

优化啁啾光栅耦合系数分布改善 其色散特性

张培琨^{1,2} 李育林¹ 刘家英² 乔学光¹ 忽满利¹

(¹ 中国科学院西安光机所光学室 西安 710068; ² 西安应用光学研究所 西安 710065)

提要 在对线性啁啾光栅的反射率峰值和带宽进行计算的基础上,结合新定义的光栅色散统计二阶矩构造出一个较全面反映光栅特性的品质因数。通过比较得出一组最佳的品质因数调节参数,并用于对光栅耦合系数高斯分布形状和耦合长度进行优化,最终获得了最佳的色散特性。结果表明本文提出的方法是一种能有效地优化光栅结构的定量方法。

关键词 色散特性,光栅耦合系数,优化,品质因数

1 引 言

自 1978 年以来光纤光栅技术发展迅猛,不同类型的光栅在众多领域都有重要的应用^[1-3]。特别是发现啁啾光栅具有反射带宽(FWHM)宽的特点后,近年来国内外已开始重视对啁啾光纤光栅的研究^[4-6]。研究显示用线性啁啾光栅作为色散补偿器可以补偿光通信中存在的色散。然而尽管它具有色散补偿能力强、带宽相对较宽等优点,但是随着色散补偿能力提高,对应带宽变窄,色散补偿曲线波动愈加激烈,从而导致色散补偿后的光脉冲发生畸变。人们发现通过变化光栅耦合系数,可以改善啁啾光栅补偿色散的性能。在众多分布变化中^[7],高斯分布是一种较理想的分布。本文仅针对光栅耦合系数变化服从高斯分布这一情况,对于有限长的啁啾光栅,改变高斯分布的控制参数,观察不同的高斯分布引起其色散特性的变化,最终用描述色散特性优劣的品质因数来定量优化啁啾光栅,以期获得最佳的色散特性。

2 理论模型

从麦克斯韦方程出发,经近似和简化后可以得到关于啁啾光栅的耦合模方程^[8]

$$\begin{aligned} \frac{dA^+}{dz} &= k(z) \exp\left[-j \int_0^z B(z') dz'\right] A^- \\ \frac{dA^-}{dz} &= k(z) \exp\left[j \int_0^z B(z') dz'\right] A^+ \end{aligned} \quad (1)$$

式中 A^+ 和 A^- 分别表示前向波和后向波的幅度。 $k(z)$ 为沿啁啾光栅传播方向变化的耦合系

* 国家自然科学基金资助项目(69687005)。

收稿日期: 1998-03-02; 收到修改稿日期: 1998-05-28

数。对于线性啁啾光栅有

$$\int_0^z B(z') dz' = 2\delta\beta z - \frac{Fz^2}{2L^2} \quad (2)$$

其中 F 为啁啾系数, β 为传播常数, δ 为失谐量。对 A^+ 和 A^- 作如下变换

$$\begin{aligned} A^+ &= u(z) \exp(-j\delta z) \\ A^- &= v(z) \exp(j\delta z) \end{aligned} \quad (3)$$

并定义反射系数为

$$\gamma(z) = \frac{v(z)}{u(z)} \exp\left[j \frac{Fz^2}{2L^2}\right] \quad (4)$$

则由方程(1)可以得出

$$\frac{d\gamma(z)}{dz} = -j \left[2\delta\beta - \frac{Fz}{L^2} \right] \gamma(z) + k(z) [1 - \gamma^2(z)] \quad (5)$$

