

啁啾光栅色散及时延特性研究*

赵玉成 李唐军 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

祝亚琴 张静媛 韩 勤 王 圩

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘 要 基于耦合模理论, 通过对耦合波方程进行相位共轭变换, 将反向耦合波方程变换为 Riccati 微分方程, 利用数值解法对常耦合系数和高斯型耦合系数线性啁啾光栅的反射特性、色散特性和时延特性进行了详细分析, 为设计具有理想效果的色散补偿器件提供了有效的理论方法。

关键词 啁啾光栅, 时延, 色散。

1 引 言

Ouellette 首先提出啁啾布拉格光栅可以实现色散补偿的理论^[1]。光栅理论以耦合波方程为基础, 而反向耦合波方程一般没有解析解。Hill 等人直接利用数值法对非周期分布的波导结构光栅滤波器特性进行了分析^[2-4]。Uchida 利用数值法对耦合系数为指数衰减的锥形光栅进行了分析^[5]。另一种方法是把光栅的非均匀结构视为分段均匀的光栅, 每一部分由一个已知的矩阵表示, 通过矩阵相乘计算光栅的整体特性, Kermisch 利用这种方法对同向光栅耦合器特性进行了分析^[6]。本文利用另一种方法将耦合波方程化简为 Riccati 微分方程, 然后利用数值解法对光栅的反射特性、色散特性、时延特性进行分析。通过对啁啾光栅的特性分析, 得出啁啾光栅反射率、归一化色散、归一化时延与归一化频率之间的关系曲线, 为实际制作啁啾光栅实现色散补偿提供了理论指导。

2 理 论

啁啾光栅的前向波和后向波的耦合方程为^[7]

$$\frac{dA^+}{dz} = \kappa(z) \left[\exp \left(-j \int_0^z B(z') dz' \right) A^-, \quad \frac{dA^-}{dz} = \kappa(z) \left[\exp \left(j \int_0^z B(z') dz' \right) A^+ \right. \right. \quad (1)$$

A^+ 、 A^- 分别为前向波和后向波的幅度, $\kappa(z)$ 为啁啾光栅的本地耦合系数, $B(z)$ 的表达式为

$$B(z) = 2\beta - \Omega(z) \quad (2)$$

β 为传播常数, $\Omega(z)$ 为光栅的本地空间频率, 当光栅为线性啁啾情况时, $B(z)$ 的表达式为

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 7 月 31 日

$$B(z) = 2(\beta_0 + \delta) - (\Omega_0 + \frac{Fz}{L^2}) = 2\delta - \frac{Fz}{L^2} \quad (3)$$

则

$$\int_0^z B(z') dz' = 2\delta z - \frac{Fz^2}{2L^2} = 2\delta z - \Phi(z) \quad (4)$$

式中 F 为啁啾系数, $\beta_0 = \Omega_0/2$ 为空间中心频率, $\Phi(z) = Fz^2/2L^2$ 。假设光栅的耦合区为 $-L/2 \leq z \leq L/2$, 边界条件为 $A^+(-L/2) = 1$, $A^-(L/2) = 0$ 。在一般情况下, 方程没有解析解。由于关心的是在 $z = -L/2$ 处 $A^-(z)$ 与 $A^+(z)$ 的比值, 没有必要了解 $A^-(z)$ 与 $A^+(z)$ 沿 z 变化的具体情况。因此作变换

$$A^+(z) = r(z) \exp(-j\delta z), \quad A^-(z) = s(z) \exp(j\delta z) \quad (5)$$

则耦合波方程(1)可表示为

$$r' - j\delta r = \kappa(z)s \exp(j\Phi), \quad s' + j\delta s = \kappa(z)r \exp(-j\Phi) \quad (6)$$

