

基于聚合物分散液晶全息光栅的可调增益均衡器*

丁维银¹ 蔡继光^{1**} 沈国土¹ 杨宝成¹ 郑继红² 顾玲娟² 庄松林²

(1 华东师范大学物理系,光谱学与波谱学教育部重点实验室,上海 200062)

(2 上海理工大学光学与电子信息工程学院,上海 200093)

摘要 从理论和实验两方面分析研究了聚合物分散液晶全息光栅在 632.8 nm 光波的入射下的衍射谱特性和电压可调特性,实验结果与耦合波理论的计算结果具有很好的一致性,从实验上验证了用耦合波理论来描述聚合物分散液晶全息光栅的衍射特性是恰当的. 并且提出了利用聚合物分散液晶全息光栅对掺铒光纤放大器增益谱进行平坦化的方法,利用聚合物分散液晶全息光栅的电压可调特性可实现动态增益均衡. 运用该方法,可使掺铒光纤放大器在 C 波段 1530 ~ 1560 nm 内,温度在 0℃ ~ 65℃ 范围内变化,掺铒光纤放大器自发辐射谱的不平坦度从 3.3 dB 降到 0.2 dB_{p-p} (峰-峰值).

关键词 光通信;掺铒光纤放大器;可调增益均衡器;聚合物分散液晶全息光栅

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

聚合物分散液晶是由液晶微滴分散于固态聚合物高分子基质中而形成的新型光学材料. 近年来在国内外受到越来越多的重视. 用体全息光路制作的聚合物分散液晶材料的体全息光栅,具有空间频率和衍射效率高及光栅参数电场可调等优异性能. 聚合物分散液晶全息 (Holographic-Polymer Dispersed Liquid Crystal, H-PDLC) 光栅可以在光纤通信中作为掺铒光纤放大器的增益均衡器.

在波分复用 (Wavelength Division Multiplexed, WDM) 系统中,除了要求掺铒光纤放大器 (Erbium Doped Fiber Amplifiers, EDFA) 有足够高的增益外,还要求有足够的增益带宽. 而随着高速率 WDM 通信的发展,EDFA 性能的某些缺陷如:增益谱不均匀性(不同的波长处增益不同)和噪声特性对系统的影响也愈加明显. 由于 EDFA 的增益谱不平坦现象,特别是在多个 EDFA 级联时,某些波长光的增益将明显小于另一些波长光的增益,从而使这些波长光的信道产生很大的误码,甚至导致信号失真,这样势必影响 WDM 系统的传输距离,因此很有必要对 EDFA 的增益谱进行平坦. 据目前文献报道主要采用两种增益平坦的方法:一种是改变掺铒光纤自身的材料组成^[1-3];另一种方法是利用各种滤波器件补偿增益光谱的差异,在外部采用各种增益均衡技术,例如光纤 Bragg 光栅^[4,5]、长周期光栅^[6-10]、光纤声光可调滤波器^[11]、Mach-Zehnder 滤波器^[12]等.

本文在实验上研究了 H-PDLC 光栅的增益谱特性,根据其增益谱特性模拟设计了运用四个光栅组成动态增益均衡器,实现了 EDFA 增益谱的平坦化. 该方法容易实现、灵活性好,可对任意一条 EDFA 的增益谱线进行平坦,可在 C 波段 1530 ~ 1560 nm 内,温度在 0℃ ~ 65℃ 范围内变化,EDFA 自发辐射谱的不平坦度从 3.3 dB 降到 0.2 dB_{p-p} (峰-峰值).

1 H-PDLC 全息光栅结构、理论和增益平坦原理

1.1 光栅的结构

体全息光栅理论所用的几何模型如图 1,图中: K 为光栅条纹的法线单位矢量; d 为体光栅的厚度; Λ 为光栅周期; k_s 为衍射光方向的单位矢量; k_p 为入射光方向的单位矢量; ζ 轴为与体光栅表面垂直的方向,从 ζ 轴逆时针转动得到的角度值为正,顺时针转动得到的角度值为负; θ 为 K 与 ζ 轴的夹角; θ_s 为 k_s 与 ζ 轴的夹角; θ_p 为 k_p 与 ζ 轴的夹角. 在计算中, θ 的取值范围为: $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$.

