

非均匀反射体全息窄带带阻滤光片

吴建宏¹⁾ 唐敏学¹⁾ 何庆声²⁾ 徐 颖¹⁾

1), 苏州大学信息光学工程研究所, 苏州 215006
2), 清华大学精仪系, 北京 100084

摘 要 在实验基础上, 利用非均匀耦合波理论得出了介质折射率调制度和空频变化的非均匀模型, 利用此模型分析了窄带宽和高光学密度滤光片所应具有的非均匀分布特性, 指出了实验工艺上应努力的方向, 实验上用重铬酸明胶(DCG)实现了性能优良的高光学密度窄带宽的全息带阻滤光片, 峰值波长光学密度为 4~ 5, 半宽度小于 20 nm。

关键词 体全息, 窄带带阻滤光片, 重铬酸明胶, 耦合波理论。

1 引 言

全息带阻滤光片具有带宽窄、光密度高等特点。它在光谱学研究, 特别是拉曼光谱的研究中有重要的应用。近年来全息滤光片的研究与应用常有报道, 在理论和实验上均有一定进展^[1~5]。Kubota^[1]对均匀介质耦合波理论与实验结果不符进行了较成功的解释, 他认为在介质内部折射率调制度和条纹密度的分布是不均匀的, 并利用非均匀介质的耦合波方程推导出了有关衍射效率的黎卡提(Recatti)方程, 在假定非均匀模型的基础上, 对方程进行数值解得到了与实验结果基本相符的衍射效率理论结果。Boj^[2]利用 Kubota 的方法建立了他们自己的模型, 分析了他们的宽带反射全息的实验结果, 利用电子显微镜拍摄的照片证实了记录介质内部的非均匀性。Liu 等^[3]也建立了一种特殊非均匀模型。由于重铬酸明胶(DCG)处理工艺的复杂性, 不同实验室得出的实验结果各有不同, 非均匀模型也各不相同。但目前尚无全息窄带带阻滤光片的理论研究报道。

全息窄带带阻滤光片的理论与实验分析与上面提及情况有所不同。仅研究带通性质时, 衍射效率 99% ± 1% 的测量很常见, 而且 1% 的误差在理论分析时也常常显得微不足道。但是在带阻滤光片的情况下, 99% 和 99.99% 的衍射效率对应的光学密度分别是 2D 和 4D, 性能差异极大。所以, 综合考虑带阻滤光片的窄带宽和高光学密度是非常有意义的。另一方面, 全息窄带带阻滤光片在实验上也较难实现, 美国 Kaiser 公司曾报道过^[4], 但该文无理论分析和实验制作说明。本文用类似于 Kubota 的方法建立了现有实验工艺条件下的非均匀分布模型, 利用此模型综合分析窄带宽和高光学密度滤光片所应具有的非均匀分布特性, 指出了实验工艺上的努力方向, 在实验上用重铬酸明胶材料实现了性能优良的高光学密度窄带宽全息

带阻滤光片。

2 实验和测试

全息滤光片的记录光路如图 1 所示。BS 为分束镜, M_1 和 M_2 是反射镜, SF_1 和 SF_2 是空间滤波器, L_1 和 L_2 为准直透镜, DCG 为重铬酸明胶记录干板。记录激光是氩离子激光器的 488 nm 激光, 干涉条纹平行于介质表面。

有关反射全息的重铬酸明胶的制备和处理已有不少文献论述。本文按文献[5]的方法, 以低温涂布、大曝光量、高温处理的原则进行重铬酸明胶的制备和处理, 胶层厚度为 20 μm 至 40 μm 。

反射全息的测量光路如图 2 所示, 整个光路置于一旋转光具座上。白光点光源经透镜 L_1 准直后入射至测试元件(HOE), 测试元件放置在旋转光具座的转轴上, 衍射光经 L_2 会聚至有两个窗口的积分球 IS, 积分球的另一个窗口接单色仪和光电倍增管, 计算机控制单色仪扫描和通过 A/D 板接收光电倍增管信号。测量时, 先将测试元件移去, 使光具座的两臂成一条直线, 测试光源的光谱信号, 然后再按图 2 测量衍射信号。计算机将衍射信号与光源信号比较后得到衍射效率随波长的变化曲线。此光路中采用积分球是为了减少两次信号测量中由于光路不同而带来的误差。

