

文章编号: 1001-4322(2004)06-0717-04

平行光栅对在刻线不平行时的色散研究*

严云富, 罗 斌, 潘 炜, 李宜峰

(西南交通大学 计算机与通信工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 利用三维空间光线追迹法, 分析了啁啾脉冲放大系统中的压缩光栅对, 在刻线不平行而光栅面平行时光的衍射特性。导出了此时光通过光栅对的群延时, 数值计算了系统 2 阶和 3 阶色散量, 以及这些色散量在光栅对严格平行时的相对误差。得出了中心波长光的接收位置相对于光栅对严格平行时的偏移量, 并且分析了它与入射角的变化关系。

关键词: 光线追迹法; 光栅对; 光波矢; 色散

中图分类号: TN206

文献标识码: A

自 Treacy 首次提出平行光栅对理论以来^[1], 平行光栅对已引起广泛关注, 此后又经 Martinez^[2,3]等人深入研究, 目前已形成了相对完整的理论体系, 并获得应用, 如在啁啾脉冲放大系统中作为压缩器使用。平行光栅对的“平行”严格来说, 应该包含光栅平面平行和光栅刻线平行两方面。然而, 在实际应用过程中, 由于系统校准误差等因素的影响, 这种严格平行难以实现。虽然, 已有部分学者对光栅不平行时压缩器的色散特性进行了研究^[4,5], 但这些工作基本上是基于光栅平面不平行而光栅刻线平行这种情况进行的。在光栅刻线平行的情况下, 光的入射、出射均在刻线的法平面内, 可以在 2 维平面内利用光线追迹方法进行研究。

问题是, 当光栅平面平行而刻线不平行时, 至少在一个光栅面上入射光线和出射光线不在刻线法平面以内。在接收平面上, 光的接收位置也将偏离光栅刻线平行时的接收位置。这时就需要将光线追迹法拓展到三维空间。本文将入射光波矢分解为平行于光栅刻线和垂直于光栅刻线的两分量, 分别考虑光栅对它们的作用^[6], 从而确定此时的光线衍射方向。最后, 通过数值计算, 得出系统此时 2, 3 阶色散值及其和刻线严格平行时的误差, 以及在接收面上中心波长光的接收位置的相对偏移量。

1 理论分析

1.1 光路及坐标说明

图 1 为平行光栅光路传播示意图。G₁, G₂ 是两平行光栅对, O₁O₂ 为两光栅之间的垂直距离, 其值为 d₀。光线从 O₁ 点入射, 经 G₁, G₂ 衍射, 过 O₁O, OH, 在和入射光线垂直的平面 O₁H 上被接收, 这时入射、出射光线均在刻线法平面 O₁OH 以内。若 G₂ 在其原平面内以 O 为中心旋转一个角, 即两光栅刻线变得不平行且存在一个夹角, 以下称为转角。这时 G₂ 上的入射光线(也就是 G₁ 上的衍射光线) O₁O 不再和 G₂ 的光栅刻线垂直。经 G₂ 衍射后的出射光线 OH 也偏离了 O₁OH 平面。在 G₂ 上, 入射光波矢在光栅刻线法平面的投影分量经 G₂ 发生衍射, 和光栅刻线平行的分量在 G₂ 平面上发生反射, 出射光线光波矢是衍射分量与平行分量的合成^[6]。据此原理并忽略光传播中能量损耗, 在同一坐标系下作出 G₂ 旋转前后的入射、出射光波波矢图见图 2 和图 3。

