

文章编号 : 0258-7025(2004)02-0190-05

银盐干板稀释显影折射率调制特性实验研究

姜根山¹, 吕跃广², 黄明强¹

(¹ 华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003; ² 中国北方电子设备研究所, 北京 100083)

摘要 通过银盐全息干板稀释显影方法, 实验研究了干板胶层有效介质折射率的曝光量特性和折射率调制度与曝光量、参物比等参量之间的关系, 分析讨论了体位相全息图的折射率调制机理, 给出了稀释显影银盐干板有效介质折射率和折射率调制度的曝光特性曲线, 指出了等参物光强比记录的全息光栅可以最大限度地利用干板胶层的折射率调制容限, 解释了以往文献中难以解释的实验现象。

关键词 信息处理技术; 折射率调制; 稀释显影; 体位相全息; 曝光量

中图分类号 O 438.1 文献标识码 A

Experimental Research on the Refractive Index Modulation of Silver-Halide Plate with Dilution Developing Process

JIANG Gen-shan¹, LÜ Yue-guang², HUANG Ming-qiang¹

(¹ Department of Applied Physics, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

(² China Northern Institute of Electric Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract By means of dilution developing process for the silver halide holographic plate, the influences of exposure energy on refractive index and index modulation in emulsion were experimentally researched. According to the exposure characteristics of optical density and diffraction efficiency, the absorption modulation of silver-halide emulsion with dilution developing process will be ignored. The hologram is a volume phase grating with an average absorption coefficient but no absorption modulation. The index modulation mechanism of the gratings was discussed, and the characteristics curves of refractive index and index modulation of effective medium in silver-halide emulsion were revealed. The maximum of index modulation of silver halide emulsion can be reached at equally intensity between reference and object waves. The test results in earlier papers have been made clear.

Key words information processing technology; refractive index modulation; dilution developing; volume phase hologram; exposure energy

1 引 言

全息干板胶层的折射率调制性能是记录位相全息图的重要参数, 获得恰当的折射率调制度(n_1)是制作高质量全息图的关键。但是, 由于折射率调制度难以进行直接测量等原因, 在文献中始终没有看到关于全息记录材料折射率曝光特性曲线的报道。国内外一些资料也仅给出银盐 $n_1 = 0.02$ 、重铬酸盐明胶 $n_1 = 0.4$ 等参考值^[1]。但由于 n_1 除与记录材料有

关外, 还与曝光量密切相关, 所以对某种感光材料的折射率调制性能仅给出这样的参考值是远远不够的。

银盐全息干板用稀释显影方法可以获得具有较高衍射效率的位相全息图, 其衍射效率的实验值可以高达 32.5% 以上^[2,3], 甚至到 40%^[4], 它比振幅全息和化学漂白方法形成的位相全息图具有更高的衍射效率和信噪比。文献[3]曾经研究了用稀释显

收稿日期 2002-09-26; 收到修改稿日期 2002-12-05

基金项目 国家教育部高等学校博士学科点专项基金(20010079004)资助项目。

作者简介 姜根山(1963—), 男, 华北电力大学应用物理系教授, 博士, 现从事激光全息及信息处理研究。E-mail: gsjiang@

影提高全息图衍射效率的方法,给出了稀释显影的光密度特性曲线以及衍射效率与显影时间、曝光量之间的关系,并得到了较高的衍射效率(28%)。但是,对衍射效率随曝光量增加而单调上升,并在曝光量较大时衍射效率趋于饱和而不上升的现象难以解释。文献[4]用光谱分析法研究了稀释显影全息干板的紫外-可见-近红外的透射光谱和光声吸收光谱,并利用 Maxwell-Garnett 有效介质理论试图解释全息干板稀释显影后,含有银微粒明胶的光谱特性和产生折射率空间调制的原因,但是由于折射率调制难以进行直接测量,至今还没有发现关于全息干板胶层折射率曝光特性及其调制机理的实验研究报道。

