

第3章

光器件特性参数测试实验

要构成光纤通信或光纤传感应用系统,除光源和光电检测器件之外,还需要一些无源或有源器件,它们是构成光纤传输或传感系统的重要部分。光纤通信和传感技术的进一步发展,将在很大程度上依赖器件的发展。

本章介绍光纤系统中常用的几种无源及有源器件,重点介绍器件的工作原理、特性参数的定义及其测试方法。

3.1 光纤活动连接器损耗测试

【引言】

光纤活动连接器也称为适配器,是连接两根光纤或光缆形成连接光通路且可以重复装拆的无源器件。其外形与普通电缆连接器有点相似,但其内部结构复杂,机械加工精度要求高。其主要技术要求是插入损耗小、拆卸方便、互换性好、重复插拔的寿命长,还具有将光纤与有源器件、光纤与其他无源器件、光纤与系统或仪表进行活动连接的功能。

【实验目的】

- (1) 了解光纤活动连接器插入损耗、回波损耗的测试方法。
- (2) 掌握光纤活动连接器的正确使用方法。
- (3) 测量活动连接器的插入损耗和回波损耗。

【实验原理】

1. 光纤活动连接器

连接器的基本结构包括接口零件、光纤插针和对中三部分。光纤插针的端面有平面、球

面(PC)或斜面(Angled Physical Contact, APC)三种,如图 3-1(a)所示。对中可以采用套管结构、双锥结构、V 形槽结构或透镜耦合结构。光纤插针可以采用微孔结构、三棒结构或多层结构,因此连接器的结构也是多种多样的。采用套管结构对中和微孔结构光纤插针固定的效果最好,又适合大批量生产,得到了广泛应用,如图 3-1(b)所示。两插头与转接器的连接有 FC 型、SC 型和 ST 型,如图 3-2 所示。FC 表示卡口-螺纹连接结构,SC(Square/Subscriber Connector)表示轴向插拔矩形外壳结构,ST(Spring Tension)表示弹簧带键卡扣结构。

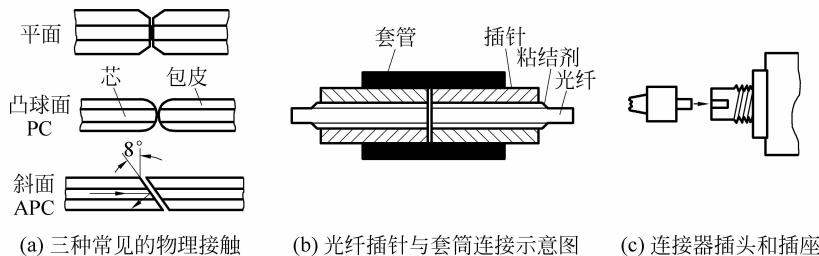


图 3-1 常用连接器物理接触和插座

38

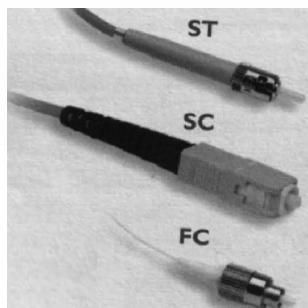


图 3-2 FC、SC、ST 型光纤连接器

2. 光纤活动连接器的主要性能指标

评价一个活动连接器的性能指标有很多,其中最重要的指标有 4 个,即插入损耗、回波损耗、重复性和互换性。

(1) 插入损耗。光纤活动连接器插入损耗是指光纤中的光信号通过活动连接器之后,其输出光功率相对输入光功率的分贝数,计算公式为

$$I_L = -10 \lg(P_o/P_i) \quad (3-1)$$

式中, P_o 为输出端的光功率, P_i 为输入端的光功率。

对于多模光纤连接器来讲,注入的光功率应当经过扰模器,滤去高次模,使光纤中的模式为稳态分布,这样才能准确地衡量连接器的插入损耗。光纤活动连接器的插入损耗越小越好。

(2) 回波损耗。回波损耗又称为后向反射损耗,它是指光纤连接处的后向反射光功率相对输入光功率的分贝数,其计算式为

$$I_R = -10 \lg(P_o/P_R) \quad (3-2)$$

式中, P_R 为后向反射光功率。

(3) 重复性。重复性是指相对同一对插头,在同一只转换器中多次插拔之后,其插入损耗的范围,单位为dB。性能稳定的连接器的重复性应小于0.1dB。

(4) 互换性。互换性是指不同插头之间或者同转换器任意置换之后,其插入损耗的范围。这个指标更能说明连接器性能的一致性。质量较好的连接器,其互换性应能控制在±0.15dB。

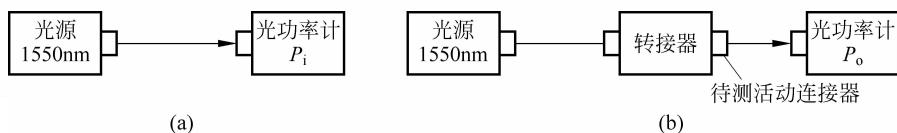
【实验仪器】

手持式光源一套,手持式光功率计一台,FC-FC单模光跳线两根,FC-FC适配器一个,3dB Y型分路器一个。

【实验内容】

1. 插入损耗的测量

光纤活动连接器插入损耗测试方法如图3-3所示。首先将活动连接器连接在光源与光功率计之间,记下此时的光功率 P_o ,然后取下活动连接器,再测此时的光功率,记为 P_i ,将 P_i 、 P_o 代入式(3-1)即可计算出其插入损耗。



39

图3-3 插入损耗测量原理图

2. 回波损耗的测量

按照图3-4(a)组成光功率测试系统,测得此时的光功率为 P_o 。将活动连接器按图3-4(b)接入,测得此时的光功率为 P_R ,将 P_o 、 P_R 代入下式即可计算出其回波损耗 I_R 。

$$I_R = 10 \lg \frac{P_o}{2P_R} \quad (3-3)$$

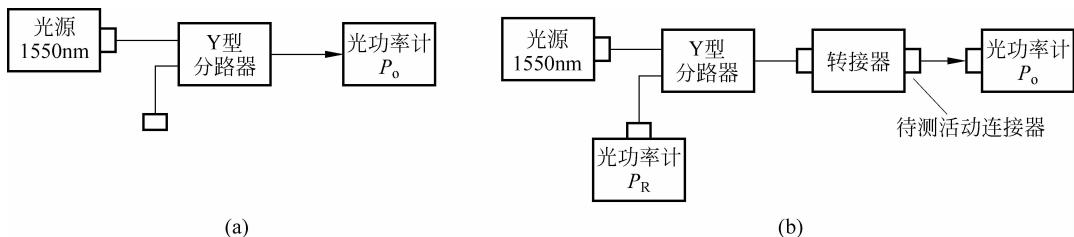


图3-4 回波损耗测量原理图

【实验报告】

- (1) 简述实验原理与目的。
- (2) 根据实验结果计算活动连接器的插入损耗。

(3) 根据实验数据计算活动连接器的回波损耗。

【思考题】

- (1) 分析活动连接器插入损耗产生的原因。
- (2) 当 Y 型分路器的分光比为 1 : 4 时,设计测试活动连接器的回波损耗实验,并推导出计算公式。
- (3) 分析 Y 型分路器对光纤活动连接器回波损耗测试的影响。

