

# 反射式窄带全息滤光片

刘大禾 黄婉云 唐伟国  
(北京师范大学物理系)

## 提 要

根据耦合波理论, 体积全息图有很好的滤光特性, 可以作为一种窄带滤光片在实际中得到应用。本文针对峰值波长、带宽和衍射效率这三个主要参数讨论了全息滤光片的性质, 提出了全息滤光片的设计步骤, 并指出了全息滤光片的特点及应用前景。

关键词: 全息光学元件; 滤光片。

## 一、引 言

全息的基本设想是 D. Gabor 于 1948 年提出的<sup>[1]</sup>。60 年代初期, 随着激光的出现, 使全息得到了飞速的发展。在有关全息的实验、基本理论等方面都进行了大量的研究工作<sup>[2,3]</sup>, 并得到了很好的结果。全息的应用也越来越受到人们的重视。其中全息光学元件(HOE)由于其重量轻, 价格便宜, 性能好, 而显出极强的生命力<sup>[4]</sup>, 并在很多方面得到了实际应用。

全息滤光片作为一种全息光学元件虽然尚未进入实用阶段, 但已显示出它的很多独特的优点。本文作者在前一段工作的基础上<sup>[5]</sup>, 对全息滤光片进行了进一步研究, 对全息滤光片的性质进行了分析, 并与干涉滤光片作了比较, 同时, 针对全息滤光片的特点讨论了它的应用前景。

## 二、理论基础、制作和测试装置

### 1. 理论基础

耦合波理论指出<sup>[4]</sup>, 相位型体积全息图, 特别是反射全息图, 具有很好的波长选择性和很高的衍射效率<sup>[6]</sup>。当一束平行的白光入射到基元体全息图(体全息光栅)时, 出射光是一束带宽很窄的光。因此, 完全可以用相位型反射全息图制成一种窄带滤光片。

理论分析给出, 全息滤光片的峰值衍射效率  $\eta_0$  和带宽  $\Delta\lambda$  分别为<sup>[7]</sup>

$$\eta_0 = \text{th}^2(\nu) \quad (1)$$

$$\nu = \frac{\pi n_1 T e^{-\alpha T}}{2n_0 d \sin^2 \theta} \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \frac{4n_0 d^2 \sin \theta}{\pi T} \xi = \frac{\lambda d}{\pi T} \xi \quad (3)$$

$$\xi = c\delta \cos \theta \quad (4)$$

其中  $n_0$  为全息图介质的平均折射率,  $n_1$  为折射率调制,  $T$  为介质厚度,  $\alpha$  为记录介质的吸收系数,  $d$  为光栅常数,  $c$  为与介质和入射波有关的常数,  $\theta$  为 Bragg 角,  $\delta$  为对 Bragg 角的偏离。本文中我们用半值宽度定义带宽  $\Delta\lambda$ 。(1)~(4)式就是讨论全息滤光片性质的基础。

### 2. 制作

用重铬酸盐明胶为记录介质制作的体积全息图具有衍射效率高, 噪声低, 分辨率高等特点, 故实验中采用重铬酸盐明胶介质来制作全息滤光片。制作光路如图 1 所示。采用这种对称型的光路主要是为使物光与参考光的光强比(参物比)为 1:1, 从而获得较大的折射率调制以得到高衍射效率。当干涉条纹与介质表面不平行时, 参物比为 1:1 还可以使全息图内的光栅周期比较均匀, 这将有利于获得较窄的带宽<sup>[8]</sup>。

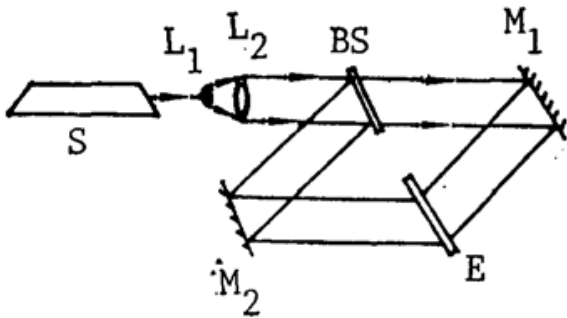


Fig. 1 Symmetric set-up geometry of constructing holographic filters  
 S—Ar<sup>+</sup> laser, L<sub>1</sub>—expanding lens, L<sub>2</sub>—collimating lens, M—mirror, E—recording medium