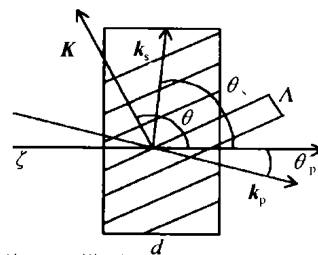


图 1 体光栅的几何模型
Fig. 1 The geometrical model of the volume holographic grating

1.2 光栅的衍射理论

H-PDLC 光栅的衍射效率可由耦合波理论^[13]求得,由文献[13]可知光栅的衍射效率可以表示为

*上海市光科技资助项目 (NO: c-23)

** Tel: 021-62232773 Email: jgcai@phy.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2004-02-17

$$\eta = \begin{cases} \frac{-\nu^2}{1+\xi^2} & \text{当 } \nu^2 + \xi^2 = 0 \\ \frac{-\nu^2 \tan^2(\sqrt{\nu^2 + \xi^2})}{\nu^2 + \xi^2 + \xi^2 \tan^2(\sqrt{\nu^2 + \xi^2})} & \text{当 } \nu^2 + \xi^2 > 0 \\ \frac{-\nu^2 \tanh^2(\sqrt{-(\nu^2 + \xi^2)})}{-(\nu^2 + \xi^2) + \xi^2 \tanh^2(\sqrt{-(\nu^2 + \xi^2)})} & \text{当 } \nu^2 + \xi^2 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\nu^2 = \frac{\pi^2 \Delta n^2 (\mathbf{e}_p \cdot \mathbf{e}_s)^2 d^2}{\lambda^2 \cos \theta_{sa} \cos \theta_p} \quad (2)$$

$$\xi^2 = \frac{\Delta k_r^2 d^2}{4} \quad (3)$$

$$\Delta k_r^2 = |\mathbf{k}_{p,r} - \mathbf{k}_{s,r} + \mathbf{k}|^2 = \frac{4\pi^2 n_0^2}{\lambda^2} \left[\cos \theta_p - \cos \theta_{sa} - \frac{2\lambda}{\lambda_0} \cos(\theta - \theta_p) \cos \theta \right]^2 \quad (4)$$

式中 θ_{sa} 为波长为 λ 时入射光的衍射角度; Δn 为光栅折射率调制度; Δk_r 为波矢的失配量; $\mathbf{K} = 2\pi/\Lambda$; \mathbf{e}_p 为入射光电场矢量的偏振单位矢量; \mathbf{e}_s 为衍射光电场矢量的偏振单位矢量; 对 P 偏振情况, 即电场矢量垂直于入射面的情况下, $\mathbf{e}_p \cdot \mathbf{e}_s = 1$; 而对 S 偏振情况, 即电场矢量位于入射面内的情况下, $\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{e}_p = \cos(\theta_p - \theta_s)$. 对 H-PDLC 光栅来说, 调制度可以通过电压来调节.

由上面理论可知, 透射光的相对强度为

$$P = 1 - \eta$$

对透射光强取对数 $G = 10 \cdot \lg(1 - \eta)$, 作出光栅的透射谱如图 2. 图中横坐标为入射光波波长, 纵坐标为透射光的增益. 所用光栅的参数为: 光栅厚度 d 为 $20 \mu\text{m}$, 平均折射率 n 为 1.55, 折射率调制度 Δn 为 0.01, 条纹方向 θ 为 150° , 入射角 θ_p 为 0° , 中心波长 λ_0 为 1500 nm .

