

光束方向微小漂移的检测

吕召林* 张国轩 陈刚 胡企铨

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 介绍了光束方向漂移的精确检测方法, 提出了泰伯(Talbot)效应的一个新用途。采用本系统对半导体激光源的方向漂移角进行了检测。最后, 通过进一步检测, 初步研究了光学器件对光束方向稳定性的影响。

关键词 光束方向漂移, 泰伯效应, 莫尔效应。

1 引 言

光盘刻录设备的一个关键技术指标是工作槽距均匀性。影响这个指标的原因是: 某些光学器件的性能、机械配合和环境等因素, 或者光源本身的不稳定性, 导致光束的方向漂移。一般来讲, 光学器件的影响可以通过系统的设计来改进, 激光的方向不稳定性在所用激光器选定后也是一定的。为了保证光盘刻录设备的性能, 最终要求刻录光束应局限于某一立体角 2Θ , 可用 Θ 的大小来表征光束方向的漂移, 此即需检测的物理量。

由于用途特殊, 对检测方法也有特别要求。首先, Θ 很小, 精度要求特别高, 在较短距离内用现有 CCD 器件来检测不能分辨; 其次, 不宜引入过多光学器件和新的光源; 最后, 该装置为辅助装置, 应该造价低, 使用方便。目前, 据作者所知尚无专用于光束方向漂移的高精度检测装置。为此, 本文研究了一种泰伯-莫尔-透镜-电荷耦合器件(TMLCCD)系统可以达到检测光束方向微小漂移的要求。

2 检测原理

检测系统的光学部分包括两块相同参数的线光栅 G_1 、 G_2 , G_2 位于距 G_1 为 q 的泰伯平面上。光学部分可同时实现泰伯效应和莫尔(Moire)效应。

一单色点光源或平面波照明周期性物体时, 在物体后的某些平面将重复出现周期性物体的清晰像, 即不用任何透镜可得到物体的像, 此即为泰伯效应。采用平行光源时, 对空间周期为 a 的线光栅泰伯距离 q 满足

$$q = \frac{j^2 a^2}{l \lambda}, \quad (j, l = 1, 2, 3 \cdots) \quad (1)$$

* 现在地址: 上海大学物理系, 201800。

收稿日期: 1997-03-21; 收到修改稿日期: 1997-06-19

但通常意义的泰伯效应实际上是整数泰伯效应。平行光入射时泰伯距离 q 满足

$$q = ma^2/\lambda, \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

泰伯像放大率为 1。

两块线光栅 G_1 、 G_2 相互叠合, 并使二者栅线以小角度相交, 则可形成莫尔条纹。设光栅 G_1 、 G_2 的空间周期均为 a , 栅线夹角为 β ($\beta \neq 0$), 则形成横向莫尔条纹

$$W = (a/2) \sin(\beta/2) \quad (3)$$

即当光栅 G_1 沿垂直栅线方向移动距离 a , 则条纹移动距离 W , 放大倍数为

$$k = W/a = (1/2) \sin(\beta/2) \approx 1/\beta \quad (4)$$

当 β 很小时, k 应很大。这就是莫尔条纹的移位放大作用。

如图 1, G_1 的自成像 G_1' 与 G_2 在同一平面, 构成莫尔光栅对。对比图 1(a)、图 1(b) 两种情况, 知入射方向改变对应光栅 G_1' 、 G_2 相对位移, 利用莫尔效应, 可直接测出放大的位移。进一步的理论分析表明入射方向沿 x 轴改变 θ_x , 光栅 G_1' 、 G_2 相对位移为 $x = q\theta_x$, 经莫尔效应放大后莫尔条纹移动量为 $X = kq\theta_x$ 。