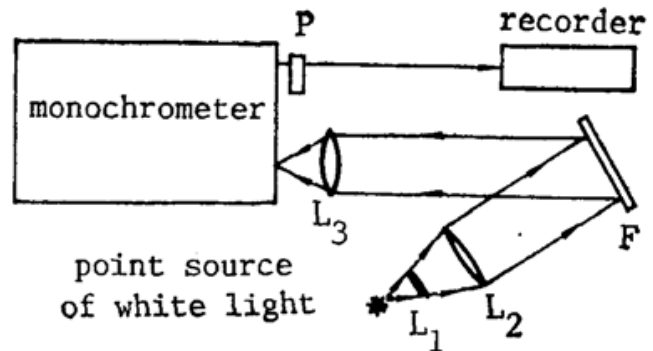


Fig. 2 Measuring set-up of holographic filters

L<sub>1</sub>—expanding lens, L<sub>2</sub>—collimating lens, L<sub>3</sub>—focusing lens, P—photomultiplier tube, F—filter

### 3. 测试装置

全息滤光片性能的测试采用图 2 的光路。这个光路有较大的灵活性, 可以测量全息滤光片的多种性质和参数。但对于参数值的计算, 要注意归一化的问题。由于研究的是反射式全息滤光片, 因而, 对滤光片的各个参数均使用反射光来测量。

## 三、全息滤光片的性质

同其他光学滤光片一样, 全息滤光片的主要性质可用峰值波长, 带宽和效率这三个参数来描写。

#### 1. 全息滤光片的峰值波长

(1) 峰值波长的可控性。由于体积全息图的再现过程满足 Bragg 条件<sup>[3,4]</sup>, 因此, 全息滤光片的峰值波长可由公式  $2nd \sin \theta = \lambda$  确定。在制作滤光片时, 选取一定的光波长和光束的入射角, 就确定了光栅常数, 也就决定了全息滤光片的峰值波长。为在某个方向上得到不同的峰值波长, 可用不同的光波长和角度制作滤光片。这可由表 1-1 和表 1-2 清楚地看出。

Table 1-1 Variation of peak wavelength  $\lambda_p$  with incident angle during construction

$i_0$	0°	20°	40°
$\lambda_p$ (Å)	5230	5515	6101

constructing condition:  $T=24\mu\text{m}$ ,  $\lambda_0=4880\text{Å}$   
 measuring condition: incident angle  $i=5^\circ$

Table 1-2 Variation of peak wavelength  $\lambda_p$  with the wavelength during construction

$\lambda_0$ (Å)	4880	5145	construction condition: $T=24 \mu\text{m}$ , incident angle $i_0=0^\circ$ measuring condition: incident angle $i=5^\circ$
$\lambda_p$ (Å)	5230	5479	

(2) 峰值波长的可调谐性。由 Bragg 条件可以看出, 对于光栅常数确定的一个全息滤光片, 其峰值波长将随 Bragg 角  $\theta$  的变化而改变。这表明, 全息滤光片的峰值波长可在一定的范围内调谐, 其调谐范围与制作滤光片时的光波长和角度有关。表 1-3 给出了全息滤光片的峰值波长与光束入射角  $i$  的关系。我们看到, 实验结果与理论计算符合得很好, 相对误差不超过 1%。

Table 1-3 The value of peak wavelength at different incident angles

$i$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	$35^\circ$	$40^\circ$	$45^\circ$	$50^\circ$	$55^\circ$	$60^\circ$
$\lambda_+$ (Å)	5477	5450	5406	5343	5269	5181	5080	4971	4856	4738	4621	4508
$\lambda_e$ (Å)	5479	5472	5424	5316	5289	5180	5070	4964	4843	4720	4639	4531

constructing condition:  $T=24 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_0=5145 \text{Å}$ ,  $i_0=0^\circ$

In the table  $\lambda_+$  is the theoretical value calculated by Bragg's law,  $\lambda_e$  is the measured value

Note:  $\lambda_+$  is calculated with the way: at first, a value of  $\lambda_e$  was measured and  $d$  was obtained from Bragg's law, then the values of other  $\lambda_+$  were calculated using the value of  $d$

