

一种间接测量相位型全息记录介质 折射率调制度的方法

恽 钢 于美文
(北京理工大学工程光学系)

提 要

为恰当评价各种相位型全息记录介质的衍射能力及相应的各种处理工艺, 本文给出一种利用分光光度计测量介质折射率调制度的原理和方法。

关键词: 分光光度计, 折射率调制度, 耦合波理论。

一、引 言

折射率调制度的大小是衡量一种记录材料(折射率型)以及相应的处理工艺好坏的一项重要措施。它比衍射效率更能反应一种记录材料的潜力。因为由 Kogelnik 的耦合波理论可知, 一张全息光栅的衍射效率与众多因素有关, 包括厚度, 条纹空间频率等, 这样就很难用衍射效率来表征材料本身的衍射能力。本文给出一种方便的间接测量折射率调制度的方法, 供从事全息工作, 特别是记录材料研究工作的人们选用。使用本法不需另外测量材料的厚度, 平均折射率等其他参数。

二、测量方法和原理

本法所用主要仪器为一台常见的分光光度计, 另外需要一套简单的全息记录装置。测量时, 首先用图 1(a)或图 1(b)所示光路用所测材料记录一张非倾斜反射全息光栅(A板), 再用同样光路对另一张完全相同材料制成的干板 B 曝光, 曝光量同 A, 只是曝光时稍加振动以消除干涉条纹。用与 A 板相同的方法处理干板 B 即得 B 板。把 A、B 板分别放大分光光度计的测量光路和参考光路之中(如图 2), 测出 A 板相对 B 板的透过率-波长曲线(如图 3), 即可按下面给出的方法求出 A 板的折射率调制度 n_1/n_i (n_1 为调制幅度, n_i 为平均折射率)。

由 Kogelnik 的耦合波理论可知, 全息光栅的衍射效率是光栅各参数, 如厚度, 倾斜角度, 调制度, 入射角等函数。当倾斜度, 入射角确定时(如图 1, 2 中的非倾斜光栅, 垂直入射), 有:

$$\eta = F(d, n_1, n_i, \lambda)。 \quad (1)$$

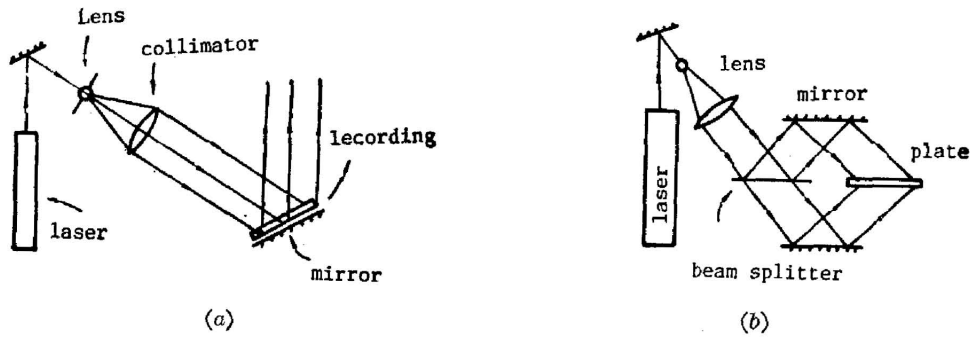


Fig. 1 Recording setup

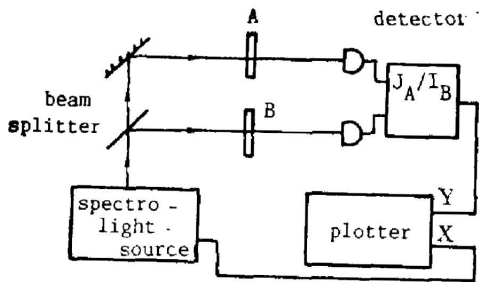


Fig. 2 Measuring setup

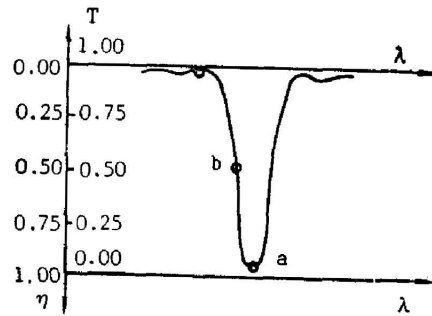


Fig. 3 $T-\lambda$ relation

其中, η 表示衍射效率, d 表示厚度, λ 为波长。若变换波长对某样品进行两次测量, 则可得下面两个方程

$$\eta_1 = f(d, n_1/n_i, \lambda_1) \tag{2}$$

$$\eta_2 = f(d, n_1/n_i, \lambda_2) \tag{3}$$

其中 η_1, η_2 分别为两次测量的衍射效率, λ_1, λ_2 分别为两次测量所用的波长, 并且, 两式中已考虑到 n_1, n_i 可合为一个宗量 n_1/n_i 。将上面两式联立, 即可消去 d , 解出 n_1/n_i 。实际上, 图 3 给出的结果一般包含几十到几百次测量结果, 任选曲线上两点一般均可达到目的, 需要考虑的主要是怎样做更方便更精确而已。下面给出具体方法。

1. 计算方法

由文献[1], 反射式, 非倾斜折射率调制型光栅垂直入射时的衍射效率为

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1 - (\xi^2/n^2)}{\text{sh}^2 \sqrt{\nu^2 - \xi^2}}} \tag{4}$$

其中:

$$\xi = \theta d/2, \tag{5}$$

$$\nu = \pi n_1 d/\lambda, \tag{6}$$

$$\theta = 4\pi n_i (\lambda_B - \lambda)/\lambda_B^2 \tag{7}$$

脚标 B 表示布喇格条件下的值, η 的最大点发生在布喇格条件满足的情况下:

$$\xi = \xi_B = 0. \tag{8}$$

选用的第一个点是衍射效率的峰值点, 即图 3 中的 a 点。此点满足布喇格条件, 故由 (4), (8) 式可求出

$$\nu_B = \text{arsh}\left(\frac{1}{\sqrt{1/\eta_B - 1}}\right) \quad (9)$$

本法选用的第二个点为图 3 中的 b 点, 即 η_B 的一半处。此点对应于

$$\eta = \eta_H = \eta_B/2 \quad (10)$$

故若令

$$x = \sqrt{(\lambda_B \nu_B / \lambda_H)^2 - \xi_H^2} \quad (11)$$

其中脚标 H 表 b 点值, 及

$$c = \nu_B \lambda_B [(2/\eta_B) - 1] / \lambda_H \quad (12)$$

则有

$$c_{\text{sh } x} = x \quad (13)$$

用牛顿切线法^[9]解出 x , 则 ξ 在 b 点的值 ξ_H 为

$$\xi_H = \sqrt{(\lambda_B \nu_B / \lambda_H)^2 - x^2} \quad (14)$$

又由(6)式

$$\nu_H = \lambda_B \nu_B / \lambda_H \quad (15)$$

由上面两式及(5), (6)式即得调制度

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{2(\lambda_B - \lambda_H)}{\lambda_B} \cdot \frac{\nu_B}{\xi_H} \quad (16)$$

注意, 在解(13)式时, 应考虑下面三种情况: (1) $c > 0$, 有实解。 (2) $c = 0$, 只有零解。 (3) $c < 0$, 有虚解, 若令 $y = jx$, $j = (-1)^{1/2}$, 则(13)式变为

$$c_{\text{sh } B} = y \quad (13')$$

2. 衍射效率的测量

Kogelnik 在他的耦合波理论中, 为简化而忽略了光栅边界处折射率的突变。本法采用了 Kogelnik 的理论, 故在测量中也应尽量排除光栅边界的影响。此外, 干板各界面及表面的反射也应予以排除。容易证明, 在乳胶的吸收可忽略的条件下, 如果假设

$$T_{gh} = T_{ee}, \quad T_{ha} = T_{ea} \quad (17)$$

即 A 板玻璃-光栅界面及光栅-空气界面的透过率 T_{gh} 和 T_{ha} 分别等于 B 板的玻璃-乳胶及乳胶-空气界面的透过率 T_{ge} 和 T_{ea} , 则只须按前面给出的办法, 把 A 板 B 板分别放入分光光度计的测量光路和参考光路之中, 并把纵座标按图 3 方式倒置即可除去各界面的影响并得 η - λ 曲线。