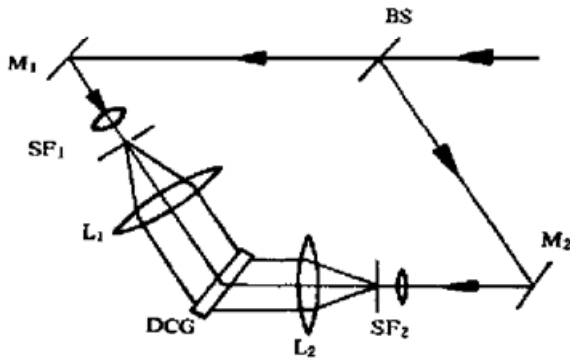


Fig. 1 Optical system for recording holograms

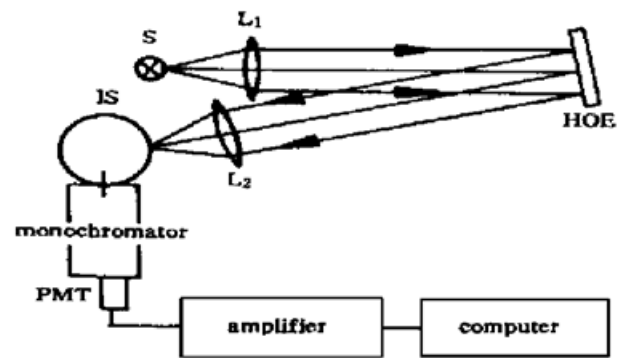


Fig. 2 Measurement system for diffraction efficiency of reflection holograms

3 理论分析

设 T 为介质厚度, z 轴与介质法向平行, 在明胶与玻璃的界面处取 $z = 0$, 在明胶与空气的界面处取 $z = T$ 。由文献[1]、文献[2]和本文的实验结果可得到: 折射率调制度 $n_1(z)$ 随 z 单调增加; 空频的相对变化量 $G(z) = [f(z) - f_0]/f_0$ 随 z 单调减小, 其中 f_0 为平均空间频率, $f(z)$ 为 z 处的空频。文献[1]和[2]得出 $n_1(z)$ 的二阶导数小于零。而本文的理论分析与实验分析结果却是 $n_1(z)$ 的二阶导数大于零。根据以上要点可得下列非均匀模型:

$$n_1(z) = n_1 \left[(1 - p) \left(\frac{z}{T} \right)^r + p \right], \quad (1)$$

$$G(z) = G_0 - \Delta G \left(\frac{z}{T} \right)^s, \quad (2)$$

其中 n_1 为 $z = T$ 面的折射率调制度, p 为 $z = 0$ 面的折射率调制度与 n_1 之比; G_0 为 $z = 0$ 面上的空频相对于平均空频的变化, ΔG 为空频相对平均空频的最大变化量; r 和 s 分别表示

$n_1(z)$ 和 $G(z)$ 随 z 变化的幂次, 反映了介质的非均匀特性, 它们与胶层的厚度和处理工艺有关。图 3(a)、图 3(b) 和图 3(c) 分别给出了 $T = 20 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 的衍射效率实验曲线和相应的理论曲线, 图中的实线是实验曲线, 虚线是理论曲线。由于玻璃和明胶的反射、吸收、散射对衍射效率有影响, 所以理论计算时应按实验曲线对理论衍射效率按比例修正。(1) 式和(2) 式的参数分别取为: 图 3(a), $n_1 = 0.043$, $p = 0.15$, $G_0 = 0.008$, $\Delta G = 0.01$, $r = 2$, $s = 1$; 图 3(b), $n_1 = 0.043$, $p = 0.05$, $G_0 = 0.008$, $\Delta G = 0.01$, $r = 3$, $s = 1$; 图 3(c), $n_1 = 0.045$, $p = 0.05$, $G_0 = 0.008$, $\Delta G = 0.01$, $r = 3$, $s = 1$ 。

