

一种用单模光纤制作亚微米周期光栅的方法

刘永智

(成都电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

提 要

本文报道一种用单模光纤制作亚微米周期光栅的全息方法, 并详细分析和讨论了影响光栅质量的各种因素。实践证明这一方法完全适于制作面积不小于 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 适于集成光学元件需要的高质量光栅。

关键词: 集成光学, 波导光栅, 单模光纤。

一、引 言

在集成光学中, 波导光栅是无源光路中很重要的元件之一。它不仅能实现光的耦合、偏转, 而且利用它的频率特性可实现选频滤波以及频率分离等。同样, 波导光栅是半导体DFB、DBR激光器所必不可少部分, 目前非线性波导光栅的研究又开辟了一个新领域。因此, 波导光栅的研究一直为各国研究工作者所重视^[1]。长期以来为了获得小周期光栅, 许多研究工作者作了不懈的努力。例如利用传统的全息方法, 人们获得了微米量级周期光栅。其中, 利用加入棱镜与匹配液方法可获得 $\approx 0.2 \mu\text{m}$ 小的周期, 这是一个很成功的方法。近年来一些研究工作者又研究了将样品置于高折射溶液中进行全息光刻的方法, 以期得到同棱镜法相似的效果。最近又发展了一种更为新颖的全息光化学刻蚀光栅的方法^[2], 这种方法借助溶液中光化学反应, 不要掩膜在样品上一次获得光栅。但是应该说, 所有这些都是利用了类似于图1所示的传统光学系统。这种系统具有稳定性好, 可获得大面积光栅等优点; 但由于需采用反射镜、准直镜等传统光学元件而使系统不够方便灵活, 特别是为了获得更小周期而把样品与光路同时置于溶液中的情况下。自1985年以来, 作者研究并成功地应用了一种用单模光纤制作全息波导光栅的方法。在这种方法里, 反射镜、准直镜等为单模光

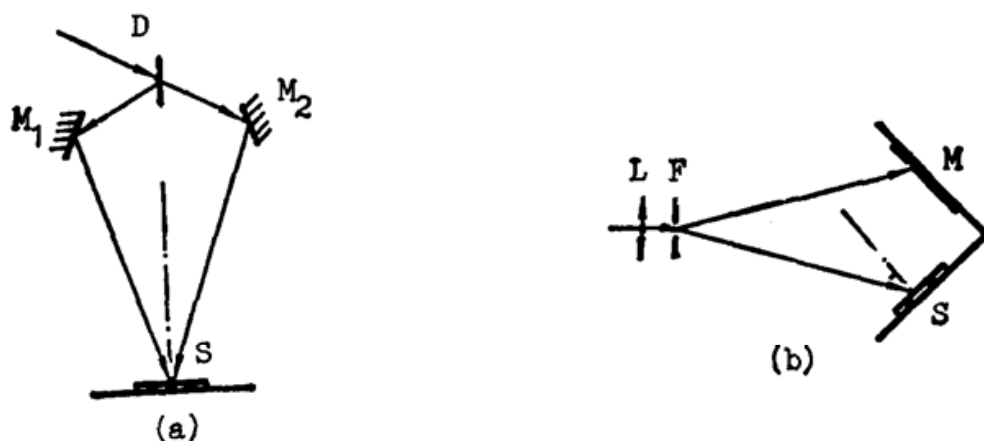


Fig. 1 General forms for the production of holographic interference gratings

纤所代替。利用这种光纤系统在光刻胶上获得了面积不小于 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ，周期 $\sim 0.3 \mu\text{m}$ 的高质量光栅。本文仅就光纤光路的选择与设计，光纤干涉系统性能以及所作光栅质量分别作一介绍。

二、光纤光路的选择与设计

图 2 为一实现全息干涉的光纤系统的原理图。在样品上形成干涉条纹的条件为

$$\sum n_{1i} r_{1i} - \sum n_{2i} r_{2i} = [m + (1/2)] \lambda \quad (1)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots,$$

式中 n_{1i} 、 n_{2i} 分别为光路 1、2 中介质的折射率； r_{1i} 、 r_{2i} 为对应光路长； λ 为光波长。由于多模光纤的各次模具有不同的传输相位，不可能在样品上得到均匀的干涉，因此只能选择单模光纤光路进行全息干涉。由图 2 可见，该系统省去了通常所需的反射镜与准直镜。干涉条纹的周期 Δ 、周期变化 δ 及周期变形 β 由图 3 可得到^[3]

