

·学科进展·

# 光纤光栅的非线性效应及其在光纤通信中的应用前景

李建新 陈雪 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学光通信中心,北京 100876)

**[摘要]** 介绍了光纤光栅中非线性效应的产生机理,综述了该效应导致的各种宏观现象并指出其在光通信中的应用前景。最后给出在低功率情况下诱发光纤光栅中非线性效应的一些方法。

**[关键词]** 光纤光栅,非线性效应,光纤通信

## 引言

自从1978年K.O. Hill等人首次发现了掺锗光纤的光敏性和由此产生的光纤光栅以来<sup>[1]</sup>,人们对其特性进行了大量的理论分析和实验研究<sup>[2-4]</sup>。随着紫外写入制作技术的日趋成熟,光纤光栅在光通信中的应用也越来越广泛<sup>[5-7]</sup>。从光发送、光放大、光纤色散补偿到接收,都将受到这一重要器件的革命性的影响。特别是在密集波分复用系统中,光纤光栅作为解复用器已受到人们的极大青睐<sup>[7]</sup>。

光纤光栅的一个很重要特性,就是在Bragg波长处的窄带反射特性。光纤光栅的绝大部分应用也正是基于这一特性。对于这一性质的研究,理论分析已趋于成熟,实验研究也已取得了很大成果。

光纤光栅的另一个特性,就是在反射带隙(photonic band gap)附近的极强的传输色散特性(一般要比普通光纤介质大出几个数量级)<sup>[8,9]</sup>,尽管这一强色散区域存在的频带很窄,但是其独特的性质还是引起了人们的关注,有人还提出可以利用这种强色散特性进行色散补偿<sup>[9]</sup>。

以上都是光纤光栅的线性特性。近年来,国外已有一些文章开始研究光纤光栅的非线性特性<sup>[3,8]</sup>;但在国内,这方面的研究还甚少。这些文献表明,当强光注入光纤光栅后,由于介质的有效折射率将与光强有关,因而它的特性不但不同于普通光纤,也与一般意义上的光纤光栅(指其线性特性)有

着显著的差异。其反射特性与非线性共同作用,会导致光学双稳态<sup>[10,11]</sup>;其色散特性与非线性共同作用,会产生光纤光栅孤子<sup>[12]</sup>;如果一束强的泵浦光脉冲与一束弱的信号脉冲同时注入光纤光栅,则会造成光学推扫现象(Optical pushbroom)<sup>[13]</sup>,导致脉冲压缩;在相位匹配的情况下,还会形成参量放大<sup>[8,14]</sup>。这些都是光纤光栅的非线性特性。这些新特性有望应用于强超窄光脉冲产生和模式转换、全光交换等诸多方面。

## 1 光纤光栅中的非线性效应的产生机理

在引入非线性之前,首先来简单回顾一下光纤光栅的线性特性。

在如图1所示的光纤光栅结构中(折射率调制亦可为其他形状),设光栅周期为 $d$ ,调制深度为 $\Delta n$ 。

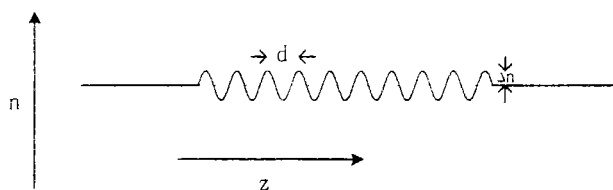


图1 光纤光栅结构(以折射率正弦调制为例)

当

$$\lambda = \lambda_B = 2nd \quad (1)$$

时,该波长的一半恰好为光栅的周期,则从每一“周

期界面”反射回来的光都达到同相,从而导致该波的光强烈反射。事实上,存在一个以  $\lambda_B$  为中心的波长范围  $\Delta\lambda$ , 波长处于这一范围的光都会经历强反射。在频域内,对应

$$\omega_B = \frac{\pi c}{\bar{n}d} \quad (2)$$

当  $\Delta n < \bar{n}$  时,有

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta n}{\bar{n}} \quad (3)$$

光纤光栅中反射带宽与行波波数的对应关系如图 2 所示。

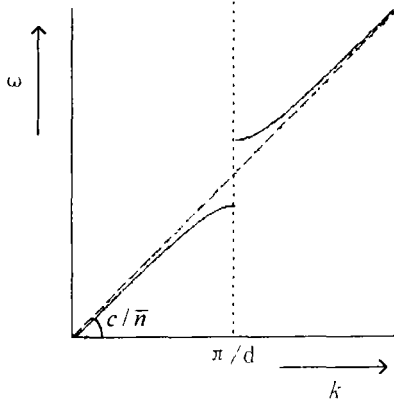


图 2 光纤光栅中的反射带隙

对于 Bragg 波长附近的光,电场可以用耦合模理论来描述。设电场  $E(z, t)$  是线偏振的,则它可以写为

$$E(z, t) = [\epsilon_+(z, t)e^{+ik_B z} + \epsilon_-(z, t)e^{ik_B z}]e^{i\omega_B t} + c.c \quad (4)$$

