

第一章 光纤器件

1.1 光纤激光器

1.1.1 基本概念

许多稀土离子，如铒、钕、和镱，都可用于制造光纤激光器，其工作波长在 $0.4\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$ 之间。早在 1961 年就研制了第一台光纤激光器，当时所用的是掺钕光纤，芯径为 $300\ \mu\text{m}$ 。低损耗的硅光纤出现不久，便于 1973 年出现了被用于二极管激光器泵浦源的光纤激光器。虽然之后又开展了一些工作，但直到 20 世纪 80 年代后期，光纤激光器才取得长足的进展。初期工作侧重于掺钕和掺铒的光纤激光器，但诸如铥、钐、钕和镱等参杂物也曾使用过。从 1989 年开始，研究重点集中在锁模的掺铒光纤激光器上，这类激光器能在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段产生超短脉冲，并在光纤通信、超快现象、光纤传感器等方面有广泛应用。

1 泵浦和光增益

激光器泵浦结构可分为三能级和四能级两种，如图 1.1 所示。在某种情况下，另一种泵浦机制也可能实现，即上转换激光。作为一个实例，图 1.2 给出了 Tm 掺杂上转换激光器的泵浦过程。来自同一（或不同）泵浦激光器的两个或多个光子被掺杂离子同时吸收，使该离子跃迁到能量相差大于单个泵浦光子能量的能级上。结果激光器的工作频率高于泵浦光频率，该现象在非线性光学中被称为频率上转换。频率上转换可以用半导体激光器产生的红外光泵浦，而使激光器工作在蓝光波段，因此引起人们的注意。在图 1.2 所示的例子中，三个 $1.06\ \mu\text{m}$ 的泵浦光子使 Tm^{3+} 离子跃迁到 1G_4 激发态，通过 $^1G_4 \rightarrow ^3H_5$ 的辐射跃迁，发出 $475\ \mu\text{m}$ 的蓝光。注意，图中各能级事实上均是因基质加宽形成的能带。

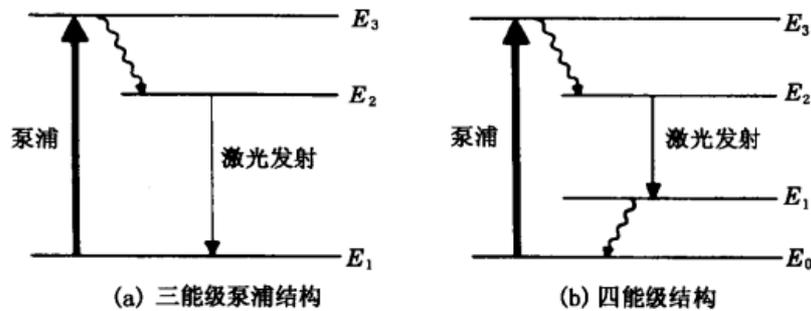


图 1.1 两种泵浦原理的示意图

(波纹箭头表示光子通过非辐射过程的快速弛豫)

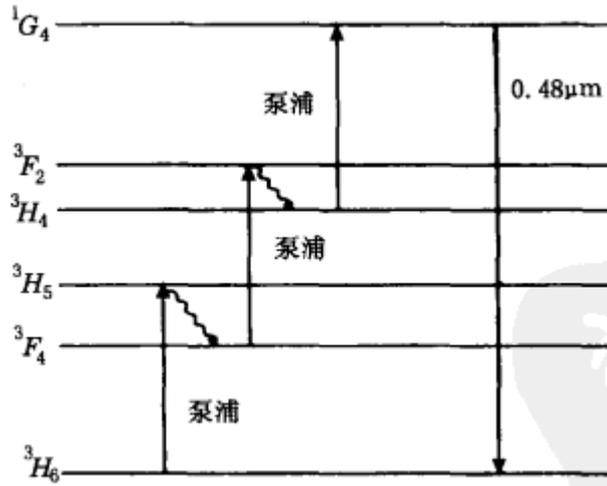


图 1.2 铥掺杂上转换激光器的泵浦过程

(波纹箭头表示能级间的快速弛豫过程,吸收三个 $1.06 \mu m$ 的泵浦光子后,发射一个 $0.48 \mu m$ 的光子)

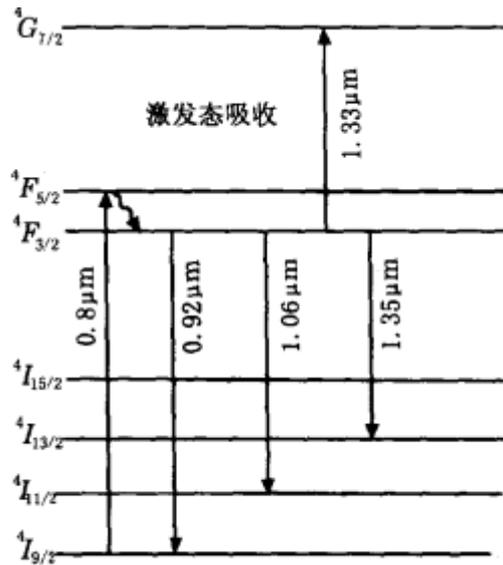


图 1.3 掺铒光纤激光器的四能级结构图

在图 1.1 所示的泵浦结构中,掺铒光纤激光器使用的是三能级泵浦机制,可用输入波长为 $0.98 \mu m$ 或 $1.48 \mu m$ 的半导体激光器实现高效率泵浦。图 1.3 是掺铒光纤激光器的四能级结构图。该激光器可用输出波长为 $0.8 \mu m$ 的 GaAs 半导体激光泵浦,实现 $4I_{9/2} \rightarrow 4F_{5/2}$ 的跃迁;该激光器可工作在 $0.92 \mu m$ 、 $1.06 \mu m$ 和 $1.35 \mu m$ 三个波长上,其中工作波长 $1.06 \mu m$ 时泵浦效率最高。虽然工作波长为 $1.35 \mu m$ 也是四能级泵浦过程,但其效率受到 $4F_{3/2} \rightarrow 4G_{7/2}$ 跃迁引起的激发态吸收的严重影

响。第一台光纤激光器出现于 1961 年，工作波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 。而半导体泵浦的光纤激光器则出现于 1973 年，现在用半导体激光器阵列泵浦的掺铒光纤激光器已能产生功率超过 10W 的连续光。

普通通信用的小功率光纤激光器输出功率一般都是毫瓦级，多采用单模光纤、端面泵浦。但单模纤芯直径只有 $9\ \mu\text{m}$ ，对 LD 的输出光束有严格的要求，无法承受太高的功率密度，因为强泵浦光耦合在很细的纤芯里会出现很严重的非线性效应，从而改变纤芯光学性能、降低转换效率。

高功率光纤激光器多采用双包层光纤。单模纤芯由掺稀土离子的石英材料构成，作为激光器振荡通道；内包层由横向尺寸和数值孔径比纤芯大得多、折射率比纤芯小的纯石英材料构成，它是接受多模 LD 泵浦光的多模光纤；因为掺杂激活纤芯和接受多模泵浦光的多模内包层是分开的，所以实现了多模光泵浦而单模输出。为了提高纤芯的吸收效率，内包层的截面形状多采用 D 形、矩形和梅花形。

高功率光纤激光器采用侧面泵浦。光纤侧面引出多个纤，每个分纤可与带尾纤的 LD 耦合形成分点泵浦，不仅极大地提高输出功率，同时又避免了传统端泵带来的一系列热效应问题。

2 腔形设计

光纤激光器的腔形设计可以有多种选择。一种最常见的激光谐振腔——法布里-珀罗 (F-P)，它是将增益介质置于两片高反射率的腔镜之间构成的。在光纤激光器中，腔镜经常对接耦合到光纤端面，以避免衍射损耗。1985 年出现的早期掺铒光纤激光器就采用了这种结构，介质膜对 $1.08\ \mu\text{m}$ 的输出光高反，而对 $0.82\ \mu\text{m}$ 的泵浦光高透。该腔的损耗很小，仅需 $100\ \mu\text{W}$ 的泵浦功率就可以达到激光阈值。但这种腔的调整较为困难，光纤端面或腔镜稍微倾斜，就会使损耗急剧增加，允许的倾斜度小于 1° 。该问题可通过将介质膜直接镀到掺杂光纤的研磨抛光面上得到解决。由于介质膜对光纤端面的缺陷极为敏感，而且泵浦光也经由一腔镜入射，所以当泵浦光经过聚焦且功率较高时就会损坏介质膜。

有几种替代方法可以使注入的泵浦光不通过介质膜镜。第一种是使用定向光纤耦合器。可以设计一种光纤耦合器使得大部分泵浦光从耦合器的第一个出口输入腔内，耦合器是光纤激光器的一部分，这样地耦合器称为 WDM 耦合器。第二种方法是直接在光纤上刻写光纤光栅作为腔镜。对激光器波长而言，布拉格光栅相当于高反镜，对泵浦光则是透明的。如果将 F-P 腔的两个腔镜都用这种方法制

造的光纤光栅代替，就形成了全光纤系统；利用布拉格光栅的另一个优点就是由于光栅具有频率选择幸而能获得单纵模窄线宽的激光输出。第三种方法是使用光纤环形镜，该镜可设计成对输出光全反，而对泵浦光全透。

因环形腔能够单向输出而经常用于激光器系统。应用于光纤激光器时，由于环形腔中没有腔镜，因此构成了一个全光纤系统。最简单的环形腔结构是将WDM耦合器的两端通过一段掺杂光纤连在一起，如图 1.4 所示。在光纤环路中插入光纤隔离器是为了使激光器单向运转，如果所使用的是普通的掺杂光纤而不是保偏光纤，还需要插入一个偏振控制器。

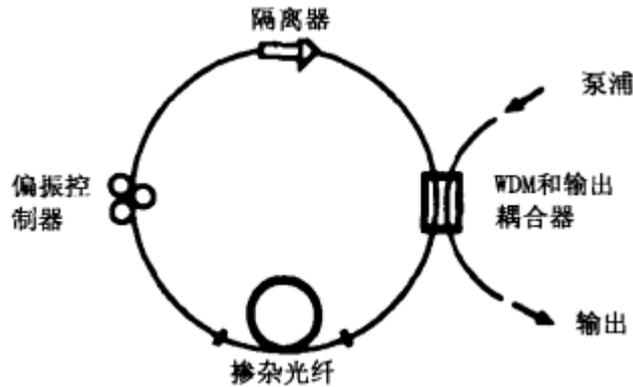


图 1.4 单向环形腔光纤激光器的示意图

早在 1985 年研制的第一台掺铒光纤激光器上就使用了这种环形腔设计，之后又出现了几种新的结构形式。图 1.5 给出了一种用于锁模光纤激光器的结构，这种结构因其形状而被称为“8”字形腔，右边的环形腔相当于一个具有增益作用的非线性光纤环形镜。非线性效应对“8”字形激光器有重要作用。在低功率运转时，光纤环路透射率很低，使得连续工作时腔内损耗很大；当光脉冲的峰值功率达到一临界值时，环路几乎透明。基于此原因，“8”字形腔有利于锁模运转。左侧腔中的隔离器可以保证激光器单方向运转。激光通过另一个光纤耦合器输出，其透射率很小 (<10%)，以降低腔内损耗。“8”字形腔的一个有趣特征在于它不用任何附加元件，如饱和吸收体，就可以实现被动锁模。

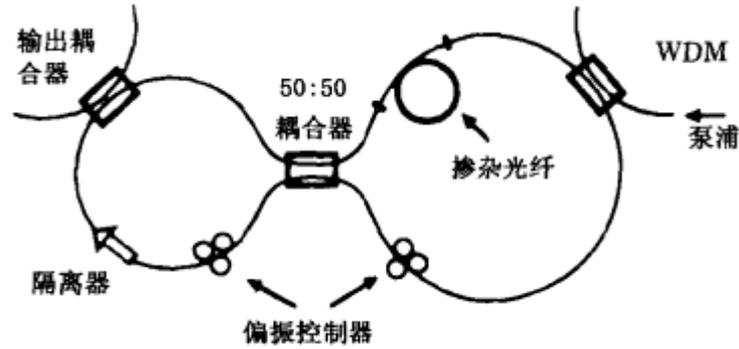


图 1.5 “8”字形腔锁模光纤激光器示意图

还有许多其它腔可以用于光纤激光器系统。例如，可以将两个 F-P 腔连在一起。这种腔形的最简单形式是将一个腔镜放在距光纤端面一定距离处，具有 4% 反射率的光纤-空气界面相当于一个低反射率镜，它将光纤腔和空气为介质的空腔耦合在一起。这种复合腔曾用于减小掺铒光纤激光器的线宽。将三个光纤光栅串联也可以构成两个耦合 F-P 腔。

1.1.2 掺铒光纤激光器

掺铒光纤激光器是利用掺入石英光纤的稀土铒(Er^{3+})离子作为增益介质，在泵浦光激发下进行光放大从而发射激光，其特性主要由掺杂元素决定，而不是由起主介质作用的石英光纤决定。

产生激光放大的过程是在增益介质的吸收波长上提供泵浦，使掺铒光纤有效获得能量而被激光。激活后的光纤介质提供形成激光放大的条件。介质的吸后与发射光波长取决于介质的能级结构。图 1.6 展示了铒离子 (Er^{3+}) 的能级结构。由于石英的非晶态特性， Er^{3+} 的能级展宽为一定的能带。在泵浦光照射下，电子从下能级 ($^4\text{I}_{15/2}$) 向上能级跃迁，对应于光的吸收，根据不同的泵浦光波长，跃迁至不同的能级。当泵浦光能量足够时，被泵浦光抽运到上能级而停留在亚稳态能级上的粒子数会超过基态上剩余的粒子数，形成粒子数反转。随后产生粒子数反转分布的 Er^{3+} 由上能级向下能级发生受激辐射，对应于发射激光的过程。对 Er^{3+} ，存在如下有实际意义的跃迁过程^[3]：

$$\text{吸收过程：从基态 } ^4\text{I}_{15/2} \rightarrow \begin{cases} ^4\text{I}_{9/2} (\text{对应 } 800\text{nm} \text{ 泵浦}) \\ ^4\text{I}_{11/2} (\text{对应 } 980\text{nm} \text{ 泵浦}) \\ ^4\text{I}_{13/2} (\text{对应 } 1480\text{nm} \text{ 泵浦}) \end{cases}$$

$$\text{激光发射过程：从激发态 } ^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2} \quad (\text{对应 } 1536\text{nm})$$

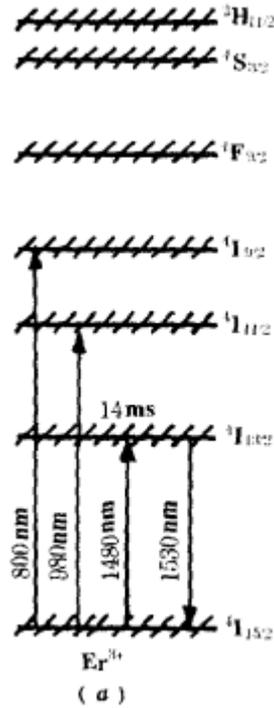


图 1.6 掺铒光纤中 Er^{3+} 能级图，14ms为上能级平均寿命

1 基本结构

掺铒光纤激光器的基本结构与其它类型的激光器基本相同，主要由泵浦源、掺稀土元素光纤、谐振腔等部件构成。此处掺铒光纤是增益介质。当泵浦光（多采用半导体光源）通过掺铒光纤时，借助泵浦光的能量实现 Er^{3+} 的反转分布，随后出现受激辐射光放大。常见的谐振腔结构主要有两种：

