

用于光纤 Sagnac 干涉仪的全息耦合器

邹运庐 徐大雄

(北京邮电学院应用物理系)

提 要

我们利用重铬酸明胶作为全息记录介质,制得了分光比接近 1:1,总衍射效率超过 60% 的双重全息透镜。本文讨论了这种全息透镜作为 Sagnac 光纤干涉仪的耦合器的优点,并给出了初步的实验结果。本文还推导了倾斜光栅的 Q 因子,提出了全息光栅的等效 Bragg 定律,并通过它们设计出所需的全息透镜。

关键词: 全息光学元件; 光纤耦合器; 干涉仪; 光纤传感器。

一、引 言

光纤传感器是把外场下光波固有特性(振幅、波长、强度、相位和偏振等)的变化通过光纤技术反映出来的一种探测器件。它可以分为振幅型和干涉仪型两大类。后者通常都需要适合于单模光纤的 3 dB 耦合器。光纤陀螺是利用光纤的可绕性制成的环形 Sagnac 干涉仪,它对 3 dB 耦合器有更高的要求。用全息透镜作为光纤陀螺仪的耦合器的设想是 Toshihiko Yoshino 等首先提出来的^[1]。我们根据 Kogelnik 的耦合波理论^[2],在实验上实现了它。该全息耦合器具有分光比易控制,偏振不敏感、制作简单和成本低等特点。它是用高效率,低噪声的重铬酸明胶作为记录介质,氩离子激光器的 488 nm 为记录波长,利用两次曝光的方法制得的一个双重全息透镜。最后把它放入 633 nm 光源的光纤 Sagnac 干涉仪中,得到输出干涉条纹。

二、全 息 理 论

在厚全息图的条件下,根据 Kogelnik 的耦合波理论,透射型相位全息图的衍射效率为

$$\eta_1 = v^2 \sin^2 \alpha \left[\frac{(\xi^2 + v^2)^{1/2}}{\alpha} \right], \quad (1)$$

式中 ξ 和 v 是参量。而厚全息光栅的 Bragg 条件为

$$2\Delta \sin \theta_0 = \lambda_0 / n_D, \quad (2)$$

式中 $\theta_0 = (\Psi_1 - \Psi_0) / 2$, Δ 是光栅常数, λ_0 是再现光波长, n_D 为介质的平均折射率, Ψ_1 和 Ψ_0 分别是介质内部的像光束倾角和再现光束倾角(图 1)。在 Bragg 入射条件下, $\xi = 0$; 当 $v = \alpha / 2$ 时, $\eta_1 = 100\%$ 。它是厚全息光栅最大衍射效率的理论值。

方程(2)适合于任何厚光栅。对于全息厚光栅,我们能找到它的一个更有意义的形式。利用全息光栅的记录参量,可以得到它的光栅方程为:

收稿日期: 1987年3月30日; 收到修改稿日期: 1987年10月18日

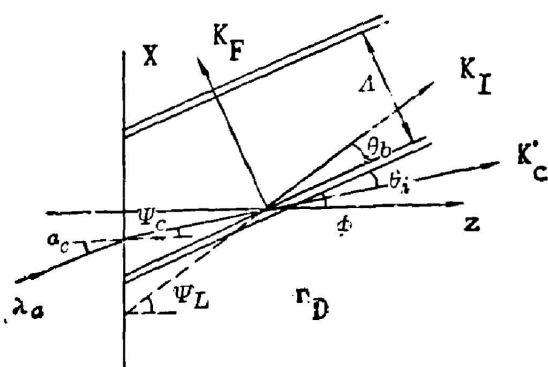


Fig. 1 Geometry of thick hologram gratings

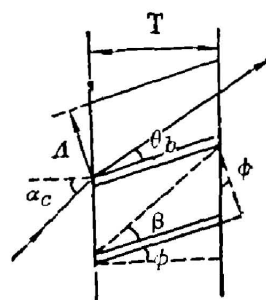


Fig. 2 Definition of thick holograms

$$2\Delta \sin \theta_b = \lambda / n_D, \quad (3)$$

式中 $\theta_b = (\Psi_0 - \Psi_R) / 2$, Ψ_0 和 Ψ_R 分别是介质内部的物光倾角和参考光倾角, λ 是记录光波长。比较方程(2)和(3), 我们得到:

$$\lambda / \sin \theta_b = \lambda_0 / \sin \theta_{b_0} \quad (4)$$

另外; 由 Bragg 条件的对称性可推得:

$$\Psi_0 + \Psi_R = \Psi_I + \Psi_{C_0} \quad (5)$$

方程(4)和(5)就是前面提到过的全息光栅的 Bragg 定律。它包含了记录和再现两个过程的参量, 与记录介质无关。

对于光栅平面垂直于乳胶平面的光栅, Kogelnik 定义了一个 Q 因子:

$$Q = 2\pi\lambda_0 / n_D \Delta^2, \quad (6)$$

式中 T 是乳胶厚度, 其它参数与前面的定义相同。当 $Q > 10$ 时, 可以认为光栅是“厚”的; $Q < 1$ 时, 是“薄”的。本文将给出一个方程(6)的扩展形式, 它适用于透射型倾斜光栅。图 2 表示了厚光栅的另一定义^[3],

$$Q_b > \beta_0. \quad (7)$$

由图中的三角关系, 我们有:

$$\tan(\beta + \phi) = \frac{\Delta}{T \cos \phi} + \tan \phi, \quad (8)$$

式中 ϕ 是光栅面的倾角。由于 $\beta < 5^\circ$, $\phi < \pi/4^*$, 在一级近似下, 存在等式:

$$\sin \beta \approx \Delta / T \cos \phi_0. \quad (9)$$

把方程(2)、(7)和(9)联系起来, 我们得到:

$$Q = 2\pi\lambda_0 T \cos \phi / n_D \Delta^2 > 4\pi > 10. \quad (10)$$

显然, 它仅比(6)式多一个倾斜因子 $\cos \phi$ 。对于非倾斜光栅 $\phi = 0$, 方程(10)又变成方程(6)。

三、实验结果

考虑到 Bragg 条件和倾斜光栅的 Q 因子公式, 选择方程(1)中的 v 值使 η_1 值最高。我

* 对于厚光栅, 一般 $\Delta \ll T$ (如 1000lines/mm 的光栅, $\Delta = 1 \mu\text{m}$, $T = 15 \mu\text{m}$), $\tan \beta < \Delta / T$, 则 $\beta < 5^\circ$ 。由 $\sin \alpha_i = n_D \sin \Psi_i$ ($i=0, R$), 因 $n_D = 1.52$, $|\sin \alpha_i| \leq 1$, 则 $|\Psi_i| < \pi/4$, 而 $\phi = (\Psi_0 + \Psi_R) / 2 < \pi/4$ 。

们得到角度的最后优化值分别为 $\alpha_{O_{1,1}} = \pm 20.5^\circ$, $\alpha_{R_{1,1}} = \pm 2.6^\circ$ 和 $\alpha_c = 0^\circ$ 。它们产生两组相互对称的倾斜光栅。因此,在正入射的再现光下,将输出两个对称的像光束。其它的实验参量为 $T = 15 \mu m$, $n_D = 1.52$, $\lambda = 488 \text{ nm}$, $\lambda_a = 633 \text{ nm}$, $R_{O_{1,1}} = 8.7 \text{ cm}$, $R_{R_{1,1}} = \infty$ 及 $R_c = \infty$ 。实验的工艺流程如下:

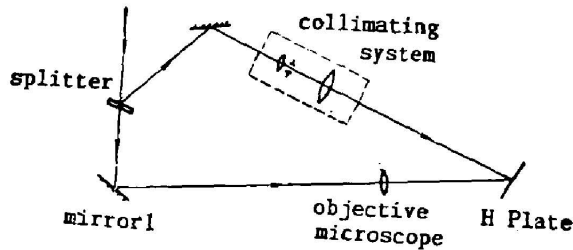


Fig. 3 Recording arrangement for fabricating the coupler

∞。实验的工艺流程如下:

① 制作全息干板:在玻璃基片的一面涂上重铬酸明胶,另一面涂上黑色的防光晕层;

② 曝光及显影;

③ 密封防潮;

④ 放入 Sagnac 光纤干涉仪系统中。

制作该全息耦合器的典型光路如图 3

所示,曝光曲线如图 4。图中的曲线 A 代

表一束物光的记录情况,曲线 B 代表两束相同的物光记录情况。对于曲线 B,假设两次的曝光量相同, E_0 表示双曝光的第一次的曝光量,而 η 表示两个衍射像的总衍射效率。

表 1 给出了该元件几何参数的理论和实验值,表 2 给出了该元件的特征参数。表中 η_i 是曲线 A 的最大值, η_1 是该元件单边衍射像的效率, η 是曲线 B 的最大值, σ 是分光比。在目前的条件下,该耦合器的插入损耗约为 5dB*。但它具有多功能的特性。