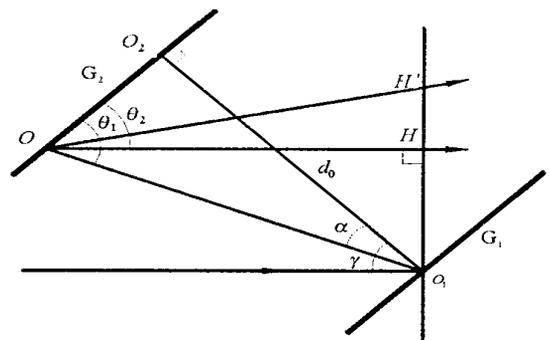


Fig. 1 Schematic of the parallel grating pair

图 1 光栅对工作示意图

图 2, 图 3 都以旋转过后的光栅刻线方向为 x 轴方向, 光栅 G₂ 平面为 xoy 平面。图 2 为 G₂ 光栅未旋转时的光入射、出射光波矢示意图。l 为光栅刻线方向, 它与 x 轴向成角, M 平面为过原点 O 的光栅刻线法平面, 入射波矢 AO 和出射波矢 OB 均在此平面内。AO 为入射光线 O₁O 的光波波矢, 方向和图 1 中 O₁O 一致。OB 为 G₂ 未旋转时衍射光线的光波矢, 对应图 1 中的出射光线 OH 方向。

* 收稿日期: 2003-05-09; 修订日期: 2004-03-03

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(20020433)

作者简介: 严云富(1973—), 男, 在读硕士, 主要从事光纤通信与光器件研究; E-mail: yanyunfu@sohu.com。

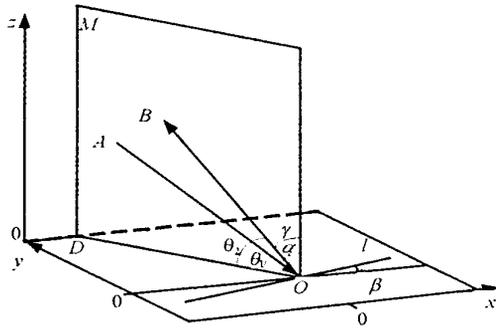


Fig.2 Diagram of diffraction on G_2 before rotation

图 2 G_2 未旋转时衍射示意图

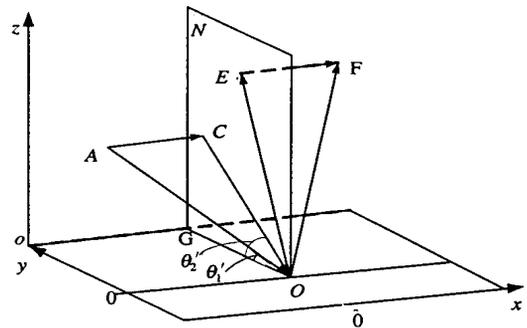


Fig.3 Diagram of diffraction on G_2 after rotation

图 3 G_2 旋转后衍射示意图

在图 3 为 G_2 光栅旋转后的光入射、出射光波矢示意图。 $N(yOz)$ 平面为过光入射点 O 的光栅刻线法平面。入射光波矢 AO 在法平面 N 上的投影分量(简称为衍射分量)为 CO ，它将经 G_2 衍射，该分量的出射波矢为 OE ， OE 也在 N 平面内。 AO 与刻线方向 x 平行的分量为 AC ，它不经 G_2 衍射，而是经 G_2 反射。总的出射光波波矢 OF 便为 OE 和 AC 的矢量合成，其方向对应为图 1 中的 OH 方向。图 3 中的相关矢量之间的关系为： $|EF| = |AC|$ ， $|CO| = |OE|$ 。

1.2 G_2 旋转前后的衍射光线之间的夹角

为方便讨论，我们作以下定义： θ_1 是 G_1 上的入射角和衍射角。光栅对严格平行时， θ_1, θ_2 是 G_2 上入射光线和衍射光线与 G_2 平面的夹角。当光栅刻线存在转角时， θ_1, θ_2 是 G_2 上衍射分量的入射方向和衍射方向与 G_2 平面的夹角。对应图 2、图 3 中的 $\theta_1 = \angle AOD$ ， $\theta_2 = \angle BOD$ ， $\theta_1' = \angle COG$ ， $\theta_2' = \angle EOG$ 。显然： $\theta_1 = \theta_2 - \beta$ ， $\theta_1' = \theta_2' - \beta$ ； $\theta_2 - \beta$ 与 $\theta_2' - \beta$ 分别为投影分量 CO 在 G_2 上的入射角和衍射角。由光栅对一级衍射方程得到