(1) F-P 腔

使用介质膜或金属膜的方法构成F-P腔，典型的线性腔光纤激光器如图1.7所示。可以有单向泵浦、双向泵浦两种，其中单向又可分为正向泵浦和反向泵浦两种方式，反向泵浦可使更多泵浦光能量转化为信号光能量，因而可获得比同向泵浦光高约3dB的增益，但反向泵浦方式噪声系数将比同向泵浦高(约1.5dB)，二者相结合的双向抽运可实现高增益。

(2) 环形腔

泵浦光能量由 980 nm /1550nm 波分复用器耦合到掺铒光纤中构成环形谐振腔，隔离器的作用是提高激光输出的稳定性，耦合比可视要求而定。

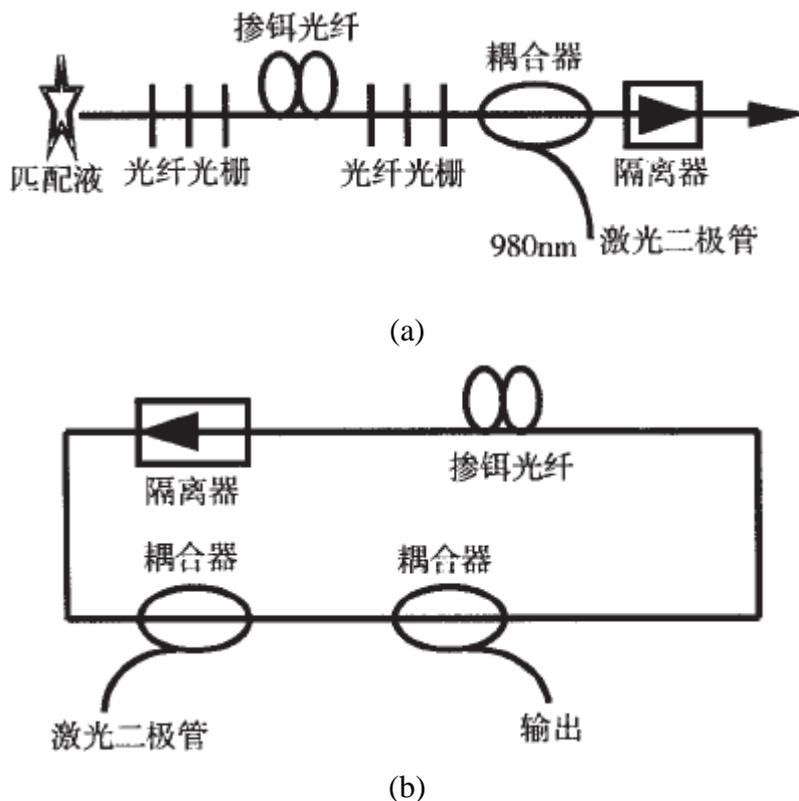


图 1.7 掺铒光纤激光器结构 ((a) F-P 腔; (b) 环形腔)

2 输出特性的实验研究

(1) 实验装置

掺铒光纤激光器的实验系统由半导体激光器、波分复用器、EDF(掺铒光纤)、光耦合器、频谱分析仪等组成，光路实验连接图如下：

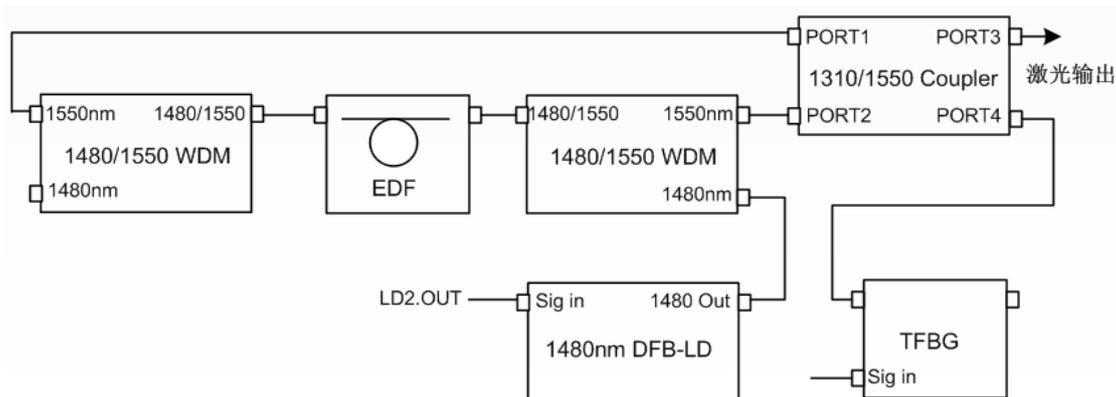


图 1.8 掺铒光纤激光器实验系统图

在图 1.8 所示的实验系统中，1480nm 半导体激光器作为泵浦源，为铒离子在掺铒光纤中基态和亚稳态之间形成粒子数反转分布提供能量。

(2) 激光器输出光功率

将光纤激光器输出端至光功率计 OPM，OPM 量程置 1mW 档，连接 1480nm

泵浦激光器控制信号至主机的 LD2.OUT 端口，设置 LD2 工作模式(MOD)为恒流模式(ACC)，驱动电流(Ic)置为 0。缓慢增加 1480nm 泵浦激光器驱动电流，0 至 300mA 每隔 5mA 记录一次泵浦激光器（1480nm DFB）输出光功率和掺铒光纤激光器输出功率（即 OPM 功率数据），测得的实验数据如表 1.1 所示，其中 Ic（mA）为驱动电流，Pp（mW）为泵浦光功率，Po（ μ W）为光纤激光器输出功率。

表 1.1 掺铒光纤激光器测量数据

Ic (mA)	Pp (mW)	Po (μ W)	Ic (mA)	Pp (mW)	Po (μ W)
0	0	0	155	37.9	363.5
5	0	0	160	39.3	378.6
10	0.1	0	165	40.8	388.4
15	0.2	0	170	42.4	395.8
20	0.3	0	175	43.9	398.8
25	0.3	0	180	45.4	401.9
30	0.6	0.5	185	46.8	405.0
35	2.1	4.3	190	48.3	399.8
40	3.7	12.7	195	49.9	398.5
45	5.4	24.2	200	51.3	406.1
50	6.9	37.4	205	52.7	465.9
55	8.5	52.4	210	54.0	510.2
60	10.0	68.5	215	55.2	552.0
65	11.5	102.5	220	56.3	554.1
70	13.1	120.0	225	57.9	573.9
75	14.5	137.8	230	59.5	574.3
80	16.0	156.1	235	61.0	572.8
85	17.4	174.4	240	62.5	561.2
90	18.9	190.9	245	64.0	560.0
95	20.3	203.9	250	65.3	588.0
100	21.8	210.7	255	66.7	687.2
105	23.4	214.9	260	67.8	720.3
110	24.9	214.8	265	69.0	723.6
115	26.4	215.8	270	70.4	726.8
120	28.0	215.9	275	72.0	729.8
125	29.6	226.7	280	73.6	724.5
130	31.0	246.5	285	74.9	717.8
135	32.5	276.5	290	76.2	710.7
140	33.9	305.2	295	77.6	735.6
145	35.3	324.5	300	79.2	860.5
150	36.6	344.1			

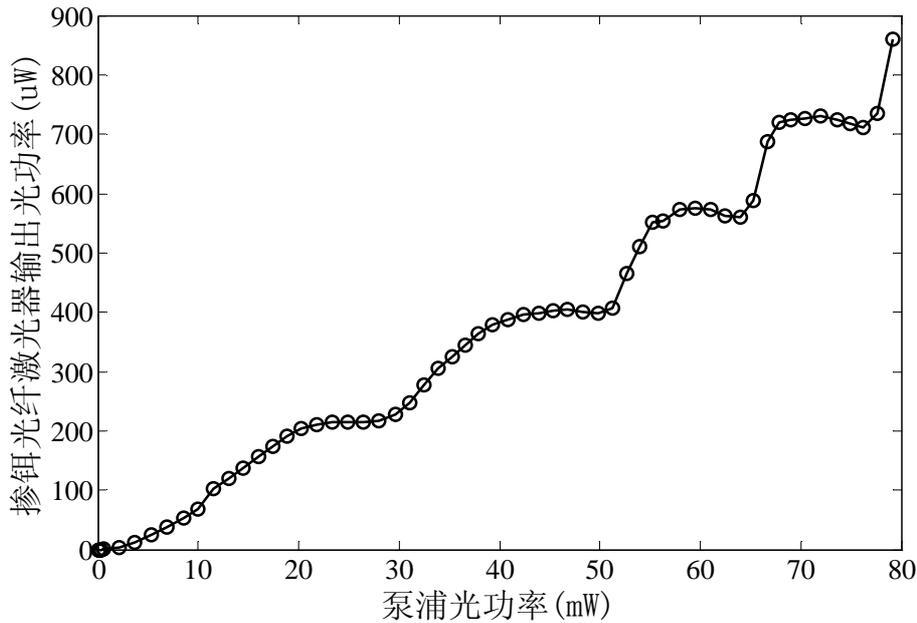


图 1.9 掺铒光纤激光器输出光功率与泵浦光功率关系曲线图

由上述实验数据和曲线图可以看到，引入泵浦光后，初始时刻随着泵浦源驱动电流或泵浦光功率的增加，光纤激光器的输出光功率很微弱，几乎没有激光输出。这是因为由光纤耦合器、波分复用/解复用器、光纤光栅和铒光纤共同构成闭合光纤环，即谐振腔，当光场在谐振腔内往复振荡时，由于光无源器件都有一定的附件损耗，尤其是铒光纤，其损耗值高达 8—10dB/km。所以在初始振荡时刻，虽然光场由于受激辐射光功率得到了一定程度的放大，但功率放大倍数较小，不足以抵消光纤环路的损耗，考虑到环路损耗这一因素后光功率总体呈现减小而不是放大。直到经过足够多次数的受激辐射光放大后，光场的增益大于光纤环路的损耗后才能获得真正意义上的激光输出。此后随着泵浦源驱动电流和输出光功率的增加，曲线呈上升趋势。

(1) 激光器输出光谱特性

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，将光谱分析器功率探头输出连接至 PD，OPMMOD 置 PD/mW，量程 (OPMRT0) 置 100uW 档，再设置 LD2 工作模式 (MOD) 为恒流模式 (ACC)，测量光纤激光器输出光谱，波长范围 1540-1580nm，波长间隔 0.1nm。调节泵浦光激光器驱动电流 LD2 (I_c) 置分别为 100 mA、125 mA、150 mA、175 mA、200 mA、225 mA、250 mA、275 mA、300mA，保存每一驱动电流条件下激光器的输出光谱图，并测量计算每一驱动电流对应的掺铒光纤激光器峰值波长和 3dB 线宽。各驱动电流条件下激光器的输出部分光谱图如下。

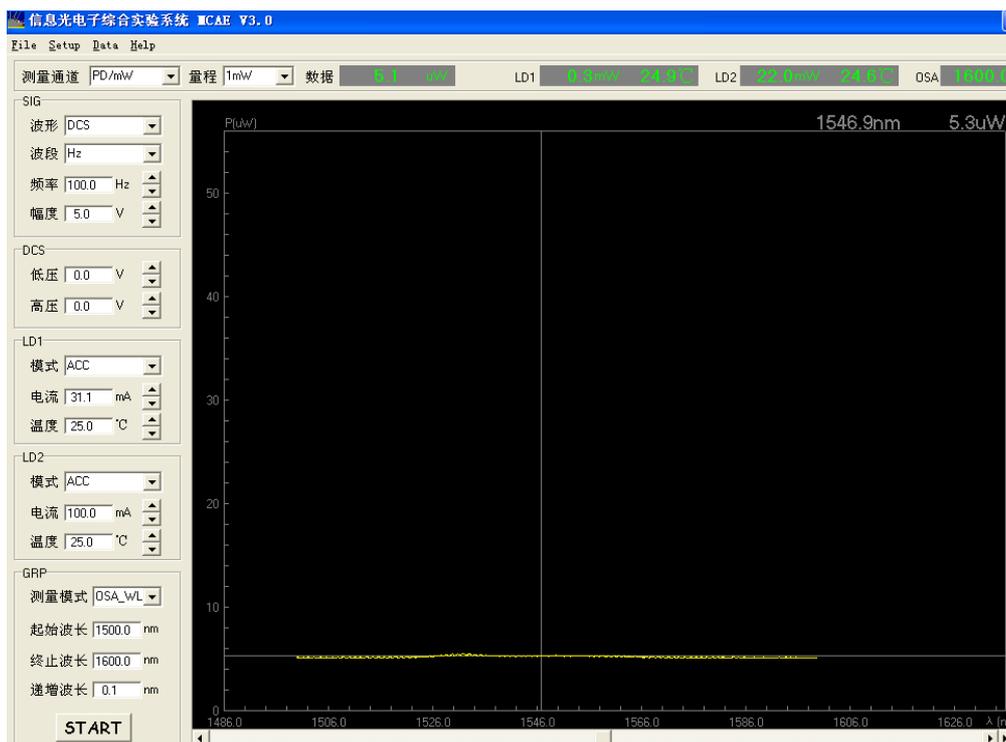


图 1.10 $I_c=100\text{ mA}$ 条件下激光器的输出光谱图

由图 1.20 可看到，当泵浦光驱动电流为 100mA 时，此时光纤激光器输出光谱呈一条直线，观察不到任何明显的峰值光谱，这说明此时激光器没有真正意义上的稳定高功率激光输出。这和前面的理论分析是一致的。

