

文章编号: 0529-6579 (1999) 06-0034-05

光纤 Bragg 光栅及其光学特性测量^{*}

傅思镜, 梁丽贞, 曹惠英, 刘惠子, 林晓霞

(中山大学物理学系, 广州 510275)

摘 要: 光纤 Bragg 光栅的研究和应用已成为当前光通信国际热点技术课题. 扼要介绍了光纤 Bragg 光栅的工作原理和主要光学特性, 着重描述用实验室常用仪器测量其主要光学特性的方法.

关键词: 光纤 Bragg 光栅; 测量

中图分类号: TN 25; TP 391 **文献标识码:** A

Hill 等^[1]发现掺锗光纤的光敏(光折变)效应, 随后 Meltz 等^[2]利用 244 nm 紫外激光干涉从单模光纤侧面成功地写入 Bragg 光栅. 此后, 人们发现利用光纤 Bragg 光栅可以更方便制作出性能更好的光纤激光器、光纤光放大器、光纤色散补偿器、光纤波分复用器等光纤功能器件. 光纤光栅在当前国际新发展的全光纤集成通信系统中亦有明朗的应用前景. 因此, 光纤光栅倍受世人瞩目. 普遍认为, 掺锗 Bragg 光栅(GDBG)的开拓是继掺铒光纤光放大器(EDFA)之后光纤通信领域的又一重大技术突破, 将成为光纤通信发展的又一个重要里程碑. 它的应用已成为当前一个全球性的热点技术课题. 因此, 了解光纤光栅的工作原理和主要光学特性, 并掌握其主要光学特性使用实验室常用仪器的测量方法, 对科技研究和教育部门, 尤其对我国的高等学校具有重要的现实意义.

1 光纤 Bragg 光栅工作原理及其主要光学特性

由耦合模方程^[3]

$$\frac{dA_1}{dz} = -jK_{12}A_2\exp(j\Delta\beta z), \quad \frac{dA_2}{dz} = -jK_{12}^*A_1\exp(j\Delta\beta z) \quad (1)$$

A_1 、 A_2 分别为正反向传输波归一化振幅, K 为耦合系数. 其中,

$$\Delta\beta = \beta_1 + \beta_2 - l\frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

Λ 为光栅周期, l 为光栅级数, β_1 、 β_2 是传播常数, 对式(1)两边进行微商, 并代入边界条件

$$A_1(0) = 1, A_2(0) = 0, \quad \frac{dA_1}{dz} = 0, \quad \frac{dA_2}{dz} = jk_{12}A_2\exp(-j\beta L)$$

^{*} 基金项目: 广东省自然科学基金(960025)资助项目

收稿日期: 1999-02-04 作者简介: 傅思镜, 男, 1945 年生, 副教授.

式中, $B = (\beta_2 + K_{22}) + (\beta_1 + K_{11}) - l \frac{2\pi}{\Lambda}$, 则可解得 $A_1(z)$ 、 $A_2(z)$. 所以两导模的归一化功率为

$$\begin{aligned} P_1(z) = |A_1(z)|^2 &= \frac{K_{12}K_{12}^* \sinh^2[G(z-L)]}{(B^2/4)\sinh^2(GL) + G^2 \cosh^2(GL)} \\ P_2(z) = |A_2(z)|^2 &= \frac{(B^2/4)\sinh^2[G(z-L)] + G^2 \cosh^2[G(z-L)]}{(B^2/4)\sinh^2(GL) + G^2 \cosh^2(GL)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $G = G^\pm = [K_{12} \circ K_{12}^* \pm (B^2/4)]^{1/2}$, G 的上下标 +、- 号表示光波沿正、反方向传输两种情况. 当光栅结构适当, 使 $\Delta\beta = 0$, 即满足相位匹配条件时, 两导模的功率变为

$$\begin{aligned} P_1(z) = |A_1(z)|^2 &= \frac{\sinh^2[|K_{12}|(z-L)]}{\cosh^2[|K_{12}|L]} \\ P_2(z) = |A_2(z)|^2 &= \frac{\cosh^2[|K_{12}|(z-L)]}{\sinh^2[|K_{12}|L]} \end{aligned} \quad (4)$$

P_1 、 P_2 的曲线如图 1 所示, 可以看出, 坐标从 0 变到 L , 正向传输模的功率 $P_1(z)$ 从最大值变到 0; 而反向传输模的功率 $P_2(z)$ 从 0 变到最大值. 这说明在耦合区内, 正向传输模的功率被耦合到了反向传输模中.