$$\sin \theta_1 + \sin \theta_2 = \lambda / d \tag{1}$$

$$\sin(\theta_2 - \beta) + \sin(\theta_2' - \beta) = \lambda / d \tag{2}$$

式中： λ 为光波波长， d 为光栅刻线周期。在给定入射角 θ_1 由(1)，(2)式便可以算出衍射角 θ_2 ，从而求出 θ_1, θ_2 等角。为方便计算，将入射光矢量模 $|AO|$ 归一化为 1，容易得到 A, B, F 点坐标为

$$A(-\cos \theta_1 \sin \beta, \cos \theta_1 \cos \beta, \sin \theta_1) \tag{3}$$

$$B(-\cos \theta_2 \sin \beta, \cos \theta_2 \cos \beta, \sin \theta_2) \tag{4}$$

$$F(\cos \theta_1 \sin \beta, \sqrt{1 - (\cos \theta_1 \sin \beta)^2} \cos \theta_2, \sqrt{1 - (\cos \theta_1 \sin \beta)^2} \sin \theta_2) \tag{5}$$

由 B, F 坐标可求出两点间的距离 $|BF|$ 为

$$\begin{aligned} |BF|^2 = & (\cos \theta_1 \sin \beta + \cos \theta_2 \sin \beta)^2 + [\sqrt{1 - (\cos \theta_1 \sin \beta)^2} \cos \theta_2 - \cos \theta_2 \cos \beta]^2 + \\ & [\sqrt{1 - (\cos \theta_1 \sin \beta)^2} \sin \theta_2 - \sin \theta_2]^2 \end{aligned} \tag{6}$$

定义 OH 与 OB 之间的夹角(即为 OB 与 OF 的夹角)为 θ 。在 BOF 中， $|OB| = 1$ ， $|OF| = 1$ ，由余弦定理有

$$\cos \theta = 1 - |BF|^2 / 2 \tag{7}$$

利用 θ 角，可以方便地计算出 $|HH|$ 的值为

$$|HH| = \frac{\cos(\theta - \beta) \tan \beta}{\cos \theta} d_0 \tag{8}$$

式中： d_0 为光栅对两光栅间距。

1.3 群时延

G_2 旋转后，在两平行光栅对之间，光路没有变化。从光栅 G_2 上 O 点出射到接收面上的光路，由 OH 变为 OH' ，由于 OH' 与接收面是垂直的，得到 $|OH'| = |OH| / \cos \theta$ 。光栅 G_2 旋转后的光程 L_w 为 $|O_1O|$ 与 $|OH'|$ 之和，易得

$$L_w = d_0 [1 + \cos(\theta - \beta) / \cos \theta] / \cos \theta \tag{9}$$

将(7)式代入(9)式便可算出旋转后的光程 L_w 。由相位及色散关系可得到简洁的群时延为^[1,7]

$$\tau_g = \frac{dL_w}{d\omega} = \frac{L_w}{c} \tag{10}$$

系统的 2 阶及 3 阶色散便为上式对角频率的 1 阶及 2 阶导数。

2 数值计算

数值计算采用的参数值为:光波长 $\lambda = 1.053\mu\text{m}$,光栅刻线间距 $d = (1/1200)\text{mm}$,光栅间距 $d_0 = 1\text{m}$ 。

由以上分析,可以计算在特定的转角 β 和入射角 θ 下,系统的 2 阶、3 阶色散系数,它与转角 $\beta = 0$ 时的色散系数存在相对误差,此相对误差是光栅刻线不平行度对系统色散影响程度的一个指标。相对误差随入射角变化的关系曲线为图 4、图 5。当转角 β 增加时,误差也增加并呈加剧趋势。当转角 β 小于 5° 时,在所给的入射角范围

