

文章编号: 0258-7025(2006)08-1087-05

# 基于全息聚合物液晶光栅的动态增益均衡器的设计与模拟

郑继红<sup>1</sup>, 顾玲娟<sup>1</sup>, 庄松林<sup>1</sup>, 丁维银<sup>2</sup>, 沈国土<sup>2</sup>, 蔡继光<sup>2</sup>, 杨宝成<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093  
<sup>2</sup> 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)

**摘要** 介绍了聚合物分散液晶(PDLC)材料及体全息光栅的特性,提出了基于全息聚合物液晶(H-PDLC)电控光栅多极串联式动态增益均衡器的设计。根据光栅的衍射特性计算公式,对全息聚合物液晶光栅在中心波长为1550 nm的波长选择特性进行模拟,并且进一步利用遗传算法模拟实现全息聚合物液晶动态光强增益均衡器的功能。计算模拟表明,选择合适的全息聚合物液晶光栅参量,能够使光栅在1550 nm为中心波长的衍射谱线半宽度达到10 nm。同时,采用基于全息聚合物液晶的动态光强增益均衡器,能够使掺铒光纤放大器在1530~1560 nm内,其自发辐射谱的不平坦度从3.3 dB降到0.1 dB<sub>pp</sub>(峰-峰值)。

**关键词** 衍射与光栅;动态增益均衡器;聚合物分散液晶;体全息光栅;光通信器件

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Design and Simulation of Dynamic Gain Equalizer Based on Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal Volume Grating

ZHENG Ji-hong<sup>1</sup>, GU Ling-juan<sup>1</sup>, ZHUANG Song-lin<sup>1</sup>, DING Wei-yin<sup>2</sup>,  
SHEN Guo-tu<sup>2</sup>, CAI Ji-guang<sup>2</sup>, YANG Bao-cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Optics and Electronics Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy of Ministry of Education,  
Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** The characteristics of polymer dispersed liquid crystal (PDLC) and holographic polymer dispersed liquid crystal (H-PDLC) volume grating are introduced. Based on the novel H-PDLC volume gratings, series-connecting dynamic gain equalizer design is provided. Furthermore, simulations are made about wavelength selectivity of H-PDLC grating at 1550 nm and the function of H-PDLC dynamic gain equalizer. The calculation results show that when suitable grating parameters of H-PDLC are selected, half spectral width of grating is about 10 nm at central wavelength of 1550 nm. And the fluctuation of spontaneous emission spectra of erbium-doped fiber amplifier (EDFA) can decrease from 3.3 dB to 0.1 dB within 1530 nm to 1560 nm based on H-PDLC dynamic gain equalizer.

**Key words** diffraction and gratings; dynamic gain equalizer; polymer dispersed liquid crystal; volume grating; optical communication device

## 1 引言

在密集型波分复用系统中,光信号在光纤传输过程中需要进行放大,以保证信号传输的质量。目前在C波段或L波段都使用掺铒光纤放大器

(EDFA),但掺铒光纤放大器的输出光强随波长(信道)的不同有4 dB左右的波动,这种波动对光信号传输的保真性十分不利,故在掺铒光纤放大器的输出端需要使用“光强增益均衡器”,使这种光强波动控

收稿日期:2005-12-22;收到修改稿日期:2006-04-10

基金项目:上海市教委青年基金(Q40202)和上海市教委重点学科基金(T0501)资助项目。

作者简介:郑继红(1975—),女,安徽人,上海理工大学光学与电子信息工程学院讲师,博士,主要从事聚合物分散液晶材料及其在光通信器件中的应用研究。E-mail:jihongzheng@sina.com

