

# 线性啁啾光纤光栅的优化设计\*

孟 晶 汤伟中 周 文

(浙江大学信电系, 杭州 310027)

徐森禄

(浙江大学光科系, 杭州 310027)

**摘 要** 基于线性啁啾光纤布拉格光栅(LCFBG)的色散补偿原理, 探讨了不同的准高斯型耦合系数函数曲线对色散补偿特性的影响, 建立使该光栅色散补偿曲线既具有高色散系数和宽带特点, 同时对边峰还有相对的抑制能力的设计思想。文中讨论了相关参数对色散补偿曲线的影响。

**关键词** 啁啾光纤光栅, 色散补偿, 耦合系数。

## 1 引 言

掺铒光纤放大器的实现使光纤通信研究热点集中于  $1.55 \mu\text{m}$  的低损耗区域。为补偿现有通信光纤在该处  $17 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$  的色散, 线性啁啾光纤布拉格光栅色散补偿器成为现今色散补偿研究的一大主角<sup>[1]</sup>。这种器件具有色散补偿能力强, 带宽相对较宽及制作简单等优点。然而该器件也有自身不足。通常色散补偿能力越强, 对应带宽就越窄, 色散补偿曲线波动越激烈, 导致经色散补偿后的光脉冲发生畸变; 反之则可能使补偿能力不够, 降低了器件的实用性。本文通过数值分析, 发现光栅的耦合系数对色散补偿曲线起着非常显著的作用。基于这个特点, 可以克服线性啁啾光纤布拉格光栅色散补偿器自身不足, 优化其色散补偿特性。

## 2 理论分析及计算

线性啁啾光纤布拉格光栅的工作原理本质上是相位色散<sup>[2, 4]</sup>, 即反射系数的相移  $\psi$  是光频  $\omega$  的函数。以  $f$  为反射系数, 则

$$f = |f| \exp(i\psi) \quad (1)$$

线性啁啾光纤布拉格光栅的群速度色散(GVD)有关系式<sup>[2]</sup>

$$D = - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\psi}{d\omega^2} \quad (2)$$

耦合系数  $\kappa(z)$  对  $z$  的积分  $\int_{-L/2}^{L/2} \kappa(z) dz$  是反映布拉格反射能力的决定因素( $L$  为光栅长度,

\* 本文受到浙江省自然科学基金的支持。

收稿日期: 1996 年 4 月 23 日

见图 1), 因而同反射率  $|f|^2$  相关。而相移又是反射系数的复角, 所以从逻辑上耦合系数  $\kappa(z)$  可以影响相移  $\psi^{[4]}$ 。这点从线性啁啾光纤布拉格光栅的耦合模方程可以看出<sup>[3]</sup>

$$\frac{dA}{dz} = -i\kappa(z) \exp \left[ i \int_{-L}^z d(t) dt \right] B \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dz} = i\kappa(z) \exp \left[ -i \int_{-L}^z d(t) dt \right] A \quad (4)$$

其中

$$d(z) = 2\beta - \Omega(z) \quad (5)$$

$$\Omega(z) = \frac{2\pi}{\Lambda} + \frac{2Fz}{L^2} \quad (6)$$

$$f(z) = B(z)/A(z) \quad (7)$$

$$\psi(z) = \arg [f(z)] \quad (8)$$

$A$  和  $B$  分别为沿  $+z$  和  $-z$  方向的复振幅;  $D(z)$  为总的失谐量;  $\beta$  为导波的传播常数;  $\Omega(z)$  对应于啁啾光纤光栅的有效波矢;  $F$  为啁啾系数。求解线性啁啾光纤布拉格光栅的群速度色散须先对  $\psi(-L)$  作计算。设定

$$\kappa(z) = \kappa_0 \exp(-C|z/L|^v) \quad (9)$$

$$\Phi(z) = -i \int_{-L}^z d(t) dt \quad (10)$$

$$A(z) = T(z) \exp[\Phi(z)/2] \quad (11)$$

$$B(z) = R(z) \exp[-\Phi(z)/2] \quad (12)$$

$$\eta(z) = \frac{R}{T} = f(z) \exp[\Phi(z)] \quad (13)$$

将其代入(3)式、(4)式可推得微分方程

$$\begin{cases} \frac{d\eta}{dz} = i(2\delta - 2Fz/L^2)\eta + i\kappa(z)(1 + \eta^2) \\ \delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \end{cases} \quad (14)$$