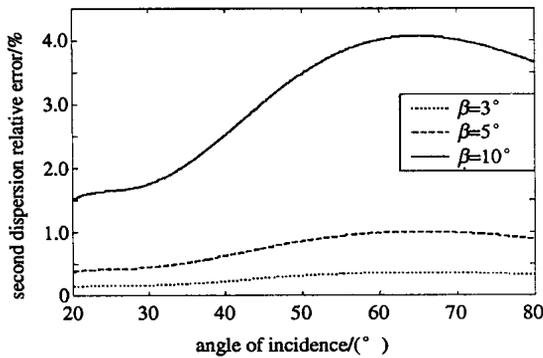


Fig. 4 Relative errors of second dispersion for various incident angles

图 4 不同入射角下 2 阶色散相对误差

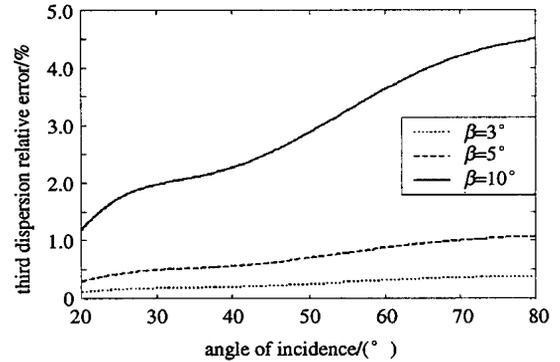


Fig. 5 Relative errors of third dispersion for various incident angles

图 5 不同入射角下 3 阶色散相对误差

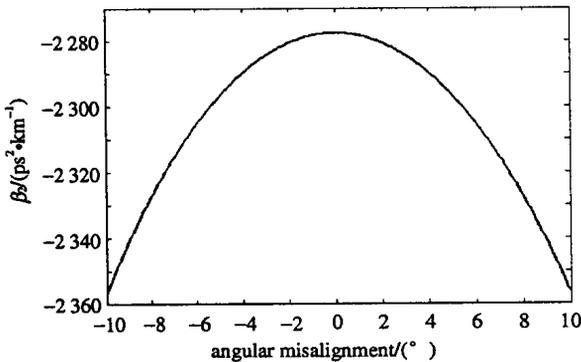


Fig. 6 Second dispersions for various angular misalignment at incident angle 50°

图 6 入射角为 50° 时不同偏角下 2 阶色散

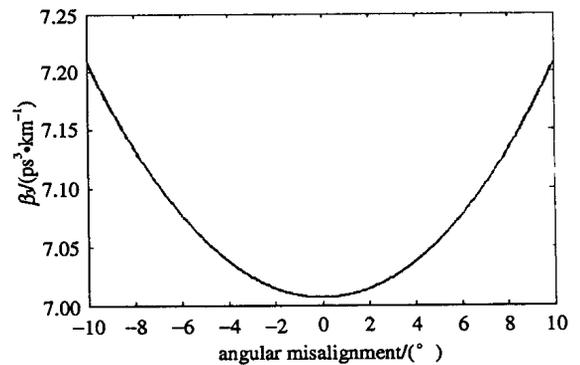


Fig. 7 Third dispersions for various angular misalignment at incident angle 50°

图 7 入射角为 50° 不同偏角下 3 阶色散

内,2 阶、3 阶色散系数的相对误差均小于 1%。图 6、图 7 为入射角为 50° ,当转角 β 变化时,系统的 2 阶、3 阶色散系数图。转角 $\beta = 0$ 时,对应的 2 阶、3 阶色散系数为: $\beta_2 = -2.278 \times 10^3 \text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, $\beta_3 = 7.007 \text{ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ 。由图可知,随着转角 β 绝对值的增大,系统的 2 阶、3 阶色散系数的绝对值均增大,并呈现抛物线型变化。

根据(8)式,在特定转角 β 下,可以计算中心波长光接收点相对于 $\beta = 0$ 时的偏移量 $|HH|$, $|HH|$ 随入射角 θ 变化的关系曲线见图 8。由(8)式可知,距离 $|HH|$ 与 3 个角度有关:衍射角 θ' 、入射角与衍射角之间的夹角 α 以及角度 β 。同一入射角下, α 随 θ 的增大而增大,所以转角 β 增加,偏移量 $|HH|$ 也增加。根据光栅衍射方程,衍射角 θ' 随入射角 θ 的增大而减小,由(8)式可推知偏移量 $|HH|$ 也随入射角 θ 的增大而减小,与图 8 中曲线向下走势一致。当入射角较小时,衍射角 θ' 较大并接近 90° ,这时 $\cos(\theta')$ 趋近于 0,导致偏移量 $|HH|$ 很大,因而曲线在此区间较陡。夹角 α 的绝对值先减小到 0° ,以后又增大,曲线在中部有一段凸起部分,正是由于 $\cos(\alpha)$ 在这段增大作用占了优势。

