

双峰值面全息反射元件的角敏特性*

陈林森 吴建宏

(苏州大学激光研究室, 苏州 215006)

提 要

从实验上研究了 DCG 全息元件透射光谱的暗带谷值波长随入射角变化的特性, 提出用双峰值强度面反射元件作全息角敏元件(HASE), 该 HASE 对入射光有较高的角度灵敏度和广角敏感性, 分析了实验参数对暗带谷值和带宽的影响.

关键词 全息反射元件, 角敏器.

1 引 言

对体全息位相反射光栅的研究已开展了许多工作^[1~5], Heaton^[3] 分析并测量了漂白型卤化银反射光栅在单色光下的角度选择性, Kostuk^[2] 提出了多光栅体反射全息图衍射效率的互耦合模型. 在 HUD(head-up display)、防激光致盲镜^[3]、光互连元件^[4]和窄带滤光片^[5]方面, 对重铬酸明胶(DCG)的特性及全息反射元件的应用进行了有益的探索.

另一方面, 光跟踪、视觉传感和飞船空间交会对接等均要求对目标物与接收器间的相对姿态进行确定, 用光学传感手段, 首要解决的问题是必须用光电传感器对目标相对入射光的角度实现非触式近距探测. 全息透镜^[6~8]将光线角度量转换成强度或位移量进行测量, 角敏范围小, 扩大视角与提高测量精度是相互制约的. 本文对全息反射元件的透射光谱暗带谷值波长随入射角变化特性进行了实验研究, 提出用双峰值强度面全息反射元件作为一种新型全息角敏元件(HASE), 并用重铬酸明胶(DCG)进行了制作. 分析了实验参数(参物比、处理条件和胶层膨胀)对 HASE 暗带谷值、谷值波长和带宽的影响, 验证了 HASE 的角敏范围和角灵敏度.

2 HASE 的角敏原理

用耦合波方程^[9]可推导出无吸收位相反射光栅的透射光强为

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= R(T) \cdot R^*(T) = \Psi^2 (\Psi^2 \cos h^2 \Psi + \xi^2 \sin h^2 \Psi)^{-1}, \\ \xi &= (T/2) \cdot K_z, \\ \Psi &= \left[\left(\frac{\pi n_1 T}{\lambda_0} \right)^2 / (C_r |C_s|)^{1/2} - \frac{K_z^2 \cdot T^2}{4} \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里 T, n_1 分别是记录介质的厚度和折射率调制度, λ_0 是空气中再现光的波长, K_z 是再现光波偏离矢量 K 的 z 分量^[10],

$$K_z = K_x - K_i + K_r, \quad (2)$$

收稿日期: 1992年5月11日; 收到修改稿日期: 1992年7月15日

* 本项目获得江苏省自然科学基金资助.

一般地, (2) 式中, $K_x, K_y = 0$, 为光栅方程, K_f 为空间频率矢量, $K_f = 2\pi f, f = (2n_0/\lambda_1) \cdot \sin[(\theta_r - \theta_o)/2]$. 如图 1 所示, 用一物光和两束参考光同时记录, 经处理后形成双峰强度面全息反射元件, 用白光以 (θ_c, ϕ_c) 角照明, 由于元件对连续光波长的选择反射, 其透射光谱上形成两条与选择反射波长互补的窄暗带, 暗带谷值波长 $(\lambda_{o1}, \lambda_{o2})$ 应分别满足布喇格条件 ($\xi = 0$), 由 (1)、(2) 式和光栅方程, 有

$$\cos(\theta_c - \theta_f) \cdot \cos\phi_c = \lambda_o / (2n_0/f) \tag{3}$$

式中 $\theta_f = (\theta_o + \theta_r)/2 - \pi/2$ 为 K_f 与介质面法向的倾角, θ_c, ϕ_c 是 K_c 在 xoz 面内投影与 z 轴夹角及 K_c 与 xoz 面交角, 所有角度均为介质内的量. 对具有 θ_{f1} 和 θ_{f2} 的全息反射元件, 用光谱测量系统确定出 $\lambda_{o1}, \lambda_{o2}$ 和比值 $R = \lambda_{o1}/\lambda_{o2}$, 只要 $\theta_{f1} \neq \theta_{f2}$, R 是单调函数, 从 (3) 式便确定了 θ_c, ϕ_c 的大小及 θ_c 的符号. 因而, 双峰值强度面全息反射元件可作为一种新型全息角敏元件 (HASE).