3.2 光分路器插入损耗和分光比测试

【引言】

光分路器是对光实现分路、合路、插入和分配的无源器件。在光纤通信系统中,用于数据母线和数据线路的光信号的分路和接入,以及从光路上取出监测光以了解发光元件和传输线路的特性和状态。在光纤用户网、区域网和有线电视网中,光分路器更是必不可缺的器件。在光学领域的其他许多方面光分路器的应用也非常广泛。

40

【实验目的】

- (1) 了解 Y 型分路器的工作原理及其结构。
- (2) 掌握 Y 型分路器的正确使用方法。
- (3) 掌握 Y 型分路器主要特性参数的测试方法。
- (4) 测量 Y 型分路器的插入损耗、附加损耗和分光比。

【实验原理】

Y 型分路器的技术指标一般有插入损耗(Insertion Loss)、附加损耗(Excess Loss)、分光比和方向性、均匀性等,在实验中主要测试 Y 型分路器的插入损耗、附加损耗及分光比。

1. 插入损耗

就 Y 型分路器而言,插入损耗定义为指定输出端口的光功率相对全部输入光功率的减少值。插入损耗计算公式为

$$I.L_i = -10\lg(P_{outi}/P_{in}) \quad (3-4)$$

其中, $I.L_i$ 为第 i 个输出端口的插入损耗, P_{outi} 是第 i 个输出端口测到的光功率值, P_{in} 是输入端的光功率值。

2. 附加损耗

Y 型分路器的附加损耗定义为所有输出端口的光功率总和相对于全部输入光功率的减小值。附加损耗计算公式为

$$E.L = -10\lg \frac{\sum P_{out}}{P_{in}} \quad (3-5)$$

对于 Y 型分路器,附加损耗是体现器件制造工艺质量的指标,反映的是器件制作过程带来的固有损耗;而插入损耗则表示的是各个输出端口的输出光功率状况,不仅有固有损耗的因素,更考虑了分光比的影响。因此不同类型的光纤耦合器,插入损耗的差异,并不能反映器件制作质量的优劣,这是与其他无源器件不同的地方。

3. 分光比

分光比是光耦合器件所特有的技术术语,它定义为耦合器各输出端口的输出功率的比值,在具体应用中通常用相对输出总功率的百分比来表示,即

$$C.R = \frac{P_{\text{out}}}{\sum P_{\text{out}}} \times 100\% \quad (3-6)$$

例如对于 Y 型分路器,1 : 1 或 50 : 50 代表了输出端相同的分光比,即输出为均分的器件。在实际工程应用中,往往需要各种不同分光比的器件,可以通过控制制作方法来改变光耦合器件的分光比。

【实验仪器】

手持式光源一套,手持式光功率计一台、Y 型分路器一个、FC 光纤跳线一根、FC-FC 适配器一个。

41

【实验内容】

测试 Y 型分路器的插入损耗、附加损耗和分光比时,其参数测试原理图如图 3-5 所示。

测试方法为: 测试出光源输出的光功率 P_0 , 如图 3-5(a)所示; 将 Y 型分路器接入其中组成图 3-5(b)所示测试系统后,分别测出 Y 型分路器输出端的光功率 P_1 和 P_2 ,代入式(3-4)、式(3-5)、式(3-6),即可计算出待测 Y 型分路器的性能指标参数。

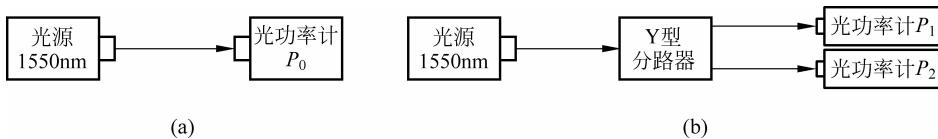


图 3-5 Y 型分路器性能参数测试原理图

【实验报告】

- (1) 简述实验原理与目的。
- (2) 记录各实验数据,根据实验结果计算 Y 型分路器插入损耗和附加损耗。
- (3) 分析实验结果,进行误差分析。

【思考题】

- (1) Y 型分路器的分光比和实际所测的值有什么差异? 为什么?
- (2) 讨论引起 Y 型分路器插入损耗的因素。如何克服?

3.3 光隔离器性能参数测试

【引言】

光隔离器是一种非互易光学元件,它只容许光束沿一个方向通过,对反射光有很强的阻挡作用。在光传输系统中,由于光纤活动连接器、光纤熔接头等光学元件的存在和光纤本身的瑞利散射的作用,总是存在反射光波,对系统性能产生有害的影响,因此就必须采用光隔离器消除反射波的影响。在光发射机、光放大器中都装有光隔离器。

【实验目的】

- (1) 掌握光隔离器的工作原理和主要性能参数。
- (2) 设计带有光隔离器的光纤系统,用于光隔离器各项参数的测量。
- (3) 对光隔离器性能参数进行测量。

【实验原理】

42

1. 光隔离器简介

光隔离器是一种只允许光波沿光路单向传输的非互易性光无源器件。它的作用是隔离反向光对前级工作单元的影响。光隔离器由起偏器、旋光器和检偏器三部分组成,如图 3-6 所示。起偏器是一种光学器件,当光束入射到它上面时,其输出光束变成了某一方向的线性偏振光,该方向就是起偏器的偏振轴。当入射光的偏振方向与起偏器的偏振轴垂直时光不能通过,因此起偏器又可作检偏器用。旋光器由旋光性材料和套在外面的永久磁铁组成,借助磁光效应,使通过它的光的偏振方向发生一定程度的旋转。

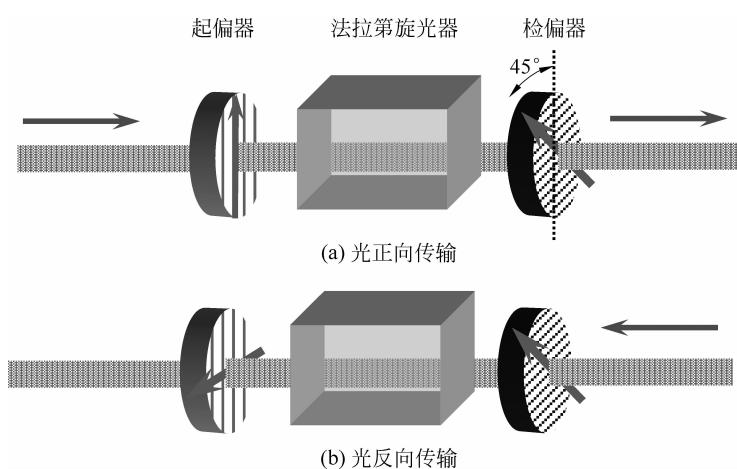


图 3-6 光隔离器原理图

光隔离器的工作原理为：起偏器与检偏器的偏振轴相差 45° ，当入射光经过起偏器时，被变成线偏振光，然后经旋光器，其偏振面被旋转 45° ，刚好与检偏器的偏振方向一致，于是光信号顺利通过光隔离器而进入光路中。如果有反射光出现时，反射光通过检偏器和旋光器后，其偏振方向与起偏器的偏振方向正交而不能通过起偏器，从而达到了隔离反射光的目的，每级光隔离器对反射光的损耗高达 35dB 以上。