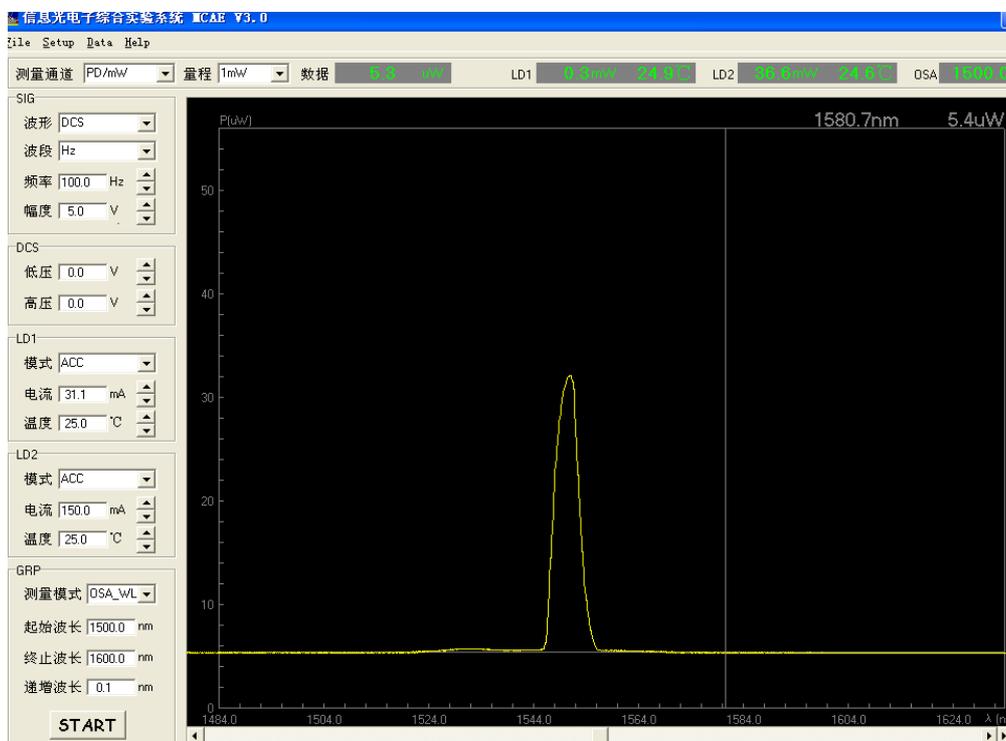


图 1.11 $I_c=150\text{mA}$ 条件下激光器的输出光谱图

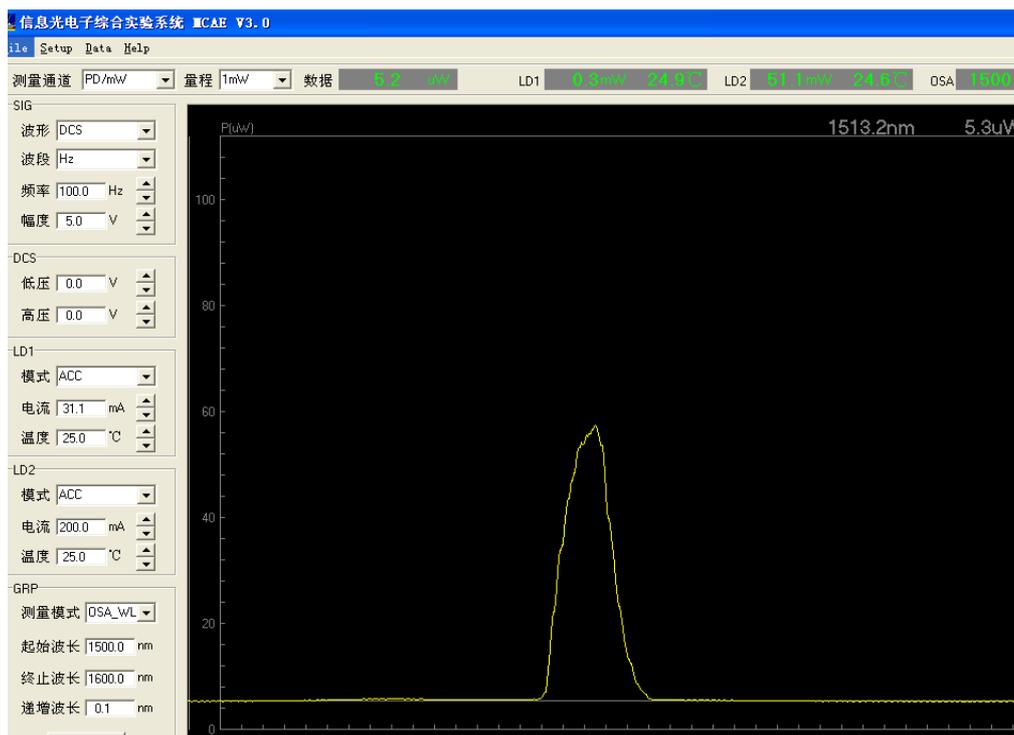


图 1.12 $I_c=200\text{mA}$ 条件下激光器的输出光谱图

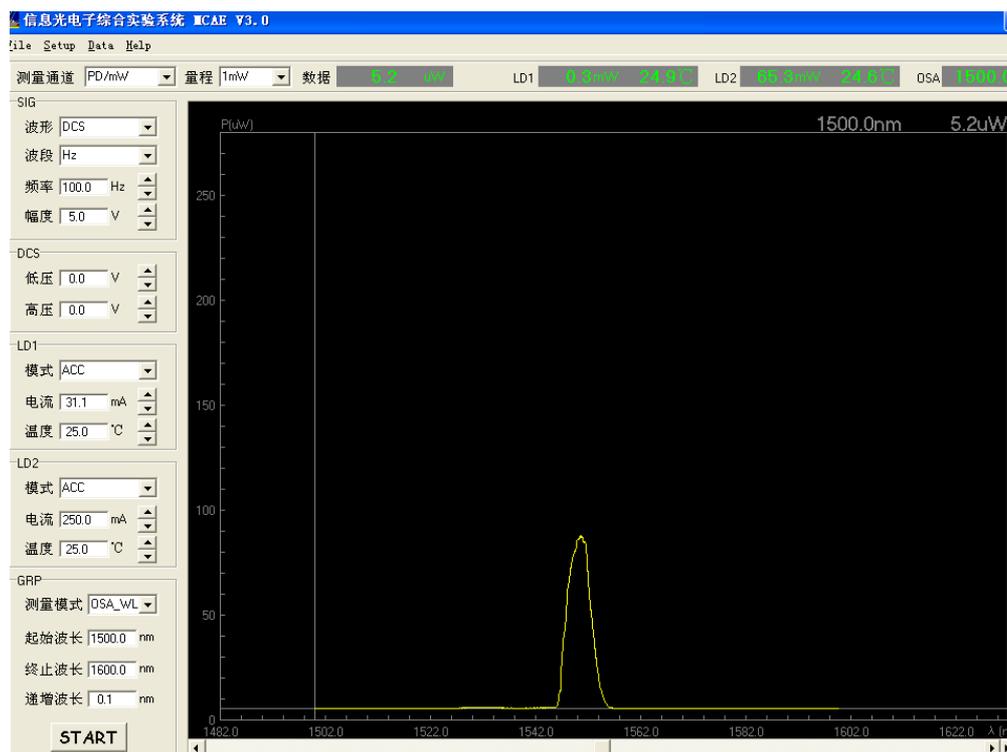


图 1.13 $I_c=250\text{mA}$ 条件下激光器的输出光谱图

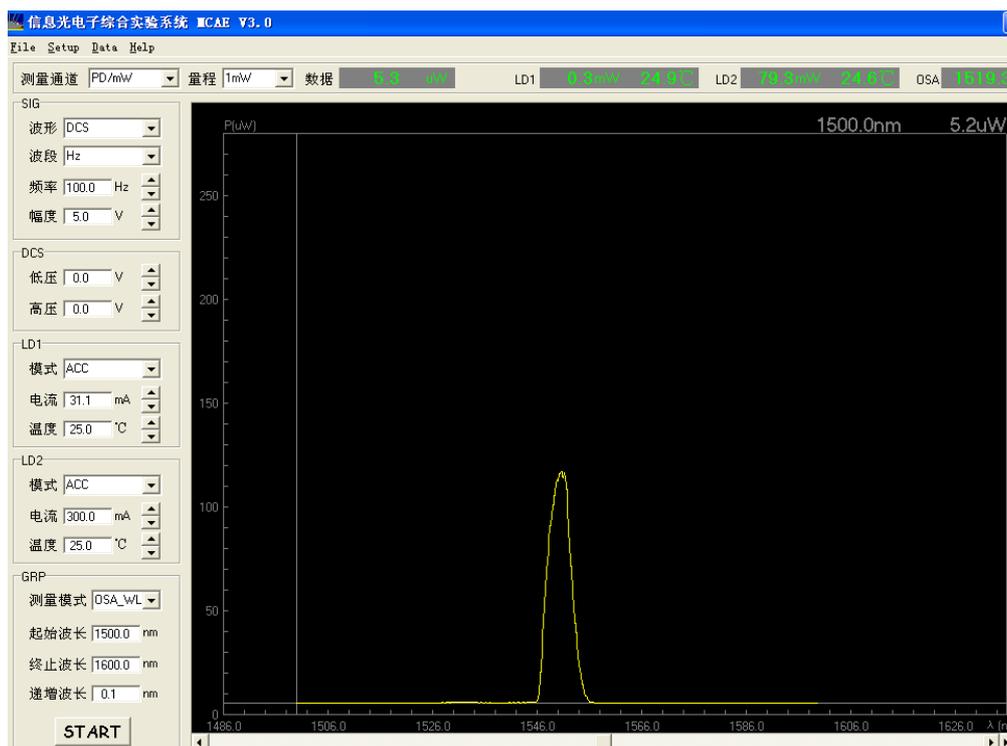


图 1.14 $I_c=300\text{mA}$ 条件下激光器的输出光谱图

根据实验图记录在各驱动电流的条件下激光器输出光的峰值波长,并计算出 3dB 线宽。计算及测量数据如表 1.2 所示。

表 1.2 不同泵浦光驱动电流条件下激光器峰值波长、3dB 线宽

I_c (mA)	λ_{max} (nm)	3dB 线宽 (nm)
100	1550.3	0
125	1550.5	8.8
150	1550.7	9.1
175	1550.5	5.6
200	1551.1	5.4
225	1550.6	5.0
250	1550.9	5.2
275	1551.1	5.2
300	1550.9	5.3

根据以上数据绘制“驱动电流—3dB 线宽”曲线和“驱动电流—峰值波长”曲线。

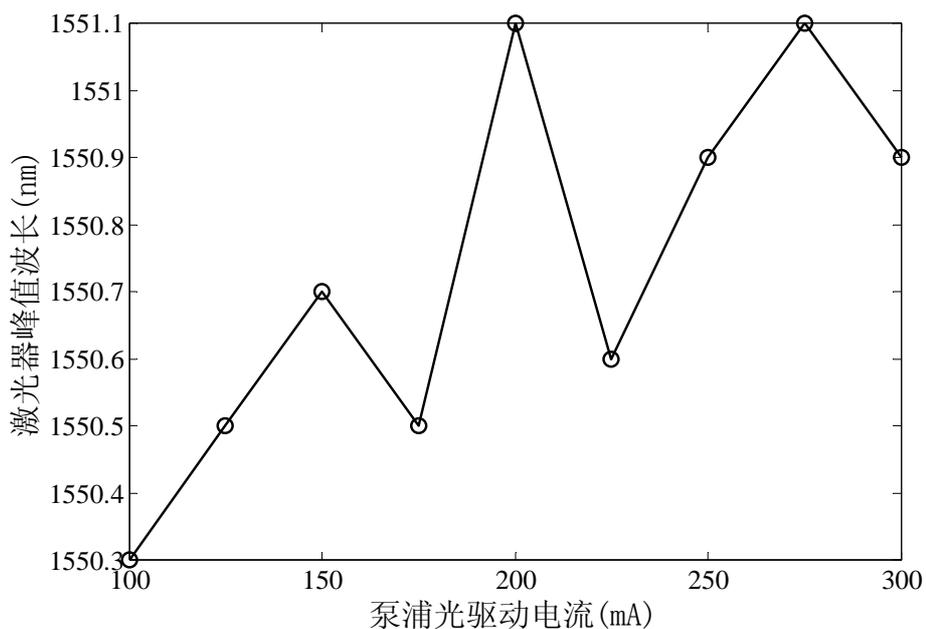


图 1.15 不同泵浦光驱动电流条件下激光器峰值波长

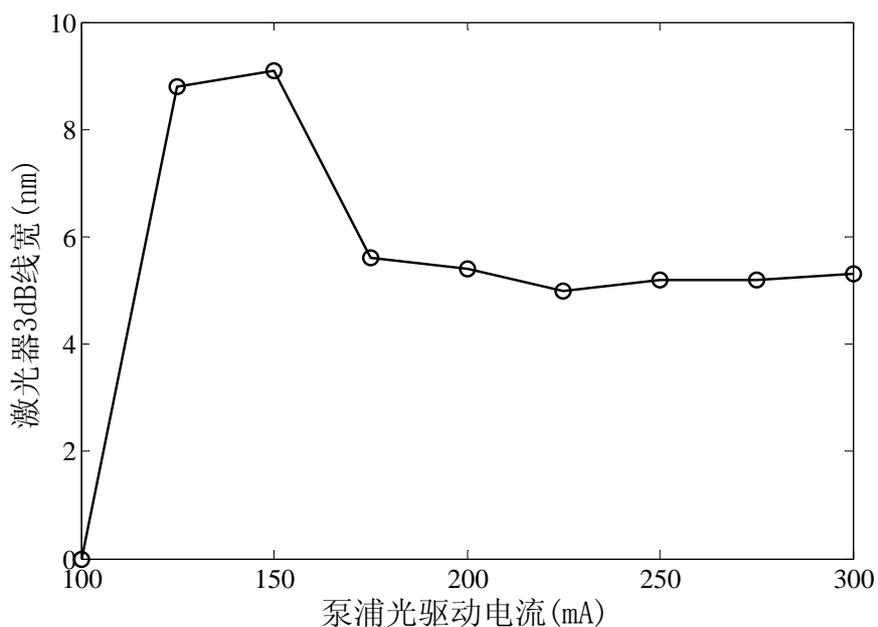


图 1.16 不同泵浦光驱动电流条件下激光器 3dB 线宽

从图 1.15 可知泵浦光驱动电流不同，对应的峰值波长也不相同，随着驱动电流的增加，峰值波长大体向长波长方向漂移，但漂移量限制在小于 1nm 的范围内，该光纤激光器的波长稳定性较为理想。、图 1.16 可知，当泵浦光驱动电流大于或等于 200mA 时，激光器 3dB 线宽基本保持一条直线，数值大约在 5nm 左右。当驱动电流大于或等于阈值电流时，光纤激光器工作处于工作稳定状态。

1.2 光纤放大器

光放大器有多种类型,包括半导体激光放大器和光纤型光放大器两类。光纤型光放大器有光纤喇曼放大器(FRA)、光纤布里渊放大器(FBA)、光纤参量放大器(FPA)和掺杂光纤放大器(如EDFA)等几种。光纤喇曼放大器和布里渊放大器利用所谓受激喇曼和布里渊散射两种非线性和非弹性散射过程,是石英光纤固有的现象,作为非线性介质的光纤,通过分子振动和声学声子的参与,起着主动的作用。光纤参量放大器利用光纤的被动作用,依靠束缚电子的非线性响应产生的参量过程,实现光信号的放大。掺杂光纤放大器是一种新型放大器,特别是 $1.55\mu\text{m}$ 的掺铒与 $1.3\mu\text{m}$ 的掺镨光纤放大器具有增益高、噪声低、频带宽、输出功率高等点,具有广泛的应用前景。

1.2.1 光纤放大器原理与特性

1 光放大器原理

光放大器是基于受激辐射或受激散射原理实现入射光信号放大的一种器件,其机制与激光器完全相同。实际上,光放大器在结构上是一个没有反馈或反馈较小的激光器。任何光学介质,当采用泵浦(电学或光学)方法,达到粒子数反转时就产生了光增益,即可实现光放大。一般,光增益不仅与入射光频率(或波长)有关,也与放大器内部光束强度有关。光增益与频率和强度的具体关系取决于放大器增益介质的特性。

由激光器原理可知,对于可用均匀展宽二能级系统模型描述的介质,其增益系数可写为

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + \frac{P}{P_s}} \quad (1.1)$$

