

激光的双光栅移频效应理论及应用

韩光耀 张毓昌 易明 黄宗华 杨选民

(南京大学物理系)

提要: 分析了激光的双光栅移频效应, 并作了实验验证。这一效应可用来测量小位移量或速度值, 比麦氏干涉仪简单易调, 并已试用于穆氏谱仪上测定振动速度, 效果理想。

Double grating frequency shift effect of the laser beam and its application

Han Guangyao, Zhang Yuchang, Yi Ming, Huang Zonghua, Yang Xuanming

(Physics Department, Nanjing University)

Abstract: Frequency shift of the double grating is considered and confirmed by our experiment. Using this effect we determine the value of velocity or small displacement. It is simpler than the method of Michelson's instrument or the intensity modulating method and has been successfully tested on Mössbauer spectrometer to determine the velocity of vibration. Satisfactory result has been obtained.

原 理

有关超声位相光栅的原理, 文献[1]已作分析讨论, 单片位相光栅移频效应的理论和实验我们在[2, 3]作了报道。二相同条纹密度的位相光栅, 互相贴近, 在 Y 方向的折射率变化幅值为 ΔN , 光栅间距为 Δ_A 。A 光栅移动速度为 v_A , 相当于圆频率为 ω_A 的折射率波的传播; B 光栅静止, 即 $\omega_B=0$ 。其中

$$\omega_A = 2\pi \frac{v_A}{\Delta_A} = K_A v_A \quad (K_A \text{ 为移动光栅波矢})$$

故二光栅合成的折射率波的传播可写成:

$$N(y, t) = 2N_0 + \Delta N e^{j(\omega_A t - K_A y)} + \Delta N e^{jK_A y} \quad (1)$$

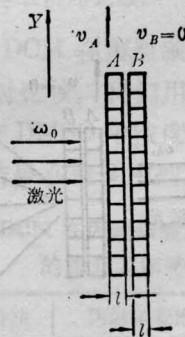


图 1

进入光栅的平面波光场为

$$E = E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}$$

出光栅后的光场为:

收稿日期: 1984年6月12日。

$$E(y, t) = E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 - \Delta\varphi)}$$

式中 $\Delta\varphi = N(y, t) Kl$, K 为光波矢, l 为单光栅的厚度。按 Huygens-Fresnel 衍射积分原理^[4], 在远场

$$E(\eta, t) = \frac{jK}{2\pi r} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} E(y, t) \frac{e^{jKr}}{r} dy \quad (2)$$

其中 w 为光栅的宽度, η 为观察屏上观察点坐标。积分(2)式得双光栅在远场 η 点的电场强度为:

$$\begin{aligned} E(\eta, t) = & \frac{jK}{2\pi R} E_0 (-1)^p \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(\beta) \\ & \times (-1)^q \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(\beta) w \sin \theta \\ & \times \left[\left(-pK_A - qK_A + K \sin \theta \right) \frac{w}{2} \right] \\ & \times \exp\{j[(\omega_0 + P\omega_A)t - K(2lN_0 + R)]\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $J_P(\beta)$ 为第一类 Bessel 函数系数, $\beta = \Delta N Kl$ 为调制系数。由(3)可得如下结果:

(a) 双光栅衍射光极大值所对应的衍射

角为:

$$\begin{aligned} \sin \theta = & (p+q) \frac{K_A}{K} \\ = & n \frac{\lambda}{\Lambda_A} \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned}$$

式中 $n=p+q$

(b) 对不同级的衍射有不同的光移频值。

$$\omega = \omega_0 + p\omega_A \quad p=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

(c) 各级衍射光的光强为:

$$I \propto EE^* \propto J_p^2(\beta) J_q^2(\beta)$$

可以认为, 同一级衍射光由不等强度的不同移频值的光分量组成, 而不同的衍射级有相同的移频项。上述结果汇总于图 2。由无线电工程中调制理论可知, 除了零级衍射光其不同频率项合成方式为对称边带外, 其他各级衍射光的不同频率合成方式均为非对称边带。但都合成为振幅调制的光波。