本文对稀释显影全息干板的光密度 D ,衍射效率 η 随曝光量 E 的变化关系进行了精密的实验研究,指出采用稀释显影处理的全息图是以位相全息占主要作用、只考虑平均吸收,而可忽略吸收调制的折射率调制型体全息光栅。根据实验结果及衍射效率与各参量的关系,计算出干板胶层的折射率调制度的曝光曲线,根据位相全息胶层的折射率调制机理分析,得出银盐稀释显影干板胶层的折射率曝光特性曲线。论文结果与文献[2]报道的在相同实验条件下利用消隐角估算的结果相一致,并对文献[3]报道的现象进行了圆满解释。

2 位相体全息光栅折射率调制产生机理分析

根据文献[5],平面全息图与体全息图的区别主要在于 Q 参量

$$Q = 2\pi\lambda\delta/n_0\Lambda^2 \quad (1)$$

式中 λ 为光波波长 δ 为胶层厚度 n_0 为胶层平均折射率 Λ 为胶层内条纹间距(即光栅常数)。如果 $Q \geq 10$,可视为体全息图,在理论上体全息图比平面全息可以获得更高的衍射效率。为减少在干板显影处理中因乳胶收缩对胶层内光栅常数和干板衍射效率带来的干扰,只考虑非倾斜透射全息光栅。

图1所示为非倾斜全息光栅记录示意图,假设物光和参考光的复振幅分别为: $A = Ae^{-ik_A \cdot r}$ $B = Be^{-ik_B \cdot r}$,其偏振化方向均垂直于入射面。根据光全息原理,参、物光波在胶层内发生干涉现象,干涉强度为

$$I(\mathbf{r}) = |A + B|^2 = (I_A + I_B) + 2\sqrt{I_A I_B} \cos(\mathbf{k}_B - \mathbf{k}_A) \cdot \mathbf{r} \quad (2)$$

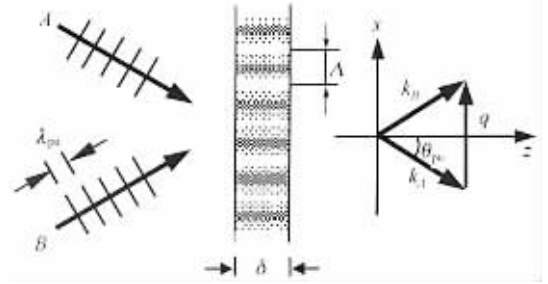


图1 透射体全息光栅记录示意图

Fig. 1 Model of a thick hologram grating with unslanted fringes

如果曝光时间为 t ,则空间曝光量应为

$$E(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r}) \cdot t = (I_A + I_B)t + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot t \cos(\mathbf{k}_B - \mathbf{k}_A) \cdot \mathbf{r} = E_0 + E_1 \cos \mathbf{q} \cdot \mathbf{r} \quad (3)$$

式中 \mathbf{r} 为空间位置矢量 $\mathbf{q} = \mathbf{k}_B - \mathbf{k}_A$ 为光栅的空间频率 E_0 为平均曝光量 E_1 为其空间调制量。

对银盐全息干板,根据 Maxwell-Garnett 有效介质理论^[3] 稀释显影后,胶层内的有效介质折射率是银粒子浓度的函数,在显影等处理条件一定时,是曝光量 E 的单值函数,即 $n = n(E)$ 。因此,位于线性曝光区内有效介质的空间折射率分布为

$$n(\mathbf{r}) = n_0 + n_1 \cos \mathbf{q} \cdot \mathbf{r} \quad (4)$$

式中 n_1 为有效介质折射率调制度。

位相全息图的折射率曝光特性是记录光强(或曝光量)分布、形成折射率调制的主要原因,也是折射率调制型位相全息图的基本曝光特性。一旦特性曲线得以确定,就可以按乳胶厚度和记录条件设置最佳曝光量,使全息图的拍摄质量能够定量控制在最佳状态。