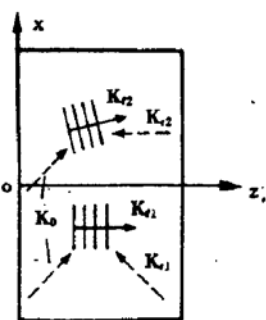


Fig. 1 A simultaneous holographic recording of HASE with two groups of peak-intensity planes

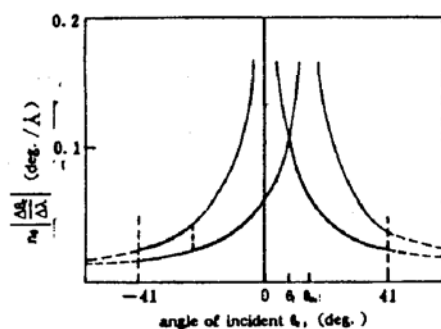


Fig. 2 Theoretical plot of angular sensitivity of HASE

图 2 是满足布喇格条件时 HASE 的角灵敏度 $|\Delta\theta_c/\Delta\lambda|$ 与 θ_c 的函数曲线 ($\phi_c = 0$), 在两峰值强度面角灵敏度相同, 对应的波长比为 R_m , 当 $R > R_m$ 时 HASE 对 λ_{o2} 的角灵敏度较高, 反之, 应以 λ_{o1} 为测量依据. HASE 的倾角 θ_{f1}, θ_{f2} 的选择须考虑两个条件, 第一, 应使两峰值强度面的角灵敏度有互补性, 第二, 在不同 θ_c 下 λ_{o1} 或 λ_{o2} 应处于光谱测量区内. 表 1 列出了 $\theta_{f1} = 0, \theta_{f2} = 15^\circ$ 组合的 HASE 的特性参数 ($n_0 = 1.52, \lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$), 表中 R_0 为 $\theta_c = 0$ 时的波长比, $\Delta\lambda$ 为 HASE 的光谱响应范围. 从图 2 和表 1 看到, 利用双峰值强度面的互补性显著改善了 HASE 对小角度的灵敏度, 扩大了角敏范围, 尤其是 HASE 对大角度的高角灵敏度是区别于其他角敏元件的重要特征.

Table 1 Characteristic parameters for evaluating HASE

θ_o	θ_r	θ_f	θ_m	f	R_o	R_m	$n_0 \Delta\theta_c/\Delta\lambda _L$	$n_0 \Delta\theta_c/\Delta\lambda _H$	$\Delta\lambda$
(deg.)				($1/\mu\text{m}$)			(deg./nm)		(nm)
30	150	0	7.92	4.77	0.86	0.90	1.1	0.24	430~560
30	180	15		6.02					

3 实验制作与结果讨论

为验证上述结论, 制作了 HASE. 如图 1 所示, 取介质中 $\theta_o = 19.4^\circ, \theta_{r1} = 160.6^\circ, \theta_{r2} = 180^\circ$, 用 Ar^+ 激光器的 488.0 nm 谱线在重铬酸明胶干板 (面积为 $50 \times 60 \text{ mm}^2, T \sim 25 \mu\text{m}$,

$n_0 = 1.52$) 上曝光,对记录后 DCG 干板进行处理^[11,12],加玻璃盖片并密封后成 HASE,其倾角 $\theta_{f1} = 0, \theta_{f2} = 9.7^\circ$,空间频率 $f_1 = 58701/\text{mm}, f_2 = 61401/\text{mm}$.