值得一提的是, 考虑到 A 板和 B 板在曝光量和处理上均相同, 可认为 B 板乳胶的折射率和 A 板光栅的零频折射率 n_i 相同, 因此, 只要 n_1 足够小, 假设(17)式是能够成立的, 而这也正是耦合波理论的一项近似。

有时, 由于某些原因, 可能无法获得 B 板, 或者由于不能保证 A 、 B 板的相似性而使 B 板的使用变得无意义。这时可做一些特殊的处理。例如, 如图 4(a), 可作一直线与透过率曲线相切于 d 和 d' 点。这样, 若 o 点到横座标的距离为 D , 则

$$\eta_B = \eta'_B / D \quad (18)$$

显然, 这种办法能够减少但不能避免由于不用 B 板而造成的精度上的损失。

三、实 例

笔者运用上述方法对 DCG 光聚合物明胶和漂白银盐等材料制成的光栅样品进行了测

试。现给出其中两个样品的测试结果。

图 4(a) 为一个 DCG 样品的透过率-波长曲线, 由于样品是现成的, 不可能再得到 B 板,

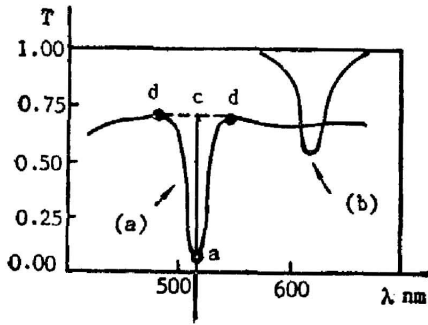


Fig. 4 Results to DCG and silver halide gratings

故用 $d-d'$ 连线(虚线)的办法给出衍射效率-波长关系, 由此关系, 得 $\eta_B = 0.874$, $\lambda_B = 517 \text{ nm}$, $\lambda_H = 507 \text{ nm}$, 可算出 $n_1/n_0 = 0.026$ 。图 4(b) 为一漂白银盐全息光栅的测试结果。测试时用了 B 板, 由图可见 $\eta_B = 0.490$, $\lambda_B = 617 \text{ nm}$, $\lambda_H = 603 \text{ nm}$, $n_1/n_0 = 0.022$ 。

显然, 从调制度的角度看, 与 DCG 相比, 经漂白处理的银盐材料的衍射能力往往并不低, 如果适当增加厚度有可能得到高的衍射效率。而主要问题是噪音过大。

四、精度分析

假设在测量过程中, 所用仪器以及测量中各项操作所造成的误差是足够小的。使用较高精度的仪器, 并细心操作, 总能达到目的。这里要讨论的是耦合波理论^[1]本身所带来的误差, 这种误差是本方法无法避免的。

由(16)式可知, n_1/n_0 的相对误差:

$$\frac{\delta(n_1/n_0)}{n_1/n_0} = \frac{\delta\nu_B}{\nu_B} - \frac{\delta\xi_H}{\xi_H} \leq \left| \frac{\delta\nu_B}{\nu_B} \right| + \left| \frac{\delta\xi_H}{\xi_H} \right| \quad (19)$$

对(4)或(9)式微分, 可推出, 在 a 点:

$$\frac{\delta\nu_B}{\nu_B} \approx \frac{\text{sh}^2 \nu_B}{2\eta_B \nu_B \text{ch} \nu_B} \cdot \left(\frac{\delta\eta_B}{\eta_B} \right) = C_B \left(\frac{\delta\eta_B}{\eta_B} \right) \quad (20)$$

同样, 在 b 点对(4)式微分, 可求出 $\frac{\delta\xi_H}{\xi_H}$ 与 $\delta\eta_B/\eta_B$ 之间的关系。但由于关系式过于复杂, 这里采用较简单的数值办法:

$$\frac{\delta\xi_H}{\xi_H} \approx \frac{\xi'_H - \xi_H}{\eta'_H - \eta_{B/2}} \cdot \frac{\eta_B}{2\xi_H} \left(\frac{\delta\eta_H}{\eta_H} \right) = C_H \left(\frac{\delta\eta_H}{\eta_H} \right) \quad (21)$$

