

折射率相位调制型全息图的衍射*

钟丽云 张文碧 杨齐民 李川
(云南工业大学激光研究所, 昆明, 650051)

摘要: 首先推出折射率相位调制型全息光栅的衍射方程, 由此说明衍射效率主要取决于调制折射率, 且各级衍射光的衍射效率不同是多种原因造成的。并指出体积光栅效应对透射全息衍射效率是有贡献的, 讨论了影响散射物体全息衍射效率的问题, 最后指出在一般情况下, 调制折射率是一个很小的量, 化学处理对它起着关键性的作用。

关键词: 衍射效率 调制折射率 体积光栅效应 基元全息 化学处理

Study on the diffraction efficiency of refraction index phase modulation hologram

Zhong Liyun, Zhang Wenbi, Yang Qimin, Li Chuan
(Institute of Laser, Yunnan Polytechnic University, Kunming, 650051)

Abstract: First, this paper deduced the diffraction equation for refractive index phase modulation holographic grating, and pointed out that the diffraction efficiency was mainly influenced by refraction index modulation, and the diffraction efficiency of different levels came from many factors. The volume grating effect affected the diffraction efficiency of transmission hologram. This paper also discussed the factors that influenced the diffraction efficiency of scattering object, and proposed the amount of refraction index modulation was very small, the diffraction efficiency was mainly determined by chemical treatment.

Key words: diffraction efficiency refraction index modulation volume grating effect elementary hologram chemical treatment

引言

利用科格尼克的耦合波理论, 可以推出折射率相位调制型全息图在各种情况下的衍射效率方程, 但所得到的方程相当复杂, 不便于实际应用。笔者从折射率相位调制型全息光栅的衍射方程, 讨论了各种因数对衍射效率的影响, 并指出在一般情况下, 调制折射率是一个很小的量, 化学处理对它起着关键性的作用。

1 折射率相位调制型全息光栅的衍射

用两组平行光束照射到记录干版上, 经曝光和化学处理(显影、定影和漂白)后, 则干版内沿 x 方向的折射率分布为:

$$n(x) = n_0 - n \sin(K \cdot x) \quad (1)$$

$$K = 2\pi / \Lambda \quad (2)$$

* 云南省科委基金资助。

式中, n_0 是干版内的平均折射率, n 是干版内的调制折射率, λ 是光栅在 x 方向的波长, K 是其波矢, 则光栅方程可以写为:

$$z(x) = d \operatorname{nsin}(K \cdot x) \quad (3)$$

式中, d 是光栅厚度, 如图 1 所示。现考虑正入射光的衍射情况, 即入射光是沿 z 方向传播的平面波, 则

$$E(z) = e^{-ikz} \quad (4)$$

$$k = 2\pi / \lambda \quad (5)$$

式中, λ 是入射光的波长, k 是其波矢。经光栅调制后的光波方程变为

$$E(x) = e^{-ikd \operatorname{nsin}(K \cdot x)} \quad (6)$$

考虑到光栅在 x 方向有一定宽度为 q , 则上式改写为^[1]

$$E(x) = e^{-ikd \operatorname{nsin}(K \cdot x)} \cdot \operatorname{rect}(x/q) \quad (7)$$

将上式进行傅里叶变换, 就可得到相位光栅的各级衍射光

$$E(l) = \int_{-q/2}^{q/2} e^{-ikd \operatorname{nsin}(K \cdot x)} \cdot \operatorname{sinc}(q(x-l)/q) \cdot \cos \theta_t \quad (8)$$

$$= 2d \operatorname{nsin} / \lambda \quad (9)$$

$$l = \cos \theta_t \quad (10)$$

式中, θ_t 是相位调制度(有的文献称为相位移), θ_t 是透射光的出射角^[2], $J_m(\cdot)$ 是 m 阶贝塞尔函数, $\operatorname{sinc}(\cdot) = \sin(\cdot) / \cdot$ 为 sinc 函数。

