂, 夏光琼. 啁啾的引入对线性负切趾型布拉格光栅双稳特性的影响 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(12):6419~6423
- 6 X. H. Jia, Z. M. Wu, G. Q. Xia. Analysis of bistable steady characteristics and dynamic stability of linearly tapered nonlinear Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13):2945~2953
- 7 Tian Jianfeng, Wu Zhengmao, Xia Guangqiong. Theoretical investigation on the bistability of nonlinear Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4):2256~2260
田剑锋, 吴正茂, 夏光琼. 非线性布拉格光栅双稳特性的理论研究 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(4):2256~2260
- 8 Ye Qing, Liu Feng, Cai Haiwen *et al.*. Composite second-order performance improvement in optical fiber CATV transmission system using chirped fiber grating [J]. *Chin. Phys.*, 2005, **14**(5):969~973
- 9 Wang Huaisheng, Sun Darui, Zhang Zhigang *et al.*. The Bragg reflection characteristics of the fiber grating formed by chirped ultrashort laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(9):2185~2189
王淮生, 孙大睿, 张志刚 等. 啁啾飞秒激光脉冲形成的光纤光栅的 Bragg 反射特性 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(9):2185~2189
- 10 Song Ji'en, Guo Yong, Yang Guangqiang *et al.*. Second harmonic generation based on Er-Yb co-doped fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):72~74
宋继恩, 郭勇, 杨广强 等. 钕镱共掺光纤二次谐波的产生 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):72~74
- 11 Li Xiaolu, Jiang Yuesong. Condition of gap soliton in fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1549~1553
李小路, 江月松. 光纤布拉格光栅中的隙孤子存在条件 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1549~1553
- 12 Guohui Lu, Hongan Ye, Junqing Li *et al.*. Optical bistability in tunable fiber laser using fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):18~20
- 13 S. Radic, N. George, G. P. Agrawal. Optical switching in $\lambda/4$ -shifted nonlinear periodic structures [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21):1789~1791
- 14 J. Liu, C. Liao, S. Liu *et al.*. The dynamics of direction-dependent switching in nonlinear chirped gratings [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **130**:295~301
- 15 S. Radic, N. George, G. P. Agrawal. Analysis of nonuniform nonlinear distributed feedback structures; generalized transfer matrix method [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(7):1326~1336
- 16 G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8):995~997

- 17 S. Radic, N. George, G. P. Agrawal. Theory of low-threshold optical switching in nonlinear phase-shifted periodic structures [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(4):671~680
- 18 B. J. Eggleton, G. Lenz, N. M. Litchinitser. Optical pulse compression schemes that use nonlinear Bragg gratings [J]. *Fiber & Integrated Opt.*, 2000, **19**(4):383~421
- 19 C. X. Shi. Optical bistability in reflective fiber gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):2037~2043
- 20 G. P. Agrawal, A. H. Bobeck. Modeling of distributed feedback semiconductor lasers with axially-varying parameters [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(12):2407~2414

激光二极管抽运超短长度

Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤激光器*

Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤具有很高的增益,单位长度增益已有报道可达5 dB/cm。以此为介质的光纤放大器和激光器在光子集成、光通信等领域中具有很好的应用前景。目前国外已有用激光二极管(LD)抽运超短长度 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤实现1.54 μm激光输出的报道。

我们最近用激光二极管抽运超短长度 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤,实现了连续激光运转。所用的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤纤芯直径为5 μm,包层直径为130 μm,在1535 nm处的数值孔径为0.214,纤芯 Er³⁺ 浓度为2.91×10²⁶ ions/m³, Yb³⁺ 浓度为1.9×10²⁶ ions/m³。以波长为976 nm的激光二极管作为抽运源,采用端面抽运方式,抽运光经透镜组聚焦,通过平面输入镜后耦合入 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤。该平面输入镜作为激光谐振腔的

前腔镜,镀有对976 nm抽运光高透、对1.54 μm光全反的膜层。无后腔镜而以光纤端面与空气界面的菲涅耳(Fresnel)反射提供反馈形成谐振,激光从光纤后端面直接输出。当光纤长度为12 cm时,阈值功率为1.124 W,当输入功率为4.8 W时得到130 mW激光输出,激光中心波长为1535.360 nm。在以后的实验中,我们将进一步提高抽运耦合效率,以提高输出功率和斜率效率。

南开大学物理学院光子学中心,

天津 300071

宋 峰, 邹昌光, 程振洲, 苏瑞渊,

韩 琳, 张家祥, 田建国

收稿日期:2007-08-07

收到修改稿日期:2007-08-20

* 天津市攻关培育项目(05YFGPGX05100)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0224)资助课题。