

矩形带通反射全息的研究

吴建宏 陈林森

(苏州大学激光研究室, 苏州 215006)

摘 要 矩形带通反射全息在一定带宽内(约 10~20 nm)具有极高的衍射效率, 在反射全息的应用中具有特殊的意义。本文给出了这一反射全息的制作工艺过程和实验结果。实测结果表明对于两类矩形带通反射全息, 衍射效率分别达 99% 和 95% 以上, 峰值带宽大于 10 nm。

关键词 反射全息, 重铬酸明胶, 全息滤光片, 矩形带通,

引 言

反射全息元件的主要特点是单色性、高衍射效率及灵活性。其主要用途有两类: 耦合器件和滤光器件。前者如全息平显系统(HUP)和全息夜视仪^[1]; 后者如全息激光防护镜^[2]、滤光片^[3, 4]和法布里-珀罗标准具^[5]等。在诸多的应用中矩形带通反射全息具有重要意义。与干涉滤光片类似, 光经窄带滤光片滤波后有相当一部分能量在半宽度以外, 而矩形带通滤光片能将大部分能量集中在半宽度以内。并且矩形带通反射全息还具有极高的衍射效率。它除应用于激光防护外, 还可开发成其它新型光学元件。例如它可作为带阻滤波器应用于单色仪或分光光度计的杂散光测量中, 两片复合的反射全息可使峰值滤波达 10^{-8} , 这是其它光学方法很难实现的。又如在植物和生物学中有重要应用的强光多色仪中将此类全息元件替代传统的滤光片, 将能有效地提高光能利用率, 并利用其良好的调谐性使仪器简化。

本文从耦合波理论和介质膜理论出发从理论上分析实现矩形带通反射全息的实验方法及特性参量; 在实验上对这一反射全息进行了工艺探索, 得到了条纹面分别平行和倾斜于介质表面的两类矩形带通反射全息。

2 理论基础

线性记录的纯位相反射全息可采用 Kogelnik 的双波耦合理论处理^[6]。但由于记录介质的非线性性, 折射率调制是非正弦型的。为了比较这一非线性的影响, 考虑一个极端的情况——折射率调制完全“饱和”, 即折射率调制为矩形函数。在折射率分布的每一周期中, 半个周期的折射率为 $n_0 + n_1$, 另半个周期的折射率为 $n_0 - n_1$, 其中 n_0 为介质平均折射率, n_1 为折射率调制度。对这一折射率分布可以采用周期性介质膜理论^[7]。现从理论上分析线性与非线性记录的反射全息的特性。

图 1 是利用耦合波理论与介质膜理论得到的 $\eta \sim \lambda$ 曲线 (η 为反射全息的衍射效率, λ 为入射波长)。图中取折射率调制度 $n_1 = 0.02$, 介质折射率 $n_0 = 1.52$, 胶层厚度 $T = 20 \mu\text{m}$, 布拉格波长 $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ 。由图 1 看出, 对于具有同样折射率调制能力的记录介质, 处于“饱和”状态的反射全息具有较高的衍射效率和较大的带宽。进一步的计算表明, 随着 n_1 的增大, 这两种情况的带宽和衍射效率都将增大, 并且均存在衍射效率接近 100% 的带宽。为讨论衍射效率曲线与记录介质特性的关系, 定义曲线的峰值带宽 $\Delta\lambda_p$ 为衍射效率下降 1% 时的入射波长间隔。显然 $\Delta\lambda_p$ 的大小在较大程度上反映了 $\eta \sim \lambda$ 曲线的矩形性。图 2 是以记录介质厚度 T 为参量的 $\Delta\lambda_p \sim n_1$ 曲线。图中的曲线有两组, 它们分别由耦合波理论和介质膜理论得出。由图 2 可以看出: $\Delta\lambda_p$ 随 n_1 的增大而增大; 当记录介质厚度 T 达到一定值后, T 对 $\Delta\lambda_p$ 的影响已不大; 对相同的 n_1 , “饱和”状态的反射全息有较宽的带宽。

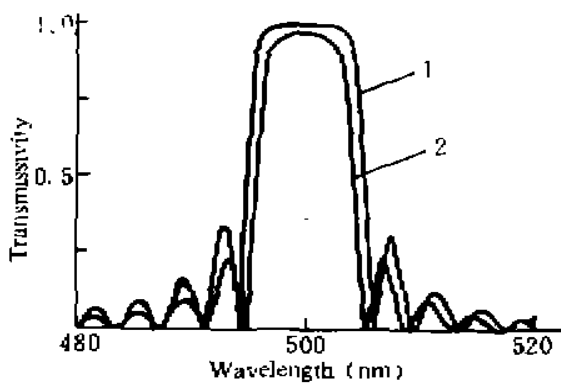


Fig. 1 $\eta \sim \lambda$ curves; No. 1 is obtained by the theory of dielectric films and No. 2 by the coupled wave theory when $T = 20 \mu\text{m}$ and $n_1 = 0.02$