式中, g_0 为增益峰值,与泵浦强度有关; ω 为入射光信号频率; ω_0 为原子跃迁频率; P 为被放大信号的功率; P_s 为饱和功率,与增益介质的荧光时间 T_1 和跃迁截面等参数有关; T_1 亦称为粒子数驰豫时间,根据增益介质的不同自 $100\text{ps}\sim 10\text{ms}$ 范围内波动; T_2 为增益介质的偶极驰豫时间,一般为 $0.1\text{ps}\sim 1\text{ns}$ 。方程(1.1)是研究光放大器的基本方程。

2 光增益谱宽与放大器带宽

在方程(1.1)中,当取 $P/P_s \ll 1$,即在小信号或非饱和状态,增益系数为

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2} \quad (1.2)$$

当 $\omega = \omega_0$ 时增益最大，当 $\omega \neq \omega_0$ 时增益随 ω 的改变而按洛仑兹分布变化。实际放大器增益谱可能不完全是洛仑兹分布，有时甚至偏离很大。

增益谱宽定义为增益谱 $g(\omega)$ 降至最大值一半处的全宽 (FWHM)。对于洛仑兹分布，增益谱宽为 $\Delta\omega_g = 2/T_2$ 或

$$\Delta\nu_g = \frac{\Delta\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2} \quad (1.3)$$

这表明，在小信号条件下，增益谱宽主要决定于增益介质的偶极驰豫时间 T_2 。对于半导体激光器， $T_2 \approx 0.1ps, \Delta\nu_g \approx 3THz$ 。

由介质的增益谱 $g(\omega)$ ，可求得放大器的带宽。定义放大器的增益或放大倍数为

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.4)$$

式中， P_{out} 和 P_{in} 分别为被放大信号的输出和输入功率。在长度为 L 的放大器中，光信号沿长度逐步被放大，光功率随距离的变化规律为 $dP/dz = gP$ ，在 z 点的功率为 $P(z) = P_{in} \exp(gz)$ ，输出功率为 $P_{out} = P(L) = P_{in} \exp[g(\omega)L]$ ，因此放大器的增益为

$$G(\omega) = \exp[g(\omega)L] \quad (1.5)$$

上式表明 G 与 g 之间存在指数依存关系，当频率 ω 偏离 ω_0 时， $G(\omega)$ 下降的比 $g(\omega)$ 快得多。

放大器的带宽 $\Delta\nu_A$ 定义为 $G(\omega)$ 降至最大放大倍数一半 (3dB) 处的全宽度 (FWHM)，它与介质的增益谱宽 $\Delta\nu_g$ 的关系为

$$\Delta\nu_A = \Delta\nu_g \left(\frac{\ln 2}{g_0 L - \ln 2} \right) \quad (1.6)$$

如所预料，放大器的带宽比介质增益谱宽窄很多。图 1.17 给出了归一化增益 G/G_0 和 g/g_0 随归一化失谐 $(\omega - \omega_0)T_2$ 变化的曲线，其中 g_0 为增益峰值， G_0 为放大器的峰值增益： $G_0 = \exp(g_0 L)$ 。

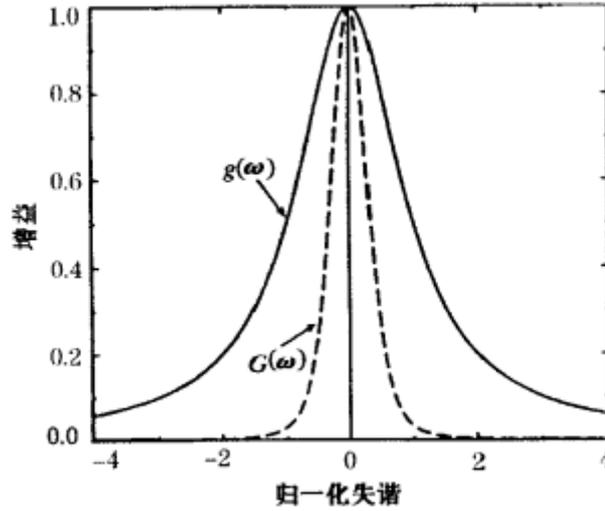


图 1.17 二能级光放大器增益谱及其相应介质的洛仑兹增益谱特性

3 增益饱和与饱和输出功率

增益饱和是放大器放大能力的一种限制因素，起因于方程 (1.1) 中增益系数与功率的依存关系。当 $P \ll P_s$ 时， $g(\omega)$ 简化为方程 (1.2)，称为小信号增益。当 P 增大至可与 P_s 相比拟时， $g(\omega)$ 降低， $G(\omega)$ 也降低。为简化讨论，设输入信号频率 $\omega = \omega_0$ ，将式 (1.1) 代入 $dP/dz = gP$ 可知，光功率随距离按下述关系变化

$$\frac{dP}{dz} = \frac{g_0 P}{1 + P/P_s} \tag{1.7}$$

利用初始条件： $P(0) = P_{in}, P(L) = P_{out} = GP_{in}$ ，对上式积分，可得放大器增益为

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{G-1}{G} \cdot \frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \tag{1.8}$$

式中， G_0 为小信号增益。图 1.18 给出了 G/G_0 随 P_{out}/P_s 变化的曲线，表明随着输出功率的增大，增益出现了饱和。

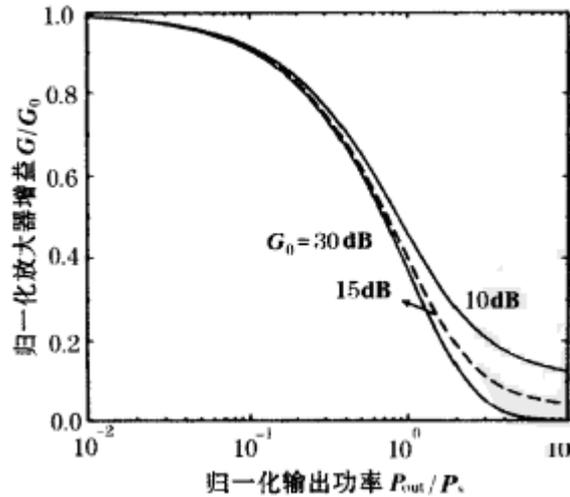


图 1.18 放大器增益随输出功率的变化

通常定义放大器增益降至最大小信号增益一半或 3dB 时的输出功率为饱和输出功率，按此定义，将 $G = G_0/2$ 代入式 (1.8)，可得饱和输出功率为

$$P_{out}^s = \frac{G_0 \ln 2}{G_0 - 2} P_s \quad (1.9)$$

一般， G_0 在 100~1000 (20~30dB) 范围内，因而 $P_{out}^s \approx 0.69P_s$ ，表明放大器的饱和输出功率比增益介质的饱和功率低约 30%。

4 光放大器在光波系统中的应用

光放大器具有高增益和高功率放大能力，在各种不同的光波通信系统中均可得到应用。图 1.19 展示了四种基本应用。第一种应用(图(a))是将光放大器作为在线放大器代替电光混合中继器，当光纤色散和放大器自发辐射噪声累积尚未使系统性能恶化到不能工作时，这种代替是完全可行的，特别是对多信道光波系统更具诱惑力，可节约大量设备投资。第二种应用(图(b))是将光放大器接在光发送机后以提高光发送机的发达功率，增加传输肿离，这种放大器称为功率放大器。第三种应用(图(c))将光放大器接在光接收机前，以提高接收功率和信噪比，增加通信距离，这种放大器称为前置放大器。第四种应用(图(d))将光放大器用于补偿局域网中的分配损耗，以增大网络节点数。还可以将光放大器用于光子交换系统等多种场合，这种放大器亦称为功率放大器。

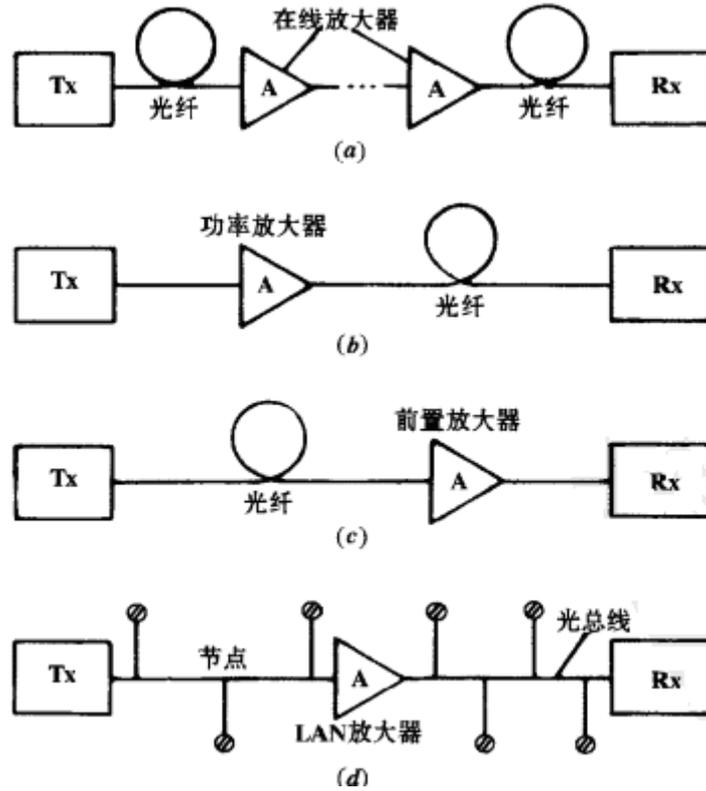


图 1.19 光放大器在光波系统中的可能应用

(a) 用作线路放大器 (b) 用作光发送机功率放大器 (c) 用作光接收机前置放大器 (d) 用作局域网的功率放大器

1.2.2 掺铒光纤放大器

掺杂光纤放大器利用掺入石英光纤的稀土离子作为增益介质，在泵浦光的激发下实现光信号的放大，放大器的特性主要由掺杂元素决定，而不是由起主介质作用的石英光纤决定。有许多不同的稀土元素，如铒(Er)，钬(Ho)，钕(Nd)，钐(Sm)，铥(Tm)，镨(Pr)和镱(Yb)等，都可用于实现不同波长的光放大器，这些波长覆盖了从可见光到红外的很宽范围，直至 $2.8 \mu\text{m}$ ，其中掺铒和掺镨光纤放大器分别工作于 $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.3 \mu\text{m}$ ，具有高增益、高功率和宽带宽等优良特性，是迄今各类光放大器中最有发展前景的一种，在光波通信系统中具有广泛的应用，已导致光纤通信技术的巨大变革。本节将只讨论掺铒光纤放大器的工作原理、特性及其应用。

1 EDFA 工作原理

掺铒光纤放大器(简称 EDFA)采用掺铒离子单模光纤作为增益介质，在泵浦光激发下产生粒子数反转，在信号光诱导下实现受激辐射放大，其结构如图 1.20 所示。泵浦光由半导体激光器(LD)提供，与被放大信号光一起通过光耦合器或波

分复用耦合器注入掺铒光纤 (EDF)。光隔离器用于隔离反馈光信号, 提高稳定性。光滤波器用于滤除放大过程中产生的噪声。为了提高 EDFA 的输出功率, 泵浦激光亦可从 EDF 的末端 (放大器输出端) 注入, 或输入输出端同时注入, 分别如图 1.30 (a)、(b)、(c) 所示。这三种结构的 EDFA 分别称作前向泵、后向泵和双向泵掺铒光纤放大器。图 1.21 给出了实用 EDFA 的外形结构图。

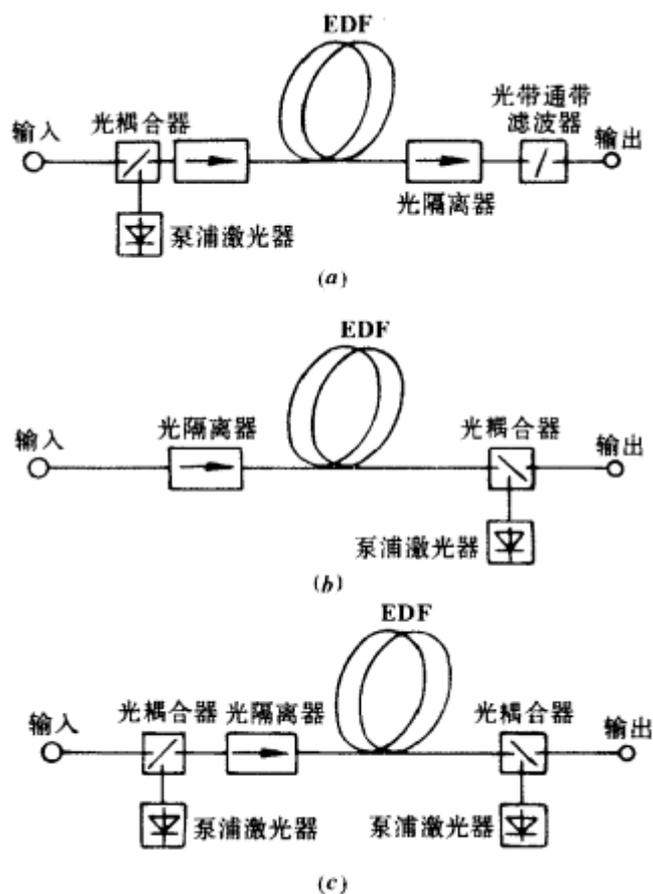


图 1.20 掺铒光纤放大器的基本结构
 (a) 前向或正向泵浦结构; (b) 后向或反向泵浦结构; (c) 双向泵浦结构

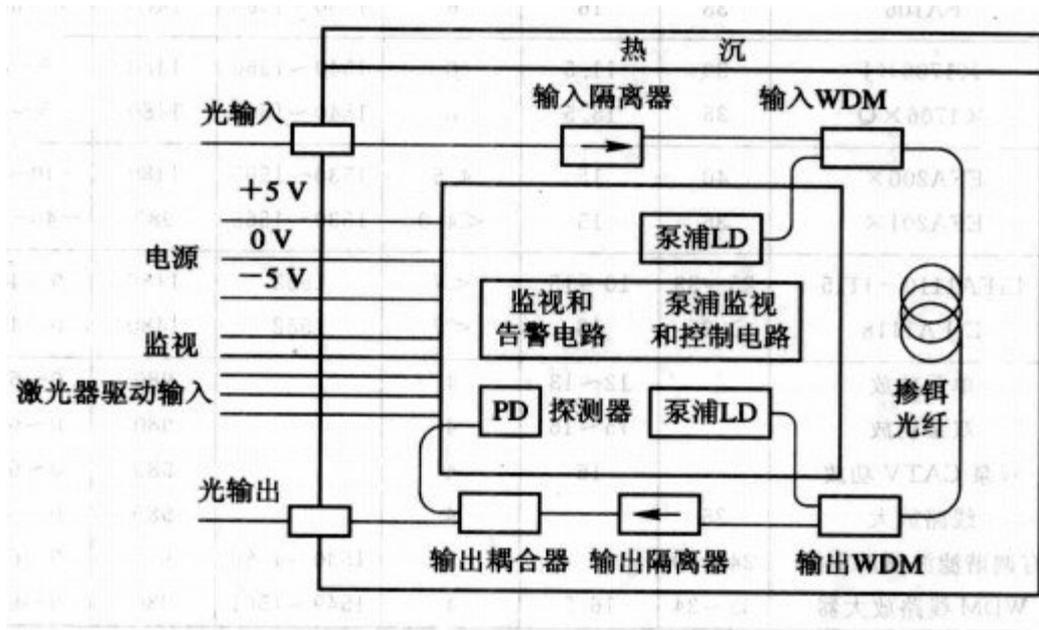
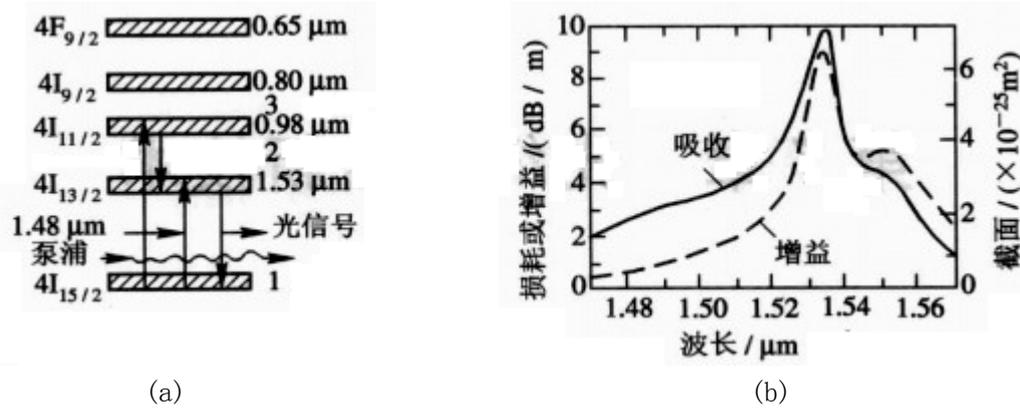