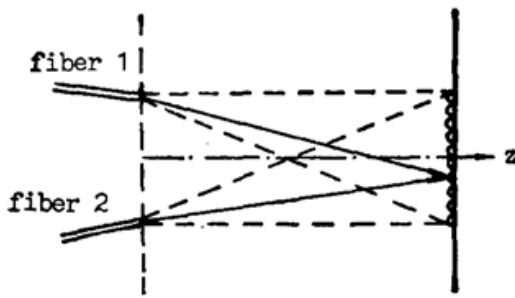


Fig. 2 Holographic interference principle with the fibers

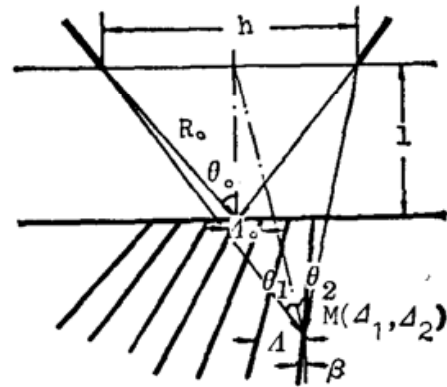


Fig. 3 Fringes produced by the holographic interference of fiber

$$\Delta = \lambda / 2n \sin \theta, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\Delta \Delta_1}{\Delta_0} = \frac{2 \sin \theta_0}{(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)} - 1, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\Delta_1 \Delta_2}{(R_0 - \Delta_1 \sin \theta_0)(R_0 + \Delta_1 \sin \theta_0)}, \quad (4)$$

公式(3)，(4)中，介质折射率取 $n=1$ 。 Δ_0 为 0 点条纹周期； Δ 为 M 点 ($x = \Delta_1$, $y = \Delta_2$) 条纹周期。 β 为 M 点条纹与该点切线夹角。由于 β 很小， $\beta \approx \tan \beta$ 。为了在光刻胶上获得均匀的一定面积的光栅，希望所选光纤在给定波长下应能单模传输且具有适当的光束发散角，同时能保持良好的线偏振状态。下面对此必要性分别作一讨论：

1. 单模传输条件

通常，对应光刻胶灵敏度的波长范围较短约在 $0.35 \mu\text{m} \sim 0.45 \mu\text{m}$ 之间，因此为了保证光纤单模传输，要求光纤的 LP_{11} 模截止波长也应落在这一范围之内。由单模传输条件^[4]， LP_{11} 模的截止波长 $\lambda_c \geq 2.61 n_1 a \sqrt{2\Delta}$ ，其中 n_1 、 a 分别为纤芯折射率与半径； $(\Delta = n_1 - n_2) / n_1$ 与光纤数值孔径 NA 有关。在光纤折射率分布一定情况下只有选取较小的纤芯半径 a 才能使 LP_{11} 模有较短截止的波长 λ_c 。

2. 光束发散角

从单模光纤辐射到空气中的 LP₀₁ 模激光束可近似作为高斯光束处理。在光纤轴上离端面 z 处空气中的光场分布为^[5]

$$E = \frac{c}{W} \exp\left[-\left(\frac{r}{W}\right)^2\right], \quad (5)$$

$$W = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2}, \quad (6)$$

$$W_0 = a \left[0.779 + 0.285 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^{3/2} + 0.00726 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^6 \right]. \quad (7)$$

式中 W_0 , W 分别为端面与 z 处的光束半径。若在 $z=l$ 处垂直于光纤轴的平面上定义一均匀光强区 S , 使该区域最边缘部分光强 I_m 为中心轴部分光强 I_0 的 90%, 则由图 4 可得到 S 所对应的空间发散角 θ_m 近似为

$$\theta_m \approx \text{tg}^{-1}\left(\frac{r_m}{l}\right) = \text{tg}^{-1}\left\{\frac{\lambda}{\pi W_0} \left[\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{0.9}\right)\right]^{1/2}\right\} \approx \text{tg}^{-1}\left(0.073 \frac{\lambda}{W_0}\right). \quad (8)$$

而均匀光强区单位面积上的光强为 (1 mW 输出)

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta I}{\Delta S} \right|_{z=l} &\approx \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_m} \frac{2}{\pi W^2} \exp\left[-2\left(\frac{r}{W}\right)^2\right] r \, dr \, d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_m} r \, dr \, d\varphi} = \frac{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r_m}{W}\right)^2\right]}{\pi r_m^2} \\ &= \frac{0.1}{\pi r_m^2} \text{ (mW/mm}^2\text{)}. \end{aligned} \quad (9)$$