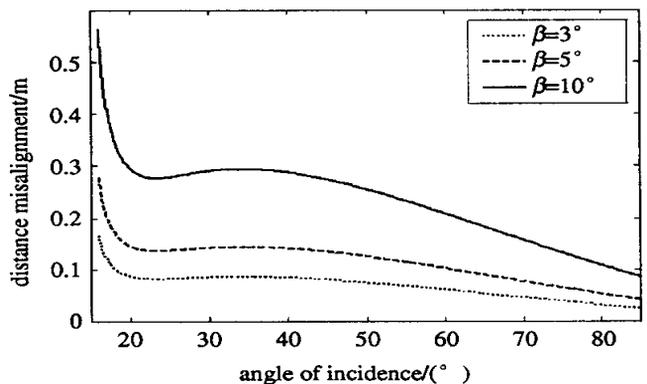


Fig. 8 Distance misalignment of center frequency light on the receiving plane

图 8 中心波长光接收位置的偏移距离

3 结 论

本文利用 3 维空间光线追迹法,数值计算了平行光栅对在刻线不平行时系统的 2 阶、3 阶色散,并在光接收面上对接收位置的偏移量进行了分析计算,得出的结论可供系统校准时参考。通过文章的分析与计算可知,要使系统 2 阶、3 阶色散系数误差控制到 1% 以内,转角 应控制在 5° 以内。但是,光在 G_2 旋转前后的接收位置发生偏移,尤其当光栅间距很大,转角 超过 10° 时,中心波频率光偏移已很大,从而加剧系统本身的空间色散。本文介绍的方法在分析光束入射时,具有一定的指导意义。实际上,由傅里叶角谱理论,实际应用中的入射光束,含有各方向的光波矢,其中有的偏离了光栅法平面,因而可用文中的方法分析。另外,分析中忽略了光传输损耗,当有损耗时,各衍射矢量长度将会相应变短,叠加后方向就会相应变化,将会影响到出射光方向、色散等系统特性。

参考文献:

- [1] Treacy E B. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1969, **5**(9): 454—458.
- [2] Martinez O E. Grating and prism compression in the case of finite beam size[J]. *Opt Soc Am(B)*, 1986, **3**(7): 929—934.
- [3] Martinez O E. 3000 times grating compression with positive group velocity dispersion: application to fiber compression 1.31.6 region[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **23**(7): 1662—1670.
- [4] Zhang Z, Yagi T. Evaluation of dispersion in a misaligned grating pair pulse compressor[J]. *Appl Phys*, 1995, **77**(2): 937—939.
- [5] 王勇, 张伟力, 柴路, 等. 压缩器光栅不平行度对色散影响的光线追迹法研究[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(5): 481—483. (Wang Y, Zhang WL, Chai L, et al. Calculation of the dispersion with angular misalignment of grating pair compressor by ray-tracing method. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(5): 481—483)
- [6] 王中阳, 徐至展. 有限束宽下光栅对压缩的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 151—159. (Wang Z Y, Xu Z Z. Study of grating pulse compression in the case of finite beam size. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 151—159)
- [7] 张志刚, 孙虹. 飞秒脉冲放大器中色散的计算和评价方法[J]. *物理学报*, 2001, **50**(6): 1080—1086. (Zhang Z G, Sun H. Calculation and evaluation of dispersions in a femtosecond pulse amplification system. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(6): 1080—1086)

Research of dispersion on grating pairs in the case of unparallel grating grooves

YAN Yur-fu, LUO Bing, PAN Wei, LI Yr-feng

(Department of Computer Science and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper analyses the diffraction characteristics of grating pair compressor in a CPA(chirped pulse amplification) system, using the 3D ray-tracing method, under the conditions that the grating grooves are unparallel while the grating surfaces are parallel. In this case, the group delay of optical light passing through this system, the second and the third dispersion of the system and the relative errors of dispersion with the condition that the grating grooves is strictly parallel were calculated. The reception position's variation quantity of the central wavelength light on the reception surface was achieved, meanwhile, its variations with the incident angle varying were analysed.

Key words: Ray-tracing method; Grating pair; Optical wave vectors; Dispersion