Table 1-4 The tunable range of holographic filters with different  $i_0$ 

$i_0$	$0^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$
tunable range (Å)	4230-5308	4492-5521	5033-6240

constructing condition:  $T=48 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_0=4880 \text{Å}$

measuring condition:  $i$  was changed from  $0^\circ$  to  $60^\circ$

表 1-4 反应了制作滤光时光束入射角  $i_0$  对滤光片调谐范围的影响。可以看到, 角度变化范围为  $60^\circ$  时, 波长的调谐范围达  $1000 \text{Å}$  以上。

(3) 影响峰值波长可控性的因素。综上所述, 全息滤光片的峰值波长是可以控制的。从原理上讲, 只要严格地控制制作时的光波长和角度, 就可以相当准确地控制滤光片的峰值波长。但由于曝光后处理过程中明胶的膨胀, 使滤光片的实际峰值波长与理论值产生差别。同时, 由于很难使制作条件及处理过程条件的严格一致, 因此, 多次制作的滤光片的峰值波长总会有差别。不过, 采用严格的处理工艺, 可以尽量减小这种影响。目前, 实验研究中波长的控制误差可小于 1%。另外, 由于峰值波长具有可调谐性, 这种误差一般不会影响全息滤光片的实际使用。

## 2. 全息滤光片的带宽

滤光片的带宽通常定义为半值宽度, 对全息滤光片, 仍采用这个定义。

(1) 带宽的控制。全息滤光片的带宽由 (3) 式给出。公式表明带宽与介质的厚度有关, 厚度越大, 宽度越窄。由 (3) 式还可以看出, 带宽与峰值波长有关, 故也常用相对带宽  $\Delta\lambda/\lambda$  来表征滤光片的带宽。表 2 是带宽与介质厚度之间关系的实验结果。图 3 是用不同厚度介

Table 2 The relationship between bandwidth and thickness of medium

$T(\mu\text{m})$	12	24	36	48	60	72
$\Delta\lambda(\text{\AA})$	200	162	134	94	75	40
$\Delta\lambda/\lambda$	0.039	0.032	0.026	0.019	0.013	0.0076

The value of peak wavelength of the filters listed in the table are all about  $5100\text{\AA}$

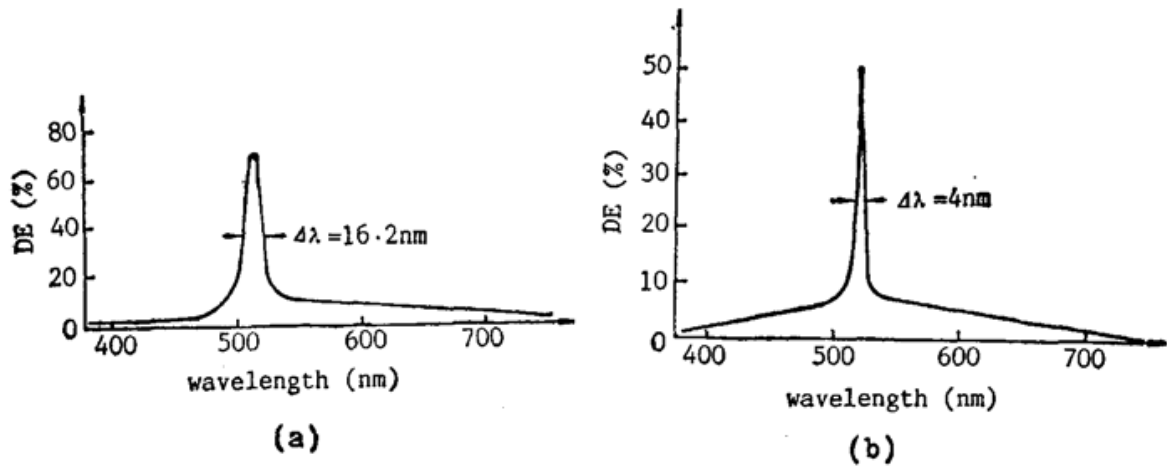


Fig. 3 The spectrum of filters with different thickness

(a)  $T=24\mu\text{m}$ ; (b)  $T=72\mu\text{m}$

质制作的全息滤光片的光谱特性曲线。表 2 和图 3 的实验结果都证明了式的预言。在实际使用中,可根据对带宽的不同要求而选用不同厚度的介质来制作滤光片。

(2) 噪声对带宽的影响及消除方法。产生噪声的因素有多种,但最严重的是曝光后处理过程中在介质内出现的一种白色“结晶”。这种“结晶”产生较大的散射噪声,使滤光片的带