对条纹的干涉来说, 光束发散角 θ_m 愈小条纹变形愈小, 而且单位面积上的光强愈强。但是为了获得一定面积的质量良好的干涉条纹光束又必须具有适当的发散角。利用公式(8)、(9)根据光纤结构参数与光波长可确定样品应放的位置以及大致所需曝光时间。

3. 偏振特性

对于图 2 所示全息系统, 由光纤输出的两束光具有相同方向的线偏振态有利于提高干涉条纹对比度。但通常所用单模光纤均非保偏光纤, 具有双折射特性 ($\beta_x \neq \beta_y$)。对于长度 L 的单模光纤, 因传播常数 β_x 、 β_y 不同所产生的相差 $\delta = (\beta_x - \beta_y)L$ 使其辐射光束具有椭圆、偏振特性。光的偏振度 P 为^[6]

$$P = \sqrt{1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \delta}. \quad (10)$$

公式中 α 为纤内光束与光纤轴交角。对于任意 α 值, 只要通过改变光纤应力即能使 δ 满足 $\sin \delta = 0$, 使光纤处于线偏振状态 $P = 1$ 。

三、单模石英光纤性能试验

作者曾对几种实验室用单模石英光纤进行试验, 最后选定的光纤主要结构参数为阶跃型, $a = 1.58 \mu\text{m}$, $n_2 = 1.458$, $\Delta = 2.65 \times 10^{-3}$ 。对此光纤试验结果如下:

1. 单模传输特性

理论计算得到的光纤数值孔径 NA 与 LP₁₁ 模截止波长 λ_c 分别为 6.1° , 与 $0.439 \mu\text{m}$ 。

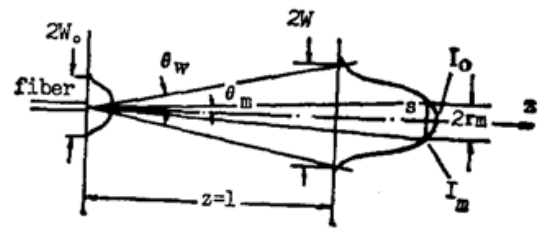


Fig. 4 Homogeneous range of optical intensity and corresponding spatial divergent angle

显然, 包括 Ar^+ 激光器的 $0.4880\ \mu\text{m}$, $0.4579\ \mu\text{m}$ 以及 He-Cd 激光器的 $0.4416\ \mu\text{m}$ 波长均能单模传输。图 5 给出这一光纤在 $\lambda=0.4416\ \mu\text{m}$, $1.5\ \text{mW}$ 功率注入下测量所得输出光强远场分布, 这是一典型单模特性, 未曾观察到受激散射。对 $0.4880\ \mu\text{m}$ 以及 $0.4579\ \mu\text{m}$ 也得到类似结果。

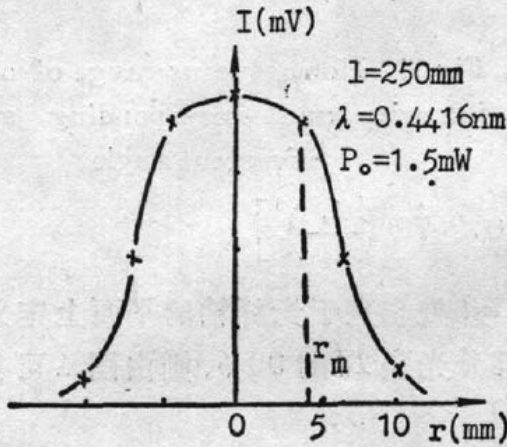


Fig. 5 Far-field distribution of output light from fiber at $\lambda=0.4416\ \mu\text{m}$, $P_0=1.5\ \text{mW}$

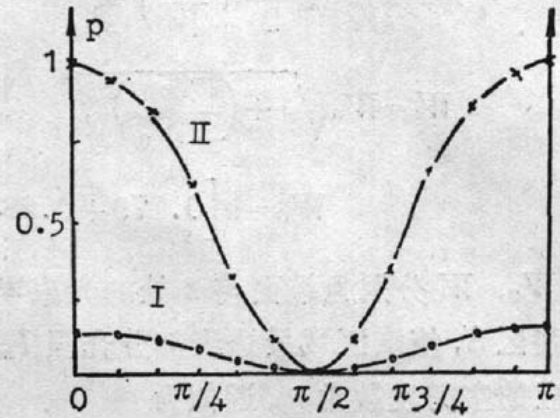


Fig. 6 Polarized characteristics of radiative light from fiber at $\lambda=0.4416\ \mu\text{m}$

