

实验九 光纤光栅器件测量

一 实验目的

1. 了解光纤光栅的工作原理及相关特性；
2. 了解光纤激光器的工作原理及特性，掌握其参数测量方法；
3. 了解光纤传感器的工作原理及特性，掌握温度传感的测量方法。

二 实验原理

2.1 光纤光栅

光纤光栅于1978年，由拿大渥太华通信研究中心的Hill等人首次提出。他们在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏效应，并采用驻波写入法制成世界上第一根光纤光栅。1989年，美国科学家Meltz等人实现了光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，简称FBG）的紫外激光侧面直写技术，使光纤光栅的制作技术实现了突破性进展。进入20世纪90年代后期，人们将光纤至于高压氢气中，使上述光照引起的折射率的变化上升至到了 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ，大大提高了光纤写入灵敏度。随着光纤光栅制造技术的不断完善，其应用的领域也日益增多，从光纤通信、光纤传感到光信息处理的整个领域，都将由于光纤光栅的实用化而发生重大变化，光纤光栅技术是光纤技术中继掺铒光纤放大器（EDFA）技术之后的又一重大技术突破[16, 17, 18]。

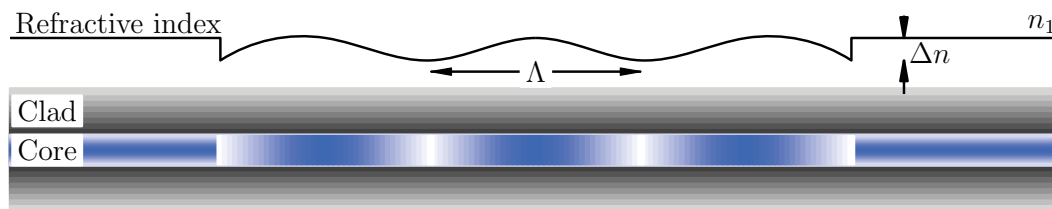


图 9.1: 光纤光栅的结构以及折射率分布示意图。

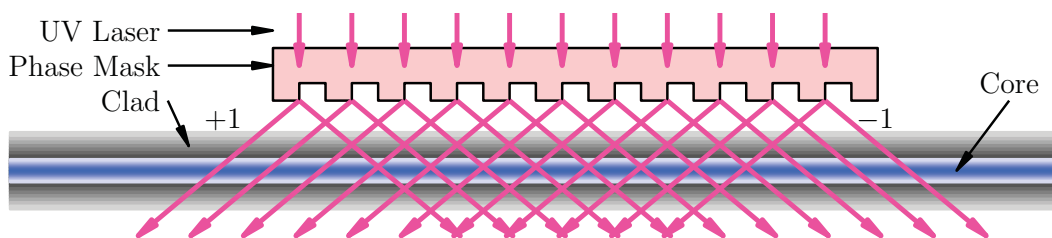


图 9.2: 光纤光栅的一种制作方法：位相掩模侧面直写方法的原理图。

光纤光栅的结构如图9.1所示。在普通的光纤芯中掺入光敏性杂质，然后通过紫外激光的照射，形成折射率周期调制分布的结构，如图9.1所示。在光纤芯内，光栅分布区域的折射率分布比较复杂，有均匀正弦分布，非均匀正弦分布（啁啾光栅），均匀方波光栅，非均匀方波光栅等等。对于最简单的均匀正弦光栅结构，其芯层内的折射率可以表示为：

$$n = n_1 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x\right) \quad (9.1)$$

其中 Δn 为折射率变化的幅度， Λ 为折射率变化的空间周期， x 为光纤轴向。由于周期结构的存在，使得入射光的模式通过周期结构倒格矢提供的动量，能够转换为其它模式。在忽略模式泄露，偏振效应等损耗情况下，可以通过耦合模方程求解光纤光栅的本征态和本征方程。

理论分析结果表明，光纤光栅结构具有一个反射频带，对应频带的中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (9.2)$$

在反射波长的中心位置 λ_B 处，反射率 $R = 1$ ；当波长偏离 λ_B 时，反射率迅速 R 迅速衰减到零。因此，布拉格光栅的作用的实质就是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或反射镜。从 λ_B 的表达式中可以看出， λ_B 的大小与光栅的结构参数密切相关，包括折射率分布（体现为有效折射率 n_{eff} ），周期长度 Λ 等等。基于这一事实，利用布拉格光栅结构，可以实现多种变量的传感。这些器件具有反射带宽较宽、附加损耗较小、非常容易与光纤耦合，可与其它光电器件集成，不受环境灰尘影响等一系列优点。