图 1.21 实用 EDFA 的外形结构图



(a)

(b)

图 1.22 EDFA 的工作原理

(a) EDF 中铒离子能级图；(b) EDFA 的吸收和增益谱

参照图 1.22(a)所示的铒离子的能级图，对 Er^{3+} ，存在如下有实际意义的跃迁过程：

$$\text{吸收过程：从基态 } 4I_{15/2} \rightarrow \begin{cases} 4I_{9/2} (\text{对应 } 800\text{nm 泵浦}) \\ 4I_{11/2} (\text{对应 } 980\text{nm 泵浦}) \\ 4I_{13/2} (\text{对应 } 1480\text{nm 泵浦}) \end{cases}$$

激光发射过程：从激发态 $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ (对应 1536nm)

在掺铒光纤中，铒离子有三个能级：其中 1 代表基态，能量最低；能级 2 是亚稳态，处于中间能级；能级 3 代表激发态，能量最高。当泵浦光的光子能量等于能级 3 和能级 1 的能量差时，铒离子吸收泵浦光从基态跃迁到激发态(1—3)。但是激发态是不稳定的， Er^{3+} 很快返回到能级 2。如果输入信号光的光子能量等于能级 2 和能级 1 的能量差，则处于能级 2 的 Er^{3+} 将跃迁到基态(2—1)，产生受

激辐射光，因而信号光得到放大。由此可见，这种放大是由于泵浦光的能量转换为信号光能量的结果。为提高放大器增益，应提高对泵浦光的吸收，使基态 Er^{3+} 尽可能跃迁到激发态。图 1.22 (b) 给出了一种芯区掺铒的铒光纤的增益和吸收频谱，可见其增益谱很宽 ($\text{FWHM} > 10\text{nm}$)，并有双峰结构，增益谱线和吸收谱线部分重叠，主峰靠的很近。

利用 980nm 和 1480nm 附近的半导体激光器可以有效泵浦 EDFA，仅用几毫瓦的泵浦功率就可以获得 30~40dB 的高增益放大，泵浦效率可达 11dB/mW 和 5dB/mW。在 820nm 波长上效率低，约 0.8dB/mW，但利用 40~50mW 的泵浦功率可实现 30 dB 的高增益放大。

2 EDFA 的小信号增益和饱和特性

EDFA 的增益与许多参数有关，如 Er^{3+} 浓度与径向分布、光纤尺寸、泵浦功率与输入信号功率等，一般可用速率方程阐明。对于 1480nm、980nm、800nm 泵浦波长可分别用二能级、三能级、四能级速率方程。三能级系统中，由于泵浦能级 3 上的粒子向能级 2 的快速驰豫而基本上是空的，因而亦近似可用二能级系统速率方程分析。为简化分析和便于理解，下面采用二能级速率方程

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_p N_1 - W_s (N_2 - N_1) - \frac{N_2}{\tau_{sp}} \quad (1.10)$$

其中， $N_1 = N_t - N_2$ 为基态后下能级粒子数； N_2 为上能级粒子数； N_t 为总粒子数密度； τ_{sp} 为上能级粒子寿命； W_p, W_s 分别为泵浦几率和信号光的受激发射几率

$$W_p = \sigma_p P_p / (a_p h \nu_p) = \sigma_p I_p / h \nu_p \quad (1.11)$$

$$W_s = \sigma_s P_s / (a_s h \nu_s) = \sigma_s I_s / h \nu_s \quad (1.12)$$

其中 σ_p, σ_s 分别为泵浦频率 ν_p 和信号频率 ν_s 处的受激吸收和受激发射截面， a_p, a_s 分别为光纤中泵浦光和信号光模式的横截面面积； P_p, P_s 分别为泵浦光和信号光功率； I_p, I_s 分别为泵浦光和信号光光强。式 (1.10) 的稳态解为

$$N_2 = \frac{P'_p + P'_s}{1 + 2P'_s + P'_p} N_t \quad (1.13)$$

其中， $P'_p = P_p / P_p^{sat}, P'_s = P_s / P_s^{sat}$ ； P_p^{sat}, P_s^{sat} 为饱和功率。由于吸收、受激辐射和自发辐射作用，使泵浦功率和信号功率沿放大器长度方向变化，当忽略自发辐射影响时， P_p, P_s 按如下规律变化

$$\frac{dP_p}{dz} = -\sigma_p N_1, \frac{dP_s}{dz} = \sigma_s (N_2 - N_1) \quad (1.14)$$

利用 $N_1 = N_t - N_2$ 和式 (1.13) 可得

$$\frac{dP_p}{dz} = \frac{(1 + P'_s)}{(1 + 2P'_s + P'_p)} \alpha_p P_p \quad (1.15)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\frac{(P'_p - 1)}{(1 + 2P'_s + P'_p)} \alpha_s P_s \quad (1.16)$$

其中 $\alpha_s = \sigma_s N_t, \alpha_p = \sigma_p N_t$, 分别为信号和泵浦频率处的吸收系数。由上述方程可导出增益 G 与铒光纤长度 L 和输入泵浦功率 P_{pin} 的解析表达式, 是一个超越方程

$$\ln\left(\frac{P_{pin}}{P_{th}} - \frac{1}{2} \alpha_p L - \frac{1}{2} \frac{\alpha_p}{\alpha_s} \frac{\ln 10}{10} G\right) + \frac{1}{2} \alpha_p L - \frac{1}{2} \frac{\alpha_p}{\alpha_s} \frac{\ln 10}{10} G = \ln\left(\frac{P_{pin}}{P_{th}}\right) \quad (1.17)$$

其中 P_{th} 代表增益 $G = 0$ 或使 EDF“透明”所需的泵浦功率, 定义为: $P_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_{sp}} a_p$,

其值可通过实验测试 α_p 和 P_p 后按下式求得

$$\ln\left(\frac{P_p}{P_{th}} - \frac{1}{2} \alpha_p L\right) + \frac{1}{2} \alpha_p L = \ln\left(\frac{P_p}{P_{th}}\right) \quad (1.18)$$

方程(1.17)可用于分析 EDFA 的放大性能, 设计放大器的参数。图 1.23 展示了用典型参数计算所得 $1.55 \mu\text{m}$ EDFA 的小信号增益随泵浦功率和放大器长度而变的曲线。在图(a)中, 对给定的放大器长度 L , 放大器增益光随泵浦功率按指数增长, 当泵浦功率超过某一值后, 增长变慢了。在图(b)中, 对给定的泵浦功率, 放大器增益随长度变化, 并存在一最佳长度, 超过此长度后, 由于泵浦功率的消耗, 最佳点后的铒光纤不能受到足够泵浦, 而且要吸收已放大的信号能量, 导致增益很快降低。从图中曲线可见, 采用 $1.55 \mu\text{m}$ 信号波长、5mW 的泵浦功率, 在 $L = 30\text{m}$ 时已达到 30dB 的增益, 过长已无意义。

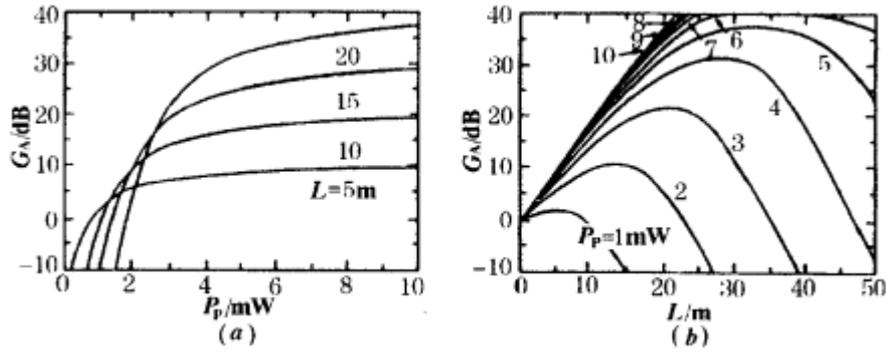


图 1.23 1.48 μm 泵浦的 EDFA 的放大特性

对于给定的 EDFA，由方程(1.15)和(1.16)也可得到输出功率 P_{out} 与输入泵浦功率 P_{pin} 和输入信号功率 P_{sin} 关系的解析表达式

$$\ln\left(\frac{rP_{out}}{P_{th}}\right) - \ln\left(\frac{rP_{sin}}{P_{th}}\right) + \left(\frac{rP_{out}}{P_{th}} - \frac{rP_{sin}}{P_{th}}\right) = \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \left[\frac{P_{pin}}{P_{th}} - 1 - \ln\left(\frac{P_{pin}}{P_{th}}\right) \right] \quad (1.19)$$

其中 $r = v_p/v_s$ 。图 1.24(a) 展示了归一化输出功率随归一化输入功率而变的计算曲线，称为 EDFA 的幅值特性。由式(1.19)亦可得到增益随输入和输出功率而变化的曲线。图 1.24(b) 给出了某典型参数的 EDFA 在不同泵浦功率时增益随输出功率的变化及增益饱和特性，由图可得到增益降低 3dB 时的饱和输出功率。

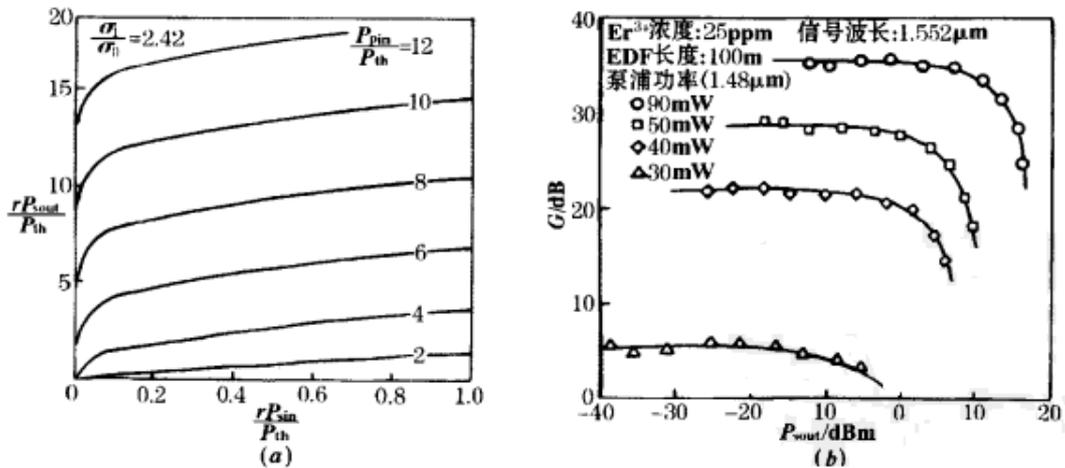


图 1.24 EDFA 的幅值特性和增益饱和特性

(a)EDFA 输出功率随输入功率的变化；(b)EDFA 增益随输出功率的变化

3 EDFA 特性的实验研究

实验内容分两部分，第一部分是掺铒光纤放大器增益特性测量，第二部分是 EDFA 增益谱测量。实验设计的实验方案如图 1.25 所示：

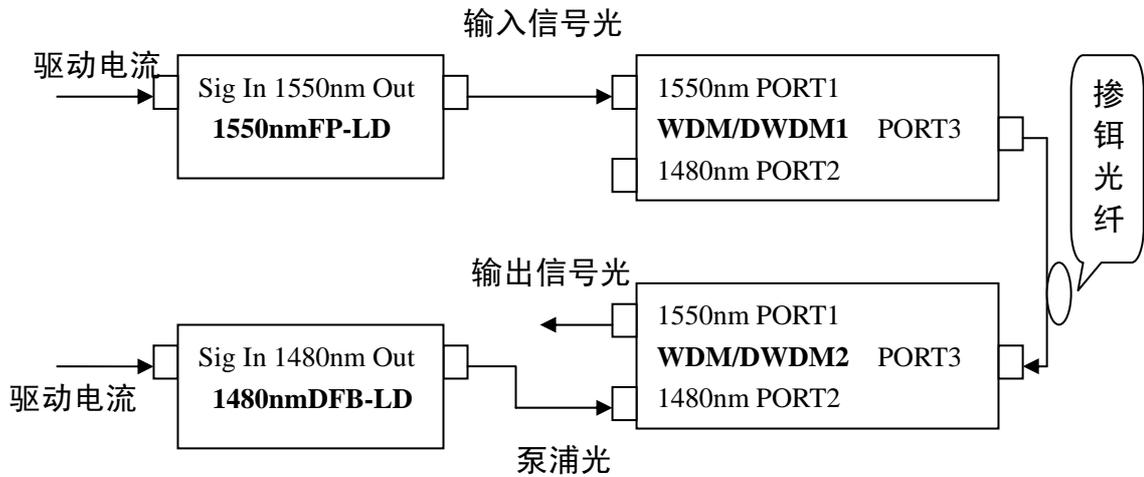


图 1.25 掺铒光纤放大器实验原理图

图 1.25 中“1550nm FP-LD”为法布里-珀罗腔结构的半导体激光器，由于 EDFA 主要工作在 1530nm~1560nm 范围内，所以本实验采用 1550nm FP-LD 激光器作为信号光源。“1480nm DFB-LD”为分布式反馈结构的半导体激光器，发射波长为 1480nm 的激光，作为 EDFA 的泵浦光源。这样的话，铒离子(Er^{3+})从基态跃迁到亚稳态能带的上部，然后粒子以非辐射方式迅速在亚稳态上重新分布，实现粒子数反转，可以比 980nm 泵浦光获得较大的输出功率。“WDM/DWDM”为波分复用/解复用器，可完成 1480nm 激光和 1550nm 激光束的分路与合路功能。