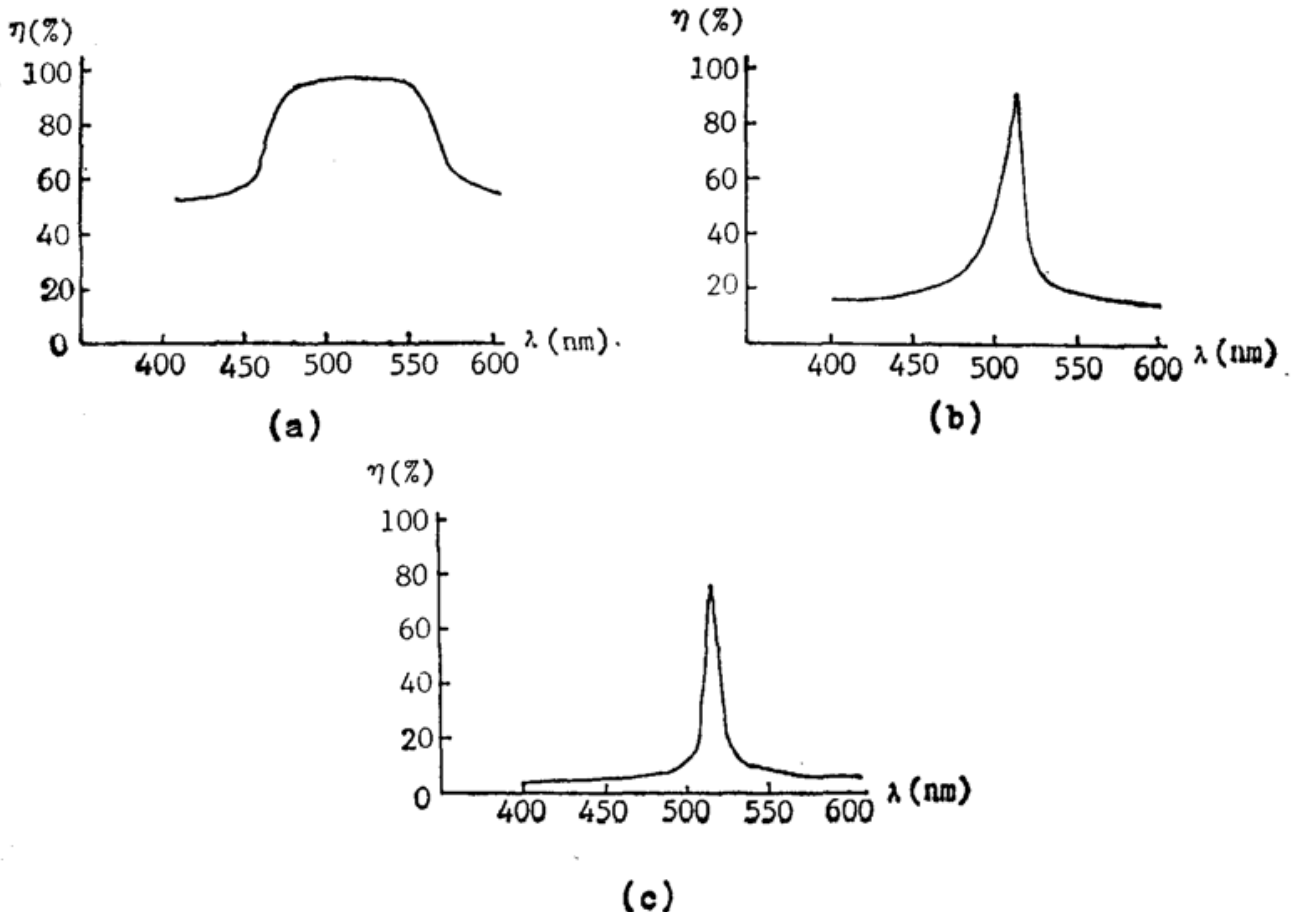


Fig. 4 The effect of noise on bandwidth

(a) with one-step dehydration; (b) with five-steps dehydration;  
(c) with hardning and five-steps dehydration