图 3 是测量 HASE 角敏特性的装置,测量前先对 PMT 信号归一化,光谱测量区间定为

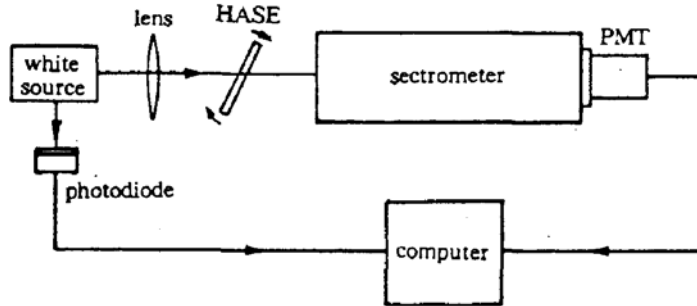


Fig. 3 Apparatus of measuring the transmitted spectrum of HASE

400~600 nm,为提高谷值波长测量精度,应使 HASE 的暗带尖窄同时保持暗带谷值与背景偏置值有一定的反差.图 4 中曲线(a)是正入射时 HASE 的透射光谱,两组峰值强度面对连续光波长选择反射,在谷值波长为 551.0 nm,512.0 nm 的附近形成两暗带,其余波段形成平均透过率为 71.4% 的连续背景,对应的谷值透过率为 0.5% 和 3.5%,两暗带带宽 $\Delta\lambda$ (光强下降 70% 处的波差)为 11.8 nm 和 4.7 nm.从(1)式的计算可知,在 $T, C_R, |C_S|$ 不变时,减少 n_1 可使 $\Delta\lambda$ 变小,从而利于提高波长测量精度.实验发现,提高参物比可显著减小 $\Delta\lambda$,图 4 中曲线(a)的倾斜峰值强度面参物比为 1:1,平行峰值强度面参物比为 20:1.此外,降低 DCG 干板最初浸水($<15^\circ\text{C}$)和减少浸入时间以及适当延长坚膜时间均对带宽变窄有利.为便于区别 λ_{01} 和 λ_{02} ,可控制 K_{r1} 和 K_{r2} 的光强及总曝光量使两峰衍射效率不同,从而暗带谷值不同.图 4 中曲线

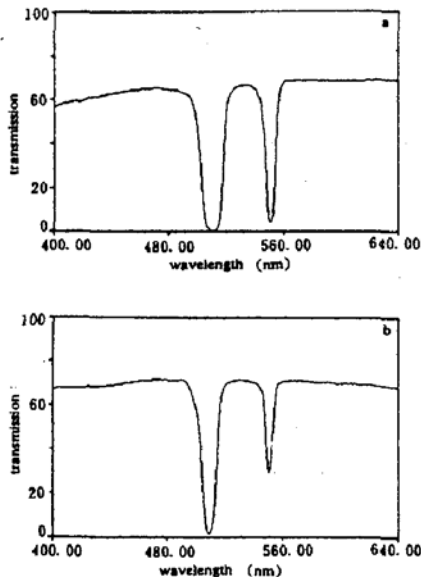


Fig. 4 The transmitted spectrum of HASE at the normal incident angle

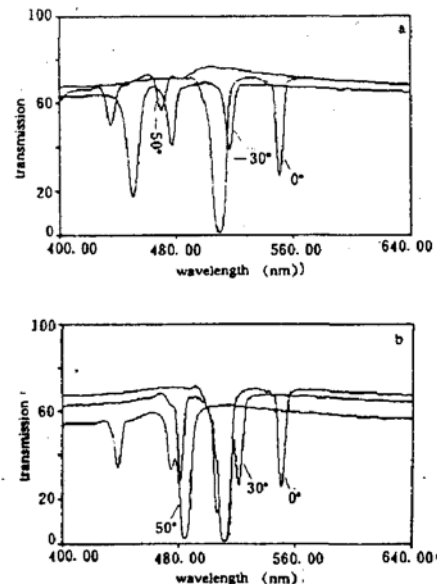


Fig. 5 Changes of dark-band valley wavelength against the angles of incident

(b)是经暗带变窄处理和减少平行峰值强度面曝光量后获得的透射光谱, $\Delta\lambda$ 为 7.8 nm 和 3.1 nm,均减小到原带宽的 66%,谷值变为 1.5% 和 28%.图 5 为 HASE 在不同入射角 θ_c' (空气中)下的透射光谱, θ_c' 从负到正, R 逐渐减小,当 $\theta_c' < -49^\circ$ 时,倾斜峰值强度面的 $\lambda_{02} < 400$