目前，在 1310nm 波段和 1550nm 波段光隔离器反向隔离度都可做到 40dB 以上。

2. 光隔离器的主要性能指标

光隔离器的主要技术指标有插入损耗、反向隔离度和回波损耗等。在光传输系统中对光隔离器性能的要求是：正向损耗低、反向隔离度高、回波损耗高、器件体积小、环境性能好。由于光隔离器比较贵重，所以一般应用在光源中，在光纤线路中不用，之所以不用并不是不需要，而是从成本考虑。如果光隔离器价格便宜，插入损耗又小，可以在线路中应用，以提高系统性能。

(1) 插入损耗。光隔离器的插入损耗可表示为

$$\alpha_L = -10 \lg \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} (\text{dB}) \quad (3-7)$$

式中， P_{out} 和 P_{in} 分别为光隔离器的输出和输入光功率。

插入损耗主要是由光隔离器中的偏振器、法拉第旋光元件和准直器等元件的插入而产生的。光隔离器的插入损耗一般在 0.5dB 以下，最好的指标可以达到 0.1dB 以下。

(2) 反向隔离度。反向隔离度是光隔离器的重要指标之一，用符号 I_{SO} 表示，其数学表达式为

$$I_{\text{SO}} = -10 \lg \frac{P'_{\text{R}}}{P_{\text{R}}} (\text{dB}) \quad (3-8)$$

式中， P_{R} 和 P'_{R} 分别为反向输入和输出光功率。

无论哪种型号的光隔离器，其反向隔离度应在 30dB 以上，越高越好。

(3) 回波损耗。光隔离器的回波损耗定义为正向输入光功率 P_{in} 和返回到输入端的光功率 P'_{in} 之比，其表达式为

$$\alpha_{\text{RL}} = -10 \lg \frac{P'_{\text{in}}}{P_{\text{in}}} (\text{dB}) \quad (3-9)$$

回波直接影响系统的性能，所以回波损耗是一个相当重要的指标。优良的光隔离器其回波损耗都在 55dB 以上。

【实验仪器】

手持式光源一套，手持式光功率计一台、光纤隔离器一个、FC 光纤跳线一根、FC-FC 适配器一个、光纤耦合器一个。

【实验内容】

- (1) 测量光纤隔离器的插入损耗。
- (2) 测量光纤隔离器的隔离度。
- (3) 设计光纤隔离器回波损耗的测量方法并进行实现。

【实验报告】

- (1) 简述实验原理与目的。
- (2) 记录各实验数据,根据实验结果,计算光隔离器的插入损耗和反向隔离度。
- (3) 设计光纤隔离器的回波损耗的测量方法并进行实现。

【思考题】

- (1) 影响光隔离器的插入损耗有哪些因素?
- (2) 实际应用中的光隔离器的反向隔离度为何不为无穷大?试分析其原因。
- (3) 光隔离器的回波损耗主要由哪些因素引起的?

3.4 光调制器

44

【引言】

调制有直接调制和外调制两种方式。前者是信号直接调制光源的输出光强,后者是信号通过外调制器对连续输出光进行调制。尽管大多数情况均采用直接调制,但是在高速系统、相干检测系统或用非相干接收的波分复用系统中,必须采用光的外调制。本节介绍电光调制器、磁光调制器及声光调制器实验。

【实验目的】

- (1) 理解电光调制原理,掌握电光晶体半波电压、消光比和透光率的测量和计算方法。
- (2) 理解磁光和声光调制原理。
- (3) 了解电光调制、声光调制和磁光调制在光通信中的简单应用。

【实验原理】**1. 电光调制器**

某些晶体在外加电场的作用下,其折射率随外加电场的改变而发生变化的现象称为电光效应。电光效应分为两种类型:一种是介质折射率变化量正比于电场强度,称为一阶电光效应或泡克尔斯(Pockels)效应;另一种是介质折射率变化量与电场强度的平方成正比,称为二阶电光效应或克尔(Kerr)效应。

具有电光效应的晶体称为电光晶体,主要有铌酸锂(LiNbO_3)晶体、砷化镓(GaAs)晶体和钽酸锂(LiTaO_3)晶体等。利用晶体的电光效应制成的调制器称为电光调制器,可用于对激光的振幅和相位进行调制。

电光调制器通常利用一阶电光效应,在这种情况下,施加电场 E 引起的折射率变化为

$$\Delta n = \frac{n_0^3}{2} \gamma_{ij} E_j \quad (3-10)$$

式中, n_0 是 $E=0$ 时材料的折射率, γ_{ij} 是线性电光系数, i 和 j 对应于适当坐标系中各向异性

材料的轴线。

1) 电光相位调制

图 3-7 为电光相位调制器示意图。施加的外电场 $E_a = V/d$ 与 y 方向相同, 光的传输方向沿着 z 方向, 即外加电场在光传播方向的横截面上。假设入射光为与 y 轴成 45° 角的线偏振光, 可以把入射光用沿 x 和 y 方向的偏振光 E_x 和 E_y 表示, 对应的折射率分别为 n'_1 和 n'_2 。于是当 E_x 和 E_y 沿横向传输距离 L 后, 它引起的相位变化为

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi n'_1}{\lambda} L - \frac{2\pi n'_2}{\lambda} L = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{22}}{\lambda} \frac{L}{d} V \quad (3-11)$$

可见, 施加的外电压在两个电场分量间产生一个可调整的相位差 $\Delta\phi$ 。

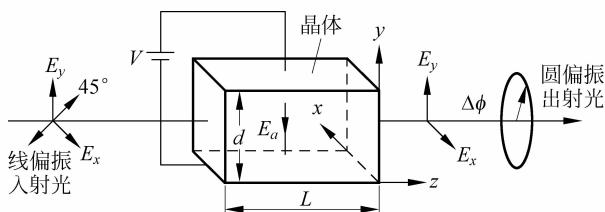


图 3-7 电光相位调制器示意图

2) 电光强度调制

在图 3-7 所示的相位调制器中, 在调制晶体之前和之后分别插入起偏器和检偏器, 就可以构成电光强度调制器, 如图 3-8 所示。

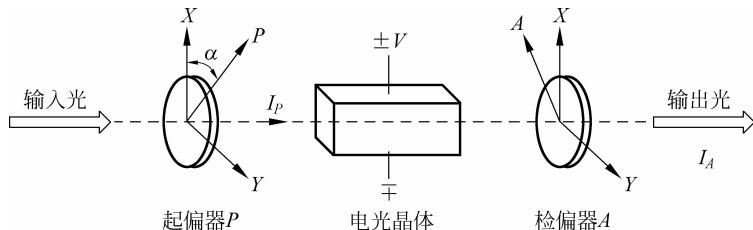


图 3-8 电光强度调制器示意图

由激光器发出的激光经起偏器 P 后只透射光波中平行其振动方向的振动分量, 当该偏振光 I_P 垂直于电光晶体的通光表面入射时, 如将光束分解成两个线偏振光, 则经过晶体后其 X 分量与 Y 分量会产生 $\Delta\phi(V)$ 的相差, 然后光束再经检偏器 A , 产生光强为 I_A 的出射光。当起偏器与检偏器的光轴正交($A \perp P$)时, 根据偏振原理可求得输出光强为

$$I_A = I_P \sin^2(2\alpha) \sin^2\left[\frac{\Delta\phi(V)}{2}\right] \quad (3-12)$$