宽显著加宽。这种噪声主要是异丙醇脱水的不均匀性所造成的,尤其当介质较厚时更为明显。例如采用一步脱水,由于介质较厚,介质的四周及上表面首先脱水并且脱水彻底,而介质内部脱水较困难且很慢,这造成介质的膨胀极不均匀。这样,介质不是被撕裂成小孔,而是大面撕裂甚至折断,由此产生“结晶”现象<sup>[9]</sup>,出现严重的噪声。

这种现象对滤光片性质的影响,一是使带宽增大,二是增大了滤光片的背景噪声,即抬高了偏置水平。图 4(a) 所示的是一个采用一步脱水,噪声相当严重的滤光片的滤光特性,介质厚度为  $48\ \mu\text{m}$ 。可以看到,带宽很宽,基底也很高。降低这种噪声就是要使脱水过程均匀,这可采用多步脱水及加硬化处理的方法来解决。图 4(b) 为其他条件相同,但经五步脱水处理的滤光片的滤光特性;图 4(c) 是先经硬化处理再经五步脱水的滤光片的滤光特性。可以看到,脱水过程均匀大大改善了滤光片的性质。

介质的硬化处理有几种方法<sup>[6,9]</sup>,我们采用的是将曝光后的底片先在 0.5% 的重铬酸钾溶液中浸泡,再在 2% 的亚硫酸钠溶液中浸泡。硬化处理虽然大大降低了噪声,但同时也降低了效率,这主要是由于硬化使介质的调制变小。

### 3. 全息滤光片的衍射效率

全息滤光片的衍射效率由公式(1)和(2)给出。效率随记录介质吸收系数  $\alpha$  的减小而单调增大,效率与介质厚度的关系较为复杂。可以证明,当记录介质的厚度与吸收系数满足关系  $T = \frac{1}{\alpha}$  时,可获得最大衍射效率<sup>[7]</sup>。在研究中,制作的全息滤光片的最大衍射率 ( $\Delta\lambda < 90\ \text{\AA}$  时)已达到 90%。关于全息滤光片效率与厚度和吸收系数的关系,我们将另文详述。

### 4. 全息滤光片的设计步骤

根据前面的分析,我们认为全息滤光片的设计应遵循以下步骤:

- (1) 由实际使用中所需的峰值波长,选择制作滤光片时激光器的波长和光束的入射角,光束入射角可通过调整光路来控制。
- (2) 根据实际使用中对带宽的要求,确定所用记录介质的厚度,要求带宽越窄,厚度应越大。
- (3) 当记录介质的厚度确定后,应恰当选择其吸收系数  $\alpha$  (即灵敏度),使之满足关系  $T = 1/\alpha$ ,这样滤光片就可在这个厚度上获得最大衍射效率。

## 四、全息滤光片的特点及应用前景

### 1. 可调谐性

全息滤光片具有良好的可调谐性,在调谐过程效率和带宽的变化都很小,图 5(a) 清楚地反映了这一点。干涉滤光片的调谐性能如图 5(b) 所示<sup>[10]</sup>。二者相比,其差别是很明显的。另外由于采用全息照相的方法,可在同一底片上制作多个全息滤光片。图 6 就是这种滤光片的光谱特性。图中所对应的滤光片为两次曝光制成,它可在不同的方向上得到不同的峰值波长,它们的衍射效率分别为 75% 和 65%,带宽均为  $95\ \text{\AA}$ 。干涉滤光片很难具有这一特点。这一特点使它可能在光通讯中得到应用。国外有人正在进行这方面的研究<sup>[11,12]</sup>。