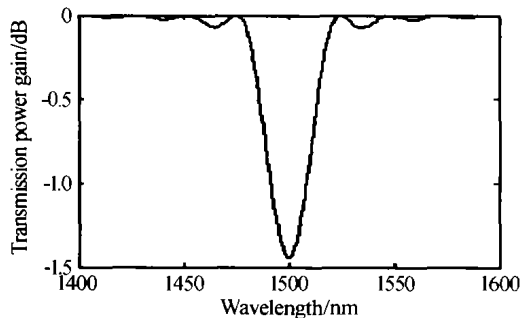


图 2 光栅的透射谱
Fig. 2 The transmission spectrum of the grating

1.3 增益平坦原理

由体相位光栅的增益谱特性知, 体相位光栅在发生衍射的布拉格波长附近可以提供数值为负的增益, 而对其他波长处的增益基本不影响, 这样我们就

可以考虑利用一组体相位光栅合适的组合来合成所要求的标准的增益补偿曲线. 根据增益均衡原理^[14], 首先应由 EDFA 的增益谱求出标准增益补偿谱, 再由若干个滤波器在所允许的增益不平坦度范围内叠加成增益补偿谱. 本文利用一组参数不同的 H-PDLC 光栅合适的组合来合成 EDFA 所要求的增益补偿曲线(与 EDFA 增益谱线具有相反的增益起伏特性).

基本方法如下: 如图 3, 图中虚线 2 为有待平坦的 EDFA 的标准增益补偿曲线. 首先以产生 $1557 \sim 1563 \text{ nm}$ 波段的增益补偿曲线为例, 以 1557 nm 为中心(相当于布拉格衍射的中心波长)将 $1557 \sim 1563 \text{ nm}$ 之间的曲线以 1557 nm 为轴线向左翻转, 然后令其余波段的增益为 0, 就得到 H-PDLC 光栅透射谱大致应该具有的形状, 所得到的这种增益谱的形状称为增益谱模板. 图 3 中曲线 1 就是利用上述方法得到的体相位光栅的增益谱模板. 然后运用遗传算法, 根据所求得的增益谱模板寻找合适的光栅参数, 使光栅的透射谱最大程度地与增益谱模板重合. 这样就能得到该波段的平坦光栅. 用标准增益补偿谱减去所求得的光栅的透射谱, 就得到了用一个光栅平坦后的增益补偿谱. 图 3 中曲线 2 为平坦前的增益补偿谱, 曲线 3 为用一个光栅平坦后的增益补偿谱, 下一步就是运用以上方法再对此曲线 3 进行平坦, 直到增益不平坦度满足要求为止. 因此可运用以上的方法用若干个参数不同的光栅依次对任意一条 EDFA 的增益谱的各个波段进行增益补偿, 从而实现对 EDFA 的增益谱的平坦化.

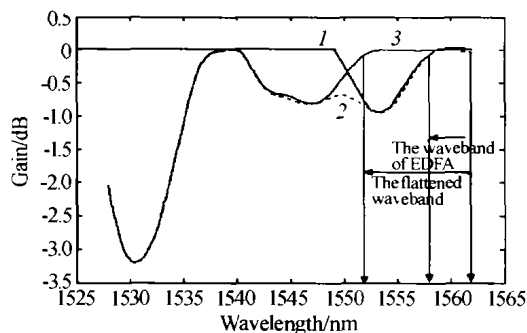


图 3 运用光栅的增益平坦原理
Fig. 3 The principle of flattening the EDFA using the gratings

2 实验及增益平坦模拟的结果

2.1 光栅的衍射谱测量

实验时按文献[15]和[16]的方法制作 H-PDLC 光栅, 取配方为 P1:LC = 1:1 制作光栅样品 1, 光栅参数为: 平均折射率 n 为 1.55, 折射率调制度 Δn 为 0.005, 光栅厚度 d 为 $10 \mu\text{m}$, 光栅周期 Δ 为 756.4 nm , 条纹方向 θ 为 90° . 然后用氦氖激光器发出的波长

λ 为 632.8 nm 的红光以不同的入射角入射光栅, 观察衍射光强. 结果如图 4, 图中横坐标为入射角, 纵坐标为衍射光效率 η , 实线为实验时用激光功率计测得的结果, 虚线是按照文献 [13] 的耦合波理论由 Matlab 语言编写的程序理论模拟计算的结果.