光纤光栅主要分两大类：一是Bragg光栅（也称为反射或短周期光栅），这种光栅的周期较小，即 Λ 较小，因此倒格矢所提供的动量 $2\pi/\Lambda$ 较大；完全能够将正向传播的模式，耦合到反向传输模式中。这种光栅就是我们上面所讨论的类型。第二中光纤光栅叫透射光栅（也称为长周期光栅），这种光栅的周期 Λ 很大，因此倒格矢动量很小，可以将光纤芯的模式，耦合到包层内的模式上。芯内模式与包层模式沿同方向传输，因此动量之差很小。光纤光栅从结构上可分为周期性结构和非周期性结构，从功能上还可分为滤波型光栅和色散补偿型光栅，色散补偿型光栅是非周期光栅，又称为啁啾光栅(chirp光栅)。目前光纤光栅的应用主要集中在光纤通信领域和光纤传感器领域。

光纤光栅是利用光纤中的光敏性制成的，所谓光敏性是指激光通过掺杂光纤时，光纤的折射率将随光强的空间分布发生相应变化的特性。为了增加光纤的光敏特性，可以通过掺杂的方法（主要是硼，锗等元素），刷火，以及载氢等方法。所用激光的波长主要是244nm的中紫外光。由于光栅的形成依赖于激光光束的空间干涉条纹，因此对激光的空间相干性要求较高。

图9.2显示了相位掩模法制作光纤光栅的原理图。其中位相掩模板是衍射光学结构，将入射光波分为 ± 1 级的两个光束，两光束相干涉，形成明暗相间的条纹，因此相应位置处的折射率就随光强变化，形成光栅结构。位相掩模板是一个特殊的光栅（价格昂贵），能够增强 ± 1 的衍射强度，而抑制0级的衍射强度。所得到的布拉格光栅周期是掩模板周期的一半。此外还有很多其他制作方法，例如直接写入法、在线成栅法、全息干涉法等等，此处不再赘述。

2.2 光纤激光器

全光纤可调谐激光器是高速大容量光通信系统中的关键部件，特别是它较宽的增益带宽和简便稳定的调谐结构，以及其激光波长恰好处在光通信1500nm波段等诸多独特优点，越来越引起广大光通信工作者的极大重视，已成为激光器研制领域的一个热点。在光纤通信中，稀土掺杂的光纤激光器较之半导体激光器有如下优点：

1. 不必经过光电转换可直接对光信号放大。在不改变原有的噪声特性和误码率前提下，可以直接放大数字、模拟或者二者的混合数据格式。
2. 光纤激光器的激射波长由基质材料的稀土掺杂剂所决定，不受泵浦光波长的控制。
3. 光纤激光器和光纤放大器与现有的光纤器件（如耦合器、偏振器和调制器）完全相容，可以制作出完全由光纤器件组成的全光纤传输系统。通过定向耦合技术和Bragg反射器技术，可以制作出窄线宽、可调谐的光纤激光器。
4. 光纤激光器可以作为光孤子源。掺铒光纤锁模激光器能直接产生足够功率的超短光脉冲；同时由于光脉冲在光纤谐振腔中传输时的非线性效应，在适当的条件下，可产生脉宽为数十或数百飞秒的变换极限双曲正割形光脉冲，是光孤子通信的理想光源。

光纤调谐激光器常用的调谐方法有旋转光栅、调节腔内标准具角度、利用声光滤波器、电调液晶标准具等等，调谐范围为几纳米到几十纳米。非光纤调谐器件与光纤之间的耦合将不可避免地增大腔内的插入损耗，从而导致激光器的效率并增加激光阈值。可调谐光纤光栅是光纤器件，用光纤光栅作为调谐装置能与光纤兼容，可有效克服非光纤调谐方法所造成的插入损耗问题。本实验使用光纤光栅调谐装置调谐环形腔掺铒光纤激光器的输出波长，实现窄线宽可调谐激光输出。实验原理如图 9.3所示。

2.3 光纤光栅传感器

随着紫外写入光纤光栅制作技术的日益完善，光纤光栅在光纤传感领域的应用得到了迅速发展。光纤光栅Bragg波长受应力和温度特性的影响，当对光纤光栅Bragg波长的偏移进行测量，即可测知其所受到的应力和温度，这是光纤光栅用于光纤传感的主要工作原理。

光纤光栅传感器的应用前景十分广阔。由于光纤光栅传感器具有抗电磁波干扰、同时尺寸小（标准单根光纤的直径大约为125 μm ）、重量轻、耐温性好、重复利用、传输距离远（传感器到解调端可达几公里）、耐腐蚀性、高灵敏度特性、弹性好易形变等优点。早在1988年光纤传感年就成功地在航空航天领域中作为检测技术。同时光纤光栅传感器还可应用于化学、材料、水利、船舶、电力、煤矿等各个领域。在土木工程领域的混凝土组件和结构中，测定其结构的完整性和内部应变状态，从而建立灵巧结构，并进一步实现智能建筑。光纤光栅型传感器除了光纤传感器的基本优点之外，还具有分辨率高、重复性好、稳