为易于了解起见, 设调制系数 β 较小, 则 $J_0^2 \gg J_{\pm 1}^2 \gg J_{\pm 2}^2$, 略去高次移频光分量, 我们

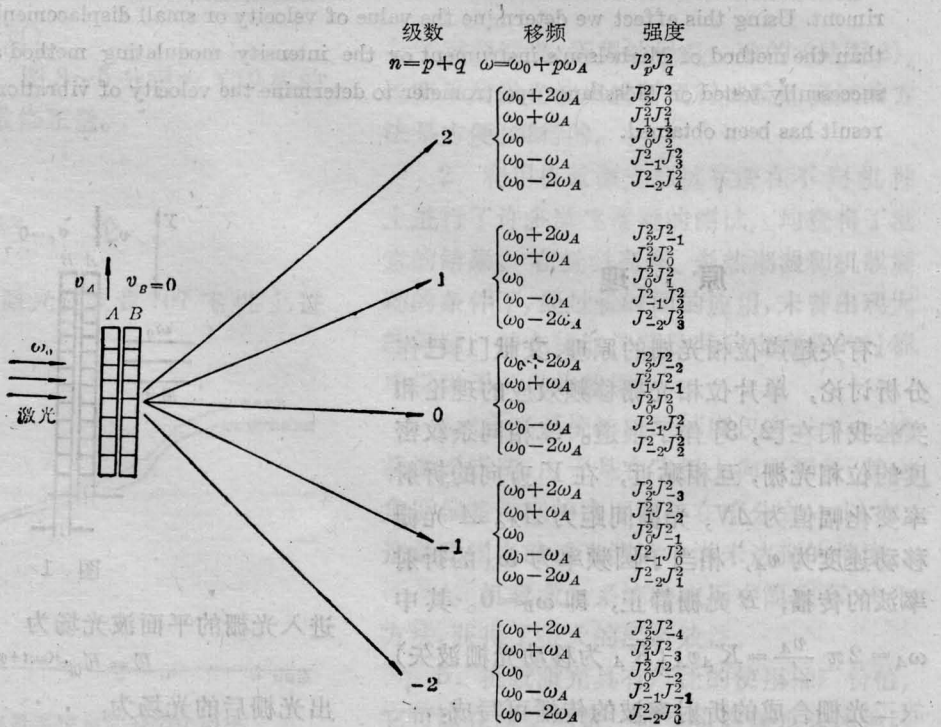


图 2

可以把零级光看成以光为频载波，以 ω_A 为调制频率的调制波，通过光电检测器的平方律检波：

$$I(t) \propto EE^* \propto J_0^2 J_1^2 + 4J_0^2 J_1 J_{-1} \cos \omega_A t + 2J_1^2 J_{-1}^2 \cos 2\omega_A t$$

滤去直流成份，略去二次谐波分量，即可

得到 $f_A = \frac{\omega_A}{2\pi}$ 的讯号频率。而

$$f_A = \frac{v_A}{\lambda_A} = v_A n_0 \quad (n_0 \text{ 为光栅条纹密度})$$

从而可由 f_A 决定光栅的平移相对速度。将光栅附着于某运动物体，即可测出该物体的相对移动速度。

实验装置

图 3 既为验证上述理论，也为测量等速穆斯堡尔谱仪振动速度的实验原理性装置。

有关元件的工作状态见照片 1~3。

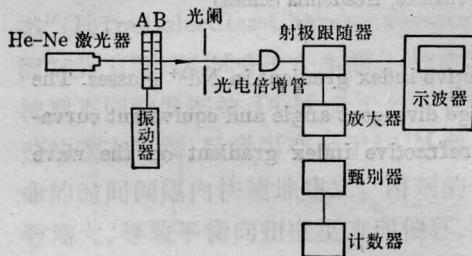
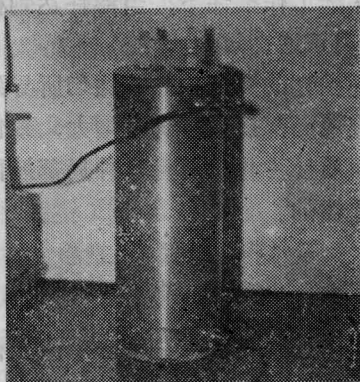
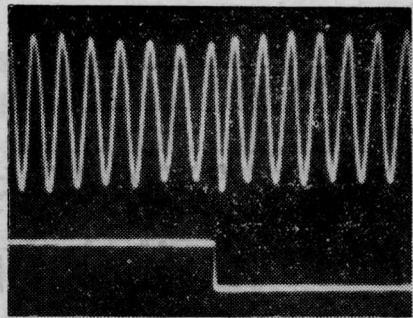


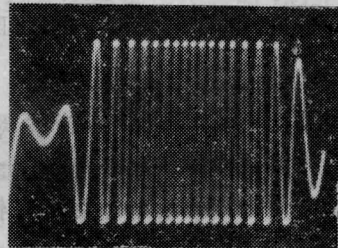
图 3 穆斯堡尔谱仪实验装置原理图



照片 1 电磁振动器上的双光栅装置



照片 2 示波器上电磁振动器匀速振动波形 (下边方波为驱动信号)