定义本地反射系数

$$\rho(z) = \frac{s}{r} \exp(j\Phi) \quad (7)$$

对(7)式两边微分并利用(6)式得关于 ρ 的 Riccati 微分方程

$$\rho' = -j(2\delta - \Phi')\rho + \kappa(z)(1 - \rho^2) \quad (8)$$

方程的边界条件简化为

$$\rho(L/2) = 0 \quad (9)$$

光栅在 $z = -L/2$ 处的反射率为 $R = \rho\rho^*$ 。这样利用数值解法可以对啁啾光栅的反射特性、色散特性和延时特性进行分析。

3 数值结果

一般情况下, Riccati 方程(8)没有解析解, 通常用数值法进行求解。为了使数值结果具有更普遍的意义, 引入归一化频率参量 $\Delta = \delta L$, 归一化耦合长度 $\kappa_0 L$, 归一化色散参量 $\zeta = d^2\psi/d\Delta^2$, 归一化时延参量 $\gamma = d\psi/d\Delta$, 其中 $\psi(\Delta)$ 为反射波相对于入射波的相位。利用 Runge-Kutta 法对 Riccati 方程进行求解得线性啁啾光栅的反射谱特性、色散特性和时延特性, 如图 1 所示。

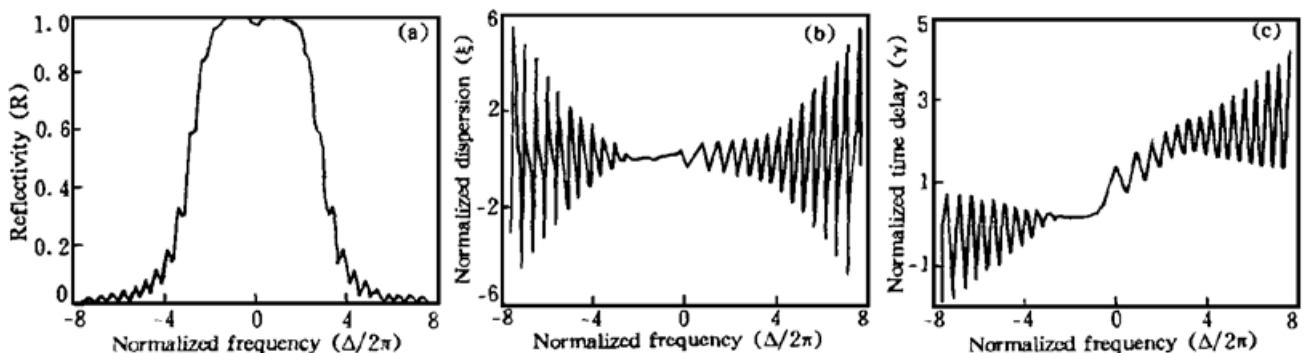


Fig. 1 (a) Variation of the reflectivity of linearly chirped grating with a constant coupling coefficient versus normalized frequency $\Delta/2\pi$; $\kappa_0 L = 2\pi$, $F = 20\pi$, (b) Normalized dispersion versus normalized frequency $\Delta/2\pi$, (c) Normalized time delay versus normalized frequency $\Delta/2\pi$

可见,光栅的反射谱并不平滑,这是由于每一个本地反射波长附近存在旁瓣反射。而啁啾光栅的色散特性不平坦,时延特性的线性度不好,这种常系数线性啁啾光栅很难满足色散补偿的要求。为了抑制啁啾光栅的旁瓣,获得平坦的色散特性和良好的时延特性,可以通过改变沿光栅方向的耦合系数来实现,即使得在光栅的反射峰处的耦合系数大,在反射峰两侧的耦合系数小。如果光栅的耦合系数为高斯形状函数,则光栅反射谱的平滑性可以大大改善。对于紫外写入光栅,可以通过光源强度本身的高斯分布,在一定程度上实现耦合系数的变化。对于离子刻蚀法制作的光纤光栅,可以通过控制刻蚀深度来实现耦合系数随光栅位置的变化。对于高斯型耦合系数