根据方程(2)(3),当参、物光强比选择为 1:1 时, $I_A = I_B$, 亦即 $E_0 = E_1$ 此时,在胶层内亮条纹处的最大曝光量 $E_{\max} = E_0 + E_1 = 2E_0$ 暗条纹处的曝光量 $E_{\min} = E_0 - E_1 = 0$ 。干板经显影处理后,在亮条纹处有效介质折射率最大 $n_{\max} = n_0 + n_1$ 暗条纹处有效介质折射率最小 $n_{\min} = n_0 - n_1$ (由于光强比为 1:1 $E_{\min} = 0$ 意味着暗条纹处有效介质折射率 n_{\min} 为明胶折射率,即 $n_{\min} = 1.50$)。因此在线性曝光区内 $n_1 = (n_{\max} - n_{\min})/2$,即 折射率调制度为胶层内光栅条纹区有效介质折射率空间变化幅度的一半^[6]。

曝光量越强,胶层内析出的银粒子浓度越高,有效介质折射率 n 就越大^[4]。因此 n_{\max} 随曝光量增加

而增加,并最终在明胶中的银粒子全部析出时达到饱和值。当参、物光强比为 1:1 时,由于空间 n_{\min} 恒等于明胶折射率,所以有效介质折射率调制度 n_1 将随曝光量增加而增加,并在 n_{\max} 达到最大值时趋于饱和。但是,如果参、物光强比不是 1:1 根据干涉原理,暗条纹处曝光量 $E_{\min} > 0$,空间 $n_{\min} = n_0 - n_1 > n_{\text{gelatin}}$,并随曝光量增加而增加。因此,折射率调制度 n_1 将在 n_{\max} 先期达到饱和值后由于 n_{\min} 继续增加而开始下降。当 n_{\min} 趋于饱和值时 n_1 趋于 0。所以,选择 1:1 参、物光强比要比选择其他参物比值更容易最大限度地利用胶层介质的折射率空间调制性能,使干板胶层的折射率调制度接近最大调制容限值 $n_{1\max} = (n_{\text{saturation}} - n_{\text{gelatin}})/2$ 。这对制作折射率调制度越大衍射效率越高的反射体位相全息光栅是非常重要的。

3 实验及结果

实验中,He-Ne 激光器长 1.5 m,功率 60 mW,波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,参、物光强度比为 1:1,夹角为 40° ,分别经针孔滤波器滤波和准直,使达到干板的参、物光均为高度均匀分布的平行光。全息干板采用厚度 $\delta = 5000 \text{ nm}$,明胶折射率为 1.50 的高性能银盐干板。曝光时间和参、物光强经严格控制和准确测量。干板显影按特殊配方加 10 倍蒸馏水稀释处理。温度严格控制在 $20 \sim 21^\circ\text{C}$,显影时间为 30 min,定影 15 min 后,水洗 30 min,然后自然干燥。

图 2 为干板经稀释显影后光密度曝光特性曲线 ($D-E$),根据文献 [3] 给出的原液显影特性曲线,稀释显影的特性曲线斜率(即反差系数 γ)远远小于原液显影。因此,在胶层条纹区域,由于明暗条纹间曝光量的空间变化而引起的光密度空间调制 D_1 远远小于原液显影后吸收型全息图胶层的光密度空间调制。根据 Kogelnik 耦合波理论^[7],胶层平均光密度与光密度调制之比等于胶层内平均吸收系数与吸收系数调制之比,即 $D_0/D_1 = \alpha/\alpha_1$ 。所以稀释显影银盐干板的吸收调制可以近似忽略,而只需考虑其平均吸收系数,因此稀释显影银盐干板是一种考虑平均吸收系数但可忽略吸收调制的全息图类型。

图 3 为衍射效率随干板曝光量之间变化关系的特性曲线 ($\eta-E$),实验表明,衍射效率随曝光量单调上升,在达到最大值后下降,并最终趋于恒定值。这一现象不同于文献 [3] 报道的在参、物光夹角设置为 30° 时的特性曲线实验结果。