制在1 dB以下。目前使用的光强增益均衡器是根据掺铒光纤放大器的输出特性制作的对各种波长光信号固定衰减而拉平掺铒光纤放大器的输出,称为固定式光强增益均衡器。由于掺铒光纤放大器的输出光强-波长曲线并不是固定的,可能随温度、输入功率和其他因素的变化而发生变化,固定式均衡器就无法使变化后的功率输出平稳。因此需要发展动态光强增益均衡器,根据掺铒光纤放大器输出的光强-波长曲线进行动态实时的补偿,使光强随波长的波动控制在最小范围。目前世界主要光通信器件公司在研究的动态光强增益均衡器多采用在输入或输出端把当前的功率谱信号取出,再反馈给控制电路,对增益均衡器进行调节,实现新的拉平功能,但增益均衡器及其控制系统制作复杂,成本昂贵。

据报道<sup>[1~3]</sup>,在光通信系统中主要采用各种滤波器件补偿增益光谱的差异,例如光纤布拉格光栅、长周期光栅、光纤声光可调滤波器、马赫-曾德尔滤波器等。采用自由空间光学技术也可以实现动态光强增益均衡功能,一种方法是采用自由空间衍射光调制器或者旋转反射镜的微机电系统(MEMS)<sup>[4,5]</sup>。另一种是采用液晶偏振性质实现动态增益均衡,该技术首先由 Corning 光纤公司提出<sup>[6]</sup>,目前世界上大部分的动态光强增益均衡器都是这种偏振依赖的液晶器件。本文提出一种基于电控聚合物分散液晶(PDLC)材料制作的全息光学衍射元件实现动态光强增益均衡的功能。聚合物分散液晶材料在全息干涉条纹曝光条件下,形成聚合物与液晶微滴,有效折射率不同且条纹起伏间隔的相位型光栅,在电场作用下,液晶微滴条纹的有效折射率发生改变,与相邻聚合物条纹的折射率差值减小,光栅的衍射效率降低。由于电控反射式体光栅通常波长选择特性很好,可以设计制作动态光强增益均衡器件。根据全息聚合物液晶(H-PDLC)布拉格光栅的电控衍射特性,对基于全息聚合物液晶光栅的动态光强增益均衡器做了初步的设计模拟。

## 2 聚合物分散液晶材料及电控布拉格光栅技术

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之中而形成的新型光学材料,若微滴的尺寸较大,聚合物分散液晶具有显著的电控散射原理的开关特性<sup>[7]</sup>。而当微滴的尺寸比光的波长小时,聚合物分散液晶呈现为透明。不加电压时,微滴

的光轴呈随机取向,材料的折射率显示出聚合物折射率与液晶寻常光折射率、非常光折射率的加权平均。施加的外电场达到或超过阈值时,各微滴中向列液晶光轴方向一致地沿电场方向,材料的折射率为液晶的寻常折射率与聚合物折射率的加权平均。除去外电场,液晶微滴在弹性的作用下又恢复到最初状态,这就是聚合物分散液晶材料具有的电控折变特性。

结合传统的光学全息技术,利用激光平面波干涉,可以制作具有电控衍射可调的布拉格衍射光栅。制作全息聚合物液晶光栅需要将液晶和预聚混合物放置在镀有氧化锡铟(ITO)导电膜的双层玻璃基片当中,在干涉光路中曝光,通常可以制作透射式和反射式的体光栅。当衍射波长和角度满足布拉格衍射条件时,衍射光能量达到最大值,衍射效率在理论上最大可以达到1。实验研究表明,全息聚合物液晶光栅是一种偏振损耗低的光学元件。衍射分光的中心波长取决于光栅的空间频率,而体光栅的衍射带宽取决于体光栅的厚度和光栅条纹方向。增加厚度或者改变条纹角度都可减小光栅的衍射带宽。实验制作的空间频率为300 line/mm,厚度为25  $\mu\text{m}$ 的全息聚合物液晶透射式体光栅,在C波段可以达到85%以上的衍射效率,同时偏振相关损耗(PDL)小于0.05 dB,衍射带宽在50~150 nm之间<sup>[8]</sup>。在电场的调控作用下,全息聚合物液晶光栅在C波段的调控范围可以达到12 dB左右。