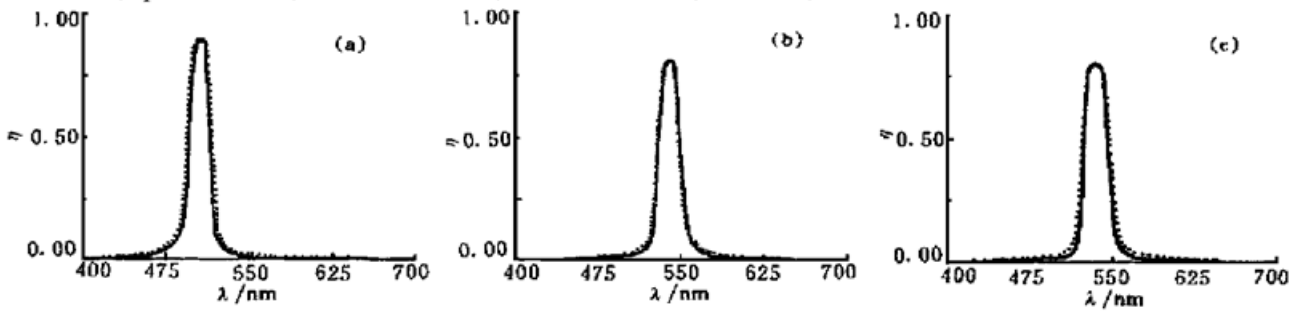


Fig. 3 Diffraction efficiency curves of DCG reflection holograms, real lines are experimental curves, and dashed lines are theoretic curves

从以上曲线看出理论曲线基本无次峰, 与实验曲线吻合较好; 并且从所选的参数看, 折射率调制度在介质内的衰减较快, 而且介质越厚, 衰减越快, 即 T 越大, r 也越大, 介质中对衍射效率贡献较大的仅在介质表面。在窄带反射全息的情况下曲线基本对称, 条纹密度的变化很小。

窄带带阻滤光片的主要特性是低峰值透过率和窄带宽, 在理论计算时用互补性原理可从衍射效率得出峰值透过率。以下从理论上分析带宽、衍射效率与介质非均匀性的关系。在以下计算中取以上实验曲线的典型值: $G_0 = 0$ 、 $\Delta G = 0$ 和 $p = 0.1$ 。

1) 衍射效率曲线的波瓣。图 4 给出了 $p = 1, 0.5$ 和 0.1 的衍射效率曲线, 从图看出 p 减小时波瓣减小, $p = 0.1$ 时波瓣基本消失, 而 $p = 0.1$ 也与实验曲线基本吻合, 所以以下理论计算中以 $p = 0.1$ 为典型值。在其他 r 值下, 也有类似结果。

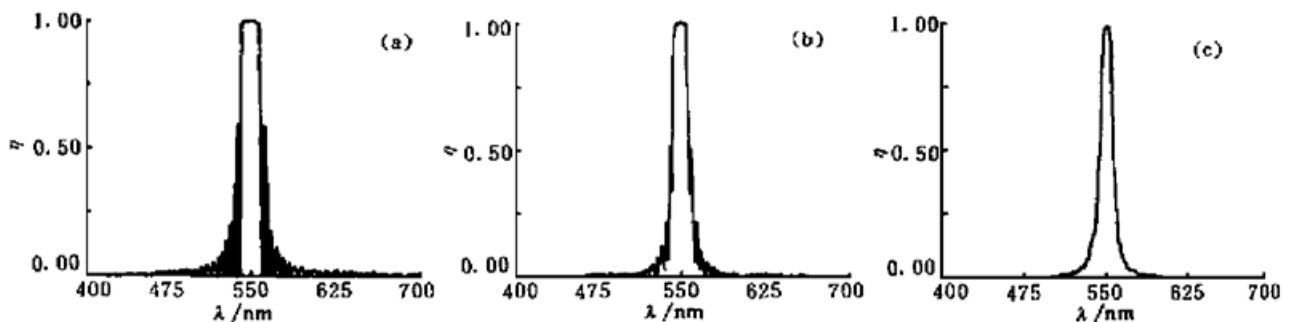


Fig. 4 The theoretic curves of nonuniform coupled-wave theory at different p , (a) $p = 1$, (b) $p = 0.5$, (c) $p = 0.1$, and the other conditions are $n_1 = 0.03$, $T = 20 \mu\text{m}$, $r = 1$, $G_0 = 0$ and $\Delta G = 0$

2) 峰值衍射效率。峰值衍射效率 η 与胶厚度 T 和最大折射率调制度 n_1 的关系如图 5(a) 和图 5(b) 所示。显然, η 与 T 和 n_1 的关系是单调递增关系, 并且在其他条件相同的情况下, r 越大, η 越小。