照片 3 示波器上电磁振动器匀加速振动波形

测试结果

用我校研制的 PH-802 型等速穆斯堡尔谱仪，且采用两片每毫米 100 条的全息光栅，测量不同参考信号幅度下的光脉冲数 N ，按下式计算出振动速度：

$$v_A = NT_R / T_{ef} n_0$$

式中 t 为测量时间， T_{ef} 为参考信号脉冲每一周期 T_R 内所测速度脉冲的开门时间， n_0 为光栅条纹密度。测量结果如图 4 所示。我们可以看到参考信号脉冲幅度与光脉冲计数有很好的线性关系。

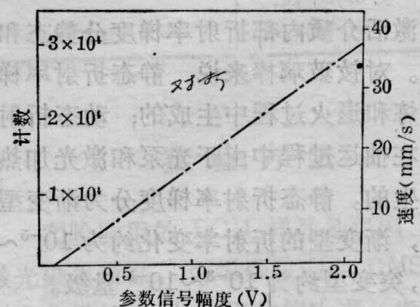


图 4 等速穆斯堡尔谱仪速度与参考信号幅度的线性关系

(下转第 329 页)

$$\frac{N-1}{Nd} \geq \frac{r \sin \theta}{\lambda z_0} \quad (26')$$

至于次最大,在曝光次数 N 大时,其影响可以忽略,或每次曝光量按牛顿二项式系数的比例,则次最大消失^[6]。

从(26')式可见,在光路确定以后,为了保证只有一个综合狭缝,位移量 d 必须足够小。但由(25)式, d 变小综合狭缝变宽,为了维持综合狭缝的一定宽度,须增加曝光次数 N 。我们选取 $d=5\mu\text{m}$, $N=7$, $z_0=32\text{cm}$, $\theta=75^\circ$, $r=2.5\text{cm}$, $\lambda=6328\text{\AA}$, 计算结果说



图 4

明条件(26')式满足,并求得综合狭缝宽度为 3mm 。选取 $z_r=13\text{cm}$, $z_n=120\text{cm}$, $z_f=23.5\text{cm}$, 对 $\frac{\lambda'}{\lambda}=0.8$, 求得重现象平均深度为 12cm , 重现频谱面位置 $\zeta_f=-52\text{cm}$ 。实验结果和理论分析符合,白光重现下的彩虹全息象的照片如图 4 所示,提高实验精度可以减小色模糊。

本文的实验工作是在美国沙基诺大学光学实验室中完成的,陈选教授给予很多指导和帮助,在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Guicong Chen *et al.*; *JOSA*, 1982, **72**, 1830.
- [2] Qizhe Shan *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, 3902.
- [3] C. P. Grover, H. M. van Driel; *JOSA*, 1980, **70**, 335.
- [4] H. Chen *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, 3557.
- [5] 陈桂丛, H. Chen; 《光学学报》, 1983, **3**, No. 4, 326
- [6] J.M. Burch, J. M. T. Tokarski; *Opt. Acta*, 1968, **15**, 101.

(上接第 345 页)

而等加速模式测量结果如图 5 所示,调制频率脉冲数用多道分析器记录。可以看出光脉冲数与速度成正比变化,速度计算公式为:

$$v_A = N / f_R t T n_0$$

式中 N 为光脉冲数, f_R 为振动物子工作频率,

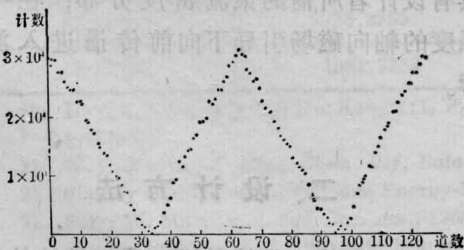


图 5 双光栅移频法所测得的等加速穆斯堡尔谱仪的速度谱

t 为测量时间, T 为多道每道停留时间, n_0 为光栅密度。

本结果由于光栅密度不够,测出的速度变化曲线有些涨落点,如果采用较密光栅,可以改进测量结果。

甘进福同志在本实验的制作和调试等工作中给了很大帮助,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] M. Born, E. Wolf; *Principle of Optics*, 6th ed., Pergamon, New York, 1980, p.593.
- [2] 韩光耀等;《激光》, 1982, No.6, 66.
- [3] 易明等;《南京大学学报》, 1984, No 4.
- [4] G. Bekefi, A. H. Barrett; *Electromagnetic Vibrations, Waves, and Radiation*. MIT Press, Cambridge, 1977, p. 561.