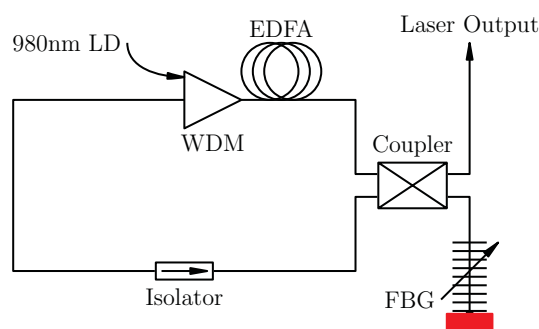


图 9.3: 可调谐光纤光栅激光器原理图。

定性高、测量动态范围大，不必考虑光源强度的随机起伏波动，对光路的损耗不敏感，能满足多参量、复用式、阵列式、分布式传感的要求。

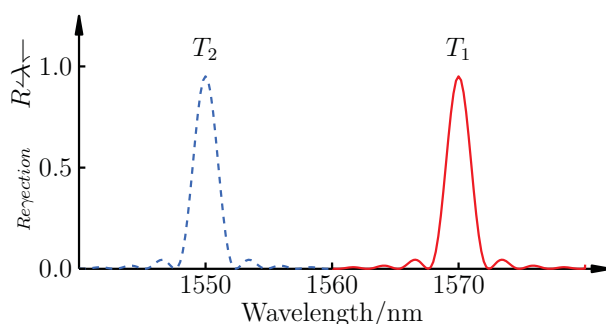


图 9.4: 光纤光栅反射谱随温度变化示意图。

光纤光栅反射谱如图 9.4所示。光纤光栅中最重要的特性指标是其Bragg反射波长 λ_B ，可以表示为： $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 其中， n_{eff} 是光纤光栅的有效折射率， Λ 为光栅周期。当光纤光栅的温度升高时，由于光纤材料的热光效应，其有效折射率会增加；而且由于热胀冷缩效应，光栅周期也会增长，从而使 λ_B 向长波长方向移动，波长偏移量 $\Delta\lambda_T$ 为：

$$\Delta\lambda_T = [(\alpha + e)\Delta T]\lambda_B$$

其中 α 为光纤材料的热胀系数； ΔT 为温度变化量； e 为热光系数。当光纤光栅发生应变时，一方面由于光纤沿轴向和径向的伸缩，导致光栅周期改变；另一方面光纤的轴向和径向的伸缩还会产生光弹效应，它会使光纤的有效折射率发生改变，从而使Bragg波长 λ_B 产生偏移，其波长偏移量 $\Delta\lambda_S$ 为

$$\Delta\lambda_S = (1 - P_e)\epsilon\lambda_B$$

其中 P_e 为光弹性常数， ϵ 为光纤光栅的应变。本实验测量用光纤光栅作温度传感时的定标曲线。

三 实验装置及操作

本实验要求正确搭建光路，得到光纤激光器的激光输出，并测量其 $P_O \sim P_p$ 特性曲线，根据特性曲线，求出阈值泵浦功率（电流）。同时，根据光纤光栅的反射中心波长，搭建光纤光栅传感器件，并测出温度传感曲线。

3.1 光纤激光器特性测量

光纤激光器的结构示意图可参考图9.5；也可以自行设计实验光路。
实验内容与操作步骤如下：

1. 按照图 9.5所示光路连接实验装置，将实验仪主机背板通讯接口用串行通讯电缆连接至计算机主机COM1口，打开实验仪主机电源后再运行计算机上的测试软件。
2. 光纤激光器 $P_O \sim P_p$ 曲线测量