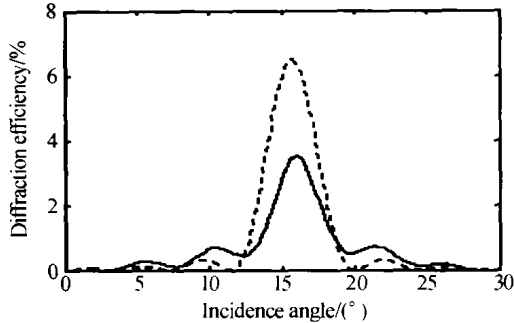


图 4 光栅的衍射效率
Fig. 4 The diffraction efficiency of the grating

布拉格衍射角理论计算值为 15.66° , 实验测得值为 15.92° , 偏差为 1.63%, 这在实验仪器的精度和误差范围内是可以接受的, 理论上衍射效率的最大值增益为 6.5%, 实验测得为 3.5%, 这主要是由于我们实验中所用的为可见光, PDLC 对此波段感光, 光栅内部有强烈的吸收和散射. 另外我们所制作光栅的玻璃表面没有镀上增透膜, 有一部分光被反射(四个反射面共有约 8% 的光强被反射). 从整体看来, 实验和理论的结果基本一致, 且实验得来的衍射光谱的形状和理论很相似, 由此证明用耦合波理论来描述是恰当的.

2.2 聚合物分散液晶全息光栅的电光特性实验

制作光栅样品 2, 参数为: d 为 $10 \mu\text{m}$, Δ 为 1259 nm , 其它参数不变. 将 H-PDLC 光栅导电玻璃上焊接导线并连接在 50 Hz 的交流变压器上, 放置在 632.8 nm 激光下, 激光功率为 2.9 mW, 调节衍射角, 使之以布拉格角入射光栅, 测量在不同电压作用下, 一级衍射光和透射光的强度变化情况. 实验结果与文献 [16] 的结果一致, 在此不再赘述.

取光栅样品 1, 光栅参数不变. 在光栅导电玻璃上焊接导线并连接在 50 Hz 的交流变压器上, 调节电压为 75 V, 然后用氦氖激光器发出的波长 λ 为 632.8 nm 的红光以不同的入射角入射光栅, 观察衍射光强. 结果如图 5, 图中虚线为未加电压时光栅的衍射谱, 实线为加压 75 V 时的衍射谱. 从图 5 中可以看出, 加电压时的衍射谱形状和未加电压时的衍射谱形状相同, 只是幅度约变为原来的一半. 这主要是因为光栅在电压的作用下使折射率调制度发生改变, 当在氧化铟锡导电膜上加上电压时, 液晶微滴的指向逐渐统一到沿电场方向, 液晶微滴的有效折射率逐渐与周围聚合物条纹的折射率相匹配, 折

射率调制度降低, 从而导致衍射的幅度发生改变^[17,18]. 当除去电场后, 光栅又恢复到原来的状态.