实验时，先把直流形式的驱动电流接入激光器，波长为 1550nm 的信号光经由 WDM/DWDM1 进入掺铒光纤。为了获得较高的增益，本试验采用的后向泵浦的方式。泵浦光经 WDM/DWDM2 耦合到掺铒光纤中，这样信号光和泵浦光在掺铒光纤中反向传输。如图所示，放大之后的信号光将从 WDM/DWDM2 的 PORT1 端口输出。利用光功率计就可以准确测量放大后输出的信号光功率。

(1) 增益特性研究

调节驱动电流使 1550nm 激光器输出光功率分别为 0.05mW, 0.1mW, 0.15mW, 0.2mW 时，缓慢增加 1480nm 泵浦光激光器输出功率，0 至 74 mW 每隔 2 mW 记录一次 EDFA 输出信号光功率 OPM 的数据，分别记为 OPM1、OPM2、OPM3、OPM，并计算出不同泵浦光功率条件下对应的 EDFA 的信号光增益，实验测量及计算结果如表 1.3 所示，并利用测量数据绘制图 1.26 和图 1.27。(增益 $G(\text{dB}) = 10\lg(P_{\text{out}} / P_{\text{in}})$)

表 1.3 EDFA 输出光功率和泵浦光功率的关系

Po (mW)	OPM1 (mW)	OPM2 (mW)	OPM3 (mW)	OPM4 (mW)	G1 (dB)	G2 (dB)	G3 (dB)	G4 (dB)
0	0	0	0	0	-	-	-	-
2	0.001	0.002	0.005	0.008	-16.9897	-16.9897	-14.7712	-13.9794
4	0.009	0.017	0.03	0.04	-7.44727	-7.69551	-6.9897	-6.9897
6	0.03	0.048	0.076	0.106	-2.21849	-3.18759	-2.95278	-2.75724
8	0.065	0.097	0.143	0.186	1.139434	-0.13228	-0.20755	-0.31517
10	0.105	0.15	0.236	0.272	3.222193	1.760913	1.968207	1.335389
12	0.143	0.213	0.341	0.365	4.56366	3.283796	3.566631	2.612629
14	0.18	0.292	0.432	0.464	5.563025	4.653829	4.593925	3.65488
16	0.212	0.369	0.5	0.575	6.273659	5.670264	5.228787	4.586378
18	0.243	0.442	0.565	0.703	6.866363	6.454223	5.759572	5.459253
20	0.273	0.495	0.619	0.806	7.371926	6.946052	6.155994	6.05305
22	0.309	0.551	0.673	0.893	7.909885	7.411516	6.519238	6.498215
24	0.337	0.592	0.732	0.962	8.286599	7.723217	6.884198	6.821451
26	0.369	0.629	0.789	1.012	8.680564	7.986506	7.209857	7.041505
28	0.405	0.67	0.85	1.07	9.08485	8.260748	7.533277	7.283538
30	0.448	0.711	0.936	1.127	9.52308	8.518696	7.951846	7.508939
32	0.483	0.75	1.018	1.194	9.849771	8.750613	8.316565	7.759743
34	0.513	0.794	1.097	1.258	10.11147	8.998205	8.641154	7.986506
36	0.538	0.844	1.151	1.32	10.31812	9.263424	8.849841	8.195439
38	0.552	0.889	1.175	1.392	10.42969	9.489018	8.939466	8.426092
40	0.568	0.945	1.207	1.47	10.55378	9.754318	9.05616	8.662873
42	0.59	0.989	1.253	1.561	10.71882	9.951963	9.218598	8.923729
44	0.613	1.021	1.31	1.619	10.8849	10.09026	9.4118	9.082169
46	0.635	1.039	1.364	1.652	11.03804	10.16616	9.587231	9.1698
48	0.66	1.063	1.421	1.673	11.20574	10.26533	9.765028	9.224659
50	0.681	1.094	1.468	1.747	11.34177	10.39017	9.906348	9.412629
52	0.695	1.129	1.507	1.773	11.43015	10.52694	10.02022	9.476787
54	0.709	1.16	1.521	1.83	11.51676	10.64458	10.06038	9.614211
56	0.728	1.192	1.549	1.893	11.63161	10.76276	10.1396	9.761206
58	0.744	1.226	1.6	1.943	11.72603	10.8849	10.28029	9.874428
60	0.764	1.241	1.639	1.965	11.84123	10.93772	10.38488	9.923326
62	0.78	1.26	1.681	1.978	11.93125	11.00371	10.49476	9.951963
64	0.784	1.299	1.716	2.041	11.95346	11.13609	10.58426	10.08813
66	0.803	1.318	1.746	2.08	12.05746	11.19915	10.65953	10.17033
68	0.824	1.324	1.757	2.142	12.16957	11.21888	10.68681	10.29789
70	0.836	1.352	1.81	2.163	12.23236	11.30977	10.81587	10.34027
72	0.836	1.398	1.833	2.172	12.23236	11.45507	10.87071	10.3583
74	0.845	1.416	1.86	2.216	12.27887	11.51063	10.93422	10.4454

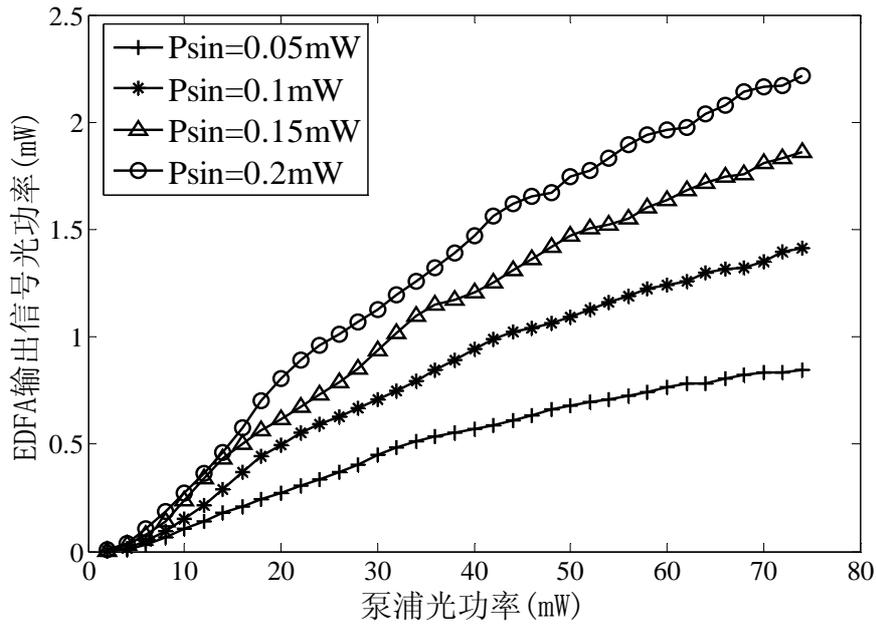


图 1.26 EDFA 输出信号光功率随泵浦光功率变化曲线图

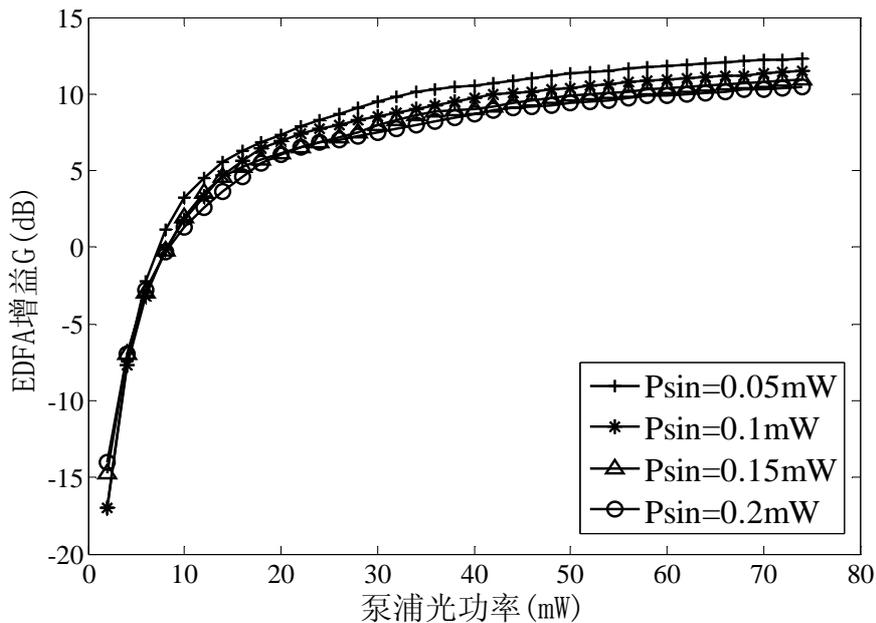


图 1.27 EDFA 增益随泵浦光功率变化曲线图

由图 1.26 和图 1.27 可知,在输入信号光功率分别为 0.05mW, 0.1mW, 0.15mW, 0.2mW 时,输入信号光经 EDFA 放大时,缓慢增加 1480nm 泵浦光激光器输出功率,一开始,输出信号光的光功率均随着泵浦光功率的增加而迅速增加,信号光所获得的增益也均随着泵浦光功率的增加而增加。当泵浦光功率增加到一定程度时,输出光功率还在不断增加,但增益数值趋于饱和,不再显著增加。这主要是由于掺铒光纤长度一定,铒离子浓度一定,随着泵浦光功率的增加,EDFA 的放大能力达到了极限。同时可知,当泵浦光功率一定时,放大器输出信号光功率和

输入信号光功率成正比变化，而放大器的增益却随输入信号光的增加而减小，即放大器增益和输入信号光功率成反比。

(2) 增益谱特性研究

选取宽带的卤素光源作为研究对象，将卤素光源输出光信号接至光谱分析仪，测量光源的光谱，其光谱图如图 1.28 所示。测量波长范围 1520-1650nm，波长间隔 0.1nm。将此光谱作为计算增益谱的基准。

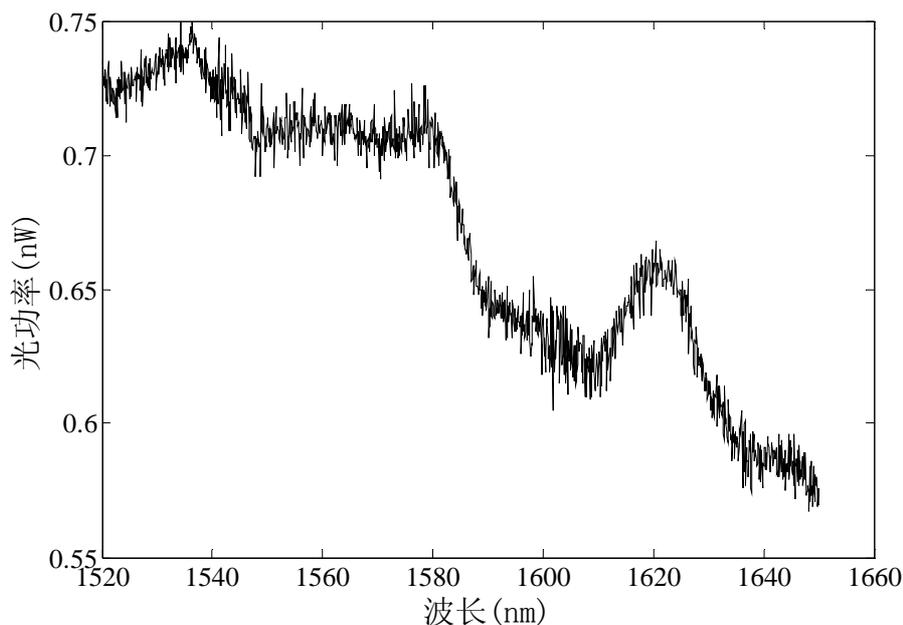


图 1.28 卤素光源光谱

将图 1.25 中的 1550nmFP-LD 用卤素光源代替，作为光信号输入 EDFA，EDFA 输出光信号连接至光谱分析器。设置泵浦光激光器工作模式 (MOD) 为恒流模式 (ACC)，泵浦光驱动电流 (I_c) 置为 400mA。测量 EDFA 输出光谱，测量结果如图 1.29 所示。

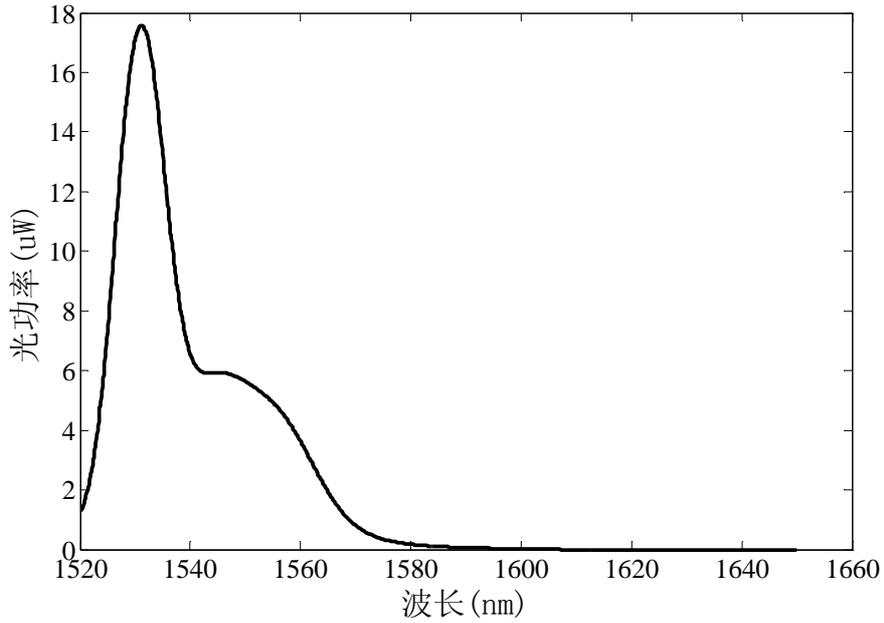


图 1.29 EDFA 输出光谱图

利用图 1.28 和图 1.29 对应的测量数据可计算出每一波长的光信号对应的增益，即 EDFA 的增益谱，计算结果如图 1.30 所示。

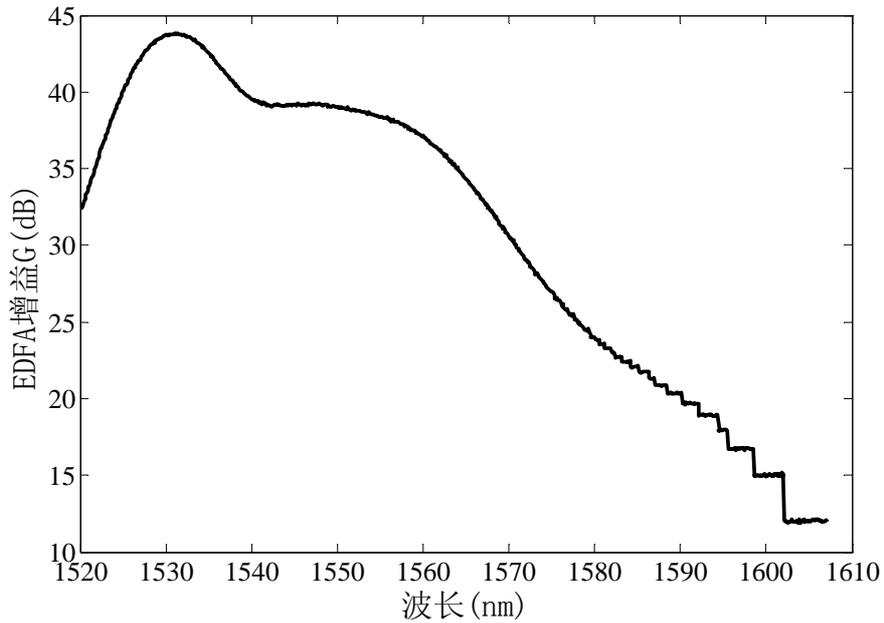


图 1.30 EDFA 增益谱

由图 1.30 可知，在输入信号光波长为 1531.1nm 处 EDFA 获得了峰值增益，其值为 43.8dB，3dB 增益带宽为 12nm。EDFA 在应用中存在一个增益平坦性问题，增益平坦是指增益与波长之间的关系。随着波分复用技术的发展，需要用一个 EDFA 同时对多个信号放大，这就要求 EDFA 在较宽的波段范围内获得均衡的增益。在实际应用中可通过使用均衡滤波器的方法实现其增益平坦。