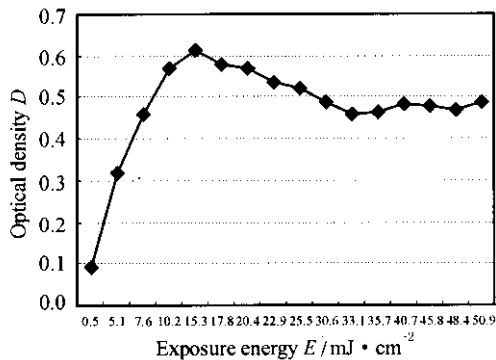


图 2 光密度曝光特性曲线

Fig. 2 Optical density curve with different exposure energy

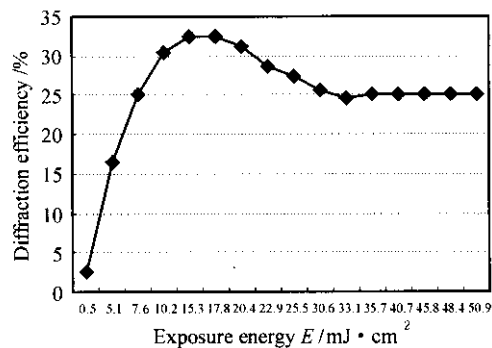


图 3 衍射效率曝光量特性曲线

Fig. 3 Diffraction efficiency curve with different exposure energy at the ratio 1:1 of beam intensity

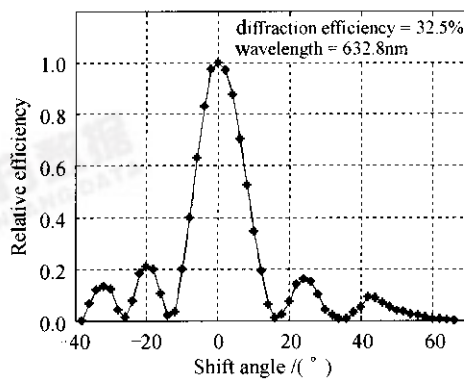


图 4 再现光入射角偏移量与相对衍射效率的关系

Fig. 4 Relative efficiency curve with different shift angle of incident light

图 4 给出了参、物光总曝光量为 17.8 mJ/cm^2 ,衍射效率为 32.5% 时的全息光栅再现光入射角相对 Bragg 角的偏移量与相对衍射效率的关系曲线(横坐标角度为 0° 时,表示按 Bragg 角入射),根据实验结果,再现光按 Bragg 角入射时衍射效率最高,偏离 Bragg 角时,衍射效率将随偏离角度的改变依

次出现次级峰值和极小值。利用图中再现光的消隐角大小,可根据文献[2]提供的方法求出折射率调制度大小。

4 干板胶层的折射率曝光特性

实验中,干板胶层平均折射率 $n_0 = 1.59$ (用椭圆偏振仪测量),在参、物光夹角为 40° 时,计算出 $Q = 14.6 > 10$,所以可按体全息图考虑。根据体全息图的耦合波理论,有吸收但忽略吸收调制的折射率调制型非倾斜体位相透射全息光栅的衍射效率为^[17]

$$\eta = \exp(-2D_0) \sin^2\left(\frac{\pi n_1 \delta}{\lambda \cos\theta_b}\right) \quad (5)$$

式中 θ_b 为 Bragg 入射角(胶层中再现光与光栅面的夹角)。

根据图 2 3 实验结果($D-E$ $\eta-E$)及方程(5),图 5 给出了当参、物光强比为 1:1 时,全息干板胶层折射率调制度(n_1)的曝光特性曲线,说明折射率调制度随曝光量单调上升,但当达到最大值(0.088)时开始有下降趋势。这是因为在设置参、物光强比为 1:1 时实际有误差,导致胶层内暗条纹处干涉光强并不严格为 0 所造成的结果。对图 4 所示曝光量的全息光栅,根据图 5 结果其 $n_1 = 0.065$ 。如按文献[2]给出的方法,由图 4 消隐角位置计算得到的折射率调制度为 $n_1 = 0.067$ (与相同实验条件下文献[2]报道的结果一致),误差 $\Delta n_1 = 0.002$,相对误差在 3.0% 以内。根据图 3,曝光量分别在 15.3, 17.8 mJ/cm^2 时,衍射效率处于峰值 32.5%,它们的折射率调制度 n_1 分别为 0.057 和 0.065,处于图 5 线性区中段,说明透射体位相全息图获得最高衍射效率时, n_1 值并不一定是干板的最大 n_1 容限值。