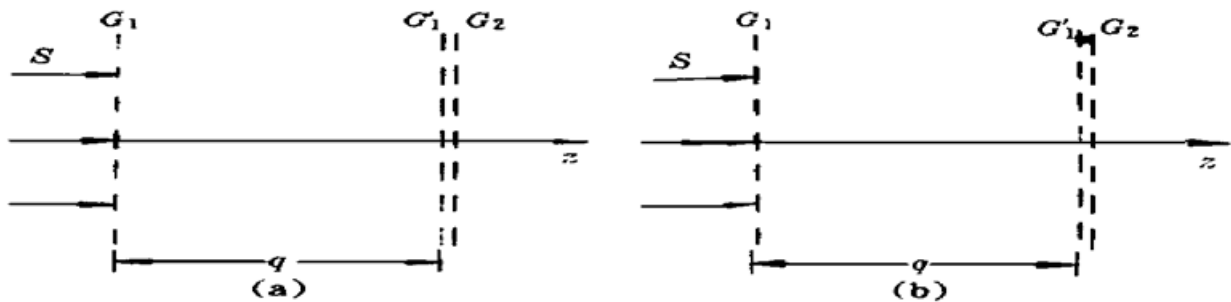


Fig. 1 The effect of incidence to Talbot image. (a) Straight incidence, (b) Tilted incidence

3 理论分析

“泰伯-莫尔”法常用于泰伯干涉仪中, 目前只限于检测透镜的像差和透明物体的位相分布。用于精测光源方向变化尚未见报道, 有必要进一步分析。关于点光源和单色平面波入射时泰伯效应的解释, 目前有多种理论, 对此早已有较详细的报道。下面采用傅里叶分析法, 讨论单色平面波斜入射和正入射所产生的泰伯像之间的关系。

如图 1(b) 所示, 设光栅 G_1 透过率可表示为

$$g(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi \frac{n}{a} x) \quad (5)$$

式中 a 为光栅空间周期, 则其频谱为

$$G(f_x) = F\{g(x)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \delta(f_x - \frac{n}{a}) \quad (6)$$

平行光束以 θ_x 角入射, $z = 0^+$ 处光场为

$$u(x, 0^+) = A \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta_x) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi \frac{n}{a} x) \quad (7)$$

空间频谱为

$$U(f_x; 0^+) = F\{u(x, 0^+)\} = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \delta(f_x - \frac{n}{a} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda}) \quad (8)$$

根据菲涅尔衍射的传递函数

$$H(f_x; z) = \exp(-i\pi\lambda q f_x^2) \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} x) \quad (9)$$

可得到位于泰伯平面 $z = q$ 处光场频谱为

$$U(f_x; q) = A \exp(-i\pi\lambda q f_x^2) \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} q) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \delta(f_x - \frac{n}{a} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda}) \quad (10)$$

根据 δ -函数与普通函数的乘积性质, 上式等价于

$$U(f_x; q) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \delta(f_x - \frac{n}{a} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda}) \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} q) \exp[-i\pi\lambda q (\frac{n}{a} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda})^2] \quad (11)$$

若 $1/a \gg \sin \theta_x/\lambda$, 即*

$$\lambda/a \gg \sin \theta_x, \quad 1/a - \sin \theta_x/\lambda \approx 1/a \quad (12)$$

当 $\theta = 2ma^2/\lambda (m = 1, 2, 3, \dots)$ 时

$$\exp(-i\pi\lambda q (\frac{n}{a} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda})^2) = 1$$

$$U(f_x; q) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \delta(f_x - \frac{n}{a} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda}) \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} q) \quad (13)$$

对比 $U(f_x; q)$ 与光栅 G_1 的频谱知

$$U(f_x; q) = G(f_x - \frac{\sin \theta_x}{\lambda}) \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} q) \quad (14)$$

泰伯平面上光场相对于正入射 ($\theta_x = 0$) 时产生频移 $\sin \theta_x/\lambda$, 在空间域中位移可由 $x/\lambda q = \sin \theta_x/\lambda$ 求得 $x = q \sin \theta_x$, 当 θ_x 很小时,

$$x = q\theta_x \quad (15)$$

由此可见, 两种情况下泰伯像满足几何近似关系, 即若在 x 方向有偏角 θ_x , 则 G_1 有位移 $x = q\theta_x$, 经莫尔效应放大后, 产生位移

$$X = kq\theta_x = q\theta_x/\beta \quad (16)$$

4 检测系统

为进一步放大莫尔条纹, 可在 G_2 后加上一凸透镜, 在 CCD 光敏面上成一放大的像(放大倍数为 M), 从而构成泰伯-莫尔-透镜-电荷耦合器件系统, 其结构如图 2 所示。