## 3 动态增益均衡器的实现

通常反射式体光栅比透射式体光栅有更好的波长选择性,因而我们采用反射式全息聚合物液晶体光栅作为基本元件,将不同空间频率的体光栅串联叠加就可能实现动态增益均衡功能<sup>[9]</sup>。首先设计不同的全息光路,在聚合物分散液晶盒中建立衍射特性各不相同的电控反射体全息光栅,每个光栅的布拉格衍射发生在特定波段(带宽在5~10 nm),同时光栅的衍射程度受电场调控;然后让不同参量的全息聚合物液晶光栅串联,每个光栅都分别针对不同信道的光产生衍射,当各个信道中光功率变化不同使掺铒光纤放大器的增益产生变化时,可通过控制施加在每个全息聚合物液晶光栅上的电场,而改变光栅的衍射效率,使每个信道信号的衰减量不同,从而达到重新把增益拉平的效果。当环境或其他因素的变化引起放大器的输出变化时,只要调节每个全

息聚合物液晶光栅的控制电场,就可一定范围内把输出再调节到拉平的状态。例如,针对四个不同信道的掺铒光纤放大器增益功率进行适时均衡,首先在波导表面将四个不同常数的聚合物分散液晶光栅串联式排列。光通过波导,依次在每级聚合物分散液晶光栅上经历滤波。每级光栅分别针对一个信道衍射衰减,让其他信道光通过,这样控制针对信道光栅的电场,改变衰减量,达到各信道总体输出功率平稳的目的。图 1 为全息聚合物液晶反射体光栅实现四波段动态均衡增益的示意图。

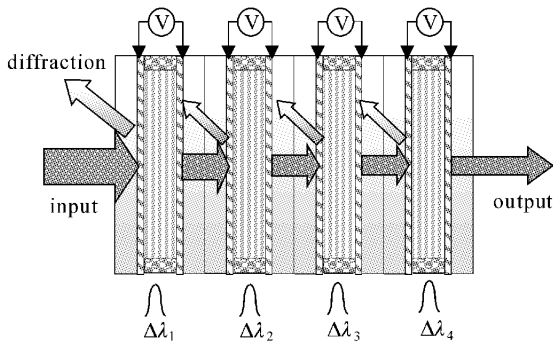


图 1 基于全息聚合物液晶光栅的四波段动态增益均衡器的实现

Fig. 1 H-PDLC dynamic gain equalizer with four wavebands

### 4 动态增益均衡器的计算模拟

#### 4.1 全息聚合物液晶光栅在 1550 nm 的波长选择性模拟

全息聚合物液晶动态增益均衡器的设计要点在于全息聚合物液晶电控光栅在光通信波段的衍射特性,主要是波长选择性。通过特性模拟,为制作光栅提供合理的参量,如厚度、空间频率、条纹方向、折射率调制程度等。

图 2 为全息聚合物液晶光栅模型示意图,其中  $k$  为光栅条纹的法线单位矢量, $k_s$  为衍射方向的单位矢量, $k_p$  为入射光的方向单位矢量。 $\zeta$  轴取为与体光栅表面垂直的方向,其正向与入射光方向的夹角小于  $0$ 。 $\theta$  为  $k$  与  $\zeta$  轴的夹角, $\theta_s$  为  $k_s$  与  $\zeta$  轴的夹角, $\theta_p$  为  $k_p$  与  $\zeta$  轴的夹角。 $\theta$  的取值范围为:  $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 。