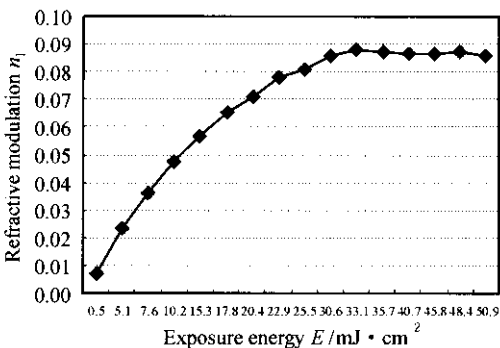


图 5 有效介质折射率调制度曝光量特性曲线

Fig. 5 Index modulation curve with exposure energy

万方数据 ratio 1:1 of beam intensity

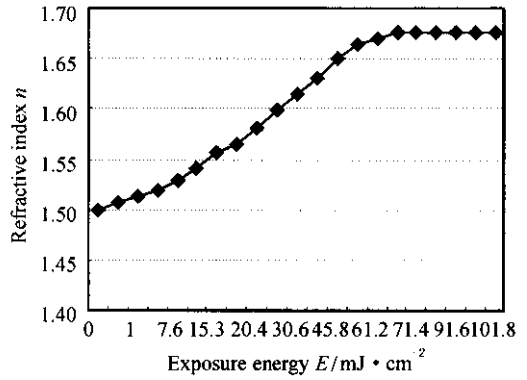


图 6 有效介质折射率曝光特性曲线

Fig. 6 Refractive index curve of effective medium with different exposure energy

图 6 给出了干板胶层的有效介质折射率曝光特性曲线,有效介质折射率随曝光量(或胶层内析出的银微粒浓度)增加而单调增加,在银微粒浓度达到饱和时,趋于极限值 1.676。当曝光量为 0 时,胶层内基本无银微粒析出,介质折射率为明胶折射率 1.50。对图 4 所示的全息光栅(曝光量为 17.8 mJ/cm^2)根据图 6 其有效介质折射率 $n = 1.565$,而用椭圆偏振仪测出该干板的平均折射率 $n_0 = 1.59$,误差 $\Delta n = 0.025$,相对误差在 1.6% 以内。该值也处于图 6 线性区中段。

根据本文讨论,很容易解释文献[3]得到的实验结果。因为按照方程(5),在 D_0 一定时,如果曝光量(或 n_1)没有足够大,或参、物光夹角较小,只要使 $\frac{\pi n_1 \delta}{\lambda \cos\theta_b} < \frac{\pi}{2}$,衍射效率将随曝光量增加单调上升,而当 $\frac{\pi n_1 \delta}{\lambda \cos\theta_b} = \frac{\pi}{2}$ 时,衍射效率处于最佳值,在

$\frac{\pi n_1 \delta}{\lambda \cos\theta_b} > \frac{\pi}{2}$ 时,衍射效率开始下降,并在 n_1 达到最大

值后趋于稳定值而不下降,这一点已由图 3 和文献[8]的实验结果所证实。如果记录材料的折射率调制性能较强(如重铬酸盐明胶), n_1 的取值范围较大,衍射效率随曝光量增加将会出现第二个、甚至第三个峰值。值得指出的是,只要参、物光强比为 1:1,衍射效率将随曝光量增加最终趋于稳定值而不下降,相反,如果参、物光强比不是 1:1,衍射效率将随曝光量增加因 n_1 趋于 0 而最终也趋于 0 值。在衍射效率达到最大值时,对反射体全息光栅表明折射率调制度已为最大值,但对透射体全息光栅而言其折射率调制度并不一定达到了最大值(如图 3 所