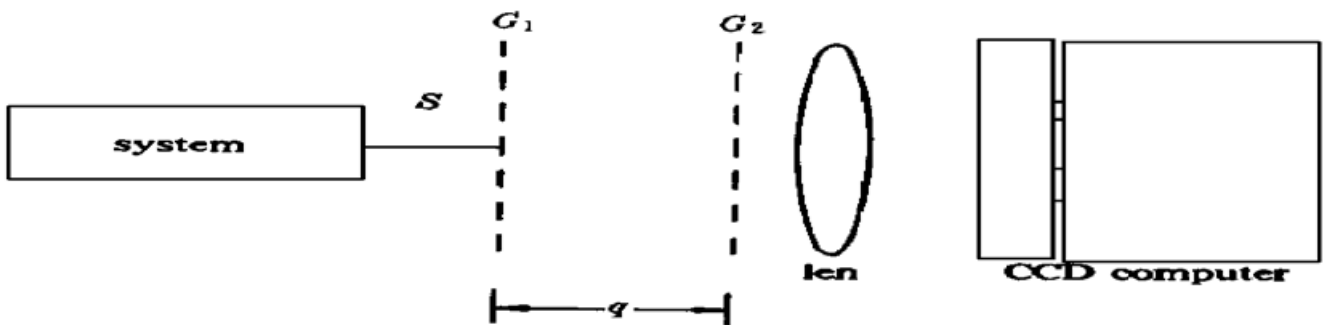


Fig. 2 The system for detecting the directional shift of a beam

若光束方向沿 x 方向漂移 θ_x 角, 经检测系统后测得莫尔条纹位移为

* 由于光栅常数 a 、光波长 λ 均为微米级, θ_x 为毫弧度级, 此条件亦不难满足, 而且泰伯面的位置只对光场的对比度影响较大。

$$X = kqM\theta_x = qM\theta_x/\beta \quad (17)$$

适当选择参数 M 、 β 、 q ，即达到所能满足的检测精度。CCD 测出 X ，根据已知参数值即可求出

$$\theta_x = X/kqM = \beta X/qM \quad (18)$$

多次采样，可得到一系列 θ_x 值。理论上讲 θ_x 应满足正态分布(高斯分布)，作数值计算，即可给出光束沿 x 方向的漂移角 Θ_x 。若光束方向漂移无倾向性， Θ_x 即反映光束漂移角 Θ 。

由于莫尔条纹放大倍数受被检光斑大小的制约，对于直径为 2 mm 的光斑，采用空间频率为 50 l/mm 的计量光栅、像素尺寸为 14 μm 的线阵 CCD、透镜成像系统的放大率为 4 倍组成的系统，可估算出其检测精度可达 0.4 μrad 。

5 检测结果

采用该系统首先对一台半导体激光源的方向漂移角进行了检测，然后通过进一步检测，初步研究了光学器件对光束方向稳定性的影响。如图 3 所示，为计算机分别在 x 、 y 方向，对一半导体激光束采集数据，得出的光束方向漂移角拟合曲线。其中，每一方向历时 2 小时，采集数据 7200 次； x 、 y 轴上的单位为系统检测精度 0.4 μrad (规定计时起点值为 0)， N 为某一漂移方向出现的次数。图 4 为在被检系统和检测系统之间加入一玻片后，再次检测得到的拟合曲线。可见，玻片加入后，光束方向漂移大幅度增加，因此普通光学元件对光束方向稳定性的影响十分明显。在研制和改进光盘刻录设备时，应考虑光学元件的在这方面的影响。