其中  $\epsilon_+$  和  $\epsilon_-$  分别为正向和反向传输的电场,  $z$  为传输方向,  $t$  为时间。 $k_B (= \frac{2\pi}{\lambda_B} = \frac{\pi}{d})$  和  $\omega_B$  分别为介质中 Bragg 波数和频率。它们满足耦合模方程组<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} +i \frac{\partial \epsilon_+}{\partial z} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial \epsilon_+}{\partial t} + \kappa \epsilon_- &= 0 \\ -i \frac{\partial \epsilon_-}{\partial z} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial \epsilon_-}{\partial t} + \kappa \epsilon_+ &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\bar{n}$  为平均折射率,  $\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_B}$  为耦合系数。从上式出发,可以推出光纤光栅对不同频率光的响应特性。

现在,我们来考虑非线性的影响。当光强足够强时,光纤的折射率与注入光强有如下关系:

$$n(I) = n_L + n^{(2)}I \quad (6)$$

$I$  为光强。 $n_L$  为线性折射率,  $n^{(2)}$  为非线性折

射率系数。

结合(2)知 Bragg 频率也会随光强增大而发生红移。借助于图 3 可以做更深入的定性理解。图中实线表示无非线性效应时光纤光栅反射谱简图,虚线表示光强很大时由于折射率随光强的增大而引起的非线性效应导致 Bragg 频率红移后的反射谱简图。可以看出,低光强时可透过光栅的频率  $\omega_l$  成为反射频率,而原高反射频率  $\omega_h$  在非线性导致频移后成为透射频率。

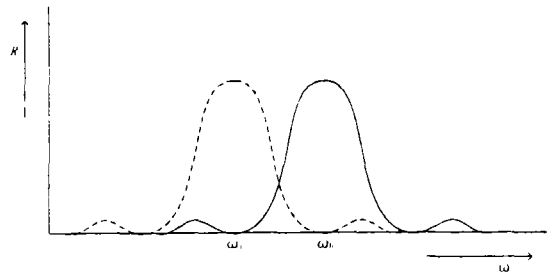


图 3 光纤光栅中反射谱随光强的变化简图

光纤光栅 Bragg 波长移动只是非线性导致的最简单直接的现象。更全面的讨论仍应从耦合模方程出发。考虑非线性时,耦合模方程变为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} +i \frac{\partial \epsilon_+}{\partial z} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial \epsilon_+}{\partial t} + \kappa \epsilon_- + \\ \Gamma |\epsilon_+|^2 \epsilon_+ + 2\Gamma |\epsilon_-|^2 \epsilon_+ &= 0 \\ -i \frac{\partial \epsilon_-}{\partial z} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial \epsilon_-}{\partial t} + \kappa \epsilon_+ + \\ \Gamma |\epsilon_-|^2 \epsilon_- + 2\Gamma |\epsilon_+|^2 \epsilon_- &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\bar{n}$  为平均折射率,  $\kappa$  为线性耦合系数,  $\Gamma$  为非线性耦合系数。上式叫做非线性耦合模方程。

从(7)式出发,可以得到光纤光栅非线性效应导致的许多现象(包括上面提到的 Bragg 波长的移动)。这些现象许多已经过实验验证,有些尚处于理论探讨阶段。

## 2 光纤光栅非线性效应导致的现象及其应用前景

虽然在光纤光栅中诱发非线性需要极强的光功率密度<sup>[8]</sup>(约  $10^{10}$  w/cm<sup>2</sup>),但这种效应一旦产生,就会导致许多新的现象,这些新现象有望在光通信中得到应用。目前主要集中在下述几个方面:

(1)Bragg 波长随光强移动。其机理已在上节讨论中给出。这种移动由于具有皮秒量级的响应速度

而有望用于全光网络中的高速光交换。目前已引起人们的广泛关注。

(2)参量放大<sup>[8,14]</sup>。假设有一束泵浦光脉冲与一束信号脉冲同时注入光纤光栅。泵浦脉冲足够强,可以导致非线性产生,且其中心波长远离 Bragg 波长,从而可以不考虑光栅结构对它的影响;信号脉冲很弱,可以不考虑其产生的非线性,但其中心波长靠近 Bragg 波长。两脉冲可以通过交叉相位调制(XPM)和其他非线性过程发生相互作用。