nm, 超出设定区间, 这时应以 λ_{01} 为测量依据. 由于 $\theta_{f2} = 9.7^\circ$, 根据(3)式, 在 $\theta_c = 0$ 和 19.4° (空气中 θ_c' 为 30.3°) 处的 λ_{02} 的位置应相同, 这与图 5(b) 的结果一致. 由图 4 和图 5 看出, 随着 K_x 与 K_y 偏角的增大, 在连续背景中的暗带波长向短波长漂移, 谷值由低变高, 当暗带谷值与整个背景偏置值仍有足够的对比度时, 用图 3 的光电探测装置能很精确地确定谷值波长的位置, 当谷值增高到使得光电系统对谷值波长的测量精度下降时所对应的角度便是 HASE 的最大角敏范围. 由图 5 可知, θ_c' 的增大对带宽的影响很小, 因此, HASE 的角度灵敏度仍由图 2 决定. 此外, DCG 干板还记录了由 θ_{c2} 与玻璃基片内反射干涉成了平行强度面, 从而在 $\theta_c' \neq 0$ 时, 出现第三条暗带, 但该暗带谷值波长总小于 λ_{01} , 且两者之比不随 θ_c' 变化而改变, 不影响测量.

处理过程中明胶膨胀使峰值强度面间隔增宽, 导致 $\lambda_{01}, \lambda_{02}$ 向长波长漂移(见图 4), 设明胶中峰值强度面膨胀率为 ϵ , λ_{01}' 为垂直峰值强度面入射时的最大谷值波长, 则 $\epsilon = \lambda_{01}' / (2n_o/f)$, 计算时, (3) 式中 $(1/f)$ 换成 (ϵ/f) . 实验中, 在 $\theta_c = 0$ 和 9.7° 处, $\lambda_{01}' = 551.0 \text{ nm}$, $\lambda_{02}' = 520.0 \text{ nm}$, 从而, $\epsilon_1 = 1.062, \epsilon_2 = 1.050$. 图 6 是胶层膨胀后两谷值波长随入射角 θ_c' 改变的实验值(图中数据点)与理论值(实线)的比较, 两者非常吻合. 由于暗带谷部较锐, 光谱测量系统可测出波长改变 0.5 nm 内的强度变化, 这样, 在 $\theta_c = \theta_m = 4.7^\circ$ (空气中 $\theta_c' = 7.2^\circ$) 处的角分辨率 $n_o |\Delta\theta_c|_{\perp} = 1.0^\circ$, 在 $\theta_c = 39.5^\circ$ ($\theta_c' = 75^\circ$) 处的 $n_o |\Delta\theta_c|_{\parallel} = 0.13^\circ$. 从图 6 中看出, 当 θ_c' 或 $\phi_c' = 0$ 时, HASE 的角敏范围优于 $\pm 75^\circ$, 当 θ_c' 或 $\phi_c' = 20^\circ$ 时, 角敏范围达 $\pm 70^\circ$, 在已知 ϕ_c' 时, 利用不同区间 λ_{01} 和 λ_{02} 的互补性, 可较精确地确定 θ_c' . 图 6(a)、(b) 中 R 是单调变化的, 故可确定 θ_c' 的符号, (c)、(d) 中, R 不变, 所以不能判断 ϕ_c' 的符号.

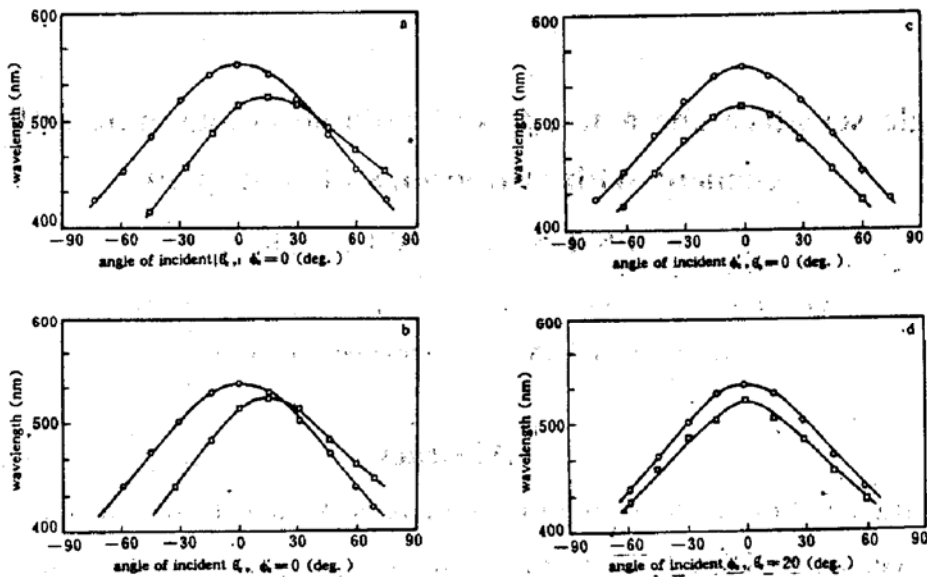


Fig. 6 Experimental valley wavelengths compared with theoretical results under different angles incident