当有限啁啾光栅的耦合长度为 $-L/2 \leq z \leq L/2$ 时, 边界条件为

$$\gamma(L/2) = 0 \quad (6)$$

通过数值积分(5)式和(6)式就可得出光栅在 $z = -L/2$ 处的反射率 $R = \gamma(-L/2)\gamma^*(-L/2)$, 此时若反射波相对入射波的相位相差 ψ , 则归一化色散参数 $\eta = \frac{d^2\psi}{d\Delta^2}$ 。其中 $\Delta = \delta\beta L$ 为归一化失谐量。已有的研究表明^[4], 当使色散补偿曲线平坦时, 会伴随反射谱峰值下降, 带宽变窄。对于一个色散补偿器, 总希望它既要有较平坦的色散曲线, 又要有较宽的带宽和较大的反射峰值。所以我们定义一个品质因数 Q 来描述光栅有关这方面的性能

$$Q = C_1 R_{\max} + C_2 D - C_3 M \quad (7)$$

式中 R_{\max} 为反射率的峰值, D 为带宽, M 为反射带宽内色散曲线振荡的统计二阶矩, 其定义为

$$M = \frac{\langle (\Delta\eta)^2 \rangle}{\langle \eta \rangle^2} \quad (8)$$

另外, C_1, C_2, C_3 为常数, 它们反映了各参量对品质因数产生影响的强弱程度。

3 数值结果

针对高斯分布

$$k(z) = k_0 \exp(-\alpha z^2/L^2) \quad (9)$$

进行计算。其中 k_0 为光栅耦合系数, α 为高斯分布控制参数, L 为啁啾光栅耦合总长度。首先用 Runge-Kutta-Gill 方法对(5)式在条件(6)式下求解, 进而求出光栅反射率与失谐量的关系曲线, 再用最小二乘法对该曲线进行光滑拟合, 从而得到反射带宽。在反射带宽范围内对色散系数 η 按(8)式求其二阶矩来反映其振荡强弱。分别变化高斯分布控制参数 α 和光栅长度 L , 由 Q 值来选取最佳值使该光栅色散补偿性能最好。

计算中取定 $k_0 = \pi, F = 30\pi$, 失谐量 $\Delta/2\pi$ 在 $-8 \sim 8$ 范围, 控制参数在 $8 \leq \alpha \leq 24$ 及光栅耦合长度在 $1 \leq L \leq 4$ 之间变化。计算了光栅的反射谱峰值和带宽, 同时用(8)式计算了反射带宽范围中色散特性曲线的统计二阶矩, 见图 1 所示。

当光栅耦合长度过短时, 光栅的反射率峰值很小且随着耦合系数高斯分布控制参数增大而递减。若将耦合长度变长, 反射率峰值就迅速升高, 且随分布参数的增大而增大。但是这种

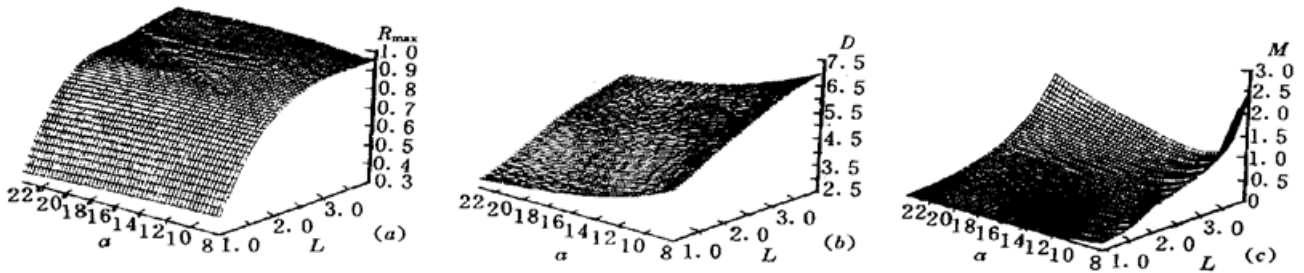


图 1 光栅反射率峰值 $R(a)$, 光栅反射带宽 $D(b)$ 和光栅色散曲线的统计二阶矩 $M(c)$ 与耦合系数高斯分布控制参数 α 及耦合长度 L 之间的三维变化曲面关系图

Fig. 1 The relationship among the reflectivity peak value R (a), the relationship among the bandwidth D (b) and the relationship among the statistic second order moment M (c), control parameter α of Gaussian distribution and coupling length L of a grating