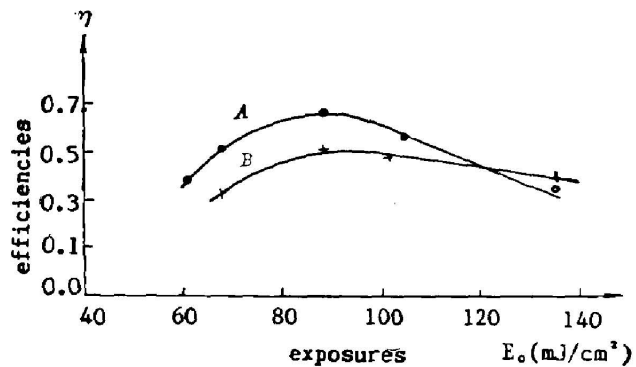


Fig. 4 Curves of the exposures

例如在 Sagnac 系统中,对于入射到光纤中的光,它起到了两个透镜和一个分束镜的作用,对于从光纤中出射的光,它又起到了两个透镜和一个合束镜的作用。将该元件放入如图 5(a)

Table 1 Geometry parameters on the element

Results	$R_I(\text{cm})$	$\alpha_I(^{\circ})$
Theoretically	6.7 ± 0.1	23.2 ± 0.05
Experimentally	6.8 ± 0.2	23.7 ± 0.5

Table 2 Character parameters of the element

Parameters	η_i	η_1	η	σ
Characters	0.75	0.30	0.60	1:1.2

* 插入损耗 = $10 \log \frac{I_2}{I_1}$, I_1, I_2 分别为输入和输出光强(见图 5(b)所示)

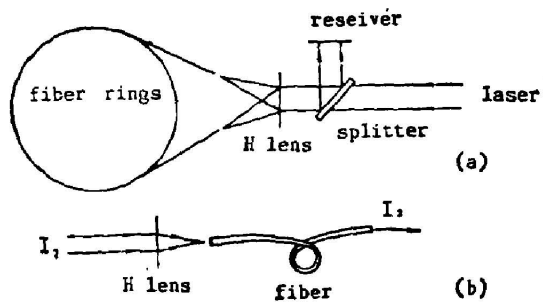


Fig. 5 Fiber-optic Sagnac system



Fig. 6 Interference fringes

所示的光纤 Sagnac 干涉仪中, 我们能得到图 6 的干涉条纹。旋转光纤环, 我们看到了条纹的“伸缩”现象。根据条纹变化的大小及光纤长度, 就可以测出光纤环旋转的角速度。

实验工作中, 傅子平老师和北京师范大学刘大禾老师给予了热情的支持和帮助。王本副教授在理论上提出了一些宝贵的参考意见。作者在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Toshihiko Yoshino *et al.*; *Appl. Optics*, 1983, **22**, No. 12 (Jun), 1800~180L.
 [2] H. Kogelnik; *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**, No. 9 (Nov), 2903~2947.
 [3] D. Meyerhofer; *RCA Review*, 1972, **33**, No. 1 (Mar), 110~130.

Holographic coupler for fiber-optic Sagnac interferometer

ZOU YUNLU AND HSE DAHSIENG

(Department of Applied Physics, Beijing University of Posts and Telecommunications)

(Received 30 March 1987; revised 18 October 1987)

Abstract

The crucial parts of a fiber-optic sensor (FOS) are 3dB couplers. It is a novel idea that a holographic lens is made as the coupler for a fiber-optic gyro. Theoretically we explored the possibility of this way and achieved it experimentally. According to Kogelnik's Coupled Wave Theory, under the Bragg condition, the diffraction efficiency of transmission holographic gratings, whose recording material is fit for certain conditions, theoretically, is up to 100%. This Bragg condition can be shown as

$$2\lambda \sin \theta_b = \lambda_0 / n_D.$$

For a holographic grating, we give the special Bragg condition as follows.

$$\lambda / \sin \theta_b = \lambda_0 / \sin \theta_b$$

$$\Psi_0 + \Psi_R = \Psi_C + \Psi_I$$

where θ_h , Ψ_o and Ψ_R are the angle parameters of recording beams, θ_b , Ψ_c and Ψ_I are those of readout beams, λ and λ_a separately the recording and the reconstructing wavelengths, is the grating constant and n_D the refractive index.

Kogelnik's theory is only fit for volume gratings. To determine whether a holographic grating is a volume grating, we have extended the formula of a Q factor for the grating into a slanted transmission hologram grating. It is that

$$Q = 2\pi\lambda_a T \cos \phi / n_D \Lambda^2 > 10.$$

It has only a slant factor $\cos \phi$ more than the formula of Kogelnik's theory for symmetric gratings. Therefore it has a universality even more.

In light of above theory, we used dichromated gelatin as the recording material and 488nm as the recording wavelengths and under two exposures obtained a two-fold holographic lens with beam ratio approaching 1:1 and total diffraction efficiency over 60%. Putting it into a fiber-optic Sagnac interferometer operating at 633nm light, we found the interference fringes as output.

Key words: holographic-optic elements; optic-fiber coupler; interferometer; fiber-optic sensor.