我们知道,两束光在光纤中相互作用时,有可能发生参量放大过程。参量放大可以描述为:

$$\omega_p + \omega_s \rightarrow \omega_w + \omega_i \quad (8)$$

也就是说,两个频率为  $\omega_p$  的泵浦光子相互作用会产生一个频率为  $\omega_s$  的信号光子和一个闲频光子  $\omega_i = 2\omega_p - \omega_s$ 。泵浦光和信号光之间的频率差

$$\Delta\omega = \omega_s - \omega_p = \omega_p - \omega_i \quad (9)$$

将直接决定参量放大是否发生<sup>[15]</sup>。研究表明,在光纤光栅中,相位匹配的实现要比普通光纤中容易实现得多,因而也容易发生参量过程<sup>[14]</sup>。这一性质容易造成光纤光栅中多路信号之间的串扰;但若能有效利用,也可以实现对某些信号的放大。

(3)脉冲压缩<sup>[3,8,13]</sup>。在上面讨论的问题中,如果  $\Delta\omega$  较大,使得相位不匹配,参量放大就不能发生,两束光只能通过交叉相位调制(XPM)发生相互作用。当强泵浦光扫过信号光后,由于泵浦光导致的非线性使得信号光发生频移,一部分信号光被俘获并形成窄脉冲随泵浦光输出。这种脉冲压缩的过程又叫光学推扫现象。这种效应有望用于产生超窄光脉冲。

(4)模式转换<sup>[10,11]</sup>。利用光纤光栅的非线性效应可以控制 LP<sub>01</sub> 模和反射的 LP<sub>02</sub> 模之间的能量转换,这一性质有望应用于被动锁模光纤激光器中产生超快孤子。在锁模激光器的谐振腔内放置一个参数适当的光纤光栅,则光脉冲通过光纤光栅时,由于非线性效应,脉冲的不同部分形成不同的模式。高密度部分形成窄的脉冲孤子。此外,模式转换还可用于色散补偿等诸多方面。

(5)双稳态<sup>[10,11]</sup>。光纤光栅中非线性诱发后,在反射脉冲中会产生双稳态现象。这种现象基于上面的模式转换。利用这种性质可制成光学双稳器件(Optical Bistability Device, OBD)。而光学双稳器件可广泛应用于全光信号放大、开关、数字信号再生、触发和整形等高速信号处理中。

(6)光栅孤子<sup>[3,12]</sup>。光纤光栅的非线性效应可

以导致产生光栅孤子。它的机理是非线性效应和光纤光栅带外色散之间的动态平衡<sup>[3]</sup>。这种特殊的孤子已经在实验上观察到<sup>[12]</sup>。

我们可以用以下过程形象地理解光栅孤子的产生过程。

如果一个中心频率为  $\omega_h$  的强脉冲注入光纤光栅,则由于它的前沿功率较低被反射,反射到脉冲中心时又由于其功率高而透射过光纤光栅(如图 4 所示)。对于后沿展宽部分也可以做类似分析。也就是说,该中心频率的强脉冲可以把前沿展宽后的部分会聚到中心来,从而形成一种不弥散的波包,即所谓的光栅孤子。由于其中心频率可以处于原反射带隙内,所以又叫带隙孤子(Gap Soliton)<sup>[3]</sup>。

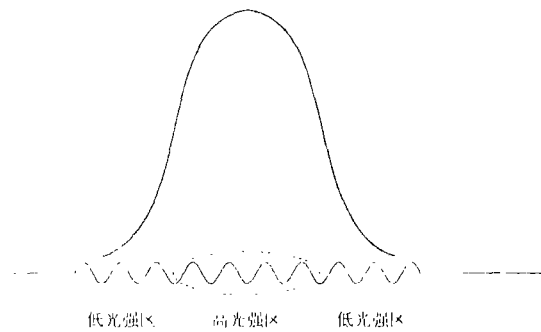


图4 光纤光栅中强脉冲诱发非线性产生光栅孤子简图(下边代表光纤光栅,上边代表强光脉冲,该脉冲在非线情况下可形成光栅孤子。虚线框里表示光纤光栅中光强较大的地方)

如果直接从耦合模方程出发,也可以推出与光栅孤子符合的非线性 Schrödinger 方程<sup>[3,8]</sup>。

光栅孤子同普通光纤孤子的性质有很大的不同,例如它的中心频率可以处于光纤光栅的反射带隙中,速度可以介于  $0 \sim \frac{c}{n}$  之间的任意值等等。光栅孤子可望用于实现全光网中的光逻辑。但是由于它的产生需要极强的光功率故而显得十分困难。

### 3 诱发光纤光栅非线性的方法

尽管光纤光栅的非线性效应能产生许多线性情况下不能发生的新现象,并且这些现象有望在光通信中得到广泛应用,但要在光纤光栅中产生非线性却是很困难的。这不仅仅是因为光纤介质的非线性系数很低,而且光纤光栅的长度一般也很短。然而,人们已开始采用各种方法去降低这种效应需要的光功率。主要有:

(1)利用两个附加的光栅提高耦合效率<sup>[16]</sup>。这

种方法在一定程度上降低了产生非线性的门限功率,但要求光频率须在反射带隙外,故只能得到带外孤子,得不到带隙孤子。

(2)在光纤光栅的制作过程中采用非均匀光进行折射率的非均匀调制。这种光纤光栅在反射带隙内外均能产生光栅孤子,但对光纤光栅的制作工艺要求较高。

(3)加长光栅长度。这样可以增大光与光栅的作用距离。

(4)光纤光掺入稀土元素,可使非线性系数大大增加<sup>[17,18]</sup>。已有实验表明,在光纤光栅中掺入 $\text{Yb}^{3+}$ 后,可以得到数十毫瓦的非线性响应功率<sup>[17]</sup>,而掺 $\text{Er}$ 光纤的高非线性折射率系数也早被人们发现<sup>[18]</sup>。

总之,随着光纤光栅在光通信中的越来越广泛的应用和密集波分复用信道数增加导致的光功率增大,光纤光栅中的非线性已成为人们必须去面对的课题。研究光纤光栅的非线性效应,不仅仅是为了消除其在密集波分复用系统导致的负面影响,更重要的是,可以开发出基于光纤光栅非线性性质的许多新型光学器件。这些新型器件可能会比线性情况下性能更好甚至具有某些线性情况下不具有的性质,从而有望在未来通信中得到广泛作用。

### 参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Hohnson D C et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**:647—649.
- [2] Hill K O, Meltz Fiber G. Bragg Grating Technology fundamental and Overview. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**:1 263—1 274.
- [3] C M de Sterke, Sipe J E. *Progress in Optics*, North-Holland, Amsterdam: E Wolf, 1994, 203—260.
- [4] Ren Xiaomin, Zhang Lintao, Ye Peida. Experimental Study on Fiber-

- Grating Bragg Reflectors. *Selected Papers of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 1992:32—37.
- [5] Giles C R. Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings. *Journal of Lightwave technology*, 1997, **15**(8):1 391—1 404.
- [6] Krug P A, Chow J, Eggleton B J. Applications for fiber Bragg gratings in communications. *Optical Fiber Communication '96*, 2010 Massachusetts Avenue NW, Washington DC, Technical Digest, 1996, 116.
- [7] Bilodeau F et al. An All-fiber Dense-wavelength-division Multiplexer/Demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings. *IEEE photo technology letter*, 1995, **7**(4):388—390.
- [8] C M de Sterke, N G Raphael Broderick, B J Eggleton. Nonlinear Optics in Fiber Gratings. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**: 253—268.
- [9] Eggleton B J, Stephens T, Krug P A. Dispersion compensation over 100 km at 10 Gbit/s using a fiber grating in transmission, *Optical Fiber Communication '96*, 2010 Massachusetts Avenue NW, Washington DC: postdeadline paper, 1996, PD5.
- [10] Shi Chaoxiang. Optical Bistability in Reflective Fiber Gratings. *Journal of Quantum Electronics*, 1995, **31**(11):2 037—2 043.
- [11] Shi Chaoxiang. Nonlinear performances of photoinduced fiber grating mode converter and their application. *Journal of Optical Communications*, 1997, **18**(1): 15—18.
- [12] Eggleton B J, Slusher R E. Bragg Grating Solitons. *Physical Review Letters*, 1996, **76**(10):1 627—1 630.
- [13] C M de Sterke. Optical push broom. *Optics Letters*, 1992, **17**:914—917.
- [14] Steel M J, C Martijn de Sterke. Bragg-assisted parametric amplification of short optical pulses. *Optics Letters*, 1996, **21**(6):420—422.
- [15] Agrwal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 1989, Chapter 5—6.
- [16] Haus H A. Matching of distributed-feedback structure. *Optics Letters*, 1992, **17**:1 134.
- [17] Janos M, Arkwright J, Brodzeli Z. Low power nonlinear response of  $\text{Yb}^{3+}$  doped optical fiber Bragg gratings. *Electronics Letters*, 1997, **33**(25):2 150—2 151.
- [18] Betts R A, Tiugiarto T, Xue Y L et al. Nonlinear Refractive Index in Erbium Doped Optical Fiber: Theory and Experiment. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, **27**(4):908—913.

## NONLINEARITY IN FIBER GRATINGS AND ITS APPLICATION PROSPECTS IN OPTIC FIBER COMMUNICATIONS

Li Jianxin    Chen Xue    Huang Yongqing    Ren Xiaomin

(*Optical Communications Center, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876*)

**Abstract** The mechanics of nonlinearity in fiber gratings is introduced, and the macroscopical phenomena and predicted their applications in optic fiber communications are summarized in this paper. Some means to decrease the power required by nonlinearity in fiber gratings are also given in this paper.

**Key words** fiber grating, nonlinearity, optic communication