$$\kappa(z) = \kappa_0 \exp(-\alpha z^2/L^2) \quad (10)$$

线性啁啾光栅的反射谱特性、色散特性和时延特性如图 2 所示。

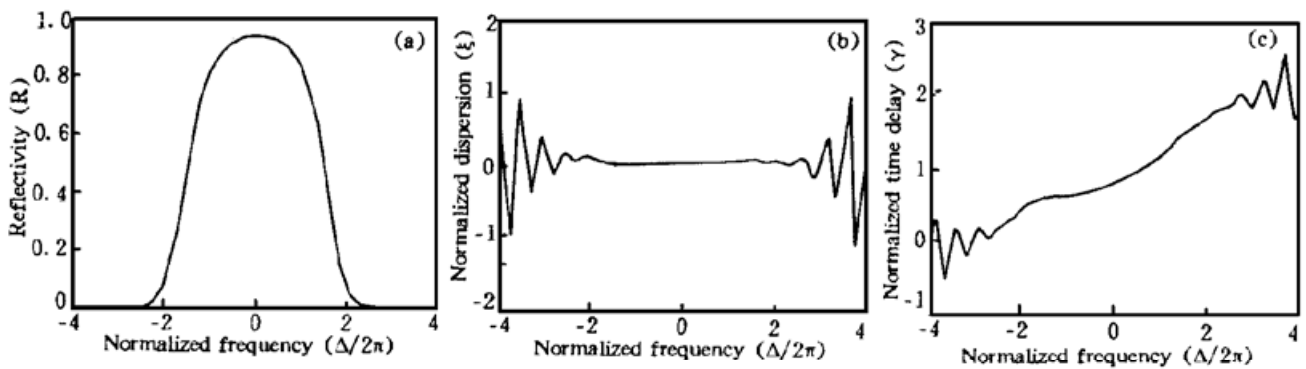


Fig. 2 (a) Reflectivity of a linearly chirped grating with a Gaussian taper function versus normalized frequency $\Delta/2\pi$: $\alpha = 16$, $\kappa_0 L = 2\pi$, $F = 20\pi$, (b) Normalized dispersion versus normalized frequency $\Delta/2\pi$, (c) Normalized time delay versus normalized frequency $\Delta/2\pi$

数值分析表明,具有高斯型耦合系数的线性啁啾光栅的反射谱特性较常耦合系数的线性啁啾光栅平滑,色散特性较平坦,时延特性在很大的区域内线性度好。由于中心频处的耦合系数大,而中心频率两侧的耦合系数逐减小,因此边瓣谱得到很好的抑制,反射带宽变窄,谱特性平滑,但由于光栅的平均耦合系数减小,因而峰值反射率也稍有降低。为了保证峰值反射率不下降,而又能得到色散特性平坦、时延线性度良好的啁啾光栅,可以用增大耦合系数的办法来实现。

结 论 本文从耦合模理论出发,通过对前向波和反向波变换,将耦合波方程化为 Riccati 方程,利用 Runge-Kutta 法对线性啁啾光栅的谱特性、色散特性和时延特性进行了数值分析。结果表明,高斯型耦合系数的线性啁啾光栅的时延特性较常系数线性啁啾光栅的时延特性的线性度更好,为实际制作啁啾光栅提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] F. Ouellette, Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 847~ 849
- [2] K. O. Hill, Aperiodic distributed parameter waveguides for integrated optics. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(8): 1853~ 1856
- [3] M. Matsuhara, K. O. Hill, Optical waveguide band-rejection filters design. *Appl. Opt.*, 1974, **13**

- (12) : 2886~ 2888
- [4] M. Matsuhara, K. O. Hill, A. Watanabe, Optical waveguide filters synthesis. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(7) : 804~ 809
- [5] N. Uchida, Calculation of diffraction efficiency in hologram gratings attenuated along the direction perpendicular to the grating vector. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(3) : 280~ 287
- [6] D. Kermisch, Nonuniform sinusoidally modulated dielectric gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(11) : 1409~ 1414
- [7] J. R. Pierce, Coupling of modes propagation. *J. Appl. Phys.*, 1954, **25**(2) : 179~ 183

Investigation of Chirped Fiber Gratings on Chromatic Dispersion and Time Delay

Zhao Yucheng Li Tangjun Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

Zhu Yaqin Zhang Jingyuan Han Qin Wang Wei

(*Institute of Semiconductor, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(Received 31 July 1996)

Abstract Based on coupled mode theory, we reduce the contradirectional coupled mode equation to Riccati differential equation by means of phase conjugate transform. The reflectivity, dispersion, time delay characteristics with constant coupling coefficient and Gaussian taper function coupling coefficient of linearly chirped gratings are analysed numerically. It provides an effective theoretical approach for design of desired chromatic dispersion compensator.

Key words chirped gratings, time delay, chromatic dispersion.