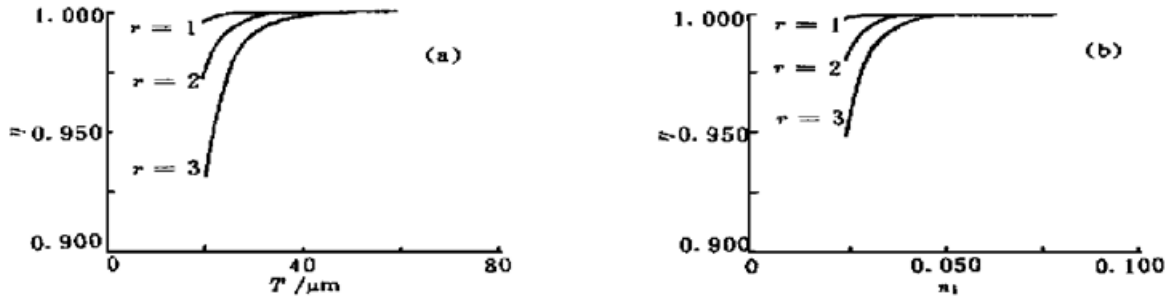


Fig. 5 The relationships between η and T , and between η and n_1 , at different r values

3) 衍射效率曲线的半宽度。半宽度 $\Delta\lambda_h$ 与胶层厚度 T 和最大折射率调制度 n_1 的关系如图 6(a) 和图 6(b) 所示。图 6(a) 中显示了 $\Delta\lambda_h$ 随 T 的变化关系，虽然这一关系不是严格的单调关系，但在单调区间内的半宽度变化不大，总体上可以看成是单调递增。特别应指出的是这里非均匀介质和均匀介质有很大不同， $r = 0$ 时 $\Delta\lambda_h$ 随 T 单调递减，而 $r > 0$ 时 $\Delta\lambda_h$ 随 T 递增。图 6(b) 显示 $\Delta\lambda_h$ 随 n_1 单调递增，并随 r 的增大而减小。

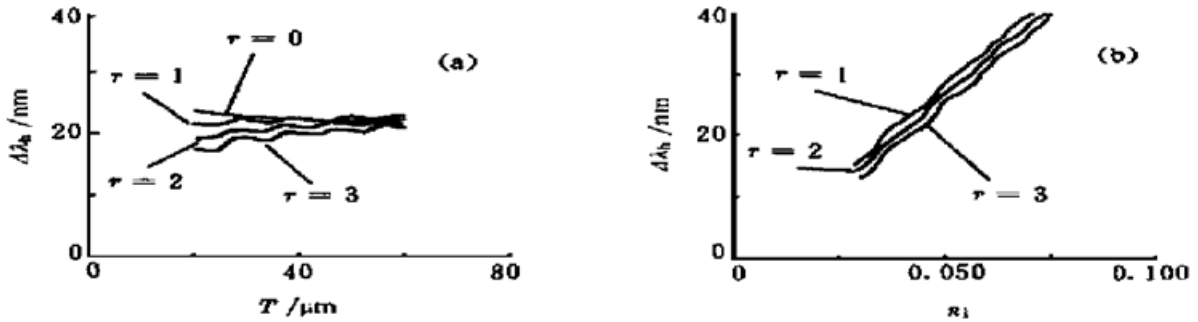


Fig. 6 The relationships between $\Delta\lambda_h$ and T , and between $\Delta\lambda_h$ and n_1 , at different r values

4) 衍射效率与带宽。有意义的理论分析是比较同一峰值衍射效率下的半宽度或同一半宽度下的峰值衍射效率。图 7(a)、图 7(b) 和图 7(c) 分别给出了 $r = 1, 2, 3$ 情况下的等 η 线 ($\eta = 0.9999$) 和等 $\Delta\lambda_h$ 线 ($\Delta\lambda_h = 20 \text{ nm}$)。显然由(2) 式和(3) 式分析得到的单调性可知， n_1 和 T 在等 η 线上方取值时，衍射效率均大于 0.9999，在等 $\Delta\lambda_h$ 线下方取值时，半宽度均小于 20 nm，在此两条线之间取值将能同时满足峰值透过率小于 10^{-4} 和半宽度小于 20 nm。比较图 7(a)、图 7(b) 和图 7(c) 三组曲线看出， r 越小，两条线交点所对应的 T 也越小，两条线包围的面积越大。