反射率峰值随耦合长度变化快速递增的关系具有一定的饱和效应。从耦合长度大于 2.5 开始, 递增速度变缓并趋于饱和。由图 1 (b) 可以看出, 反射带宽与分布参数之间存在单调递减关系, 而与耦合长度成单调递增关系。图 1(c) 显示反射带宽范围内色散曲线的统计二阶矩随耦合长度增大而变大。对于耦合长度过短的光栅, 色散曲线的统计二阶矩很小且当分布参数大于 12 时趋于零。对于耦合长度较长的光栅, 色散统计二阶矩较大并与分布参数之间存在极小值关系。对应那些取值较小或较大的分布参数, 色散统计二阶矩都比较大, 在 12 至 14 之间有一极小值。由图 1 得出, 恰当选取分布参数和耦合长度会获得色散特性较佳的啁啾光栅。为此采用(7) 式的品质因数来定量表征光栅的色散特性。

首先我们选取三组不同的 C_1, C_2 和 C_3 取值, 并将反射率峰值、带宽和色散统计二阶矩分别各自归一化以使它们之间具有同数量级的可比性。第一组取 $C_1 = 1, C_2 = 1$ 和 $C_3 = 1$ 以便突出反射率峰值和带宽在品质因数中的重要性; 第二组取 $C_1 = 1, C_2 = 1$ 和 $C_3 = 2$ 从而使反射率峰值与带宽同色散统计二阶矩在品质因数中处于同等重要的地位; 第三组取 $C_1 = 1, C_2 = 1$ 和 $C_3 = 3$ 来强调统计二阶矩在品质因数中的重要地位。

图 2 给出了这三组 C_i 取值得到的品质因数与分布控制参数及耦合长度的三维曲面和等值线图。显见三组 C_i 的品质因数极大值所对应的分布控制参数差别不大, 它们的取值都在 11.7 附近。但针对不同的 C_i 取值, 极大值对应的耦合长度相差很大, 第一组 C_i 取值导致极值点对应的耦合长度偏长; 第三组 C_i 取值使极值点对应的耦合长度偏短; 第二组 C_i 取值使极值点对

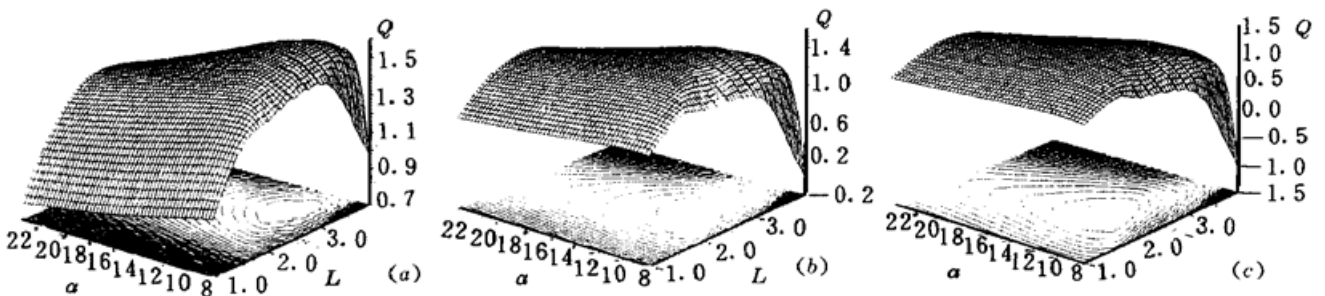


图 2 C_i 取值不同时得到的品质因数与分布控制参数 α 及耦合长度 L 的三维曲面和等值线图

Fig. 2 The three-dimensional surface and contour of quality factors versus the control parameter α and coupling length L for different series of C_i

(a) $C_1 = 1, C_2 = 1, C_3 = 1$; (b) $C_1 = 1, C_2 = 1, C_3 = 2$; (c) $C_1 = 1, C_2 = 1, C_3 = 3$