式中, α 为 P 与 X 两光轴间的夹角。

若取 $\alpha = \pm 45^\circ$, 这时 V 对 I_A 的调制作用最大, 并且

$$I_A = I_P \sin^2[\Delta\phi/2] \text{ 或 } I_A = I_P \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_\pi}\right] \quad (3-13)$$

式中, V_π 对应 $\Delta\phi = \pi$ 时的外加电压, 称为半波电压。

图 3-9 为电光强度调制透过率(输出光强与输入光强之比)与施加在电光晶体上电压之

间的关系。当电信号为数字信号时,可以接通或断开光脉冲,因此不会产生传输光强的非线性;当电信号为模拟信号时,就必须使工作点在曲线的线性区,这可以通过在起偏器之后插入一个 $1/4$ 波片,以便在输入端提供圆偏振光。在此工作点的附近小范围内,透射光强与输入电压成正比关系。调制器的输入电信号就被无畸变地转换为输出光强信号。

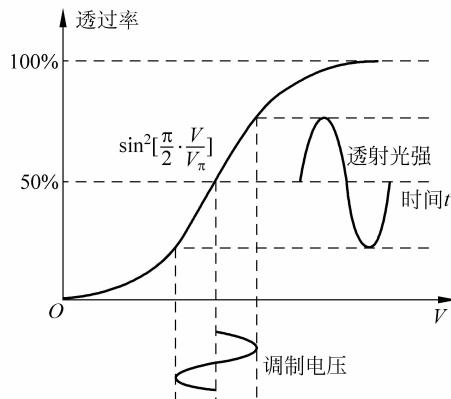


图 3-9 电光晶体透过率与电压的关系

2. 声光调制器

46

1) 声光效应

当超声波在某些介质中传播时,产生时间与空间的周期性弹性应变,造成介质密度(或折射率)周期性变化。介质随超声波应变与折射率变化的这一特性,可使光在介质中传播时发生衍射,从而产生声光效应。存在于超声波中的此类介质可视为一种由声波形成的位相光栅(称为声光栅),其光栅的栅距(光栅常数)即为声波波长。当一束平行光束通过声光介质时,光波就会被该声光栅所衍射而改变光的传播方向,并使光强在空间作重新分布。

声光器件的基本结构如图 3-10 所示,它由声光介质和换能器两部分组成。常用的声光介质有钼酸铅(PM)和氧化碲等,换能器即超声波发生器,它是利用材料的压电效应将输入的电功率转换为机械功率(即超声波),并向声光介质发射的一种能量变换器。

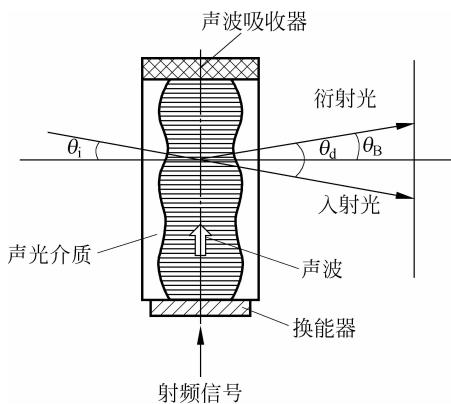


图 3-10 声光效应原理示意图

理论分析指出,当入射角(入射光与超声波面间的夹角) θ_i 满足以下条件时,衍射光最强。

$$\sin\theta_i = N \left(\frac{2\pi}{\lambda_s} \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) = N \left(\frac{K}{2k} \right) = N \left(\frac{\lambda}{2\lambda_s} \right) \quad (3-14)$$

式中,N 为衍射光的级数, λ 、 k 分别为入射光的波长和波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ_s 为超声波的波长, $K = \frac{2\pi}{\lambda_s}$ 为超声波的波数。

2) 声光调制

若掠射角 $\theta_i = 0$, 即入射光平行于声光栅的栅线入射时, 声光栅所产生的衍射图案和普通光学光栅所产生的衍射图案类似, 也就是在零级条纹两侧对称地分布着各级衍射光条纹, 而且衍射光强逐级减弱, 这种衍射称为喇曼-奈斯(Raman-Nath)衍射, 如图 3-11 所示。要实现喇曼-奈斯衍射, 则要求声光相互作用长度 $L \ll \lambda_s^2 / 2\pi\lambda$ 。理论分析表明衍射光强和超声波强度成正比。因此, 可利用这一原理来对入射光进行调制。若调制信号不是电信号, 则首先把它变为电信号, 然后作用到超声波发生器上, 使声光介质产生的声光栅与调制信号相对应, 则入射激光的衍射光强正比于调制信号的强度, 这就是声光调制的原理。

当掠射角 $\theta_i \neq 0$ 时, 一般情况下衍射光都很弱。只有在掠射角满足下式条件下, 衍射光最强。

$$\sin\theta_i = \sin\theta_B = \frac{K}{2k} = \frac{\lambda}{2\lambda_s} \quad (3-15)$$

式(3-15)称为布拉格条件, θ_B 称为布拉格角。此时的衍射光是不对称的, 只有正一级或负一级。衍射效率(衍射光强与入射光强之比)可接近 100%, 这种衍射称为布拉格衍射, 如图 3-12 所示。要实现布拉格衍射, 则要求声光相互作用长度 $L \gg \lambda_s^2 / 2\pi\lambda$ 。

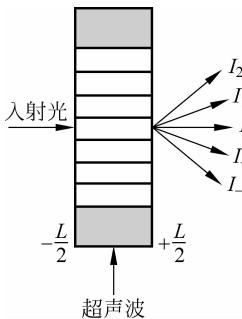


图 3-11 喇曼-奈斯衍射

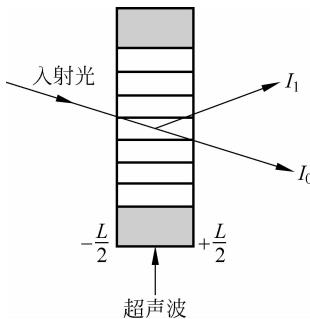


图 3-12 布拉格衍射

当满足入射角 θ_i 较小且满足 $\theta_i = \theta_B$ 的布拉格条件时, 由式(3-15)可得

$$\theta_B \approx \sin\theta_B = \frac{\lambda}{2\lambda_s} = \frac{\lambda F}{2v_s} \quad (3-16)$$

式中, F 与 v_s 分别为超声波的频率与速度。

入射(掠射)角 θ_i 与衍射角 θ_B 之和称为偏转角 θ_d , 如图 3-10 所示。由式(3-16)可得

$$\theta_d = \theta_i + \theta_B = 2\theta_B = \frac{K}{k} = \frac{\lambda}{\lambda_s} = F \frac{\lambda}{v_s} \quad (3-17)$$

由此可见,偏转角正比于超声波频率。当改变超声波频率 F (实际是改变换能器上电信号的频率)时,衍射光的方向亦将随之线性地改变,这也就是声光调制器的原理。此外,通过衍射光的偏转角 θ_d 也可得出超声波在介质中的传播速度为

$$v_s = \frac{F\lambda}{\theta_d} \quad (3-18)$$

总之,喇曼-奈斯衍射是多级衍射,其衍射光强是对称分布的,只适用于振幅较大的低频弹性波的情况;布拉格衍射的光强集中于零级或一级上,其衍射光强分布是不对称的,适用于振幅较小的高频弹性波的情况。因此,喇曼-奈斯衍射型调制器只限于低频工作,其只有有限的带宽;而布拉格衍射由于效率高,调制带宽较宽,故被较多采用。