第 m 级衍射光的光强为 $I_m = J_m^2(\cdot) \quad (11)$

第 m 级衍射光的衍射效率为 $\eta_m = I_m / I_i = |t_m^2| \cdot J_m^2(\cdot) \quad (12)$

$$|t_m^2| = 1 - |r_m^2| - |a_m^2| \quad (13)$$

式中, $|t_m^2|$, $|r_m^2|$, $|a_m^2|$ 分别是第 m 级衍射光的透射率、反射率、吸收率。当 $m = 1$ 时, 如果 $\theta_t = 1.85$, 则 $J_1(\cdot) = 0.582$ 为最大值, 再若 $|t_1^2| = 1$, 则 $\eta_1 = 33.9\%$ 。但实际上并非如此简单, 在非正入射的情况下, θ_t 还与入射角有关^[3], $|r_m^2|$ 也与入射角有关。也就是说 η_m 与入射角有关。其次, 不同衍射级的出射角 θ_t 不同, 故 η_m 不同, $|r_m^2|$ 也不同, 即各级衍射效率不同是多种原因造成的。

2 折射率相位调制光栅的体积效应

上面谈到的仅是薄全息图的情况, 即记录材料中仅有 1 层相位光栅的情况。而在体积全息中, 又只讨论了相位光栅层数远大于 1 的情况。判断是否属于体积光栅的判断是 $Q > 10$, 其中, Q 的表达式为^[4]

$$Q = 2\pi \lambda_0 d / (n_0 \lambda^2) \quad (14)$$

式中, λ_0 为记录时的光波波长, 在大多数情况下, 反射体积全息均能满足上述条件。而透射全息在许多情况下, 却既不是薄全息图, 又算不上厚全息图。那么, 这时的衍射效率应如何计算呢? 一般教科书都对此避而不谈, 原来, 耦合波方程只在薄和厚的两种情况下才有解析解, 其它情况下只能数值求解^[5]。数值解的情况表明, 由薄全息图向厚全息图的转变过程中, 随着相位光栅的层数的增加, 高阶衍射光束的衍射效率逐渐减少, 而一级衍射光束的衍射效率逐渐增加, 当光栅层数达到某一值时, 除一级衍射光外, 其余均为零。±1 级衍射光中, 只有其中之一可以达到最大, 这要看它们之中谁能满足当时的布喇格入射条件。

理论上已经证明, 在理想情况下, 体积相位光栅的衍射效率可达 100%^[6]。所以, 当考虑

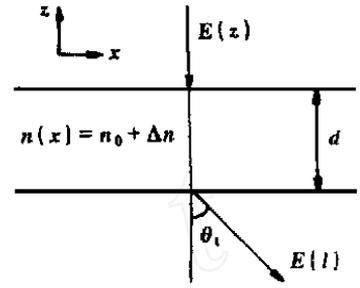


Fig. 1 Sketch of the diffraction of refractive index phase modulation grating

到体积光栅效应时,普通透射全息相位光栅的衍射效率,应当可以超过 33.9%,但真实情况也并非如此简单,这要看影响衍射效率的关键因子,即调制度的大小,对于散射物体的全息图,情况还更加复杂,我们在下面讨论。

3 散射物体的折射率相位全息图的衍射

我们知道,由散射物体到达银盐干版的物光,其光场 $O(x, y)$ 实际是一个散斑场,是散射物体上各散射中心的衍射光相干所致,它与参考光的光场 $R(x, y)$ 相干涉形成了无数多的小的全息照片(曾拍摄过它的 5000 \times 放大电镜照片^[7]),每一个斑纹形成一张小全息片,我们把它称为基元全息片。再现时每一张基元全息片再现出它对应的物体图像(就是从该小全息片位置处看到的物体形像),干版上的所有基元全息片的全体再现像构成了物体的全方位再现像。

散射物体全息图片的衍射效率是所有基元全息片的总贡献,所以,我们希望所有的基元全息图对衍射效率都有较大的贡献,而不是只有少数基元全息图对衍射效率有贡献,这样,全息图的总衍射效率依然是很低的。

但遗憾的是,在拍摄散射物体全息图时,物光是散斑场,其光强的统计分布是非常不均匀的,出现暗斑的地方最多,而出现亮斑的地方极少。所以当用物光的平均光强去决定拍摄参数时,就会造成暗斑曝光不足,而亮斑曝光过度,这将使整张全息片的衍射效率降低,这就是为什么散射物体全息照片的衍射效率,总是比全息光栅的衍射效率低得多的原因。

拍摄时增加参考光和物光之比,会使散斑光强不均匀分布的后果减弱。增加到多少恰当,要看散射物体本身的散射颗粒的大小,以及拍摄全息的种类有关,最好由实验去决定。

在参物比、曝光量和显影时间都恰当的情况下,所拍摄的全息照片,在显微镜下,观察到整张全息片就是由无数犬牙交错的散斑所组成,每一个散斑上的干涉条纹清楚可见。测量这时的衍射效率也较高,表明这时的拍摄参数是正确的。若只有少数散斑和它的干涉条纹清楚,则衍射效率低,表明拍摄参数选择不合理,应进一步增加参物比(曝光量也应相应增大)。

