

文章编号: 0258-7025(2002)06-0550-03

# 探测波导全息光栅傅里叶变换 光谱的新方法

忽满利<sup>1</sup>, 刘继芳<sup>2</sup>, 李育林<sup>3</sup>, 谭玉山<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 西北大学物理系, 陕西西安 710069; <sup>2</sup> 西安电子科技大学, 陕西西安 710067;  
<sup>3</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710068; <sup>4</sup> 西安交通大学激光与红外技术研究所, 陕西西安 710049

**提要** 提出一种利用波导全息光栅分光元件, 通过测量波导光栅附近区干涉条纹, 经快速傅里叶变换达到测量光谱的新方法。讨论了波长测量范围和光谱分辨率。给出了在设计波导光栅、确定探测器时应该考虑的几个问题。对系统测量误差进行了分析。该光谱探测方法具有光谱分辨率高、波长范围宽和结构简单等优点。

**关键词** 波导全息光栅, 傅里叶变换, 光谱探测

中图分类号 O 657.3 文献标识码 A

## A Novel Means of Detecting Spectrum by Fourier Transform with Waveguide Holographic Grating

HU Man-li<sup>1</sup>, LIU Ji-fang<sup>2</sup>, LI Yu-lin<sup>3</sup>, TAN Yushan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Physics Department of Northwest University, Xi'an 710069

<sup>2</sup> Xidian University, Xi'an 710067

<sup>3</sup> Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

<sup>4</sup> Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

**Abstract** A novel method is proposed to measure spectrum with waveguide holographic grating, based on fast Fourier transform for the interference pattern from the diffraction of light through the side of a fiber grating. The range of measurable optical wavelengths and resolvable wavelength interval are discussed with considering the period length of waveguide holographic grating and parameters of CCD detector. This method of spectrum measurement has the advantages of high-resolution of spectrum, wide wavelength scope and simple structure etc.

**Key words** waveguide holographic grating, Fourier transform, spectrum detection

## 1 引言

在光纤通信、光纤传感及光谱分析等研究和应用中,常常需要对光信号作光谱实时探测。通常棱镜分光光谱仪的光谱分辨率低,不能满足技术要求。而光栅光谱仪结构复杂、造价高、体积大。两者不易同光纤传感器和光纤通信器件构成紧凑的实时检测与分析系统。在光谱探测系统中,分光元件是决定

各项性能参数的关键。光纤 Bragg 光栅 (FBG) 是一种性能优良的敏感元件,它在光通信和光学传感应用中是非常关键的元件<sup>[1,2]</sup>,通常人们将 FBG 用作窄带反射滤波器或光纤光栅传感器<sup>[3]</sup>。实际上光纤光栅同其他衍射光栅没有多大差别,也具有分光特性。光信号经过光纤光栅,耦合输出光的方向  $\alpha$  与光信号的波长  $\lambda$  和光纤光栅的周期  $\Lambda$  有关,即

收稿日期 2001-04-28;收到修改稿日期 2001-08-10

基金项目 西北大学青年科研基金(No. 99nw35)及国家自然科学基金(No. 60047002)资助项目。

作者简介 忽满利(1959—)男,西北大学物理学系副教授,博士,主要从事信息光学和光电子器件与技术研究。E-mail:

huml@nwu.edu.cn 或 malihu@yahoo.com.cn

$\sin\alpha = n_{\text{eff}} - \lambda/\Lambda$  这里  $n_{\text{eff}}$  为光纤有效折射率, 由于  $\alpha$  同波长有关, 因此可以通过直接测量耦合输出光强实现光谱探测。P. St. J. Russell 等验证了这一方法<sup>[4]</sup>。而 Froggatt 等通过测量前、后向传输光在光纤光栅区附近产生的干涉条纹, 经计算机对该条纹进行快速傅里叶分析, 达到测量光谱的目的<sup>[5]</sup>。这种方法虽具有结构简单, 光谱分辨率高的特点, 但光谱范围非常窄。

光波导和光纤一样具有传导光波的能力, 在波导中写入光栅, 形成波导光栅, 利用它作分光元件, 特别是当波导中的光栅周期可实时可擦重写时, 能够克服光纤光栅傅里叶光谱探测中的光谱范围窄的缺点。本文将讨论波导全息光栅傅里叶变换探测光谱的原理, 波长探测范围和波导光栅参数及探测器的性能对谱探测的影响。