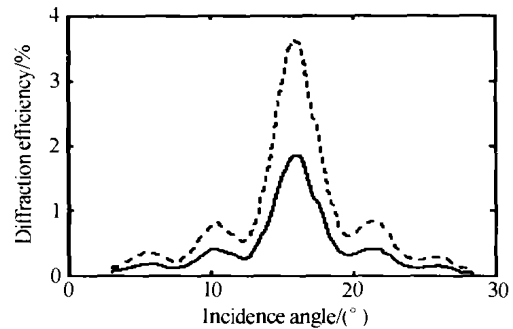


图 5 衍射谱的比较
Fig. 5 The comparison of the diffraction spectrum

2.3 增益平坦模拟结果

图 6 为一个 EDFA 工作温度在 25°C 下的增益和波长的关系图, 其增益在 1531 nm 附近有一个峰值, 在 1538 nm 附近有一低谷, 其增益不平坦度约为 3.3 dB. 为得到平坦的增益曲线我们需对此进行补偿, 图 7 为用于增益补偿的 4 个光栅的透射谱及其合成谱, 图中曲线分别为 4 个不同参数光栅的透射谱以及它们的合成谱和误差曲线, 4 个光栅的中心波长各不相同, 它们透射谱叠加成增益补偿谱. 我们共用了四个光栅对 EDFA 的增益谱进行平坦, 4 个光栅叠加成增益补偿谱减去标准增益补偿就是平坦后的增益谱, 应用该方法, 在 1530 ~ 1560 nm 范围内, EDFA 自发辐射谱的不平坦度从 3.3 dB 降到 0.1 dB_{p-p} .

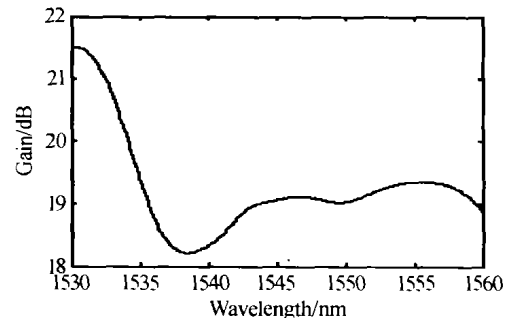


图 6 一条典型的 EDFA 增益谱
Fig. 6 A typical gain spectrum of EDFA

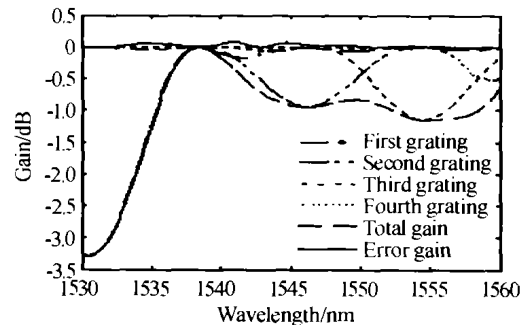


图 7 经 H-PDLC 补偿后的增益
Fig. 7 The gain flattened by the H-PDLC grating

当 EDFA 的工作温度改变时, EDFA 的增益谱也发生变化, 这时我们可以调节电压来实现对

EDFA 增益的动态补偿. 首先可以通过温度测量系统对 EDFA 的温度进行监控, 然后将温度反馈到光栅来控制光栅的工作电压, 并使之工作在线性区, 每个光栅可对相应的波段(5 ~ 10 nm)的光产生衍射使透射光强衰减, 各个光栅用不同的电场控制, 当 EDFA 的增益发生变化时, 控制电场的变化, 以改变相应波段的衰减, 从而重新达到把增益拉平的效果. 这样我们可以用以上四个光栅通过改变电压对不同温度工作下的 EDFA 进行动态增益补偿. 由于实验条件的限制, 本文直接用折射率调制度的改变来模拟电压的控制效果, 当 EDFA 的工作点发生变化时, 仍然用遗传算法对动态增益均衡器的折射率调制度进行优化, 可望在技术成熟后这部分优化工作通过反馈电路用 CPU 来完成. 由于各个体相位光栅的折射率调制度是各自独立的, 问题变化为四参数的寻优问题. 图 8 为实验测得的 EDFA 工作温度分别为 65℃ 和 0℃ 时相对于 25℃ 在 1530 ~ 1560 nm 波段的增益起伏, 从图中可以看出在不同的波段处增益起伏的数值各不相同, 最大增益起伏约为 0.7 dB_{p-p}, 图 9 为模拟在 65℃ 和 0℃ 时, EDFA 增益谱发生相应变化, 仍用以上四个光栅通过改变折射率调制度的优化结果, 图中给出的曲线是平坦后的误差曲线. 由图 9 可知, 增益均衡器仍然能够处于很好的工作状态, 增益不平坦度分别为 0.2 dB_{p-p} (65℃) 和 0.15 dB_{p-p} (0℃), 即通过调整体相位光栅的折射率调制度的数值变化实现了 EDFA 的动态增益补偿, 此时各个体相位光栅的其他参数都保持不变.