根据耦合波理论,得到在透射情况下,体光栅衍射公式<sup>[10]</sup>为

$$\eta = \frac{\sin^2(\sqrt{\nu^2 + \xi^2})}{1 + (\xi^2/\nu^2)}, \quad (1)$$

式中  $\nu$  为与折射率调制度、厚度有关的参量, $\xi$  为布拉格失配参量。

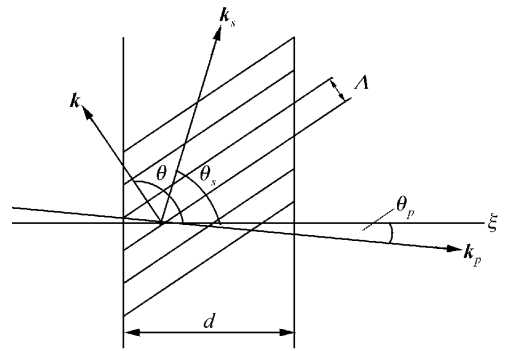


图 2 体光栅模型的示意图

Fig. 2 Schematic of volume grating model

对于全息聚合物液晶光栅,如果设想制作基于全息聚合物液晶的动态增益均衡器,则 1550 nm 中心波长的选择性能能够达到 10 nm 左右的要求。在制作过程中,如果厚度参量太大,由于聚合物分散液晶的材料是液体状态,不利于制作光栅,相对来说,增大激光夹角在工艺上更容易实现。因此,结合实际的制作过程,全息聚合物液晶光栅在 488 nm 的激光波长下制作,根据计算模拟推导的公式,中心波长为 1550 nm,  $n = 1.5, \theta = 150^\circ, \theta_p = 0$  时的特殊条纹和角度模拟衍射特性。当光栅折射率调制深度  $\Delta n$  为 0.005,厚度  $d$  为 20  $\mu\text{m}, 40 \mu\text{m}, 80 \mu\text{m}$  时,全息聚合物液晶光栅在 1550 nm 中心波长的透射效率与波长的关系曲线如图 3 所示。在电场作用下,当光栅折射率调制深度  $\Delta n$  为 0.002, 0.005, 0.008, 厚度  $d$  为 40  $\mu\text{m}$  时,全息聚合物液晶光栅在 1550 nm 中心波长的透射效率与波长的关系曲线如图 4 所示。可见,厚度为 40  $\mu\text{m}$ , 折射率调制深度为 0.005 的全息聚合物液晶光栅在中心波长为 1550 nm,  $\theta = 150^\circ, \theta_p$

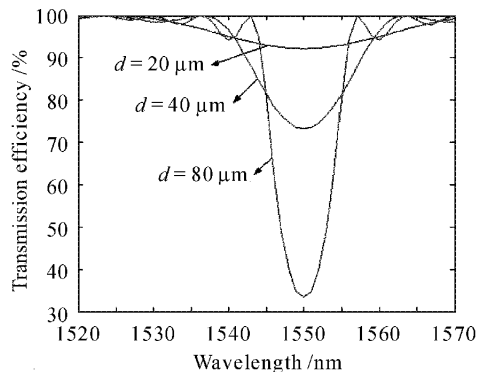


图 3 不同厚度的全息聚合物液晶光栅在 1550 nm 的波长选择特性

Fig. 3 Simulation of wavelength selectivity characteristic for H-PDLC grating on the condition of different thickness at the center wavelength of 1550 nm

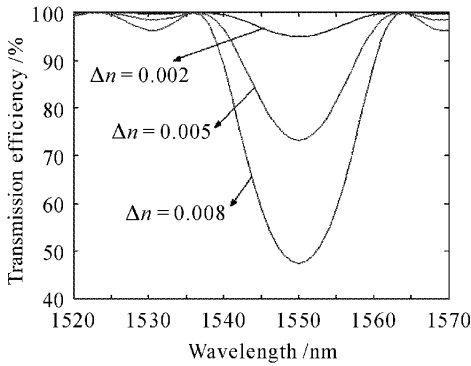


图 4 不同折射率调制深度的全息聚合物液晶体光栅在 1550 nm 的波长选择特性

Fig. 4 Simulation of wavelength selectivity characteristic for H-PDLC grating on the condition of different refractive index modulation at the center wavelength of 1550 nm