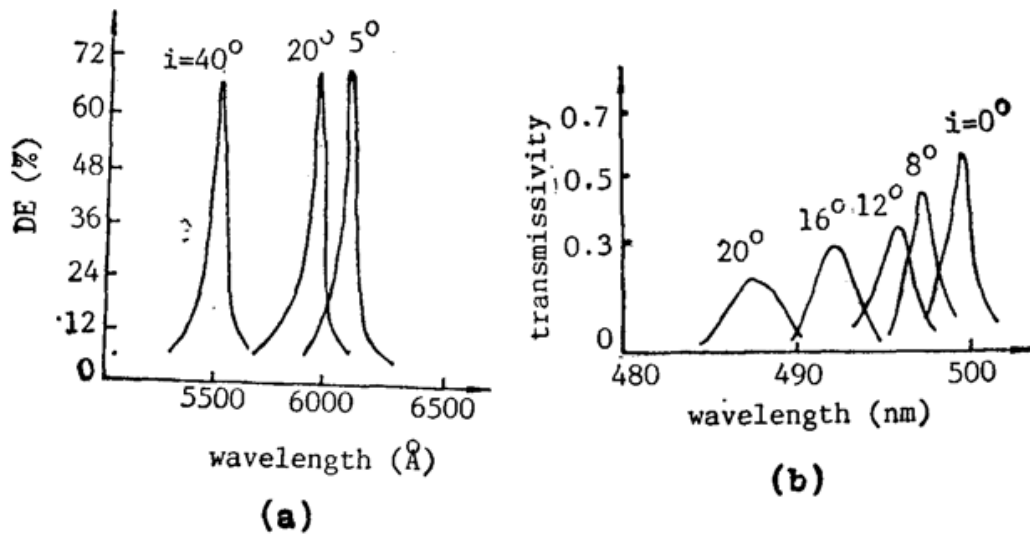


Fig. 5 Tunable characteristic of two kinds of filters  
(a) holographic filter; (b) interference filter

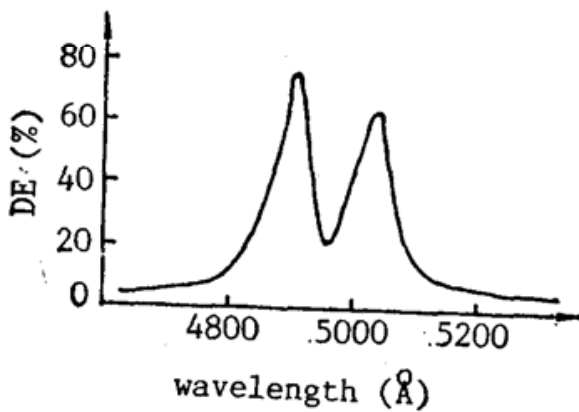


Fig. 6 Characteristic of filters with twice exposure

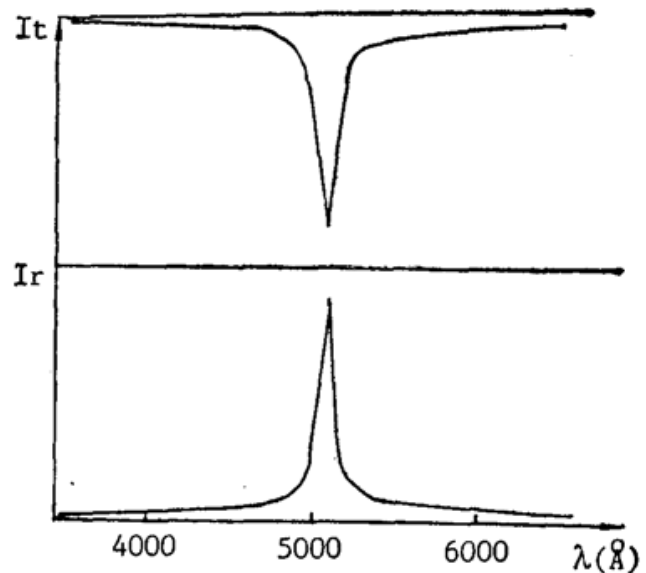


Fig. 7 Transmission and reflection spectrum of holographic filter

## 2. 单峰特性好

由图3看到,全息滤光片本身具有相当好的单峰特性,在整个可见光范围内只有一个峰值。而干涉滤光片存在次峰,消除次峰则会降低效率。故单峰特性好是全息滤光片的一个优点。

## 3. 面积大,价格低

干涉滤光片的面积都很小,一般直径为20 mm左右,而且很贵。全息滤光片是用全息照相的方法制作的,可用很低的价格制作大面积的滤光片。实验中,已作出直径为100 mm的滤光片,均匀性很好,衍射效率达到82%。