已知边界条件

$$\eta(L) = 0 \quad (15)$$

利用关系式:

$$\psi(z) = \arg [f(z)] = \arg [\eta(z)] - \Phi(z) \quad (16)$$

就可求出  $Z = -L$  处的反射系数和反射相移, 由(2)式最终求出群速度色散。传统上认为( $z$ )取高斯函数对反射谱峰及色散补偿曲线起着平滑作用<sup>[5]</sup>, 事实上这是以降低色散补偿能力和反射率为代价的<sup>[6]</sup>。图 2 即当线性啁啾光纤布拉格光栅的耦合系数  $\kappa(z)$  分别为常数和高斯函数时所对应的群速度色散。以下的计算中除特别说明外, 光栅长度都为 16 mm, 啁啾系数  $F$  取 15.0,  $\kappa(z)$  的指数系数  $C$  为 25.0, 反射共振波长为 1.55  $\mu\text{m}$ 。

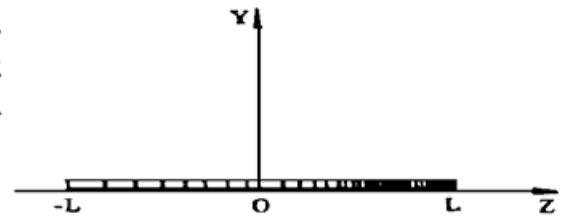


Fig. 1 The schematic diagram of LCF-BG

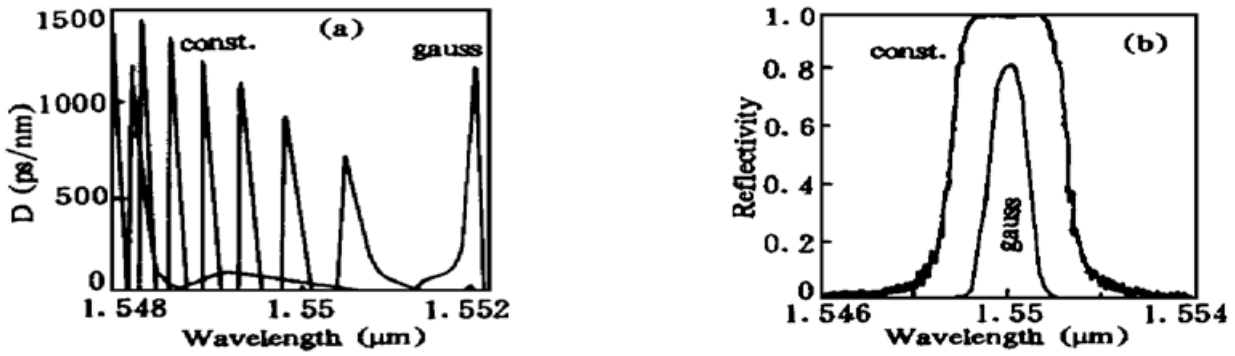


Fig. 2 The GVD (a) and reflectivity (b) curves of LCFBG with coupling coefficient of constant and Gauss function

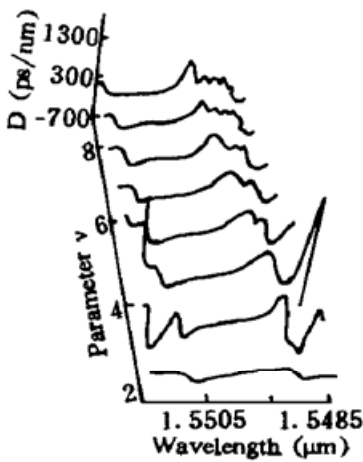


Fig. 3 The GVD curves of LCFBG with  $\nu = 2, 3, \dots, 9$

由图 2(a) 可见,  $\kappa(z)$  为高斯函数的线性啁啾光纤布拉格光栅色散曲线峰形较平缓, 其带宽较宽, 而  $1.55 \mu\text{m}$  附近处的最大群速度色散值下降到  $\kappa(z)$  为常数的 10%。图 2(b) 则清楚显示了因耦合系数的高斯化而导致的反射率幅值和反射带宽的消减。因光源谱宽和群速度色散而引起的脉冲展宽必然伴随光谱扩展, 所以实际器件应设法兼容高色散补偿能力和容忍带宽。根据文献[4], 与耦合系数相关的反射峰形状还部分决定了色散曲线的位置和形状, 这预示了耦合系数对群速度色散曲线修正的可能。经计算比较发现, 采用适当的类高斯函数(9)式作为耦合包络既能够保持高斯型函数平滑反射谱曲线和群速度色散曲线的功能, 同时又能大幅度提高反射率和群速度色散值。计算结果显示当指数取不同值时, 的确