当需测量物体相对接收器的姿态角时, 可将 HASE 复合到后向反射棱镜上成为目标合作器, 并置于待测物体上, 用扫描单色系统或平场谱仪确定从目标合作器返回的测量光的谷值波长, 便给出物体相对入射光线的角度.

以上, 验证了 HASE 的角敏特性, 它有下列特点, 1) 胶层膨胀虽使谷值波长漂移, 但不影响谷值波长满足布喇格条件, 同时, 两谷值波长的互补性提高了角敏范围和角灵敏度; 2) 用 DCG 制成的 HASE 有很尖窄的暗带且两暗带谷值可以不同, 便于测量判别; 3) HASE 将角信息转换成光谱信息, 克服了强度转换型角敏元件衍射效率不均匀导致测量误差的不足.

本文作者感谢胡元同志在 DCG 干板制作中给予的协助。

参 考 文 献

- [1] J. M. Heaton, L. Solyma, Wavelength and angular selectivity of high diffraction efficiency reflection holograms in silver halide photographic emulsion. *Appl. Opt.*, 1985, 24(18): 2931~2936
- [2] R. K. Kostuk, J. W. Goodman, L. Hesslink, Volume reflection holograms with multiple gratings: experimental and theoretical evaluation. *Appl. Opt.*, 1986, 25(25): 4362~4368
- [3] J. R. Magarinos, D. J. Coleman, Holographic mirrors. *Opt. Engin.*, 1985, 24(5): 769~780
- [4] R. K. Kostuk, J. W. Goodman, L. Hesslink, Optical imaging applied to microelectronic chip-to-chip interconnections. *Appl. Opt.*, 1985, 24(17): 2851~2858
- [5] 刘大禾, 黄婉云, 唐伟国, 反射式窄带滤光片. *光学学报*, 1990, 10(2): 147~153
- [6] T. L. Williamson, H. W. Rose, Holographic field lens detector. *U. S. Patent*, 4181435: 4, 919
- [7] Chen Linsen, Wu Jianhong, Jiang Yaguang, Optimal design of holographic field lens for the infrared. *Proc. SPIE*, 1991, 1731: 112~118
- [8] Zhang Huafeng, Wang Ben, Yu Chongxiu *et al.*, Detecting laser illumination using holographic lens and position sensitive device. *Proc. SPIE*, 1991, 1731: 278~281
- [9] H. Kogelnik, Coupled wave theory for thick hologram grating. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, 48(1): 2906~2947
- [10] L. M. Soroko, *Holography and Coherent Optics*. New York: Plenum Press, 1980: 545~560
- [11] H. M. Smith, *Holographic Recording Materials*. New York: Academic Press, 1977: 87~99
- [12] Chen Linsen, Wu Jianhong, Jiang Yaguang, Simplified processing and characteristic investigations of DCG holographic element. *Chinese J. of Lasers (E. E.)*, 1992, 1(5): 469~476

Angle-sensitive characteristics of volume holographic reflection element with two groups of peak planes

CHEN Linsen WU Jianhong

(Laser Research Laboratory, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 11 May 1992; revised 15 July 1992)

Abstract

The characteristics of wavelength of dark-band valley in the transmitted spectrum of dichromated gelatin (DCG) holographic reflection element against the angles of incident beam are investigated experimentally. The use of holographic reflection element with two groups of peak-intensity planes as the holographic angle-sensitive element (HASE) is presented. The HASE has high angular sensitivity and the property of sensitizing to incident beam within very wide angles. The influences of experimental parameters including the processing conditions and the ratios of reference to object on the minima and bandwidths of dark-band of transmitted spectrum are also analysed.

Key words holographic reflection element, angle-sensitive element.