## 4. 透射光和反射光的互补特性

同干涉滤光片一样,全息滤光片的反射和透射光谱是互补的,分别为一窄的单峰和吸收带,图7为实测的透射和反射光谱。因此,全息滤光片可以反射式使用选择出所需的波长,也可透射式使用滤掉不需要的波长,还可以两种形式同时使用。再利用面大的特点,全息滤光片已在美国空军战斗机的Head-Up Display (HUD)装置中得到实际应用。目前,

HUD 已开始装配到民航飞机上。

### 5. 效率高, 带宽窄

这已在前面详细讨论过。由于上述特点, 全息滤光片可以在某些领域中代替干涉滤光片。我系固体物理实验室在固体材料的激发能谱研究方面, 初步使用了我们制作的滤光片, 得到了较好的效果。

当然, 全息滤光片也还存在一些不足有待克服。如其带宽尚未达到干涉滤光片的最好水平, 其背景噪声比干涉滤光片大等等。另外, 改变峰值波长需要变化角度, 这会使实验装置变得较为复杂。但这些不足可以通过进一步的研究逐步得到解决。我们已在这方面进行了一定的工作。目前我们制作的全息滤光片已达到如下参数指标: 在可见光范围内, 带宽  $\Delta\lambda = 25 \text{ \AA}$  时, 效率  $\eta \approx 50\%$ ,  $\Delta\lambda = 30 \text{ \AA}$  时,  $\eta \approx 60\%$ ,  $\Delta\lambda = 40 \text{ \AA}$  时,  $\eta \approx 80\%$ ,  $\Delta\lambda = 60 \sim 80 \text{ \AA}$  时,  $\eta \approx 90\%$ 。背景噪声: 在偏离峰值波长 1 个带宽处, 效率小于 1%。

总之, 全息滤光片是一种很有前途的全息光学元件, 相信会在不久的将来得到广泛应用。

中国科学院计算研究所赵霖同志为我们提供了各种实验所需的全息干板, 特向他表示真诚的谢意。在实验工作中得到了北京师范大学孙寅官副教授以及王宁和郑东东同志的热情帮助, 在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] D. Gabor; *Nature*, 1948, **161**, No. 4098 (May), 777~779.
- [2] E. N. Leith, J. Upatnieks; *J. O. S. A.*, 1962, **52**, No. 10 (Oct), 1123~1130.
- [3] H. Kogelnik; *Bell. Syst. Tech. J.*, 1969, **48**, No. 9 (Nov), 2909~2947.
- [4] R. D. Rallison; *Proc. SPIE*, 1985, **523**, 292~295.
- [5] Liu Dahe *et al.*; *Proc. SPIE*, 1986, **673**, 463~469.
- [6] R. J. Collier *et al.*; *«Optical Holography»*, (Academic Press Inc, New York, 1971), ch. 9, 10.
- [7] 唐伟国等; *«光学学报»*, 1988, **8**, No. 2 (Feb), 152~161.
- [8] Seven Sjolider; *Optica Acta*, 1984, **31**, No. 9 (Sep), 1001~1011.
- [9] H. M. 史密斯; *«全息记录材料»*, (科学出版社, 1984), 第三章。
- [10] M. 弗郎松; *«用于辐射分离的光学滤光片»*, (科学出版社, 1986), 41.
- [11] S. S. Duncan; *Opt. Eng.*, 1985, **24**, No. 5 (May), 781~785.
- [12] D. J. Mc Cartney *et al.*; *Opt., Lett.*, 1985, **10**, No. 6 (Jun), 303~305.



## Narrow-Band holographic reflection filters\*

LIU DAHE, HUANG WANYUN AND TANG WEIGUO  
(*Department of Physics, Beijing Normal University*)

(Received 11 October 1988)

### Abstract

According to coupled wave theory, the volume hologram has a good property for light filtering and can be used as a kind of narrow-band filter. In this paper, the properties of holographic filter are discussed for its three main parameters: peak wavelength, bandwidth and diffraction efficiency. The design process of the holographic filter is proposed. The characteristics of holographic filter and its promising application are pointed out.

**Key words:** holographic optical element; filter.

---

\* The project supported by National Natural Science Foundation of China.