其中, 可选 $\xi'_H = \xi_H + \xi_H/100$, 而 η'_H 则可将 ξ'_H 代入(4)式求出。综合上面三式得:

$$\frac{\delta(n_1/n_0)}{n_1/n_0} \leq |C_B| \left| \frac{\delta\eta_B}{\eta_B} \right| + |C_H| \left| \frac{\delta\eta_H}{\eta_H} \right| \quad (22)$$

下面的问题是如何求出耦合波理论在计算衍射效率 η 时的精度 $(\delta\eta_B/\eta_B)$ 和 $(\delta\eta_H/\eta_H)$ 。这是一个相当复杂的问题, 好在还有严格的耦合波理论^[3]可用来做比较。这里近似认为 $\delta\eta_B$ 或 η_H 等于文献[1]和[3]在 a 点或 b 点计算衍射效率的差值。在用文献[3]理论计算衍射效率时, 用到下面技巧: 仿(6)式形式, 令:

$$d_r = dn_0 = \frac{\nu_B \lambda_B}{\pi(n_1/n_0)} \quad (23)$$

由于以 n_1/n_0 代 n_1 (相当于令 $n_0=1$), 故 d_r 不是光栅的真实厚度, 但由文献[4]可知衍射效率以乘积 dn_0 (即 $d\sqrt{\epsilon_0}$) 为一个自变量, 故 $n_0=1$ 的假设不影响计算结果。

将上述方法用于图 4 各例, 结果如下: 对 (a) 例, $C_B=2.19$, $C_H=0.40$, $\delta\eta_B=0.029$, $\delta\eta_H=0.07$ $\frac{\delta(n_1/n_0)}{n_1/n_0} \leq 0.12$ 。对 (b) 例, $C_B=0.79$, $C_H=0.51$, $\delta\eta_B=0.053$, $\delta\eta_H=0.011$, $\frac{\delta(n_1/n_0)}{n_1/n_0} \leq 0.11$ 。可见此方法的精度一般约为两位有效数字。用于介质的许价是足够精确的。如果用于相同厚度样品之间的比较, 估计精度要更高一些。

五、讨 论

本文所述方法是一种间接的测量方法, 因此其精度除 η_B 、 λ_B 、 λ_H 的直接测量精度外, 主要决定于 Kogelnik 理论是否适用。这意味着适用范围不超过耦合波理论的适用范围。要求所测材料的调制度不能太大等(见文献[1])。此外, 本文中的假设(17)也可能进一步限制此方法的使用范围。

扩大适用范围的方法, 笔者认为, 一是尝试以更精确的理论(如严格的耦合波理论^[3])代替 Kogelnik 的一阶理论, 二是使本法规范化, 例如规定一个大家认可的厚度等。这样, 对于那些去搞材料的研究人员来说, 可不关心绝对测量结果的准确与否, 而只注意样品之间的相互比较。进一步的推广还可包括对倾斜反射光栅, 甚至透射光栅的测量。

马春荣副教授、卢维强同志对本工作给予了大力支持, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Herwig Kogelnik; *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**, No. 9 (Sep), 2909.
- [2] 华中工学院; 《工程数学, 算法语言, 计算方法》, (人民教育出版社, 北京, 1978), 136.
- [3] T. K. Gaylord, M. G. Moharam; *Appl. Phys.*, 1982, **B28**, No. 1 (Jan), 1.
- [4] 恽钢, 于美文; 《光学学报》, 1985, **5**, No. 6 (Jun), 488.

A method of measuring the modulation of refractive index of phase holographic recording medium

YUN GANG AND YU MEI WEN
(Beijing Institute of Technology)

(Received 14 June 1988; revised 17 October 1988)

Abstract

A method of measuring the modulation of refractive index of a certain holographic recording medium is presented in this paper, for the purpose of more appropriately evaluating different recording mediums and different fabrication techniques.

Key words: spectrophotometer; modulation of refractive index; coupled wave theory.