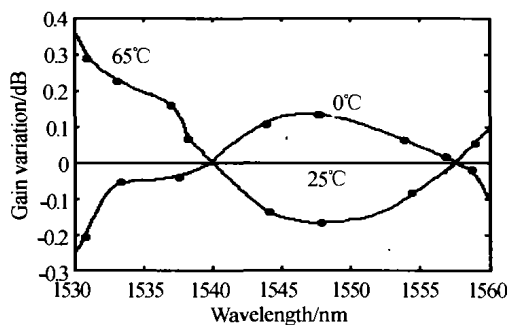


图 8 EDFA 增益随温度的变化
Fig. 8 The gain variation of the EDFA with temperature

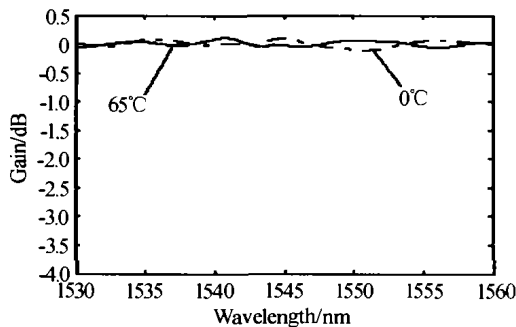


图 9 利用 H-PDLC 光栅的动态增益平坦
Fig. 9 The dynamic gain flattened by the H-PDLC grating

3 结论

综上所述, 运用耦合波理论来解释 H-PDLC 光栅特性是恰当的. 利用 H-PDLC 光栅作为 EDFA 的增效均衡器的方法容易实现, 灵活性好, 运用该方法可对任意一条 EDFA 增益谱线进行平坦, 可模拟在 1530 ~ 1560 nm 波段内, 温度在 0℃ ~ 65℃ 范围内, EDFA 自发辐射谱的不平坦度从 3.3 dB 降到 0.2 dB_{p-p} (峰 - 峰值).

参考文献

- 1 Yamada M, Kanamori T, Terunuma Y, et al. Fluoride-based erbium-doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(7): 882 ~ 884
- 2 Yoshida S, Kuwano S, Iwashita K. Gain-flattened EDFA with high Al concentration for multistage repeatered WDM transmission systems. *Electron Lett*, 1995, **31**(20): 1765 ~ 1767
- 3 刘艳格, 张昊, 蒙红云, 等. WDM 用增益平坦的高增益低噪声双段级联掺铒光放大器. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1196 ~ 1120
Liu Y G, Zhang H, Meng H Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1196 ~ 1120
- 4 Liaw S K, Ho K P, Chi S. Dynamic Power-equalized EDFA module based on strain tunable fiber Bragg gratings. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(7): 797 ~ 799
- 5 Chi Hao, Zhao Huandong, Zeng Qingji, et al. Erbium doped fiber amplifier using fiber Bragg grating as gain equalizer. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1248 ~ 1251
- 6 冉曾令, 饶云江, 朱涛, 等. 基于新型长周期光纤光栅的掺铒光纤放大器. *光子学报*, 2003, **32**(1): 72 ~ 75
Ran Z L, Rao Y J, Zhu T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 72 ~ 75
- 7 姜莉, 张东生, 袁树忠, 等. 长周期光纤光栅光谱控制及其在 EDFA 增益平坦中的应用. *光子学报*, 2004, **33**(7): 810 ~ 813
Jiang L, Zhang D S, Yuan S Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 810 ~ 813
- 8 Wysocki P F, Judkins J B, Espindola R P, et al. Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40nm using long-period grating filter. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, **9**(10): 1343 ~ 1345
- 9 谢增华, 陈根祥, 李唐军, 等. 运用长周期光栅实现 EDFA 的增益平坦化. *中国激光*, 2001, **28**(6): 553 ~ 555
Xie Z H, Chen G X, Li T J, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2001, **28**(6): 553 ~ 555
- 10 朱涛, 饶云江, 冉曾令, 等. 一种基于新型长周期光纤光栅的动态增益均衡器. *光子学报*, 2003, **32**(3): 283 ~ 285
Zhu T, Rao Y J, Ran Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 283 ~ 285