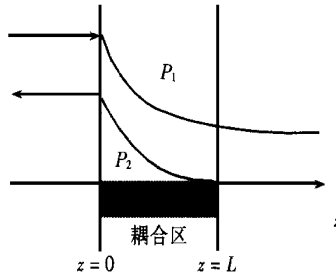


图 1 反向传输导模之间耦合时两导模的功率分布

Fig. 1 The power distribution of two coupling guided modes

由式(4)可以得到满足相位匹配条件时的反射率满足

$$R = \frac{P_2(0)}{P_1(0)} \tanh^2 \left[\frac{\pi n_1 L}{\lambda_B} \right] \quad (5)$$

其中, $n_1 = \Delta n / \bar{n}$, 为调制折射率, L 为光栅长度, λ_B 为 Bragg 波长. 说明反射率是宗量为 $(|K_{12}| \circ L)$ 的双曲正切函数的平方. 只要光栅足够长, 总可以使反射率 $R = 1$, 显然在不满足相位匹配条件时, 反射率会显著变小. 在 Bragg 光栅反射滤波器中往往取正反向波传输常数相等, 则由相位匹配条件可将式(2) 写为 $\beta = \pi l / \Lambda$.

将有效折射率 $N_e = \beta / K_0$ 代入, 则得

$$\lambda_B = 2N_e \Lambda / l \quad (6)$$

上式称为 Bragg 条件, 满足这种现象的反射称为 Bragg 反射, 此时的波长称为 Bragg 波长, Bragg 光栅反射带宽可写为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = S \cdot \sqrt{\frac{n_1}{2n_0} + \frac{1}{N}} \quad (7)$$

对强光栅来说 $S = 1$, 对弱光栅 $S = 0.5$, N 为光栅周期数. 因此一个均匀周期的光栅就可以反射以 λ_B 为中心, 带宽 $\Delta\lambda$ 之内的一切波长, 而变周期(chirp)光栅可以制作宽带滤波器等. 由式(6)可知, 改变光栅周期 Δ 和有效折射率 N_e 均可以改变 Bragg 波长, 对 2 个参量之一进行调制就可以制成 Bragg 光栅. 由上述可知基本光栅性能(特性)参数设计要点为:

- (1) 中心反射波长 $\lambda_B = 2n\Delta$, $\Delta = \lambda/(2\sin \theta)$, (对全息法);
- (2) 最大中心反射率 $R = \tanh^2(\pi n_1 L/\lambda_B)$;
- (3) 反射带宽(FWHM) $\Delta\lambda = 2n\Delta$.

2 光纤 Bragg 光栅中心波长和反射带宽的测量

2.1 测量实验装置

实验装置框图如图 2 所示.

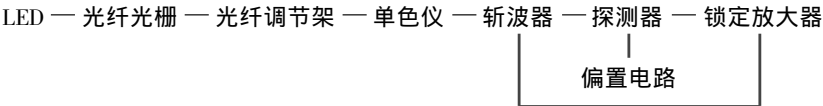


图 2 测量实验装置框图

Fig. 2 Scheme of measurement set-up

2.2 测量实验方法描述

- (1) 选择 LED 的发射光波带宽必须覆盖光纤 Bragg 光栅以 λ_B 为中心的带宽范围, 并使 λ_B 尽量落在 LED 发射光波峰值波长附近.
- (2) 先将 LED 尾纤输出端和光纤光栅两端光纤分别与光纤活动连接器(跳线)熔融接好, 然后用法兰盘将 LED 或光纤光栅相连接. 光纤调节架夹住一根跳线的一端, 使它对准单色仪输入端狭缝, 而跳线的另一端插入法兰盘的一边, 这样更换探测信号时就不影响调节好进入单色仪输入狭缝的光路.
- (3) 单色仪用刻线密度 600 条/mm 的近红外反射光栅替换紫外至可见波长的反射光栅. 测量前先将单色仪波长转盘读数调在接近 LED 发射波长低端, 这时 WDG 500-1 型单色仪(本实验用)波长刻度盘读数乘 2 就是所测近红外光谱波长值.
- (4) 斩波器斩波频率视探测器要求而定. 例如用硫化铅探测器, 斩波频率可选 40~60 Hz, 可获得较高的探测灵敏度.
- (5) 硫化铅探测器, 其信号是电压型的, 需要有合适的偏置电路. 图 3 是实验中设计的一种简单偏置电路.
- (6) 开启斩波器、偏置电路和锁定放大器, 可从锁定放大器幅值输出显示器看到系统本身的噪声, 根据它确定锁定放大器的灵敏度选择, 同时也可清楚地看到, 当开启 LED, 有信号给锁定显示放大器时, 幅值输出值明显减小, 说明噪声得到有效的抑制.
- (7) 一般光纤 Bragg 光栅的反射带宽只有几个埃(本实验用的 $\Delta\lambda = 0.272\text{ nm}$) 或更小. 因此测量靠近其中心波长 λ_B 值(本实验用的 $\lambda_B = 1\,554.032\text{ nm}$) 时, 要求每隔 0.1 nm 读一个锁定放大器幅值输出值.
- (8) 发光二极管 LED 输出光很弱(本实验用的边发射 LED 输出光功率在注入电流 60 mA 时只有 30 μW 左右), 经过单色仪后输出最大只有几十 nW. 为了尽量提高探测灵敏