4 化学处理在提高折射率相位全息图衍射效率中的关键作用

全息图的再现像主要是一级衍射,其衍射效率主要取决于 d 和 n , d 是记录材料的厚度,是由生产厂家决定的。在银盐干版的情况下, n 与未漂白前干版的调制黑度 D 有关,而 D 则与干版的反衬度,平均曝光量 ϕ_0 和干涉条纹衬比度 M 有关^[8], n 与 D 的关系较为复杂,不仅与干版的型号、漂白剂的配方、漂白时间和温度有关。而且反衬度 γ 又与干版的型号、显影液的配方、显影时间和温度有关,总的说来, n 不仅依赖于拍摄参数的选择,而且也依赖于化学处理的过程。

应当注意到的是,拍摄参数的选择受到许多的限制,如前面提到的散射物体,以及噪声的限制,一张好的全息照片不但要有高的衍射效率,而且还要有高的信噪比。所以,只从拍摄参数的选择上来挖掘提高衍射效率的办法,其效果是有限的。大量实验表明,化学处理在提高折射率相位全息图衍射效率上起着关键性的作用,此外,吸收率^[2]主要也取决于化学处理过程。

国外在这方面作过大量很有成效的工作,针对不同类别的全息,采用不同的记录材料、化学处理配方和相应处理过程,例如,使用连续激光器拍摄位相型离轴透射全息图,所采用的化学处理过程如下:(1)采用高分辨率的记录材料;(2)使用高反差显影剂(如 Adurol 显影剂),并

获取大范围均匀散射狭缝光场的新方法

金清理

(温州师范学院物理系,温州,325003)

摘要: 提出采用简单器件,将高斯分布光场经再扩展,获得大范围均匀的理想光场的方法;设计了对高斯分布光场再扩展光路,并提高散射光场光能的利用率,取得良好的实验效果。

关键词: 散射狭缝光场 再扩展 大范围 均匀性

A new method of obtaining large-range homogeneity of a large scattering slit field

Jin Qingli

(Department of Physics, Wenzhou Normal College, Wenzhou, 325003)

Abstract: A improved method using simple instrument to expand Gaussian distribution light field and get large-range homogeneous ideal light field was presented. An optical setup used to expand Gaussian distribution light field was designed to improve the utilization ratio of light energy and satisfactory experimental results ware obtained.

Key words: scattering slit light field re-expanding large-range homogeneity

达到约等于 2 的光密度;(3)采用反转漂白剂以获得高信噪比,采用 Ferric-EDTA 或 PBU 型再用卤化漂白剂以获得高衍射效率;(4)仔细清洗并缓慢风干;(5)用记录波长再现全息图。详细介绍请参看有关文献[9]。国内在这方面也作过不少工作,但多属跟踪性质的工作^[10~12],带机理性和原理探索性的工作,还需进一步地去做。

参 考 文 献

- 1 弗郎松 M. 光学(像的形成和处理). 北京:科学出版社,1979:54~55
- 2 李荫远. 非线性光学. 北京:科学出版社,1974:131
- 3 杨齐民,张文碧,钟丽云 *et al.* 光子学报,1996;25(11):997~1002
- 4 于美文. 光学全息及信息处理. 北京:国防工业出版社,1984:98
- 5 董孝义. 光波电子学. 天津:南开大学出版社,1987:398~400
- 6 于美文. 全息显示技术. 北京:科学出版社,1989:76~82
- 7 杨齐民,张文碧,钟丽云 *et al.* 光电子·激光,1996;7(2):89
- 8 杨齐民,张文碧,钟丽云 *et al.* 光子学报,1995;24(5):464~467
- 9 熊秉衡,王正荣,张永安 *et al.* 光学技术,1996;(4):7~11
- 10 吕晓旭,施英,熊秉衡 *et al.* 光子学报,1998;27(1):50~55
- 11 熊秉衡,张永安,王正荣 *et al.* 光子学报,1997;26(17):950~955
- 12 官爱玲,张文碧,钟丽云 *et al.* 激光杂志,1997;18(6):36

作者简介:钟丽云,女,1968 年出生。教授。主要从事激光全息和光电检查方面的研究工作。