在很大程度上改变了群速度色散曲线形状。对指数  $\nu$  值取  $N/2$  (其中  $N = 2, 3, \dots, 18$ ) 时, 结果见图 3(图中为便于分辨只取  $\nu = 2, 3, \dots, 9$ )。

分析图 3 的趋势可以发现如下规律。

- 1) 随着  $\nu$  值增大, 群速度色散值整体有增大的趋势(图 4), 在  $\nu$  值小于 3.5 的区域, 群速度色散值上升很快, 而在  $\nu$  值大于 3.5 的区域, 群速度色散值增长相对趋缓。
- 2) 如图 5, 在  $\nu$  值小于 3.5 的区域, 曲线峰值波长偏向短波长;  $\nu$  值大于 3.5 的区域, 其峰值波长偏向长波长。 $\nu$  值由 1 到 9 最大偏移是  $0.535 \text{ (nm)}$ , 该量相对光谱扩展量不可忽略。

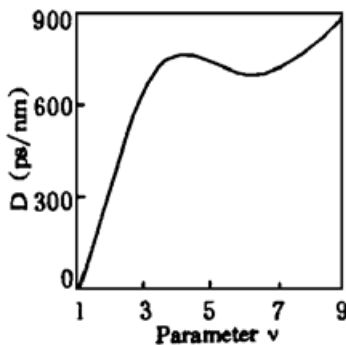


Fig. 4 Relation between parameter  $\nu$  and the maximum of GVD

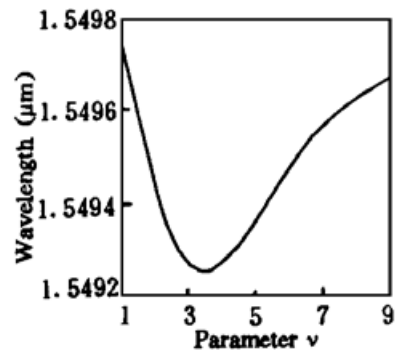


Fig. 5 Relation between parameter  $\nu$  and the wavelength of the maximum of GVD

3) 由  $\nu = 5$  开始, 群速度色散曲线逐渐向平台状峰形演变, 带宽逐步加宽并趋向平稳(如图 6), 而群速度色散平均值却几乎不下降。

4) 当  $\nu$  值太大时, 群速度色散曲线波动加剧, 补偿特性变差(图 7)。

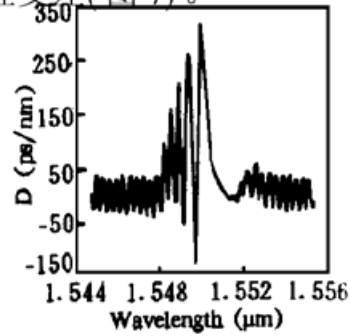
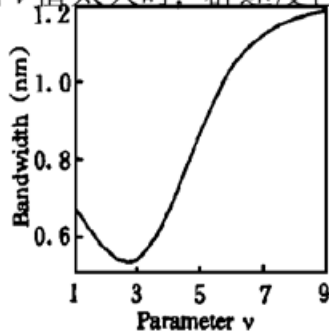


Fig. 6 Relation between  $\nu$  and the GVD curve bandwidth

Fig. 7 The GVD with  $\nu = 12.3$

比较该组群速度色散值,  $\nu$  值为 2 的高斯型耦合系数下的群速度色散最大值是 197.64 ps/nm, 其带宽为 0.61 nm;  $\nu$  值为 9.0 时群速度色散最大值是 908.3 ps/nm, 其带宽为 1.17 nm。对应于 17 ps/nm · km 的通信光纤, 上述两种光栅所具有的色散补偿能力相当于 16 mm 的线性啁啾光纤布拉格光栅分别可以补偿 11 km 和 50 km 光纤的色散累积。

其最引人注目的是特性 1)、3)。在  $\nu$  值由 1.0 趋向 9.0 的过程中, 随着色散补偿能力的提高和带宽的扩展, 群速度色散曲线渐趋平台状结构, 即在较宽频域内保持平稳高幅, 使线性啁啾光纤布拉格光栅的整体补偿能力得以优化提高, 实现了兼容群速度色散曲线幅度和带宽的目标。另一方面由图 3 可知, 群速度色散曲线较大幅的波动强度被有效抑制而使整体色散基本大于零, 这部分边峰往往就是线性啁啾光纤布拉格光栅群速度色散的高次项, 对较宽谱光脉冲和密集波分复用可能引起畸变及干扰<sup>[1]</sup>。定性比较  $\nu$  值由 1.0 到 9.0 的色散曲线,  $\nu$  值取 7.0 或 8.0 相对更佳。适当偏移反射谱中心波长以抵消因  $\nu$  值改变而导致的群速度色散峰值偏移(见图 8, 该偏移量远小于反射谱峰带宽, 故群速度色散曲线峰仍在反射谱内), 可以使 1.55  $\mu\text{m}$  波长正处在群速度色散曲线中间。