4 EDFA 的系统应用

EDFA 具有高增益、高功率、宽带宽、低串音、低损耗等优点，早在 1989 年就开始系统应用研究。第一期研究结果使系统容量达 $BL \approx 1(\text{Tb/s}).\text{km}$ ，比特率分别达到 $B=10\text{Gb/s}$ 和 $L \approx 100\text{km}$ 或 $B \geq 1\text{Gb/s}$ 和 $L=1000\text{km}$ 。其后又采用环路系统模拟长距离传输，结果达到 $BL=10\sim 70(\text{Tb/s}).\text{km}(B=2.5\text{Gb/s}, L=21000\text{km}$ 和 $B=5\text{Gb/s}, L=14300\text{km})$ 。至 1993 年采用直线长距离传输试验方案，取得 $BL=20\sim 90(\text{Tb/s}).\text{km}(B=2.5\text{Gb/s}, L=10073\text{km}$ 和 $B=10\text{Gb/s}, L=9000\text{km})$ 。这些实验成功后，EDFA 立即在光波通信系统中取得了应用，图 1.19 已指出了 EDFA 的四种应用功能，现进一步介绍一些应用系统方案及其性能。

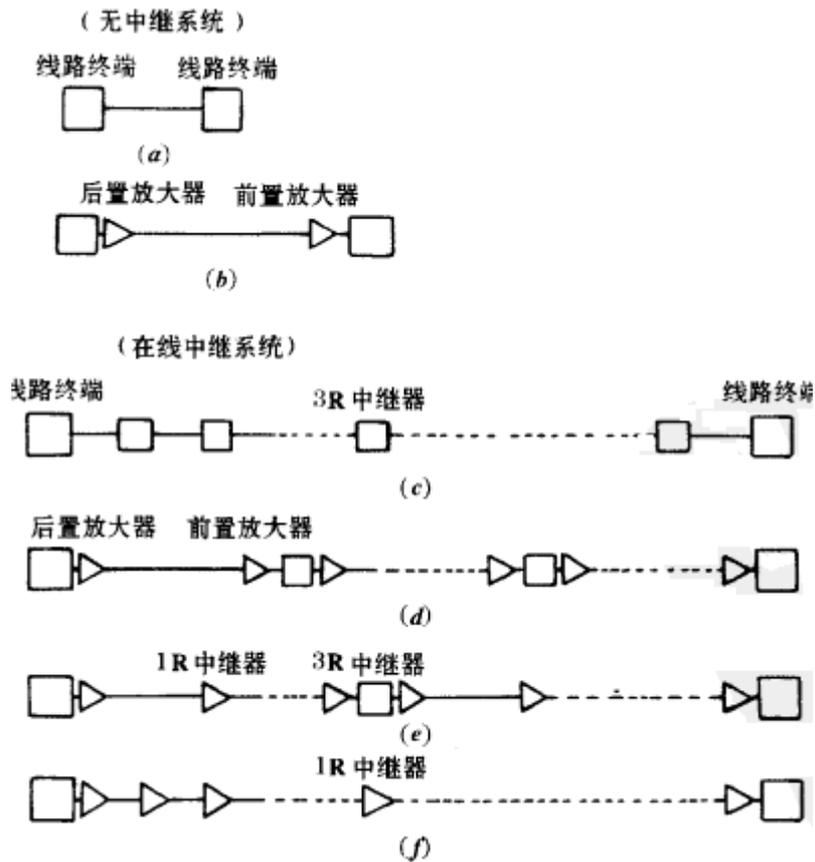


图 1.31 EDFA 在干线光波系统中的应用

图 1.31 为干线光波系统。为比较，图中(a)亦给出了普通无中级系统。图(b)中 EDFA 分别用作光发送机后置放大器和光接收机前置放大器，图(c)为普通 3R 混合中继系统，图(d)EDFA 与 3R 中继器级级联，每段间接入 3R 混合中继，以提高系统性能，延长通信距离，图(e)采用后置放大器和前置放大器，在线多级 1R 整形中继器，3R 混合中继器机器组合系统级联，以延长通信距离，图(f)为不设置再生中继器的全光放大长距离通信系统，运用于低速 ($\leq 2.5 \text{ Gb/s}$)、窄谱线

光发送机和低色散或零色散（位移）光线系统。采用不设在线 EDFA 或再生中继器的图(b)方案已使 2 Gb/s 的信号传输距离超过 300 km。

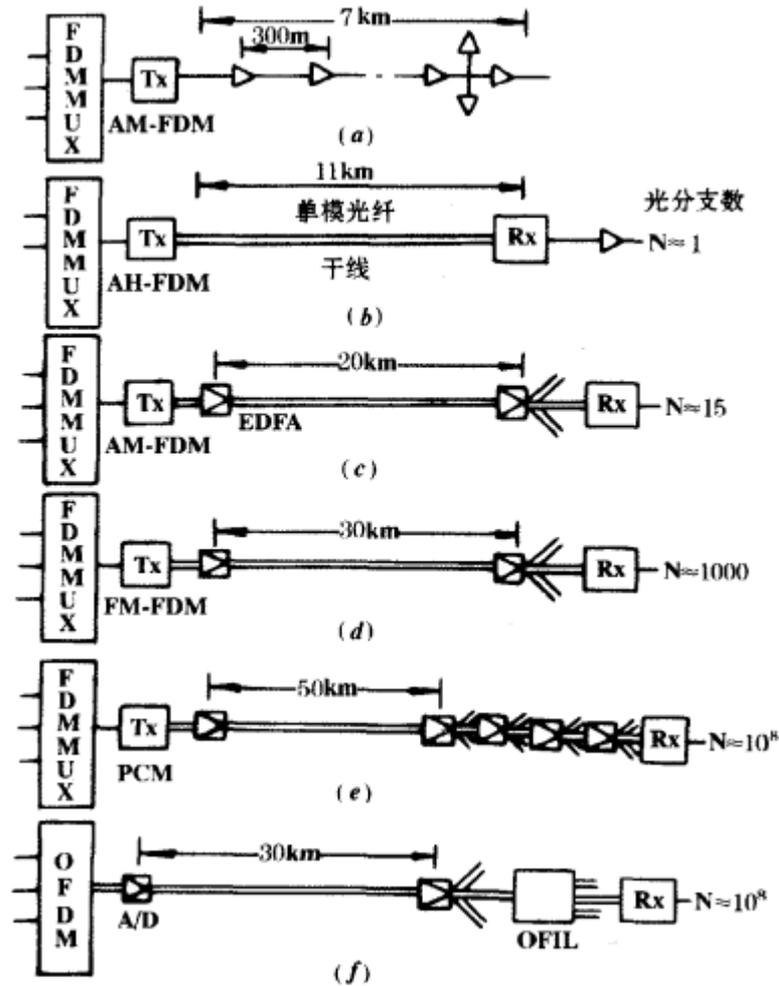


图 1.32 EDFA 在宽带光波分配系统中的应用

图 1.32 为EDFA在宽带波分配系统（如CATV或星形局域网）中的应用方案。在现在广泛使用的CATV同轴电缆网中，服务范围在 7 公里以内，而且要接入很多的电放大器，图(a)所示。当采用单模光纤代替电缆，采用 $1.3\mu\text{m}$ 的光载波传送节目时，服务范围扩大到 11 公里，如图(b)所示。当采 $1.5\mu\text{m}$ 的光放大器作为 AM-FDM光发送机的功率提升放大器和分配中心光接收机的前置放大器时，传输距离可达 20 公里，而且采用星形耦合器可提供约 15 个光分路，服务范围扩大很多，如图 (c)。当采用 $1.5\mu\text{m}$ 的EDFA放大FM-FDM信号时，传输距离可达 30 公里，光分路数可达 1000，如图(d)。在数字光放大系统中，采用多级级联放大和分路的方法，分路数可达 10^8 ，如图(e)。采用光频分复用（OFDM）的数字/模拟混合系统，在EDFA的带宽内可传输 100 路FM视频信号和 6 路 622Mb/s的数字基带信号，一个这种广播网可为 10^8 个用户提供服务，如图(f)。

1.2.3 光纤拉曼放大器

受激喇曼放大器是非线性光学研究中的一个重要问题,自激光器发明后就开展了广泛的研究。光纤中受激喇曼散射(SRS)的研究始于 70 年代初期,研究发现,石英光纤具有很宽的喇曼增益谱(达 40THz),并在 13 THz 附近有一较宽的主峰,如果一个弱信号与一强泵浦光波同时在光纤中传输,并使弱信号波长置于泵浦波的喇曼增益带宽内,则弱信号即可被放大。这种基于 SRS 机制的光放大器称为光纤喇曼放大器(FRA)。这种放大器如果设置合适的腔镜亦可构成可调光纤喇曼激光器。SRS 使一个信道中的能量转移到相邻信道中,使多信道光纤通信系统产生串扰,限制了多信道光纤通信系统的性能,在光纤通信系统中应设法避免或消除。FRA 的宽带放大特性可用作光纤损耗的分布式补偿放大,实现高速超短光脉冲的稳定透明传输。本节将讨论 FRA 的基本原理、放大特性及其在光纤通信系统中应用的一些问题。

1 FRA 的工作原理与增益带宽

图 1.33 给出了 FRA 的原理性结构示意图,频率为 ω_p 和 ω_s 的泵浦光和信号光通过波长选择耦合器输入至光纤,当这两束光在光纤中一起传输时,泵浦光的能量通过 SRS 效应转移给信号光,使信号光得到放大。泵浦光和信号光亦可分别在光纤的两端输入,在反向传输过程中同样能实现弱信号的放大。

乍看 FRA 的工作原理与其它光放大器没有多大差别,都是靠转移泵浦能量实现放大,实际上是有很大不同的。1.2.2 节讨论的掺杂光纤类放大器是靠活性光纤的受激辐射实现放大,一个入射光子使另一个同样的光子受激辐射而不损耗其能量。而 FRA 是靠非线性介质的受激散射,一个入射泵浦光子通过非弹性散射转移其部分能量,产生另一个低能和低频光子,称为斯托克斯频移光,而剩余的能量被介质以分子振动(光学声子)的形式吸收完成振动态之间的跃迁。

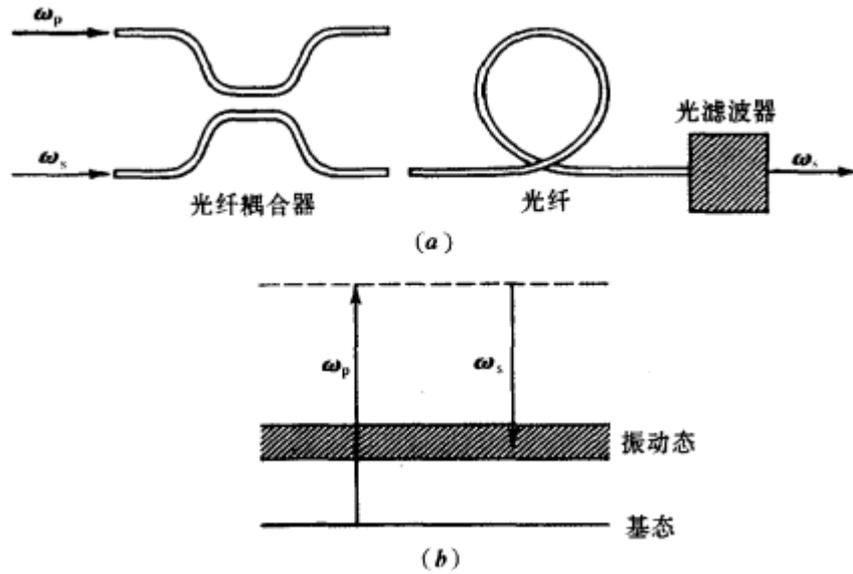


图 1.33 光纤喇曼放大器及其能级图

斯托克斯频移量 $\Omega_R = \omega_p - \omega_s$ 在 SRS 过程中起着重要作用， Ω_R 由分子振动能级确定，其值决定了产生 SRS 的频率范围。对非晶态石英光纤，其分子振动能级融合在一起，形成了一条能带，因此可在较宽的频差 $\omega_p - \omega_s$ 范围(40THz)内通过 SRS 效应实现信号光的放大。图 1.34 展示了熔融石英的喇曼增益谱特性 $g(\omega)$ 。图中曲线是在 $\lambda_p = 1\mu\text{m}$ 测得的，由于光增益 $g = g_R I_p$ ， I_p 为泵浦强度，由泵浦功率 P_p 决定， g_R 为喇曼增益系数，随 ω_p 线性增大。由此可得光纤 SRS 的光增益为

$$g(\omega) = g_R(\omega) \left(\frac{P_p}{a_p} \right) \tag{1.20}$$

其中 a_p 为光纤中泵浦光的横截面积。由图可见，FRA 增益谱与二能级激光系统的洛伦兹谱相比，两者偏离较大，峰值增益在斯托克斯频移 $\Omega_R = 13.2\text{THz}(440\text{cm}^{-1})$ 处。采用类似于 1.2.1 节中相同的带宽定义，由图可知 FRA 的带宽约为 6THz，可与行波半导体放大器相比。

SRS 增益谱较宽，用作宽带分布式补偿放大器在光纤通信系统中是具有吸引力的。但是需要较高的泵浦功率。例如，为放大 $1.55\mu\text{m}$ 的光信号，即使忽略光纤损耗，所要求的泵浦功率已超过 5W，如果考虑光纤损耗，所要求的泵浦功率将更大。但是用更长的光纤产生 30dB 的增益，补偿光纤分布损耗，构成分布式 FRA，可是光信号透明传输 100 公里。和 EDFA 类似，当输入信号功率不断增大，而泵浦功率转移给信号光而产生的消耗不可以忽略时，泵浦功率在传输过程中不断衰减，信号光的放大速率受到限制，放大过程同样也会出现增益饱和现象。