示)。

5 结 论

通过对稀释显影全息干板的实验研究及理论分析,可得出如下几点启示:

1) 银盐干板经稀释显影可得到具有较高衍射效率的体位相全息图,这种全息图具有平均吸收系数,但可忽略吸收调制。

2) 干板胶层的有效介质折射率随曝光量增加(在 1.500 ~ 1.676 之间)单调增加,当曝光量较大时(如 61.2 mJ/cm²)有效介质折射率趋于饱和值。

3) 选择 1:1 参、物光强比可以最大限度地利用干板胶层的折射率调制性能,使折射率调制度能够达到或接近干板的最大调制容限值($(n_{\text{saturation}} - n_{\text{gelatin}})/2$)。

4) 当参、物光强比为 1:1 时,干板胶层的有效介质折射率调制度随曝光量增加(在 0 ~ 0.088 之间)单调增加,并最终趋于该饱和值。而在其他参、物光强比条件下,折射率调制度随曝光量增加会最终下降并趋于 0 值,参、物光强差别越大, n_1 趋于 0 应越快。

5) 在 1:1 参、物光强比条件下,干板衍射效率在折射率调制度达到最大值后趋于稳定值,但对透射光栅,折射率调制度最大时衍射效率不一定为最大,而衍射效率最大时折射率调制度也不一定为最

大。

参 考 文 献

- 1 Yu Meiwen. Optical Holography and Information Processing [M]. Beijing : National Defence Industry Press , 1984. 35 ~ 38
于美文. 光学全息及信息处理[M]. 北京 : 国防工业出版社 , 1984 , 35 ~ 38
- 2 Jiang Genshan , Zou Lixiong , Jiang Lingzhen *et al.* . A method for estimating the index modulation of phase holographic grating [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology* , 1992 , **24**(4) 38 ~ 42
姜根山 , 邹立熊 , 姜玲珍 等 . 位相全息光栅折射率调制度的一种估算方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报 , 1992 , **24**(4) 38 ~ 42
- 3 Zhao Lin , Yan Shuqin , Wang Danlian *et al.* . A method of improving hologram diffraction efficiency [J]. *Acta Physica Sinica* , 1981 , **30**(1) : 143 ~ 146
赵 霖 , 阎书琴 , 汪淡莲 等 . 提高全息图衍射效率的一种方法 [J]. 物理学报 , 1981 , **30**(1) : 143 ~ 146
- 4 Zhang Chungping , Zhang Guangyin , Li Zengfa *et al.* . Study of spectrum characteristic for the silver halide holographic plates by dilution developing [J]. *Chinese Science Bulletin* , 1983 , **28**(9) : 523 ~ 526
张春平 , 张光寅 , 李增发 等 . 稀释显影卤化银全息干板的光谱特性的研究 [J]. 科学通报 , 1983 , **28**(9) 523 ~ 526
- 5 H. M. Smith. Holographic Recording Materials [M]. Beijing : Science Press , 1984. 13 ~ 25
H. M. Smith 著 , 马春荣 等译 . 全息记录介质 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1984. 13 ~ 25
- 6 S. C. Barden , James A. Arns , Willis S. Colburn. Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications [C]. *SPIE* , 1998 , **3355** 866-876
- 7 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *The Bell System Technical Journal* , 1969 , **48**(9) 2909 ~ 2947
- 8 Huang Mingju , Yao Huawen , Chen Zhongyu *et al.* . Study of high-density holographic characteristics of a novel green-sensitive photopolymer [J]. *Chinese J. Lasers* , 2002 , **A29**(8) 748 ~ 750
黄明举 , 姚华文 , 陈仲裕 等 . 一种新型绿光敏感高密度全息光聚物的记录特性研究 [J]. 中国激光 , 2002 , **A29**(8) 748 ~ 750