度, 要求信号输出功率最大限度进入探测器。可是 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右近红外光在我们视觉范围之外。因此, 我们先用 He-Ne 激光照射光纤调节架夹住那根光纤跳线的另一端, 从单色仪输出狭缝可看到 He-Ne 激光的输出光点位置, 然后用探测器对准, 这时光纤调节架夹住的跳线一端固定不动, 另一端通过法兰盘方便地将 LED 或 LED 与光纤光栅替换 He-Ne 激光器进行测量。

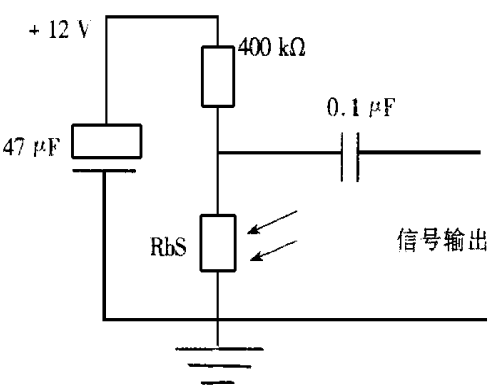


图 3 探测器偏置电路
Fig 3 The biasing circuit of photodetector

3 讨 论

3.1 关于探测器的选择和使用

探测器的波长响应范围与 LED 发射波长带宽、光纤 Bragg 光栅带宽三者相吻合。本实验选择 PbS 作探测器, 它的波长响应为 $0.8\sim3.2\text{ }\mu\text{m}$, 如 2.3 (1) 所述, 后两者的带宽都落在这范围内。还可以选择锗探测器, 它在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近有相当高的量子效率, 它的响应度约 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ 量级, 是电流型的信号, 可直接接光电检流计测量, 或接线性放大器驱动记录仪测量, 其缺点是暗电流较大, 使测量系统噪声较大。

使用图 2 测量装置, 不论选择何种探测器都要求它有足够大的光敏面积和灵敏度, 否则调节和分辨不同波长的响应就很困难。

3.2 关于实验测量结果

本实验测量结果与用深圳飞通光电技术有限公司的进口专用仪器测量的结果比较, 如图 4 所示。

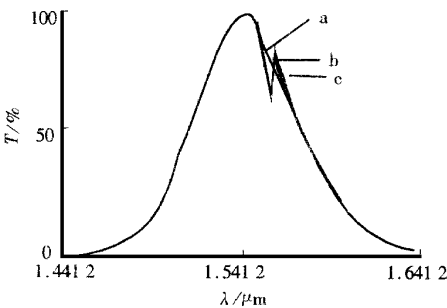


图 4 测量结果比较
Fig 4 The comparison of measurement results

- (a) 用实验室常用仪器测得的 LED 发射光谱;
- (b) 以 LED 作光源的光纤光栅透射光谱;
- (c) 用进口专用仪器测得的用 LED 作光源的光纤光栅透射光谱

图 4 (a)、(b) 的光谱曲线是重复 5 次测量取平均值拟合的结果。从图 4 (b)、(c) 可见光纤光栅的中心波长 λ_B 的值吻合得很好, 而图 4 (b) 带宽略偏大, 且图 4 (c) 带宽 $\Delta\lambda$ 的针状朝下的尾峰在图 4 (b) 测不到。分析其原因: ① 测量实验装置存在小于 (有时

等于) 0.01 mV 的系统本底噪声, 使锁相放大器幅值读数跳变较快较大, 难以准确判定该波长的输出幅值; ② WDG 500-1 型单色仪的波长精度是 0.1 nm, 加上单色仪内部机械结构的影响, 实验难以得到准确精确的波长值; ③ 实验用 MREDSP5001-2 型 LED 是普通 LED 光源, 受环境温度、注入电流的影响, 它的输出功率会随时间有一定的变化。因此, 进一步提高 LED 光源的输出功率和稳定度, 尽量减小单色仪出射狭缝宽度, 并用微型计算机配合处理测量数据, 使之在 0.1 nm 内增加测量的次数, 使用较好的数据拟合规律等等都将是进一步提高实验测量精度, 使实验测量进一步逼近进口专用仪器测量结果的有效办法。

参考文献:

- [1] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al Photosensitivity in optical fiber wave-guides application to reflection filter fabrication [J] . Appl Phys Lett, 1978, 32: 647~649.
- [2] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H Formation of Bragg gratings in optical fiber by a transverse holographic method [J] . Opt Lett, 1989, 14 (15): 823~825.
- [3] 秦秉坤, 孙雨南. 介质波导及其应用 [M] . 北京: 北京理工大学出版社, 1991. 118~196.

Optical Fiber Bragg Grating and Its Characteristic Measurement

FU Si-jing^{*}, LIANG Li-zhen, CAO Hui-ying, LIU Hui-zi, LIN Xiao-xia

Abstract: The operating principle of optical fiber Bragg grating and its main optical characteristics were introduced. The experimental method of the optical measurement with usual laboratory instruments was described.

Keywords: optical fiber Bragg gratings; measurement

^{*} Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China