3. 磁光调制器

1) 磁光效应

当偏振光通过某些透明物质时,光的振动面将以光的传播方向为轴线旋转一定的角度,这种现象称为旋光现象。相应地能使振动面旋转的物质称为旋光物质,石英晶体、食糖溶液等都是旋光性较强的物质。

除了旋光物质外,一些不具有旋光性的物质,如水、铅、玻璃等,在磁场作用下也可使穿过它的偏振光的振动方向发生旋转。这种在磁场作用下产生的旋光效应称为磁光效应,也称为法拉第旋光效应。具体地说,就是把磁光介质放到磁场中,使光线平行于磁场方向通过介质时,入射的平面偏振光的振动方向就会发生旋转,旋转角的大小与磁光介质的性质、光程和磁场强度等因素有关。振动面的旋转角度 θ (磁致旋转角)可表示为

$$\theta = \rho l H \quad (3-19)$$

式中, l 为光程, H 为磁场强度, ρ 为维尔德(Verdet)常数,它与磁光介质和入射光的波长有关,是一个表征介质磁光特性强弱的参量。不同介质,振动面旋转方向不同。顺着磁场方向看,使振动面右旋的,称为右旋或正旋介质, ρ 为正值。反之,则称为左旋或负旋介质, ρ 为负值。

对于给定的磁光介质,振动面的旋转方向只决定于磁场方向,与光线的传播方向无关,这是磁光介质和天然旋光介质之间的重要区别。利用这一特性在激光技术中可制成具有光调制、光开关、光隔离、光偏转等功能性磁光器件,其中磁光调制为最典型的一种。

2) 磁光调制器

磁光调制器的结构如图 3-13 所示,它就是根据法拉第效应制成的。将磁光介质(铁钇石榴石 $Y_3Fe_5O_{12}$ 或三溴化铬 $CrBr_3$)置于激磁线圈中,在它的左右两边各加一个偏振片,安装时使它们的光轴彼此垂直。没有磁场时,自然光通过起偏器 P 变为平面偏振光通过磁光介质,由于振动面没有发生旋转,到达检偏器 A 时由于其振动方向与检偏器的光轴垂直而被阻挡,检偏器无光输出;有磁场时,入射于检偏器 A 的偏振光因振动面发生了旋转,检偏器则有光输出。光输出的强弱与磁致旋转角 θ 有关,即与流经激磁线圈的调制电流相关,这就是磁光调制的工作原理。

磁光调制频率较低,不如电光调制,因而它目前仅用在红外波段($1\sim 5\mu m$)。

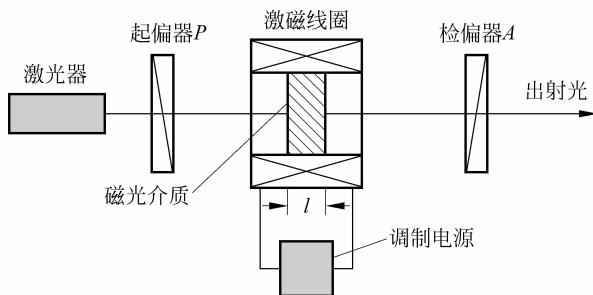


图 3-13 磁光调制器结构示意图

【实验原理】

电光调制实验系统一套、磁光调制实验系统一套、声光调制实验系统一套、双踪示波器一台、音箱一对。

【实验内容】

1. 电光调制实验

1) 系统调整

- (1) 按图 3-14 的结构图先在光具座上垂直放置好激光器和光电接收器。
- (2) 按系统连接方法将激光器、电光调制器、光电接收器等部件连接到位。(预先将光敏接收孔盖上。)

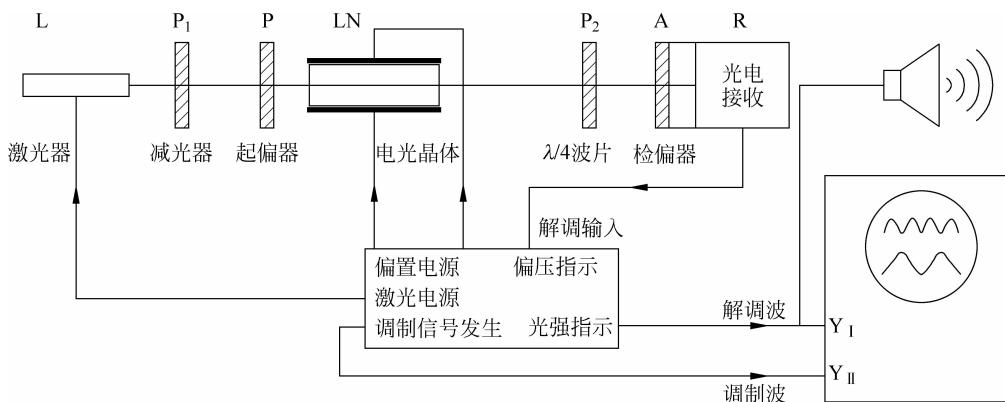


图 3-14 电光调制实验系统结构

- (3) 光路准直：打开激光电源，调节激光电位器使激光束有足够强度，准直调整时可先将激光管沿导轨推进接收器，调节激光管架上的塑制夹持螺钉使激光束基本保持水平，并使激光束的光点落在接收器的塑盖中心点上，然后将激光管远离接收器(移至导轨的另一端)，再次调节后面的三只螺钉，使光点仍保持在塑盖中心位置上，此后激光管与接收器的位置不宜再动。

- (4) 插入起偏器 P，调节起偏器的镜片架转角，使其透光轴与垂直方向成 $\theta_P = 45^\circ$ 角，

$(\theta_X = 0^\circ)$ 。

(5) 将调制监视与解调监视的输出分别与双踪示波器的 Y_I 和 Y_{II} 输入端相连, 打开主控单元的电源, 此时在接收器塑盖中心点应出现光点(去除盖子则光强指示表应有读数)。插入检偏器 A 转动检偏器, 使激光点消失, 光强指示近于 0, 表示此时检偏器与起偏器的光轴已处于正交状态($P \perp A$), 即 $\theta_A = -45^\circ$ 。

(6) 使电光晶体标记线向上插入镜片架中, 并用两螺钉将定位压环予以固定, 然后将镜片架插入光具座, 旋转镜片架至 0 刻度线即可使晶体的 X 轴处在铅直方向, 再适当调节光源位置, 务必使激光束正射透过, 这时 $\theta_P - \theta_X = 45^\circ$, 此时光强应近于 0(或最小)。如不为 0, 可调节激光光电位器使其近于 0。

(7) 去除接收孔塑盖, 打开主控单元的晶体偏压电源开关, 稍加偏压, 偏压指示表与光强指示表均呈现一定值。

(8) 必要时插入调节光强大小用的减光器 P_1 和作为光偏置的 $\lambda/4$ 波片构成完整的光路系统。

2) 观察电光调制现象

(1) 改变晶体偏压, 观察输出光强指示的变化。

(2) 改变晶体极性, 观察输出光强指示的变化。

(3) 打开调制加载开关, 适当调节调制幅度, 使双踪示波器上呈现调制波形(Y_I)与解调输出波形(Y_{II})。

(4) 插入 $\lambda/4$ 波片 P_2 , 并使其光轴平行于晶体 X 轴(相当于加有“光偏置”)观察光电调制现象。

3) 测量电光调制特性

(1) 作特性曲线: 将直流偏压加载到晶体上, 从 0 到允许的最大正(负)偏压值逐渐改变电压(U), 测出对应于每一偏压指示值的相对光强指示值, 作 I_A-U 曲线, 得调制器静态特性, 其中光电流有极大值 I_{max} 和极小值 I_{min} 。