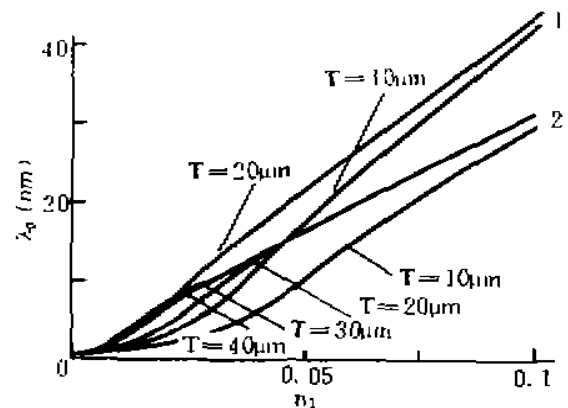


Fig. 2 $\Delta\lambda_p \sim n_1$ curves; No. 1 is obtained by the theory of dielectric films and No. 2 by the coupled wave theory

制作反射全息的较理想的记录材料是重铬酸明胶(DCG)。它的非线性记录结果应处于耦合波理论和介质膜理论的结果之间。以上的理论分析对重铬酸明胶的实验有指导意义:

1) 重铬酸明胶必须具有足够的折射率调制度 n_1 。如欲使 $\Delta\lambda_p$ 达到 10 nm~20 nm 之间, n_1 应大于 0.03, 而一般情况下重铬酸明胶的折射率调制度为 0.02, 因而重铬酸明胶必须充分膨润并有合适的预硬化。

2) 重铬酸明胶的厚度需适中。厚度过大并不能显著提高 $\Delta\lambda_p$ 和 η , 反而会带来涂布和处理困难。

3) 对重铬酸明胶进行非线性处理。因重铬酸明胶的折射率调制度是有限的, 对记录介质的非线性处理将能提高 $\Delta\lambda_p$ 和 η 。

3 实 验

矩形带通反射全息的性能主要由峰值波长、峰值带宽、峰值衍射效率、半宽度、衍射方向等来表示。其中峰值波长和衍射方向主要由记录光路确定^[2]。其余各参量由工艺决定。它的要点如下:

1) 重铬酸明胶的预硬化。这是控制 n_1 的关键工艺。控制重铬酸明胶材料的预硬化虽然已有许多方法, 但本文采用了更有效且简便的方法, 即控制明胶涂布冷凝后至水份蒸发明胶干燥这段时间内的温度。当温度较高时, 明胶较“软”, 反之则较“硬”。此外重铬酸明胶干板在室温下的存放时间和存放温度也影响预硬化, 这一措施可以对预硬化进行辅助性调节。

2) 曝光量。增加曝光量是使重铬酸明胶呈非线性的有效手段。因曝光量的成倍增加不可能导致折射率调制度的成倍提高，在本文的实验中 对 488 nm 的曝光量达 120~150 mJ/cm²，是通常曝光量的 2~3 倍。

3) 重铬酸明胶的后处理。后处理与预硬化有密切的关系。温度控制和定影液坚膜是控制衍射效率的有效手段。一般情况下，较“软”的明胶应进行低温(10℃~20℃)冲洗和定影液坚膜，较“硬”的明胶应进行高温处理(25℃~35℃)。但后处理并不能完全补偿预硬化。

矩形带通反射全息透过率实验曲线如图 3 至图 5 所示。

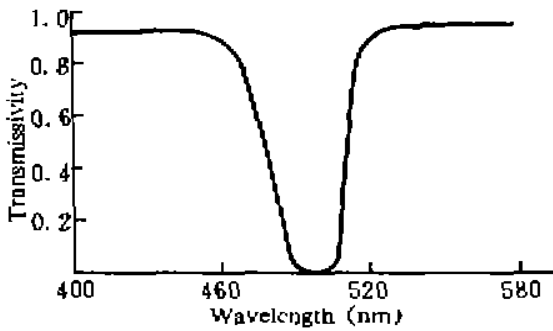


Fig. 3 Transmission of reflection hologram when $\phi = 0$ and $\theta_1 = 0$

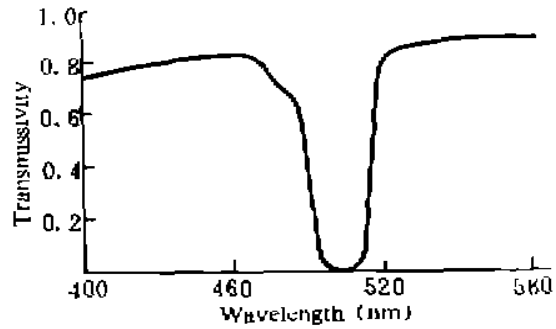


Fig. 4 Transmission of reflection hologram when $\phi = 6.6^\circ$ and $\theta_1 = 0$