= 0 时,衍射谱线半宽度可达10 nm左右。

#### 4.2 动态增益均衡器模拟

根据增益均衡原理,利用全息聚合物液晶体光栅制作动态增益均衡器,首先应由掺铒光纤放大器的增益谱求出标准增益补偿谱模板,然后再由若干个全息聚合物液晶的衍射特性组合产生的增益不平坦度叠加成增益补偿谱。如图 5 所示,虚线 2 为需要得到的掺铒光纤放大器标准增益补偿谱曲线,如果仅得到 1557~1563 nm波段的增益补偿曲线,需要以 1557 nm为衍射中心(相当于光栅布拉格衍射的中心波长)将 1557~1563 nm之间的曲线以 1557 nm为轴线向左对称翻转,然后令其余波段的增益为 0,得到光栅透射谱大致应该具有的形状,这种增益谱的形状就是光栅的增益谱模板。图 5 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。然后用遗传算法获得合适的光栅参量,使光

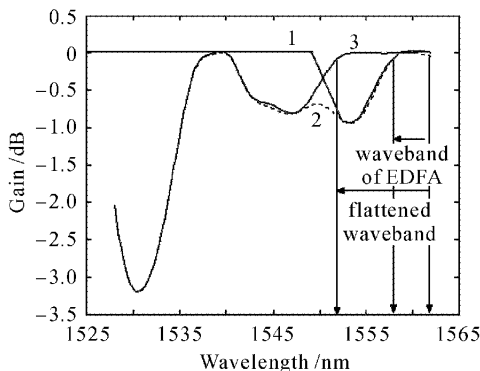


图 5 全息聚合物液晶体光栅的增益补偿原理

Fig. 5 Principle of flatting EDFA by H-PDLC grating

栅的透射谱最大程度地与增益谱模板重合。最后,再用标准增益补偿谱减去所求得的光栅透射谱,就得到了用一个光栅平坦后的增益补偿谱曲线 3。重复运用该方法对曲线 3 进行平坦,直到增益不平坦度满足要求为止。因此该方法可用若干个参量不同的光栅依次对任意一条掺铒光纤放大器的增益谱各个波段进行增益补偿,从而实现对掺铒光纤放大器增益谱的平坦化。

例如,掺铒光纤放大器工作温度在 25 ℃下,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。图 6 为用于增益补偿的四个光栅的透射谱及其合成谱,四个光栅的中心波长各不相同,它们的透射谱叠加成增益补偿谱。表 1 列出了这四个光栅的有关参量。从图 6 可以看出,经过四个全息聚合物液晶体光栅后,在 1530~1560 nm范围内,掺铒光纤放大器自发辐射谱的不平坦度从 3.3 dB降到 0.1 dB<sub>pp</sub>(峰-峰值)。

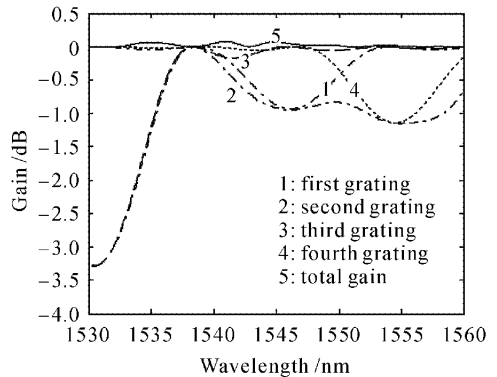


图 6 经过四个全息聚合物液晶体光栅的增益补偿后的谱线

Fig. 6 Flatting gain spectra of EDFA by four H-PDLC gratings

表 1 用于增益补偿的四个光栅的有关参量

Table 1 Some parameters of 4 gratings for gain compensating

Parameter	Index modulation $\Delta n / 10^{-3}$	Fringe normal $\theta$	Thickness of grating $/\mu\text{m}$	Center wavelength $/\text{nm}$
Grating 1	2.70	154.93	95.19	1530.5
Grating 2	3.20	130.50	46.28	1545.7
Grating 3	2.50	149.11	100.16	1558.2
Grating 4	1.00	141.22	80.40	1559.0