### 2 波导全息光栅的结构

利用钛扩散或质子交换的方法在光折变晶体如  $\text{LiNbO}_3$  为基底的材料上制作条形波导, 利用材料的光折变效应在波导中写入一定周期的全息光栅, 便可形成波导全息光栅。图 1 是一种写入全息光栅的原理图。扩束、准直后的激光束经分光镜、反射镜入射到波导中, 两平面光波干涉产生周期光强分布, 由

于光折变效应波导中形成周期性的折射率相位栅。转动激光器改变两平面波入射到波导中的夹角, 便改变了相位栅的周期。遮挡两光束中的其中一束, 可以擦除写入的相位栅。

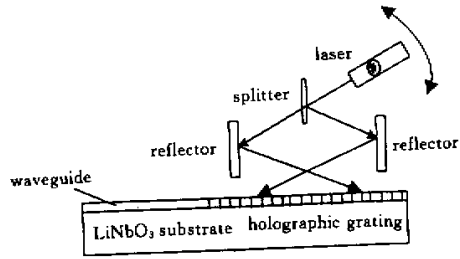


图 1 波导中全息光栅的写入

Fig.1 Scheme to write holographic grating in waveguide

### 3 波导全息光栅的分光原理

图 2 示出波导光栅傅里叶变换光谱探测原理图。待探测光经自聚焦透镜从 A 端耦合到波导中并沿波导传输, B 端镀有增反膜, 以增强对前向传输光的反射。

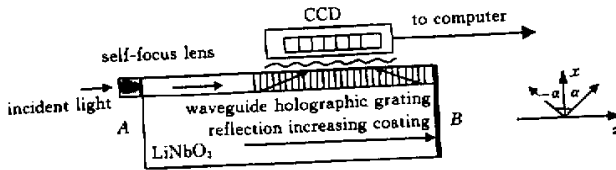


图 2 波导光栅傅里叶变换光谱探测原理

principle of detecting spectrum by Fourier transform with waveguide holographic grating

光经过波导光栅衍射, 前、后向传导模产生相应的辐射模, 两者在  $xz$  平面内同  $x$  轴的夹角分别为  $\alpha$  和  $-\alpha$ 。这一角度大小同输入光的波长和光纤光栅的关系为<sup>[4]</sup>

$$\sin\alpha = n_{\text{eff}} - \frac{\lambda}{\Lambda} \tag{1}$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为波导有效折射率,  $\Lambda$  为波导光栅周期,  $\lambda$  为波长。前后向两耦合输出光在波导光栅界面产生干涉条纹, 条纹的分布状态由输出光的方向来决定。这样波导光栅就将待测光谱转换成波导光栅附近可用线阵 CCD 探测的干涉图样。其光强分布为

$$I(z) = I_0 [1 + \gamma \cos(K_z \cdot z)] \tag{2}$$

这里  $I_0$  为平均直流光强,  $\gamma$  为条纹反衬度,  $K_z = \sin\alpha 4\pi/\lambda$ ,  $K_z$  为空间频率。

如果输入信号光是多波长成分, 则空间强度分布图样是周期不同的正弦分布的干涉条纹的线性叠加。这样光谱由所测条纹光强减去直流成分的傅里叶变换给出

$$I(\lambda) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \gamma \cos \frac{4\pi z}{\lambda} \left( n_{\text{eff}} - \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \times \exp \left[ \frac{i4\pi z}{\lambda} \left( n_{\text{eff}} - \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \right] dz \right| \tag{3}$$