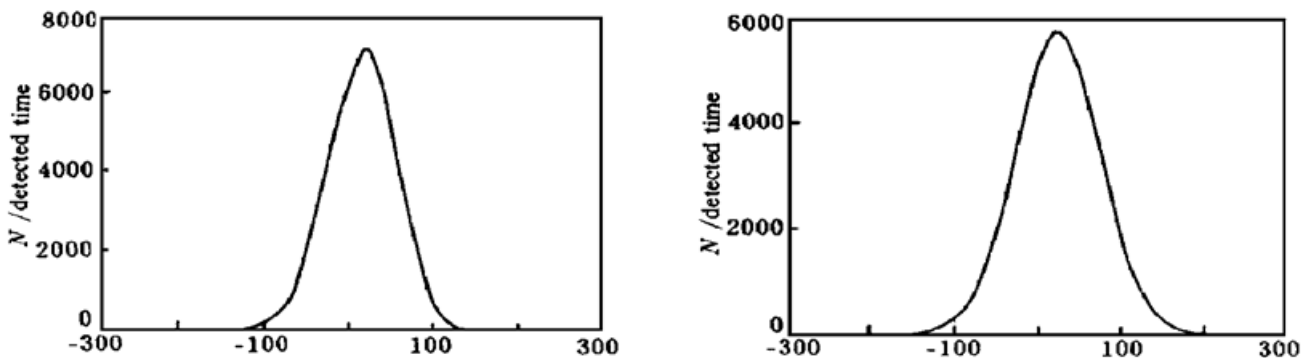


Fig. 3 Simulated curves of the directional shift

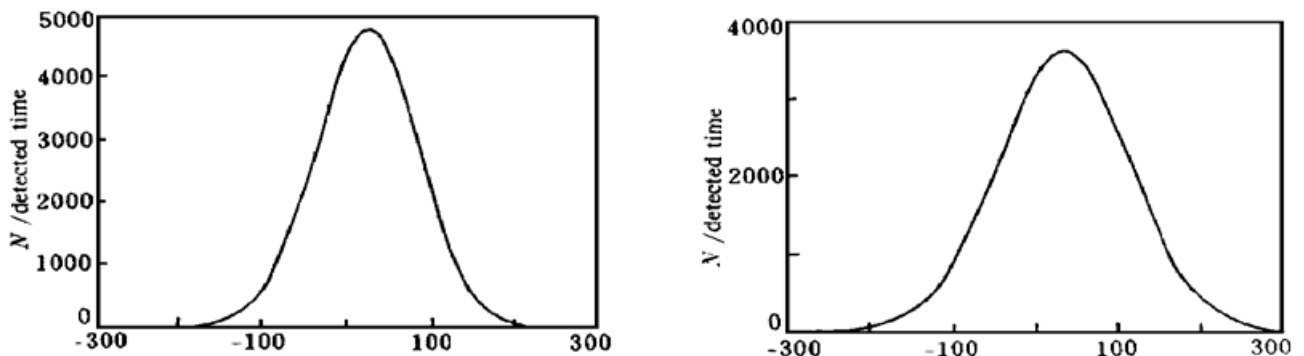


Fig. 4 Simulated curves of the directional shift after a glass slit being put in

结 论 实验结果表明，泰伯-莫尔-透镜-电荷耦合器件系统能完成对“光束方向”的动态检测(即能检测光束方向漂移)，其精度达微弧度量级，并可望进一步提高。此外，该系统还具有

结构简单、测量直接、技术基础好、使用较方便等特点。因此,在检测光束方向微小漂移方面,泰伯-莫尔-透镜-电荷耦合器件系统具有很大的优越性,可以胜任光盘刻录机等一类高精度设备的光学系统的检测工作。但也还存在系统调节过程较复杂的问题,可望通过适当的机械设计来解决。

参 考 文 献

- [1] S. Yokozaki, K. Patorski, T. Suzuki, Collimation method using Fourier imaging and Moire techniques. *Opt. Commun.*, 1975, **14**(4): 401~ 405
- [2] Pual, Latimer, Randy F. Crouse, Talbot effect reinterpreted. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(1): 80~ 89
- [3] 曹国荣, 景芳盛, 任 莹等, CCD 用于莫尔条纹细分的技术. 计量学报, 1995, **16**(2): 116~ 120
- [4] 陈 然, 郭永康, Talbot 效应研究新进展. 激光与光电子学进展, 1996, (8): 8~ 13
- [5] 光学技术手册, 北京: 机械工业出版社, 1987.

Detecting the Directional Shift of a Beam

Lu Zhaolin Zhang Guoxuan Chen Gang Hu Qiquan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 21 March 1997; revised 19 June 1997)

Abstract A method for accurately detecting the directional shift of a beam is proposed and the experiment is described, which is a new application of the Talbot effect. The directional shift of a semiconductor laser beam has been detected and the effect of optical devices on the stability of optical beam direction are discussed.

Key words directional shift of a beam, Talbot effect, Moire effect.