(2) 测半波电压: 与 I_{max} 对应的偏压 U , 即为被测的半波电压 U_π 值。

(3) 计算电光晶体的消光比和透光率: 由光电流的极大和极小值可得消光比 $M = I_{max}/I_{min}$; 将电光晶体从光路中取出, 旋转检偏器 A , 测出最大光强值 I_0 , 可计算透射率 $T = I_{max}/I_0$ 。

(4) 进行电光调制与光通讯实验演示: 将音频信号(来自广播收音机、录音机、CD 机等音源)输入到本机的“外调输入”插座, 将扬声器插入“功率输出”插座, 加晶体偏压至调制特性曲线的线性区域, 适当调节调制幅度与解调幅度即可使扬声器播放出音响节目(示波器也可同时进行监视)。改变偏压试听扬声器音量与音质的变化。

2. 磁光调制实验

1) 系统调整

(1) 在光具座的滑座上放置好激光器和光电接收器(通常光电接收器位于光具座右侧末端)。

(2) 按系统连接方法将激光器、铽玻璃介质磁光调制器以及与检偏器一体的光电接收器等组件连接到位。检偏器的两刻度盘均预置在 0 位。

(3) 光路准直：打开电源开关，接通激光器电源，点亮激光器，调节激光器尾部的旋钮，使激光器达到足够光强；将激光器推进光电接收器，调节激光器架的前后各三只夹持螺钉，使激光器基本与光具座导轨平行并使激光束落在接收部件塑盖的中心点上；然后将激光器远离(移至导轨的另一端)，再次微调后侧的夹持螺钉，务必使光点仍落在塑盖的中心位置上；调准激光器与接收器的位置后不必再动。

(4) 用所提供的电缆线分别将“调制监视”与“解调监视”插座与示波器的 Y_1 和 Y_2 的输入端相连。

(5) 插入起偏器，移去接收单元塑盖时，接收光强指示应呈现读数。调节起偏器，使光强指示器读数接近于 0，表示检偏器与起偏器的光轴正处于正交状态($P \perp A$)，记下起偏器角度。再将起偏器旋转约 45° 角，使两偏振面在此夹角下调制幅度达最大值。

(6) 调节激光强度，使光强指示的读数在 4~5 之间。

(7) 将磁光调制器插入镜片架中，拧紧定位压环的两只滚花螺钉，将调制器予以固定，然后将镜片架插入光具座后对准中心，使激光束正射透过。

2) 观察磁光调制现象

(1) 将激光器、起偏器、检偏器和光电接收器组装在光具座上，用铽玻璃调制器线缆插入主控单元后面板的“调制输出”两插座中。

(2) 打开调制信号开关，调节输出幅度，在示波器上可同时观察到调制波形与解调输出波形。再细调检偏器的转角，即可明显地看到解调波与调制波的倍频关系。

3) 测量调制深度与调制角幅度

在示波器中显示出解调波形时，调节检偏器偏角，读出波形曲线上相应的光强信号的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} ，计算出调制深度和调制角幅度。其中，调制深度 $y = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ ，调制角幅度 $\theta = \frac{1}{2} \arcsin y$ 。

4) 画出旋光角与外加磁场的关系曲线

改变调制电流的大小，测出不同电流下对应的光强 I_{\max} 与 I_{\min} 值，计算出调制深度 η 和调制角幅度 θ_0 值，作 $\theta-B(I_M)$ 关系曲线。

5) 分析直流磁场对磁光介质的影响

(1) 将励磁电磁铁置于光具座上，电磁铁中间放入火石玻璃的磁光介质(先将火石玻璃插在两磁轭之间，磁轭平面与两磁极相吻合)。将电磁铁引出线缆插入后面板的“励磁输出”两插座中。

(2) 按“系统调整”中第⑤步，使检偏器与起偏器的光轴处于正交状态(光强读数接近于 0)。

(3) 开启直流电源，使励磁线圈通以直流电流 I_{DC} ，细调检偏器的测角器度盘使光强读数恢复接近于 0，记下前后测角器度盘读数，其差值即为偏振面的旋角。

(4) 改变直流电流(由励磁电流表读出)，测出相应的偏转角，画出 $\theta-B(I_{DC})$ 关系曲线。

6) 进行磁光调制与光通讯实验演示

将音频信号(来自收音机、录音机、CD 唱盘等音源)输入到“外调制输入”插座，将有源扬声器插入“解调输出”插座，即可发声，音量由“解调幅度”控制。

3. 声光调制实验

1) 系统调整

(1) 按图 3-15 系统结构图先在光具座的滑座上放置好激光器和光电接收器，并安置好声光调制器的载物台。

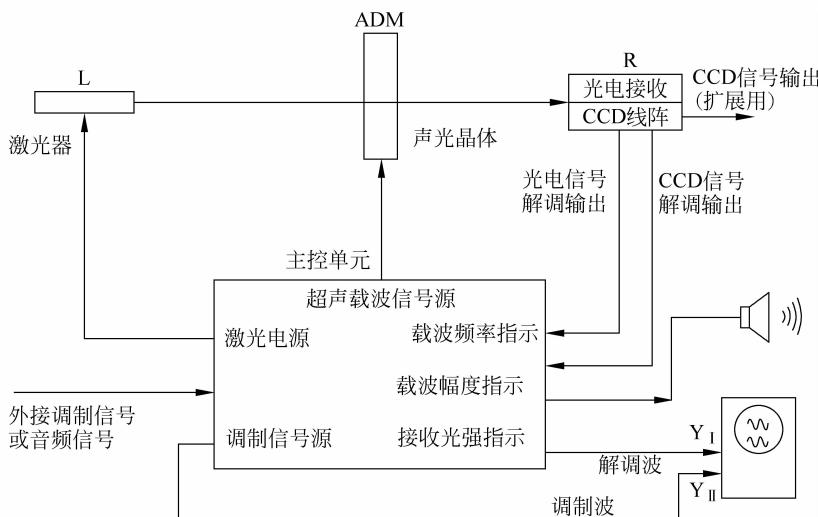


图 3-15 声光调制实验系统框图

(2) 按系统连接方法将激光器、声光调制器、光电接收等组件连接到位。

(3) 光路准直：打开电源开关，接通激光电源，调节激光器尾部的旋钮，使激光束达到足够强度；先将激光器推进光电接收器，调节激光器架上的前后各三只夹持螺钉使激光器基本保持水平，并使激光束落在接收器塑盖的中心点上；然后将激光器远离接收器（移至导轨另一端），再次微调后面的夹持螺钉，务必使光点仍保持在塑盖（光敏管接收孔）的中心位置上，以后激光器与接收器的位置不必再动。