2. θ_m 与 r_m 值

在 Ar^+ 激光器的 $0.4579\ \mu\text{m}$ 波长和 He-Cd 激光器的 $0.4416\ \mu\text{m}$ 波长下测量了光束在 $l=250\ \text{mm}$ 处的 θ_m 与 r_m 值, 并与理论计算值比较列于表 1 中。可以看到, 两结果很接近, 表明所采用的理论计算方法是可行的。

3. 偏振特性

图 6 给出 $\lambda=0.4416\ \mu\text{m}$ 波长下辐射光的偏振特性。曲线 I, II 分别为偏振校正前、后所具有的椭圆偏振状态与线偏振状态。

Table 1 Injection power of 1 mW

$\lambda(\mu\text{m})$	comp.	cal.	exp.
0.4579	$\theta_m(^{\circ})$	0.98	1.03
	$r_m(\text{mm})$	4.25	4.50
0.4416	$\theta_m(^{\circ})$	0.96	1.02
	$r_m(\text{mm})$	4.19	4.45

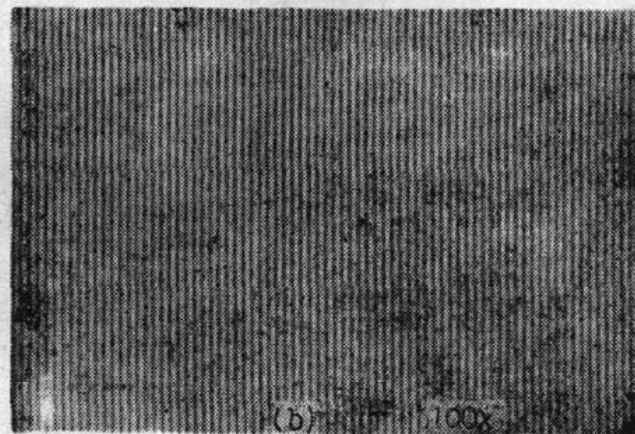
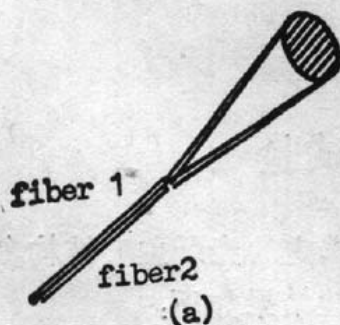


Fig. 7 Experiment for the ability of fiber interference

4. 光束相干能力

从光纤辐射光的相干能力用图 7(a)所示方法可进行观察。图 7(b)为拍摄的双光纤形成的干涉条纹的照片, 这些条纹具有高质量, 即使光纤前后移开 3 cm 对比度都没有明显的改变。对系统稳定性试验也得到满意结果。

四、光栅制作与结果分析

光栅制作所用系统如图 8 所示, 这是一双光纤装置。所用光源为一 LICONIX 42 LON He-Cd 激光器, 波长为 $\lambda=0.4416 \mu\text{m}$, 输出功率 $\text{TEM}_{00}=12 \text{ mW}$ 。激光束经分束器 S 分为两束, 然后分别经显微物镜耦合入单模光纤。 P_1, P_2 为校偏器, 利用它们可使两束光保持线偏振且偏振方向均与图中纸面垂直。样品放置在与光纤轴平面相垂直的位置。改变两光纤距离 h 以及样品与光纤距离 l 即可改变条纹周期。

作者曾分别对 1:1 与 1:3 稀释的 SHIPLEY AZ 1350 H 光刻胶进行了分段感光试验。光胶涂复在 Ag^+ 离子交换玻璃波导上, 涂层厚度约 $0.15 \mu\text{m}$ 。图 9 给出感光能量与制作的对应的光栅衍射光强的关系。可以看到 1:3 稀释的光胶光栅所需最佳感光能量较低。图 10 为一 $\Lambda=0.3116 \mu\text{m}$ 的光胶光栅的照片, 其周期用 He-Ne 激光衍射测量确定。由公式(3), (4) 计算了该光栅的变形 ($l=250 \text{ mm}, \Delta_1=\Delta_2=10 \text{ mm}$) 其 δ, β 均不大于 10^{-4} 测。得的光栅