由(13)式可见, 微分方程的啁啾项同含  $\nu$  值项在同一处, 从理论上讲改变啁啾系数和改变  $\nu$  值有相关的效果。图 9 就是  $\nu$  值取 8 而啁啾系数取 15、25、35 时的群速度色散曲线。该曲线说明随着啁啾系数增加, 群速度色散平均值下降而带宽趋宽。与增大  $\nu$  值相比其幅值下降而带宽更宽。对于要求色散补偿的均匀性甚于补偿量的情况更适于采用此法, 例如密集波分复用中以一个线性啁啾光纤布拉格光栅同时补偿两路以上光信号。

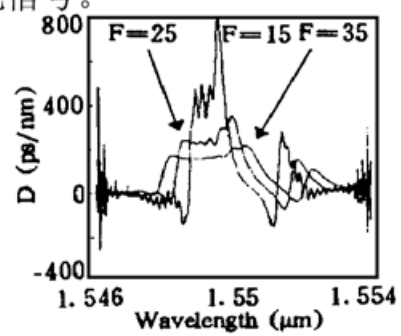
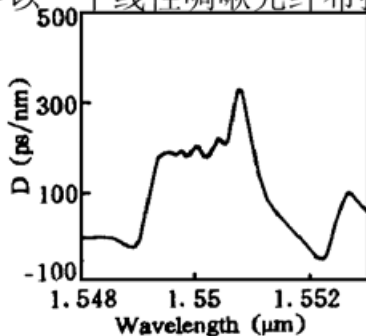


Fig. 8 The figure of GVD curve with  $\nu = 8, L = 8$  mm

Fig. 9 The figure of GVD curve with  $F = 15, F = 25, F = 35$

**结 论** 本文基于线性啁啾光纤布拉格光栅的群速度色散曲线对耦合系数的依赖性, 通过对一系列类高斯型耦合系数情况下色散补偿能力的计算, 认为当光纤光栅微扰强度较小而整个栅长有限的情况下, 线性啁啾光纤布拉格光栅的高斯耦合渐变方程并非最佳选择。适当提高  $\nu$  值可有效增强色散补偿能力并扩展补偿带宽, 它对边峰的抑制也在一定程度上优化了色散补偿特性。根据不同的需要, 选取适当的  $\nu$  值、啁啾系数和光栅长度可以最大限度满足要求, 这对于实际设计线性啁啾光纤布拉格光栅有参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] J. A. R. Williams, I. Bennion, K. Sugden *et al.*, Fibre dispersion compensation using a chirped in-fibre Bragg grating. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12) : 985~ 987
- [2] Herbert G. Winful, Pulse compression in optical fibre filters. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(6) : 527~ 529
- [3] H. Kogelnik, Filter response of nonuniform almost-periodic structures. *Bell Syst. Tech. J.*, 1976, **55**(1) : 109~ 125
- [4] D. S. Peter, W. Hodel, H. P. Weber, Compression of pulses spectrally broadened by self-phase modulation using a fiber-grating: a theoretical study of the compression efficiency. *Opt. Commun.*, 1994, **112**(12) : 59~ 66
- [5] K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo *et al.*, Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17) : 1314~ 1316
- [6] Francois Ouellette, Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. *Opt. Lett.*, 1987, **19**(10) : 847~ 849

## Optimization of the Linearly Chirped Fibre Bragg Grating

Meng Jing      Tang Weizhong      Zhou Wen

(Information and Electronic Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Xu Senlu

(Optics and Science Instrument Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 23 April 1996)

**Abstract** Based on the principle of dispersion compensation with linearly chirped fibre Bragg grating (LCFBG), the different capability of LCFBG varying the quasi-Gauss head coupling profile was analysed. A design is presental which can make the LCFBG provide both strong ability of dispersion equalization and smoothed broad bandwidth GVD curve with depressed sidelobes. The influence of relative parameter to the GVD curve is discussed.

**Key words** chirped fibre grating, dispersion compensation, coupling coefficient.