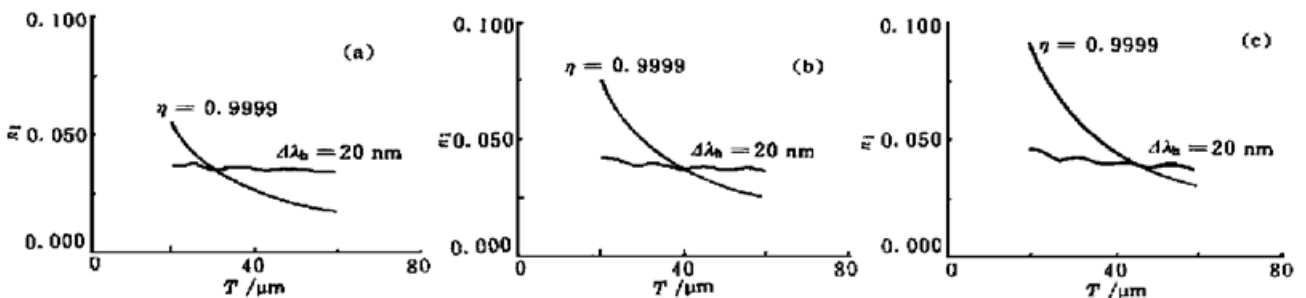


Fig. 7 The curves of iso- η and iso- $\Delta\lambda_h$ at (a) $r = 1$, (b) $r = 2$, (c) $r = 3$

由以上实验曲线和理论模型可知，胶层厚度的增加并不一定能提高滤光片性能，而且增加胶层厚度会给涂布和处理带来困难。如果工艺上能使胶层的 r 值较小，那么就能在较小的厚度下获得高效率窄带宽的滤光片。

4 实验结果

表 1 是本实验制作的带阻滤光片的测试结果。由表中可见, 除 3# 片外它们对氩离子激光的几条谱线的光学密度都在 4 左右或以上、半宽度在 20 nm 以下。3# 片的半宽度略大于 20 nm, 但光密度在 5 以上。这些性能在光谱学的研究中是非常有意义的。

Table 1. The measure results of notch filters

wavelength /nm	514.5		488.0		476.5		457.9	
sample No.	$\Delta\lambda_h$ /nm	OD	$\Delta\lambda_h$ /nm	OD	$\Delta\lambda_h$ /nm	OD	$\Delta\lambda_h$ /nm	OD
1#			18	4.0	17	4.2	16	4.7
2#	19	3.8	16	4.0	15	4.1	14	4.8
3#	22	5.3	22	5.3	20	5.5	20	5.4

参 考 文 献

- [1] Kubota T. Control of the reconstruction wavelength of Lippmann holograms recorded in dichromated gelatin. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(10) : 1845~ 1894
- [2] Boj P G, Crespo J, Quintana J A. Broadband reflection holograms in dichromated gelatin. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(17) : 3302~ 3305
- [3] Liu Daho, Zhou Jing. Nonlinear analysis for reflection hologram. *Opt. Commun.*, 1994, **107**(5, 6) : 471~ 479
- [4] Schoen C L, Sharma S K, Helsley C E *et al.*. Performance of a holographic supernotch filter. *Appl. Spectroscopy*, 1993, **47**(3) : 305~ 308
- [5] Wu Jianhong, Chen Linsen, Tang Minxue *et al.*. Effect of processing procedures of reflection holograms in dichromated gelatin on their broadband characteristics. *Proc. SPIE*, 1996, **2866** : 186~ 190

Nonuniform Reflection Volume Holographic Notch Filter

Wu Jianhong¹⁾ Tang Minxue¹⁾ He Qingsheng²⁾ Xu Ying¹⁾

1), *Institute of Information Optical Engineering, Suzhou University, Suzhou 215006*
 2), *Precision Instrument Department, Tsinghua University, Beijing 100084*

(Received 24 February 1999; revised 4 May 1999)

Abstract On the basis of experiments, the nonuniform models of modulation of refraction index and variation of spatial frequency are obtained by using nonuniform coupled-wave theory. The nonuniform distribution characteristics of the filters having high diffraction efficiency and narrow bandwidth are analyzed on the nonuniform model, and a method for improving properties of notch filter is proposed. The holographic notch filters with high optical density and narrow bandwidth are fabricated using dichromated gelatin (DCG). The characteristics of these filters are that the optical density of peak wavelength is between 4 and 5, and the half-bandwidth is smaller than 20 nm.

Key words volume holography, notch filter, dichromated gelatin, coupled-wave theory.