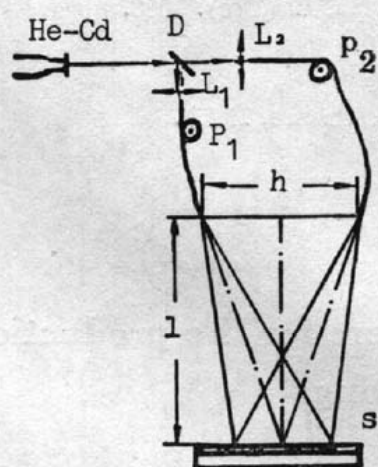


Fig. 8 experimental setup for fabricate the holographic interference gratings with fibers

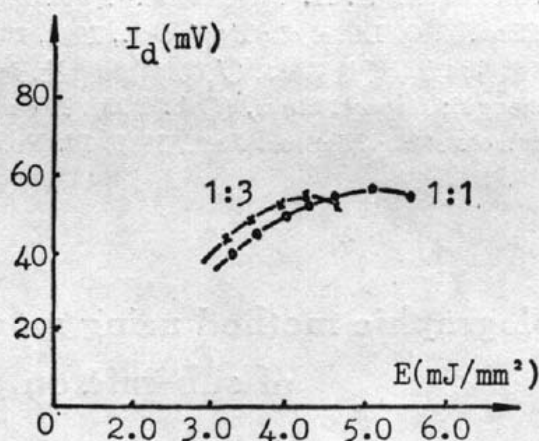


Fig. 9 corresponding relations between exposed energy and optical intensity diffracted from the gratings



Fig. 10 Photography of the $\Lambda=0.3116 \mu\text{m}$ photoresist's gratings

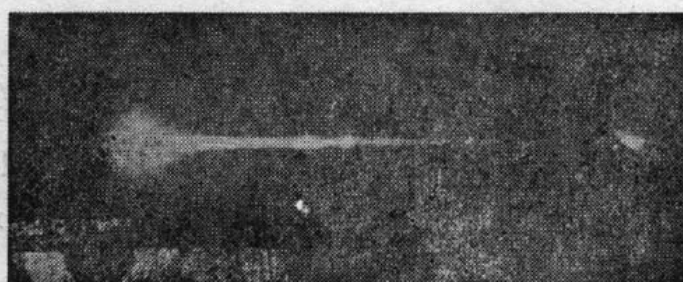


Fig. 11 Waveguide grating coupler in photoresist

衍射光强分布与曝光前样品所在处光强分布十分吻合。图 11 为一制得的波导光胶光栅耦合器照片，由耦合角算得的波导有效折射率 $N_0=1.5399$ 与用棱镜耦合 M 线测得的值 $N_0=1.5394$ 非常接近。应用这一方法制作波导光栅偏转器同样获得了成功。

五、结 束 语

利用单模光纤代替传统反射镜与准直镜进行全息干涉是一种制作亚微米波导光栅的可行方法。该法可以用来制作满足于集成光学需要的面积不小于 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ，周期约 $0.3 \mu\text{m}$ 光栅。光纤干涉系统具有操作灵活方便优点，尤其适于在溶液中进行全息干涉以使光栅周期能进一步缩小。本文对光纤干涉系统的分析与计算得到实验很好的映证，这对选择用于其它目的的光纤全息干涉系统具有一定参考意义。

感谢里摩日大学微波与光通讯实验室 J. Marcou 教授和 O. Froehly 教授所给予的支持。

参 考 文 献

- [1] W. W. Ng, C. S. Hong *et al.*; *IEEE Trans. Electron. Devices.*, 1978, **ED-25**, No. 10 (Oct), 1193.
- [2] D. V. Podlesnik, H. H. Gilgen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**, No. 12 (Dec), 1083.
- [3] S. T. Zhou, Z. Q. Lin *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 8 (Apr), 1270.
- [4] 大越孝敬等;《光学纤维基础》, (人民邮电出版社, 北京, 1979)。
- [5] K. Nziengui; *Rapport Stage*, (Lab. COM. L'Université de Limoges, France, 1985).
- [6] K. Okamoto *et al.*; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, No. 20 (Sep). 768.

A holographic method using mono-mode fibers for the production of sub-micron periodic gratings

LIU YONGZHI

(Department of Opto-Electronic Technology University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

(Received 9 November 1990; revised 11 January 1991)

Abstract

A holographic method using mono-mode fiber for the production of sub-micron periodic gratings is presented in this paper. The various factors influencing quality of the grating have been discussed in detail. All experiments demonstrate that this method is completely suitable to produce the high quality grating square having as large as $10 \times 10 \text{ mm}^2$.

Key words: integrated optics, waveguide grating, mono-mode fiber.