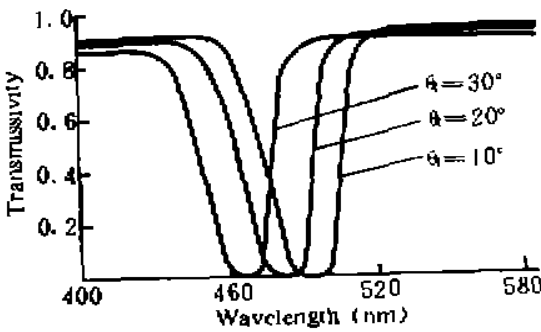


Fig. 5 Variation of transmission with angles of incidence θ_1 when $\phi = 0$

本实验中重铬酸明胶胶层厚度为 30 μm 。透过率曲线的测定在 Lambda 17 UV/VIS 分光光度计上进行。由于透过率与衍射效率有互补性，透过率曲线反映了衍射效率随入射光波长的变化。以下定义 ϕ 为条纹面与介质表面的夹角， θ_1 为入射光与条纹面法线的夹角。图 3 是 $\phi = 0, \theta_1 = 0$ 时的反射全息的透过率曲线。经测定，峰值带宽 12.2 nm，峰值波长 496 nm，峰值透过率 0.1%，半宽度 35.5 nm，扣除玻璃的反射和吸收得到的

衍射效率为 99.4%。图 4 是 $\phi = 6.6^\circ, \theta_1 = 0$ 时的透过率曲线。经测定，在峰值波长 499 nm 处的透过率为 0.1%，峰值带宽为 14.9 nm，半宽度为 26.6 nm，用 488 nm 激光测定衍射效率为 95.7%。图 5 是 $\phi = 0$ 时在不同入射条件下的透过率。

由以上实验结果可以得到以下几点结论：

1) 实验上得到了具有一定峰值带宽的反射全息，峰值带宽大于 10 nm。这类反射全息有较好的矩形性，特别是 $\phi \neq 0$ 时矩形性更好。

2) 反射全息具有较高的衍射效率，或在峰值波长处有较低的透过率。当它作为带通元件时虽然 $\phi = 0$ 时具有更高的衍射效率，但在反射光中包含了元件的镜面反射光。当作为带阻元件时， $\phi = 0$ 和 $\phi \neq 0$ 的结果相似。所以 $\phi \neq 0$ 的反射全息更有实际意义。

3) 此类反射全息具有良好的调谐性。当入射角发生变化时透过率曲线的形状及峰值透过率几乎不变。

4) 实验曲线中未出现图 1 理论曲线中的次极大。有关这一问题虽然有些解释^[1, 3]，但还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Jose R. Magarios, Daniel J. Coleman, Holographic mirrose. *Opt. Engng.*, 1985, 24(5): 769~780
- [2] 吴建宏, 陈林森, 一种用双斜复合反射全息扩大全息激光防护镜防护角的方法. *中国激光*, 1994, 21(3): 225~227
- [3] 刘大禾, 黄婉云, 唐伟国, 反射式窄带全息滤光片. *光学学报*, 1990, 10(2): 145~154
- [4] S. S. Duncan, J. A. Mcqaoid, D. J. Mclartney, Holographic filters in dichromated gelatin position tunedover the near-infrared region. *Opt. Engng.*, 1985, 24(5): 781~785
- [5] Weijan Wang, Reflection and transmission properties of holographic mirrors and holographic Fbary-Perot filters I; Holographic mirrors with partially coherent light. *Appl. Opt.*, 1994, 33(13): 2567~2573
- [6] H. Kogelink, Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, 48: 2909~2947
- [7] M. 玻恩, E. 沃耳夫著, 杨霞荪译, *光学原理*, 北京, 科学出版社, 1978: 96~101

Rectangular Band-Pass Reflection Hologram

Wu Jianhong Chen Linsen

(Laser Research section, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 5 November 1994; revised 19 June 1995)

Abstract The rectangular band-pass reflection hologram (RBRH) which has high diffraction efficiency in a wide bandwidth $\Delta\lambda_p$ (about 10 nm to 20 nm), has some particular significances in the applications of reflection hologram. In this paper the manufacturing technique and experimental results for RBRH are described. The efficiencies are greater than 99% and 95% respectively and the bandwidths $\Delta\lambda_p$ are more than 10 nm for two types of RBRH.

Key words reflection hologram, dichromated gelatin, holographic filter, rectangular band-pass.