(4) 用所提供的电缆线分别将前面板的“调制监视”与“解调输出”插座与双踪示波器的 Y_1 、 Y_2 输入端相连，移去接收器塑盖时，接收光强指示表应有读数。

(5) 将声光调制器的透光孔置于载物平台的中心位置，用压杆将调制器初步固定，然后使该滑座在靠近激光管附近的导轨内就位。

(6) 调节载物平台的高度和转向，使激光束恰好在声光调制器的透光孔中间穿过，再用压杆将声光调制器固定。

(7) 将光电接收器前端的弹簧钢丝夹持住白色像屏。

2) 观察声光调制的偏转现象

(1) 调节激光束的亮度，使在像屏中心有明晰的光点呈现，此即为声光调制的 0 级光斑。

(2) 打开载波选择开关，拨至 80MHz 的档级，调节“载波幅度”旋钮，此时 80MHz 的超声波即对声光介质进行调制。

(3) 微调载物平台上声光调制器的转向，以改变声光调制器的光点入射角，即可出现因

声光调制而偏转的衍射光斑。当一级衍射光最强时,声光调制器即运转在布拉格条件下的偏转状态。

3) 测试声光调制的幅度特性

- (1) 移去像屏,使激光束的0级光仍落在光敏接收孔的中心位置上。
- (2) 微调接收器滑座的测微计,使接收孔横向移动到一级光的位置(监视“接收光强指示”表使其达最大值)。
- (3) 调节“载波幅度”旋钮,分别读出载波电压与接收光强的大小,画出光强-调制电压的关系式(I_d-U_m)。

4) 显示声光调制偏转曲线

将接收器滑座横向细调到线阵CCD矩形接收孔的中间位置上,适当调整示波器使其正确呈现出0级光和次级光的声光调制偏转曲线。

5) 观察声光调制随频率偏转的现象

- (1) 按“测试声光调制的幅度特性”的步骤,先将“载波选择”置于“关”的位置,记下接收器滑座横向测微计在0级时的读数。
- (2) 将“载波选择”开关置于I或II的位置,可以观察到1级光(或多级光)的平移变化现象。

6) 测试声光调制频率偏转特性

- (1) 调节“载波频率”旋钮,微调接收器横向测微计,使其始终跟踪1级光的位置。分别记下载波频率指示与测微计读数(即平移距离d)。待测得1级光和0级光点间的距离d与声光调制器到接收孔之间的距离L(由导轨面上标尺读出)后,由于 $L \gg d$,求出声光调制的偏转角 $\theta_d \approx d/L$ 。

(2) 画出偏转角与调制频率的关系曲线(θ_d-F)。

- (3) 测得各调制频率F值所对应的衍射光强 I_d ,画出衍射光强与调制频率的关系曲线(I_d-F),该曲线中 I_d 的峰值 $I_{d\max}$ 应与中心频率相对应,而其与下降3dB所对应的频率差即为声光调制器的带宽。

7) 测量声光调制器的衍射效率

衍射效率 η 定义为: $\eta = I_{d\max}/I_0$,即最大衍射光强 $I_{d\max}$ 与0级光强 I_0 之比。分别测得最强衍射光与0级光的光强值,其比值即为衍射效率。

8) 测量超声波的波速

将超声波频率F、偏转角 θ_d 与激光波长 λ 各值代入式(3-18),即可计算出超声波在介质中的传播速度。

9) 进行声光调制与光通信实验演示

将音频信号(来自广播收音机、录音机、CD机等音源)输入到本机的“外调输入”插座,将扬声器插入主控单元后面板的“解调监听”插座,打开载波选择开关至80MHz档位,适当调节载波幅度与解调幅度即可使扬声器播放出音响节目。

【实验报告】

- (1) 观察电光、磁光和声光调制现象。
- (2) 画出电光调制特性曲线,测量半波电压,计算消光比和透光率。

- (3) 测量磁光调制的调制深度与调制角幅度。
- (4) 画出直流磁光调制和交流磁光调制旋光角与外加磁场的关系曲线。
- (5) 测量声光调制幅度特性, 观察声光调制随频率偏转现象, 测试声光调制频率偏转特性。
- (6) 测量声光调制器的衍射效率, 测量超声波的波速。
- (7) 进行光通信实验演示, 对工作进行评价。

【思考题】

- (1) 当电信号为模拟信号时, 为什么要在电光强度调制的起偏器之后插入一个 $1/4$ 波片?
- (2) 查阅相关资料, 了解光纤通信系统中常用的光调制器。

3.5 掺铒光纤放大器的性能测试

54

【引言】

光纤放大器是在光纤通信系统中对传输的光信号进行放大补偿的光纤器件, 是实现远距离光纤通信的关键部件。光纤放大器有两类, 一类是使用普通传输光纤制作的光放大器, 是借助传输光纤的三阶非线性效应产生的增益机制而使光信号得以放大的一种分布式光纤放大器; 另一类是利用光纤中的掺杂物质引起激活机制实现光放大的光纤放大器, 掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)属于此类。EDFA 的出现和应用, 引起了光纤通信领域一场新的变革, 是光纤通信史上的一个里程碑。

【实验目的】

- (1) 掌握掺铒光纤放大器的工作原理。
- (2) 熟悉掺铒光纤放大器的基本结构及其放大特性。
- (3) 测试掺铒光纤放大器的各种性能参数, 并根据测量的参数计算增益、输出饱和功率和噪声系数。

【实验原理】

1. 掺铒光纤放大器的工作原理

EDFA 主要由掺铒光纤、泵浦光源、波分复用器以及光隔离器等组成, 其结构如图 3-16 所示。

(1) 掺铒光纤。在制造光纤时, 把铒离子(E^{3+})掺入纤芯中而制成的光纤就是掺铒光纤, 它是在 EDFA 中提供光增益的主要部件。EDFA 的增益与其参数有关, 如铒离子浓度、掺铒光纤长度及芯径等。

掺铒光纤放大器之所以能放大光信号的原理在于 E^{3+} 吸收泵浦光的能量, 由基态 $^4I_{15/2}$

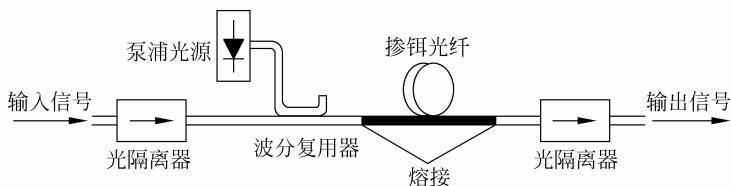
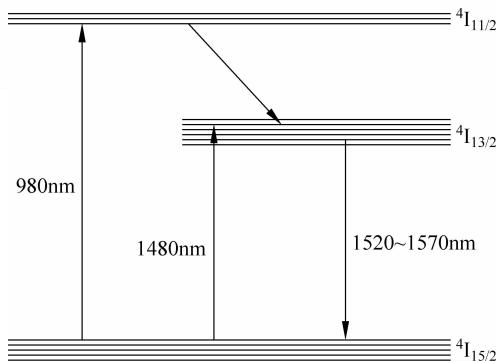