应的耦合长度介于上述两组之间。取图 2 各极值点对应的参数来计算光栅反射谱及反射带宽范围内的色散特性曲线和色散时延曲线, 并将它们与光栅耦合系数恒定情况下各曲线一一对应绘于一起进行比较。其中 $0:0:0$ 表示耦合系数恒定, 其他分别表示三种 C_i 取值。图中十分明显地反映出经过优化的光栅反射谱的边瓣谱不仅被完全抑制了, 同时色散曲线的振荡行为也被压制得更平坦, 时延曲线更接近于直线, 如图 3 所示。

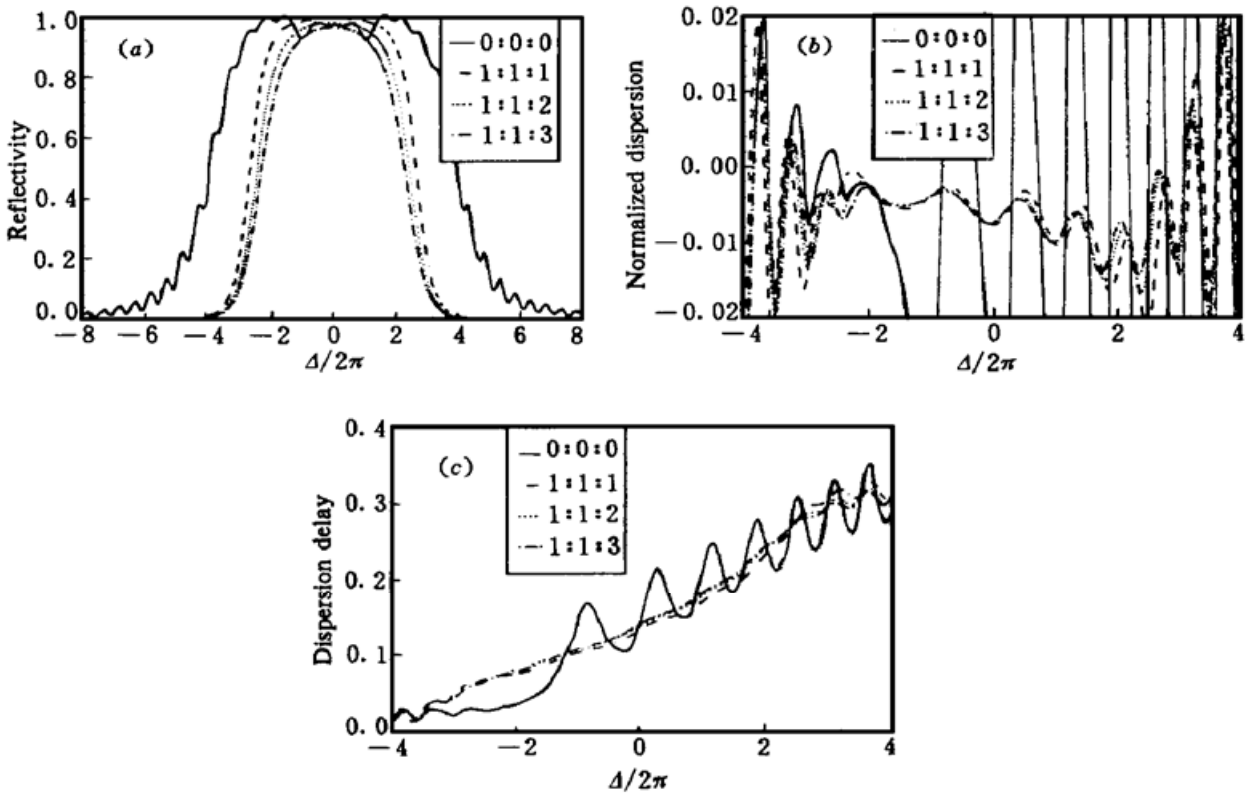


图 3 品质因数 Q 中取三组不同 C_i 值所获得的优化结果与光栅耦合系数恒定所得结果的比较

(a) 反射谱; (b) 色散特性; (c) 色散时延特性

Fig. 3 The optimization results for different series of C_i

(a) reflectivity of the linearly chirped grating versus detuning;