## 5 结 论

采用全息聚合物液晶电控光栅制作动态光强增益均衡器,能够使掺铒光纤放大器在 1530 ~

1560 nm内,其自发辐射谱的不平坦度从3.3 dB降到0.1 dB<sub>p-p</sub>(峰-峰值),很好地实现了动态增益均衡的目的。但是,如果在实际的通信系统中广泛应用,仍然有一些问题需要考虑和解决。一方面是器件的稳定性。随着工作环境的改变,光电器件在不同的温度条件下,电光性能可能会发生一定的变化。对于聚合物分散液晶材料、液晶与聚合物混和材料,温度对液晶的特性有一定的影响<sup>[11]</sup>,势必会影响到器件的性能和工作稳定性。另一方面是采用简单的串联式设计可以简化器件的结构,有利于器件的装配。但是,输入光信号从水平方向依次穿过每个滤波片过程中要通过许多级,每级的端面反射损耗会影响到整个传输光的信号。因此在制作时需要在玻璃基片上镀增透膜,尽量减小端面损耗。此外,在全息聚合物液晶光栅电控衍射特性的模拟过程中,直接采用折射率调制程度的变化来模拟计算衍射效率的改变。而在实际制作的全息聚合物液晶光栅工艺中,能否达到电压与折射率调制程度变化的对应关系和能否保证制作工艺的稳定性,是制作实际应用的器件和器件真正走向产业化的关键。

### 参 考 文 献

- 1 Shien-Kuei Liaw, Keang-Po Ho, Sien Chi. Dynamic power equalized EDFA module based on strain tunable fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7):797~799
- 2 Jiang Li, Zhang Dongsheng, Yuan Shuzhong *et al.*. Control of LPG's spectral structure and its application in EDFA gain-flattening equalizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):810~813
- 3 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[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7):810~813
- 3 Xie Zenghua, Chen Genxiang, Li Tangjun *et al.*. EDFA gain flattening equalizer based on long period fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6):553~555
- 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[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6):553~555
- 4 Joseph E. Ford, James A. Walker. Dynamic spectral power equalization using micro-opto-mechanics [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10):1440~1442
- 5 Godil, Asif A., D. Bloom *et al.*. Dynamic spectral shaping for fiber-optic application [P]. United States Patent, 6,826,330. Nov. 30, 2004
- 6 C. P. Brophy, Y. Liu, P. Wigley. Dynamically configurable spectral filter [P]. United States Patent, 6,275,623. Aug. 14, 2001
- 7 Zheng Jihong, Chen Gang, Gu Lingjuan *et al.*. A novel electrically switchable holographic polymer dispersed liquid crystal Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):491~495
- 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[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):491~495
- 8 M. Barge, D. Battarel, J. L. de Bougrenet de la Toenaye. A polymer-dispersed liquid crystal-based dynamic gain equalizer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(8):2531~2540
- 9 Zhuang Songlin, Zheng Jihong, Gu Lingjuan *et al.*. One new method to fabricate optical dynamic gain equalizer [P]. Chinese Patent, 03150763.8, September, 2003
- 庄松林,郑继红,顾玲娟等. 一种动态光强增益均衡器的制造方法[P]. 国家发明专利,03150763.8. 2003年9月
- 10 G. Montemezzani, M. Zgonik. Light diffraction at mixed phase and absorption gratings in anisotropic media for arbitrary geometries [J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **55**(1):1035~1047
- 11 Zheng Jihong, Chen Gang, Gu Lingjuan *et al.*. Analysis of the major factors affecting the efficiency of H-PDLC volume grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):524~528
- 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[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):524~528