- 11 Yun S K, Lee B W, Kim H K, *et al.* Dynamic erbium-doped fiber amplifier based on active gain flattening with fiber acoustooptic tunable filter. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(10):1229 ~ 1231
- 12 Yamada M, Mori A, Kobayashi K, *et al.* Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(9):244 ~ 246
- 13 Montemezzani G, Zgonik M. Light diffraction at mixed phase and absorption gratings in anisotropic media for arbitrary geometries. *Physical Review E*, 1997, **55**(1):1035 ~ 1047
- 14 Kazuyou Mizuno, Yasuhiro Nishi, You Mimura, *et al.* Development of etalon-type gain-flattening filter. *Furukawa Review*, 2000, (19):53 ~ 58
- 15 郑继红, 陈刚, 顾玲娟, 等. 影响聚合物分散液晶体全息光栅衍射效率因素的分析. *中国激光*, 2003, **30**(6):524 ~ 528
- Zheng J H, Chen G, Gu L J, *et al.* *Chinese Journal of Laser*, 2003, **30**(6):524 ~ 528
- 16 郑继红, 陈刚, 顾玲娟, 等. 新型聚合物分散液晶材料研制的电控体全息光栅. *光学学报*, 2003, **23**(4):491 ~ 495
- Zheng J H, Chen G, Gu L J, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):491 ~ 495
- 17 Wu B G, West J L, Doane J W. Angular discrimination of light transmission through polymer-dispersed liquid crystal films. *J Appl Phys*, 1987, **62**(9):3925 ~ 3931
- 18 Sutherland R L, Tondiglia V P, Natarajan L V, *et al.* Electrically switchable volume gratings in polymer-dispersed liquid crystals. *Appl Phys Lett*, 1994, **64**(9):1074 ~ 1076

Tunable Gain Equalizer Base on the H-PDLC Grating

Ding Weiyin¹, Cai Jiguang¹, Shen Guotu¹, Yang Baocheng¹, Zheng Jihong², Gu Lingjuan², Zhuang Songlin²

¹ Key laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Department of Physics,

East China Normal University, Shanghai 200062

² College of Optics and Electronics Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

Received date: 2004-02-17

Abstract The structure and the properties of the holographic polymer dispersed liquid crystal (H-PDLC) grating were explored and analyzed both theoretically and experimentally. The results of the experiment are consistent with those of the theory. Coupled-wave theory is used to analyze and explain the properties of the grating. The grating was used to flatten the gain of EDFAs and dynamic gain equalization can be implemented with the electrically controlled gratings. The gain from 1530 nm to 1560 nm can be flattened with the fluctuation of the amplified spontaneous emission decreased from 3.3 dB to less than 0.2 dB_{p-p} in the temperature range 0-65°C.

Keywords Optical communication; Erbium doped fiber amplifier; Tunable gain equalizer; Holographically polymer dispersed liquid crystal grating



Ding Weiyin was born in Anhui province, P. R. China in 1979. He is a student for M. S. degree in East China Normal University. His current research is focused on the EDFAs in the optical communication.