(a) 连接光纤激光器输出端至光功率计输入端OPM.IN，OPM量程置1mW档。

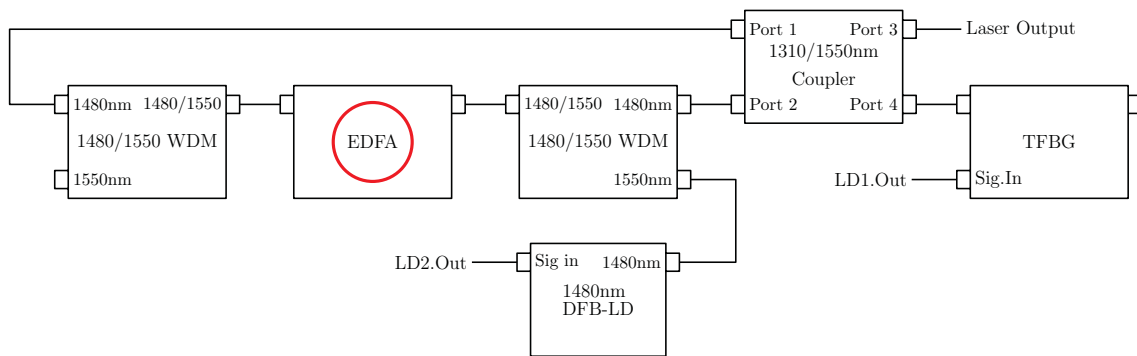


图 9.5: 可调谐光纤光栅激光器实验装置示意图。

- (b) 连接1480nm泵浦激光器控制信号至LD2.OUT，设置LD2工作模式（MOD）为恒流模式（ACC），驱动电流（ I_c ）置为0，然后缓慢增加1480nm泵浦激光器输出功率，从0至25mW每隔1mW记录一次OPM功率数据；或者直接读取泵浦激光器的驱动电流值，从0mA到300mA，每隔10mA记录一次数据。
- (c) 作光纤激光器 $P_O \sim P_p$ 曲线，求光纤激光器泵浦阈值。

3. 光纤激光器输出光谱测量：

- (a) 接上面的实验结果，连接光纤激光器输出端至C波段光谱分析器，输入狭缝置2mm，输出狭缝置0.1mm。
- (b) 将光谱分析器功率探头输出连接至光功率计输入端OPM.IN，OPM量程（RTO）置100uW档。
- (c) 设置LD2工作模式（MOD）为恒流模式（ACC），驱动电流（ I_c ）置为300mA。
- (d) 测量光纤激光器输出光谱，波长范围1540-1580nm，波长间隔0.1nm。
- (e) 从测量曲线上求光纤激光器峰值波长和线宽。

3.2 光纤传感器参数测量

实验装置和光路见图9.6。

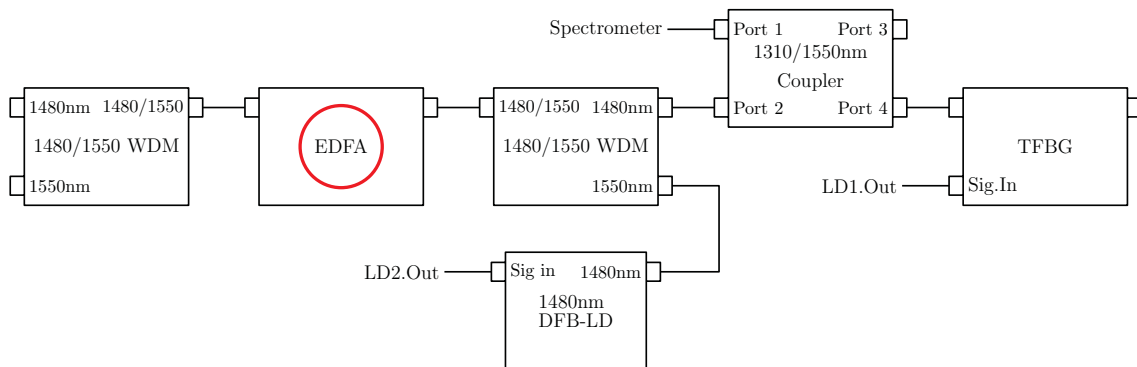


图 9.6: 光纤传感实验光路图。

光纤光栅温度传感器定标

1. 将1310nm/1550nm耦合器输出端PORT3和PORT4按照图 9.6示连接。
2. 连接TFBG控制信号至LD1.OUT，设置温度为0°C，观察测试软件上的监控数据，待温度稳定后记录实际温度 T_1 。
3. 测量耦合器PORT1端输出光谱，波长范围1540 ~ 1580nm，波长间隔0.1nm。
4. 求TFBG反射损耗谱，记录峰值波长 λ_1 。
5. 设置TFBG温度为50°C，待温度稳定后记录实际温度 T_2 。
6. 测量耦合器PORT1端输出光谱，波长范围1540 ~ 1580nm，波长间隔0.1nm。
7. 求TFBG反射损耗谱，记录峰值波长 λ_2 。
8. 根据上述实验结果，求光纤光栅温度传感器定标关系式。

四 思考题

完成实验后，请思考如下的问题：

1. 光纤光栅的分为哪两大类，它们各具有什么样的特点？
2. 如何在实验上制作光纤光栅？以相位掩模方法为例详细说明。
3. 光纤激光器的工作原理是什么？光纤激光器相比于普通激光器有什么优缺点？
4. 光纤光栅传感器有什么优缺点？能够用在哪些场合？