以上计算可通过计算机进行快速傅里叶变换来实现。

## 4 波长测量范围和光谱分辨率

当波导中的光栅周期一定时,系统就具有一定的光谱探测范围。这可由(1)式知, $\alpha$ 的大小为 $0 \sim 2/\pi$ ,当 $\alpha = 0$ 或 $2/\pi$ 时, $\lambda = n_{\text{eff}}\Lambda$ 或 $(n_{\text{eff}} - 1)\Lambda$ ,因此最大光谱范围在以 $\lambda = \lambda_0 = (n_{\text{eff}} - 1/2)\Lambda$ 为中心,波长范围为 $\Delta\lambda = \Lambda$ 的间隔内。可见对于一定周期的光栅就有对应的光谱探测中心和光谱范围。为了扩展光谱探测范围可改变波导光栅周期的大小,每改变一次光栅周期,便移动了光谱探测中心,如此重复若干次就可将可探测光谱展得很宽。另一方面,由于该光谱探测方法是由测量波导光栅界面附近的干涉条纹,通过傅里叶分析的方法来实现的,因此波长测量范围及分辨率还要受到线阵 CCD 上所能探测和分辨的条纹周期大小的限制。假定 CCD 上探测的强度条纹由  $N$  个像元组成( $N = 2^m$ ,  $m$  为整数),CCD 像元间距 (pitch) 为  $p$ ,显然能探测的最小条纹周期需两个像元,因此相应的空间频率范围为  $0 \leq K_z \leq \frac{2\pi}{2p} = \frac{\pi}{p}$ 。  $|\Delta K_z| = \frac{4\pi\Delta\lambda}{\lambda^2} n_{\text{eff}}$ ,光谱测量范围可近似表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4n_{\text{eff}}p} \quad (4)$$

可见减小像元间距,可提高光谱测量范围,但不会超过  $\Lambda$ 。光谱分辨率由 CCD 阵列长度决定,可分辨的最小空间频率为  $|\delta K_z| = \frac{2\pi}{Np}$ ,对(1)式两边求微商  $|\delta K_z| = \frac{4\pi\delta\lambda n_{\text{eff}}}{\lambda^2}$ ,因此最小可分辨的波长间隔为

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}Np} = \frac{2\Delta\lambda}{N} \quad (5)$$

显然增加 CCD 的像元个数可提高光谱分辨率。

## 5 波导光栅周期和 CCD 参数确定

1) 波导光栅周期:由公式(1)知,当探测中心波长为  $1.5 \mu\text{m}$ ,取  $n_{\text{eff}} = 2.7$ ,则波导布喇格光栅的周期约为

$$\Lambda = \lambda / (n_{\text{eff}} - 1/2) = 0.6 \mu\text{m}$$

2) CCD 像元间隔:当波长测量范围  $\Delta\lambda = 42 \text{ nm}$ ,取  $n_{\text{eff}} = 2.7$ ,中心波长  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$  时,CCD 探测器像元间距为

$$P = \frac{\lambda^2}{4n_{\text{eff}}\Delta\lambda} \approx 5 \mu\text{m}$$

3) CCD 像元数:当光谱分辨率为  $\delta\lambda = 0.041 \text{ nm}$ ,取  $\Delta\lambda = 21 \text{ nm}$ , $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ , $n_{\text{eff}} = 2.7$ , $p = 5 \mu\text{m}$  时,由(5)式可得 CCD 像元数

$$N \approx 1024$$

## 6 结 论

利用波导全息光栅作分光元件,结合快速傅里叶变换进行光谱探测的方法可以用于光纤传感器、波分复用光通信、光谱分析仪等。具有结构简单、光谱分辨率高、光谱探测范围宽等特点。分析计算表明 CCD 探测器的像元间隔和像元数比这种光谱探测原理本身对波长测量范围和光谱分辨率的限制强烈得多。即便如此,通过在波导中依次写入不同周期光栅和测量,可以覆盖较宽的波长范围。因此采用性能参数较高的 CCD 探测器时,波长测量范围和光谱分辨率还会有所提高。

## 参 考 文 献

- 1 Qin Zixiong, Zeng Qingke, Feng Dejun *et al.*. The development and theory of fiber Bragg grating based wavelength add drop multiplexers in optical networks [J]. *Progress in Physics* (物理学进展), 2000, 20(2):182~197 (in Chinese)
- 2 Graham Duck, Myo M. Ohn. Distributed Bragg grating sensing with a direct group-delay measurement technique [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(2):90~92
- 3 Jia Hongzhi, Li Yulin, Hu Manli. Analysis of stain and sensitivities temperature of long-period fiber gratings [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, 28(8):711~714 (in Chinese)
- 4 P. St. J. Russell, R. Ulrich. Grating-fiber coupler as a high-resolution spectrometer [J]. *Opt. Lett.*, 1985, 10(6):291~293
- 5 Mark Froggat, Turan Erdogan. All-fiber wavemeter and Fourier-transform spectrometer [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(14):942~944