图 3-16 EDFA 结构原理图

跃迁至高能级的泵浦态，对于不同的泵浦波长电子跃迁到不同的能级。当用 980nm 波长的泵浦光时，如图 3-17 所示， E_r^{3+} 从基态跃迁至泵浦态 $^4I_{11/2}$ 。由于泵浦态上的载流子的寿命只有 $1\mu s$ ，电子迅速以非辐射方式由泵浦态弛豫至亚稳态，在亚稳态上载流子有较长的寿命，在源源不断的泵浦下，亚稳态上的粒子不断累积，从而实现粒子数反转分布。当有 1550nm 的信号光通过已被激活的掺铒光纤时，在信号光的感应下，亚稳态上的粒子以受激辐射的方式跃迁到基态，同时释放出一个与感应光子全同的光子，从而实现了信号光在掺铒光纤的传播过程中的不断放大。在放大过程中，亚稳态上的粒子也会以自发辐射的方式跃迁到基态，自发辐射产生的光子也会被放大，这种放大的自发辐射（Amplified Spontaneous Emission, ASE）会消耗泵浦光并引入噪声。

55

图 3-17 E_r^{3+} 的能级图

(2) 泵浦光源。掺铒光纤可以在几个波长上被有效激励。最先突破的是采用 1480nm 的 InGaAs 多量子阱半导体激光器，其输出功率可达 100mW，该波长的泵浦增益系数高，而且 EDFA 的带宽与现有实用化的 InGaAs 激光器相匹配。980nm 波长泵浦效率高，噪声低，现已广泛使用。

(3) 波分复用器。光纤放大器的波分复用器的作用是使泵浦光与信号光复合。对它的要求是插入损耗低，因而适用的 WDM 器件主要有熔融拉锥光纤耦合器和干涉滤波器。

(4) 光隔离器。在输入端和输出端插入光隔离器是为了抑制光路的反射，从而使系统工作稳定可靠、降低噪声。

2. EDFA 的基本性能

EDFA 中，当接入泵浦光功率后输入信号光将得到放大，同时产生部分放大的自发辐射（ASE）光，两种光都消耗上能级的铒粒子。当泵浦光功率足够大，而信号光与 ASE 光很弱

时,上下能级的粒子数反转程度很高,并可认为沿 EDFA 长度方向上的上能级粒子数保持不变,放大器的增益将达到很高的值,而且随输入信号光功率的增加,增益仍维持恒定不变,这种增益称为小信号增益。在给定输入泵浦光功率时,随着信号光和 ASE 光的增大,上能级粒子数的增加将因不足以补偿消耗而逐渐减少,增益也将不能维持初始值不变,并逐渐下降,此时放大器进入饱和工作状态,增益产生饱和。饱和增益值不是一个确定值,随输入功率和饱和深度以及泵浦光功率而变。

(1) 小信号(线性)增益:输出与输入信号光功率之比,不包括泵浦光和 ASE 光。

$$G = 10 \lg \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{ASE}}}{P_{\text{in}}} \quad (3-20)$$

式中, P_{in} 和 P_{out} 是被放大的连续信号光的输入和输出功率, P_{ASE} 是放大的自发辐射噪声功率。

(2) 饱和输出功率:增益相对小信号增益减小 3dB 时的输出功率称为饱和输出功率。

(3) 噪声系数(Noise Figure,NF):定义为放大器输入信噪比和输出信噪比之比值。

$$\text{NF} = 10 \lg \left[\frac{1}{G} \left(\frac{P_{\text{ASE}}}{h v B_0} + 1 \right) \right] (\text{dB}) \quad (3-21)$$

式中, G 为放大器的增益, h 为普朗克常数, v 是测量时输入信号的频率, B_0 是光谱仪的频率带宽, P_{ASE} 是放大器的自发辐射功率。

(4) 偏振相关增益变化 ΔG_p :测算出不同偏振状态下的小信号增益值,找出所有小信号增益值中的最大值 G_{\max} 和最小值 G_{\min} ,偏振相关增益变化 ΔG_p 可表示为

$$\Delta G_p = G_{\max} - G_{\min} \quad (3-22)$$

【实验仪器】

1550nm LD 光源一台,EDFA 一台,光固定衰减器一只,光功率计一台,偏振控制器一个,光纤跳线若干,法兰盘一个。

【实验内容】

1. EDFA 增益的测量及增益曲线的绘制

按图 3-18(a)所示用跳线连好实验装置,开启 EDFA,稍候至稳定工作状态,先使 EDFA 的输入悬空,输出接光功率计,测得 EDFA 的自发辐射噪声功率 P_{ASE} ;然后按图 3-18(b)连接各装置,开启 1550nm LD 光源,稍候至稳定输出状态,改变固定衰减器的数目,组合出不同的衰减率:35dB、30dB、25dB、20dB、15dB、10dB、5dB;用功率计在 A 点处测量并记录信号光的输入功率 P_{in} ,同时对应每一个输入功率值,都要在 B 点处测得一个经过 EDFA 的放大后输出功率 P_{out} ,并将实验数据填入表 3-1 中,计算出各个输入功率下的增益值 G ,绘制出增益曲线。

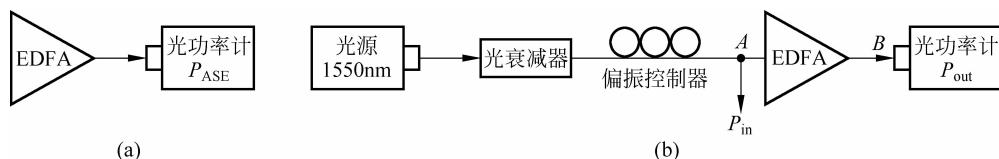


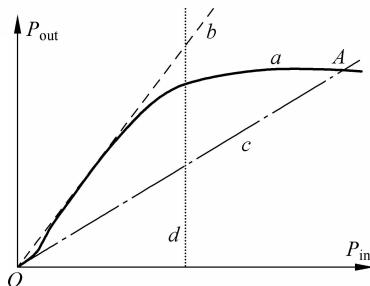
图 3-18 实验装置示意图

表 3-1 EDFA 测试数据

编号	输入功率 P_{in} (dBm)	输出功率 P_{out} (dBm)	噪声功 P_{ASE} (dBm)	增益 G (dB)	噪声系数 NF(dB)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

2. 输出饱和功率的确定

测得的增益曲线示意图如图 3-19 所示, 曲线 a 是 EDFA 的增益曲线, 虚线 b 表示其过 O 点的切线, 其斜率即小信号增益, 虚线 c 的斜率是 b 的一半, 所以与曲线 a 的交点 A 所对应的输出功率值即 EDFA 的饱和输出功率。图中竖虚线 d 左侧是 EDFA 的线性工作区, 右侧是 EDFA 的饱和工作区。



57

图 3-19 EDFA 增益曲线示意图

3. 绘制噪声系数曲线

根据定义计算 EDFA 的噪声系数, 并绘制以输入功率为横轴, 以噪声系数为纵轴的噪声系数曲线。

4. 偏振相关增益变化的确定

重复实验步骤 1 的测量过程, 只是测量输入和输出功率时在衰减器和 EDFA 之间加入偏振控制器, 测出各种偏振状态下的小信号增益值, 并找出其中的最大值 G_{max} 和最小值 G_{min} , 计算出偏振相关增益变化 ΔG_p 。

【实验报告】

- (1) 简述实验原理与目的。
- (2) 记录各实验数据, 根据实验结果, 计算增益值并绘制增益曲线。

- (3) 根据实验结果,计算噪声系数并绘制噪声系数曲线。
- (4) 确定偏振相关增益的变化。

【思考题】

- (1) 查阅相关文献,熟悉 EDFA 的泵浦方式及在光纤通信系统中的应用。
- (2) 实验中为什么使用衰减器,而不使用调整光源电流的办法得到不同的输入光功率?