(b) dispersion versus detuning; (c) dispersion delay versus detuning

由图 3 可见, 对于色散时延曲线其线性化效果在三种 C_i 取值中是基本相同的, 对色散曲线振荡行为的压制作用也是基本一致的。同未优化的光栅相比, 有关上述两方面三组取值间所存在的差别是微不足道的, 唯一明显区别表现在反射谱间的不同。虽然都不存在边瓣谱, 但第一组 C_i 优化获得的反射谱带宽和峰值都大于第三组优化结果。主要原因在于前者优化的光栅耦合长度大于后者。这种耦合系数分布变化的光栅可在紫外光写入光栅时由光源强度自身的分布或变化模板扫描速度来获得, 也可在离子刻蚀光栅时控制刻蚀深度来实现。为了适应光栅制造, 选取介于上述两者之间的第二组 C_i 会更合理些。同时发现, 只要 $C_1 + C_2$ 的值一定, 则不论 C_1 和 C_2 比值怎样变其优化结果是一致的。所以影响优化的关键是提高品质因数的各量量值和降低品质因数的各量量值在该品质因数中所占权重的大小。

3 结 论

对线性啁啾光栅的反射率峰值和带宽进行了计算, 并结合新定义的光栅色散统计二阶矩

构造出一个较全面反映光栅特性的品质因数。通过比较得出一组最佳的品质因数调节参数,进一步用该品质因数对光栅耦合系数高斯分布形状和耦合长度进行优化。优化的光栅不仅具有光滑的宽带反射谱,而且色散时延曲线更趋于线性化,同时色散曲线平坦,其振荡行为被最大限度地抑制。这些都使该光栅更适合用于补偿色散。虽然本文只是对光栅耦合系数高斯型分布进行了讨论,但由此可以表明用统计二阶矩定量描述色散的振荡行为,并与反射带宽和峰值一起作为反映光栅适于补偿色散的判据能够成功地使优化光栅结构定量化。所定义的光栅品质因数不受耦合系数分布形式的限制,完全可用于对各类耦合系数分布下的光栅进行优化。

参 考 文 献

- 1 Hill K. O., Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~ 649
- 2 O. E. Martinez. 3000 Times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in 1.3~ 1.6 μm region. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1): 59~ 64
- 3 J. A. R. Williams, I. Bennion, N. J. Doran. The design of in-fiber Bragg grating systems for cubic and quadratic dispersion compensation. *Opt. Commun.*, 1995, **116**: 62~ 64
- 4 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 847~ 849
- 5 K. A. Ahmed. Simultaneous mode selection and pulse compression of gain-switched pulses from a Fabry-Perot laser using a 40mm chirped optical fiber grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(2): 158~ 160
- 6 Y. C. Zhao, T. J. Li, S. S. Jian *et al.*. Investigation of chirped fiber gratings on chromatic dispersion and time delay. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(9): 1270~ 1273 (in Chinese)
- 7 Zhang Peikun, Li Yulin, Yu Zhisheng *et al.*. Effects of coupling coefficient distribution on the dispersion of linearly chirped gratings. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1998, **27**(3): 198~ 203 (in Chinese)
- 8 M. Matsuhara, K. O. Hill, A. Watanabe. Optical-waveguide filters: Synthesis. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(7): 804~ 809

Improvement to Dispersion Property of a Linearly Chirped Grating by Optimizing the Distribution of Coupling Coefficient

Zhang Peikun^{1,2} Li Yulin¹ Liu Jiaying² Qiao Xueguang¹ Hu Manli¹

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

²*Xi'an Applied Optics Institute, Xi'an 710065*

Abstract In this paper the reflectivity peak value and bandwidth of a linearly chirped grating are calculated. A second order moment of the dispersion is defined. A quality factor is used to exactly describe the dispersion property of the grating. With this quality factor, the grating structure is optimized by selecting different coupling lengths and the distribution of coupling coefficient to improve its dispersion property. The results show that the method reported in this paper is a quantitative one being able to optimize the structure of gratings efficiently.

Key words dispersion property, coupling coefficient of grating, optimization, quality factor