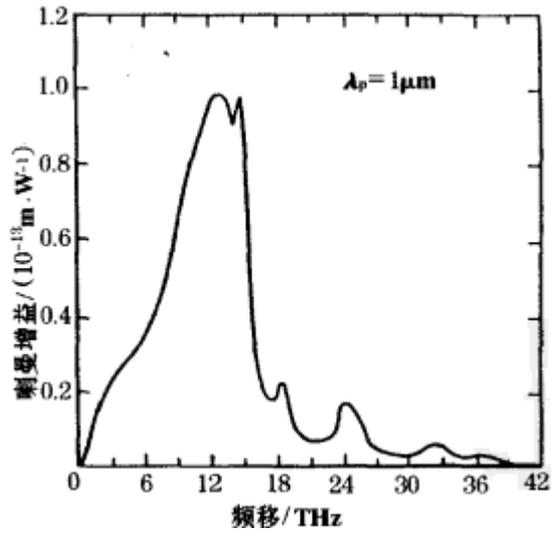


图 1.34 熔融石英的喇曼增益谱

2 FRA 特性的实验研究

实验系统如图 1.35 所示，和 EDFA 的实验系统类似，仅将图 1.25 中的一段掺铒光纤换成长度约为 4 公里的 G.652 普通单模光纤即可。其中 1550nmFP-LD 为信号光，1480nmDFB-LD 为泵浦光。

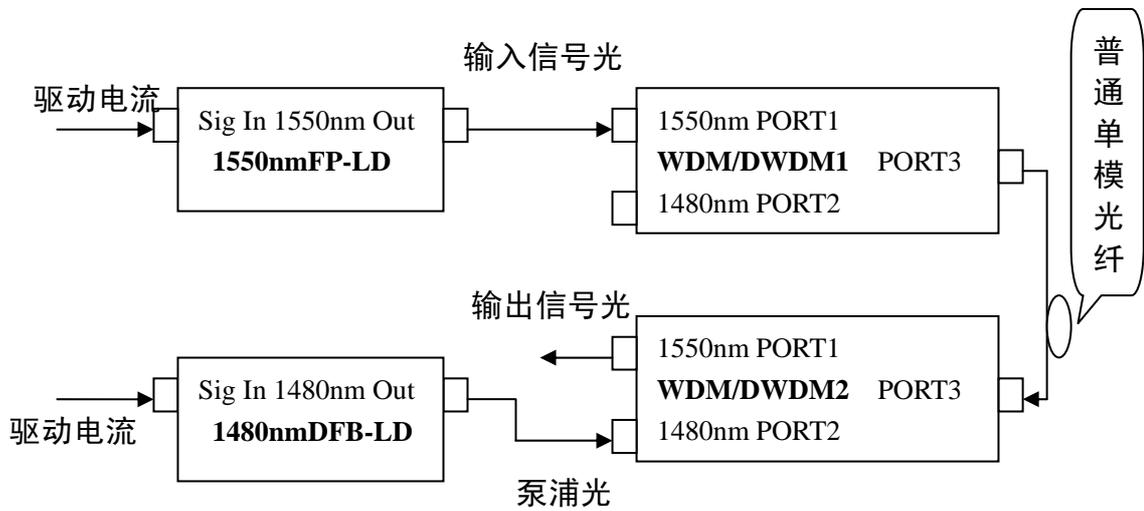


图 1.35 光纤喇曼放大器实验原理图

(1) 增益特性研究

调节 1550nm 激光器输出功率使得 FRA 输入信号光功率分别为 0.05 mW 、0.1 mW 和 0.14mW，在 0mA-400mA 之间调节泵浦光驱动电流，记录不同驱动电流对应的放大器输出信号光功率。测量数据如下表。

表1.4 输入信号光功率为0.05mW时FRA输出光功率

I(mA)	P(μ W)						
0	49.8	110	52.3	220	54.3	330	55.7
10	49.8	120	52.6	230	54.5	340	55.7
20	49.8	130	52.7	240	54.5	350	55.7
30	49.8	140	52.7	250	54.7	360	55.7
40	50.3	150	52.8	260	54.9	370	55.7
50	50.8	160	53.3	270	54.9	380	55.7
60	51.2	170	53.5	280	54.9	390	55.7
70	51.2	180	53.9	290	55.5	400	55.7
80	51.2	190	53.9	300	55.7		
90	51.5	200	54.0	310	55.7		
100	52.0	210	54.2	320	55.7		

表1.5 输入信号光功率为0.1mW时FRA输出光功率

I(mA)	P(μ W)						
0	100.6	110	104.7	220	108.7	330	111.2
10	100.6	120	104.9	230	108.8	340	111.4
20	100.6	130	104.9	240	109.4	350	111.4
30	100.6	140	105.1	250	109.7	360	111.4
40	101.2	150	105.3	260	110.0	370	111.4
50	101.4	160	105.6	270	110.1	380	111.5
60	102.5	170	106.5	280	110.2	390	111.5
70	102.9	180	106.6	290	110.0	400	111.5
80	103.2	190	106.8	300	111.1		
90	103.9	200	108.3	310	111.2		
100	104.4	210	108.5	320	111.2		

表1.6 输入信号光功率为0.14mW时FRA输出光功率

I(mA)	P(μ W)						
0	137.9	110	140.9	220	145.8	330	149.7
10	137.9	120	141.0	230	145.9	340	149.7
20	137.9	130	141.5	240	146.1	350	149.8
30	137.9	140	141.7	250	147.2	360	149.8
40	137.9	150	142.7	260	147.8	370	149.8
50	138.0	160	143.0	270	147.8	380	150.0
60	138.7	170	143.3	280	147.9	390	150.5
70	139.8	180	143.8	290	148.9	400	150.5
80	140.2	190	144.1	300	149.5		
90	140.2	200	144.4	310	149.7		
100	140.8	210	144.8	320	149.7		

由以上三组数据可绘制图 1.36。由此图可知，当输入信号光一定时，FRA 输出信号光功率随泵浦光功率的增加而增加；当泵浦光功率一定时，FRA 输出信号光功率随输入信号光的增加而增加。

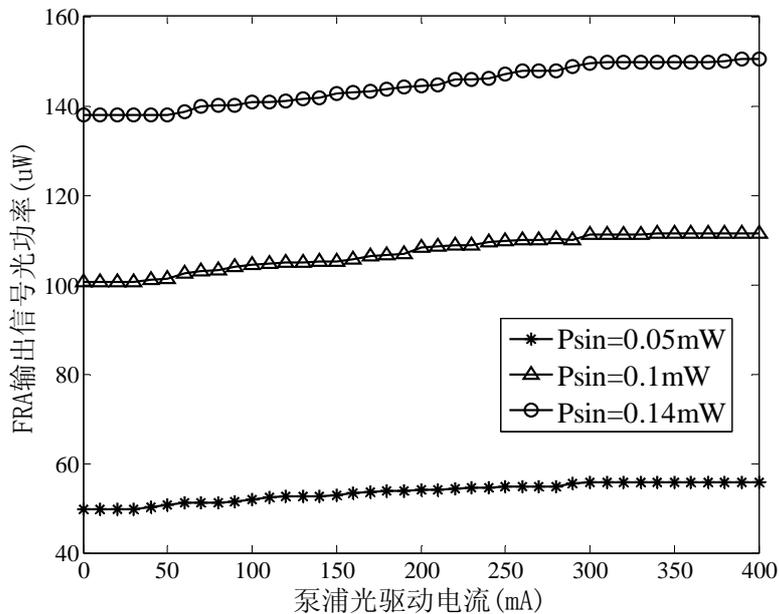


图 1.36 FRA 输出信号光功率随泵浦光驱动电流变化曲线图

利用上述测量数据计算出不同泵浦光驱动电流对应的 FRA 增益数值，计算结果如表 1.7 所示。（增益 $G = P_{out} / P_{in}$ ）

表 1.7 FAR 增益计算结果

泵浦光驱动电流 (mA)	FRA 增益 G ($P_{sin}=0.05mW$)	FRA 增益 G ($P_{sin}=0.1mW$)	FRA 增益 G ($P_{sin}=0.14mW$)
0	0.996	1.006	0.985
10	0.996	1.006	0.985
20	0.996	1.006	0.985
30	0.996	1.006	0.985
40	1.006	1.012	0.987857
50	1.016	1.014	0.989286
60	1.024	1.025	0.990714
70	1.024	1.029	0.998571
80	1.024	1.032	1.001429
90	1.03	1.039	1.001429
100	1.04	1.044	1.005714
110	1.046	1.047	1.006429
120	1.052	1.049	1.007143
130	1.054	1.049	1.010714
140	1.054	1.051	1.012143
150	1.056	1.053	1.019286
160	1.066	1.056	1.021429
170	1.07	1.065	1.023571
180	1.078	1.066	1.027143
190	1.078	1.068	1.029286
200	1.08	1.083	1.031429
210	1.084	1.085	1.034286
220	1.086	1.087	1.041429
230	1.09	1.088	1.042143
240	1.09	1.094	1.043571
250	1.094	1.097	1.051429

260	1.098	1.1	1.055714
270	1.098	1.101	1.055714
280	1.098	1.102	1.056429
290	1.11	1.1	1.063571
300	1.114	1.111	1.067857
310	1.114	1.112	1.069286
320	1.114	1.112	1.069286
330	1.114	1.112	1.069286
340	1.114	1.114	1.069286
350	1.114	1.114	1.07
360	1.114	1.114	1.07
370	1.114	1.114	1.07
380	1.114	1.115	1.071429
390	1.114	1.115	1.075
400	1.114	1.115	1.075

利用上述数据绘出不同注入信号光功率条件下 FRA 增益随泵浦光驱动电流的变化关系曲线，如下图所示。

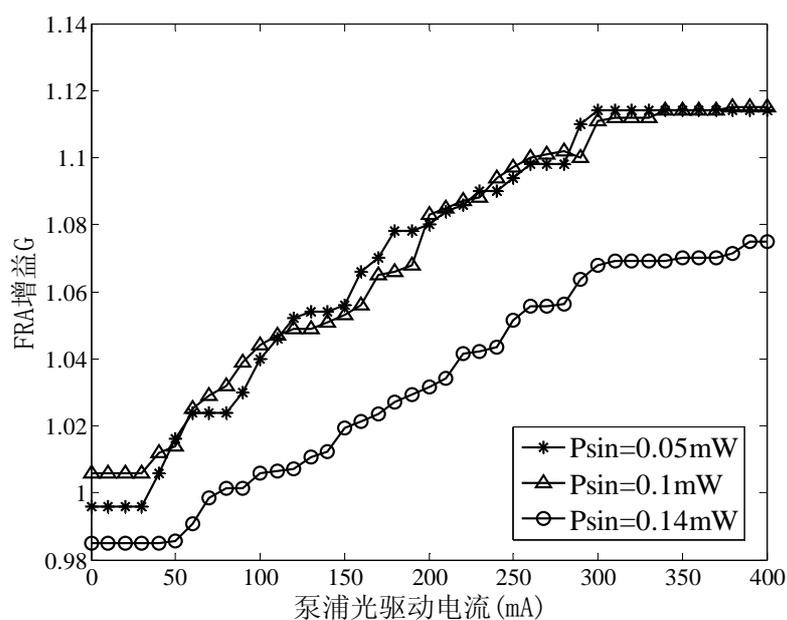


图 1.37 FRA 增益随泵浦光驱动电流变化曲线图

由图 1.37 可明显观察到当注入信号光固定时，FRA 增益随泵浦光驱动电流

的增加而增加。

(2) 增益谱特性研究

将图 1.35 中的 1550nmFP-LD 用卤素光源代替, 作为光信号输入 FRA, FRA 输出光信号连接至光谱分析器。设置泵浦光激光器工作模式(MOD)为恒流模式(ACC), 泵浦光驱动电流(I_c)置为 400mA。测量 FRA 输出光谱, 测量结果如图 1.38 所示。

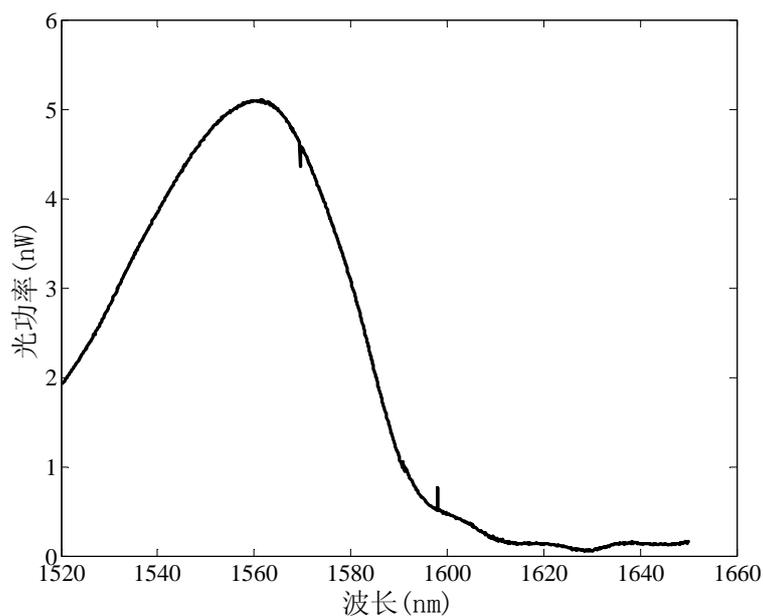


图 1.38 FRA 输出光谱图

将图 1.28 所示的卤素光源的光谱作为基准, 利用图 1.28 和图 1.38 对应的测量数据可计算出每一波长的光信号对应的增益, 即 FRA 的增益谱, 计算结果如图 1.39 所示。

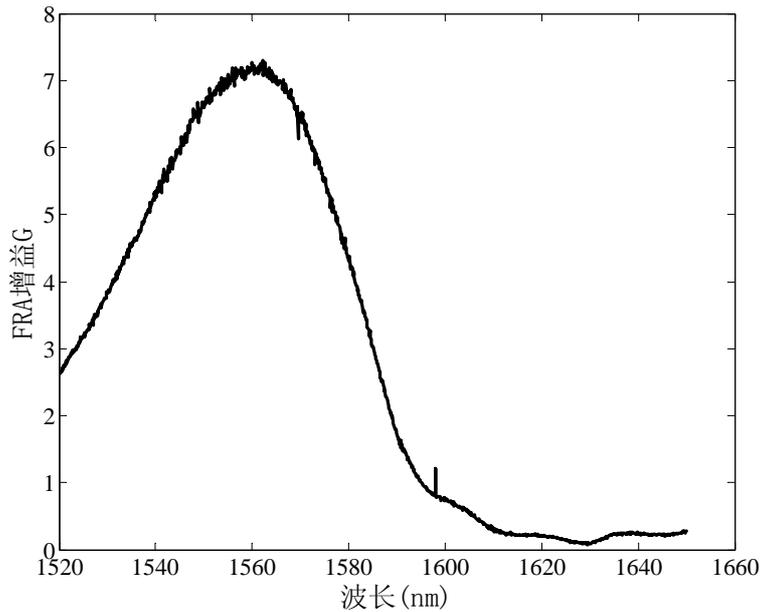


图 1.39 FRA 增益谱

由上图可知 FRA 的增益波长范围为 1520nm~1594nm，在 1561.8nm 处获得峰值增益，其值为 7.19，3dB 增益带宽为 55nm。

3 FRA 的应用

光纤喇曼放大器有两种类型和两种应用，一种称为集中式 FRA，主要作为高增益、高功率放大，其长度约 1~2km，泵浦功率 1~2W，可提供 30dB 的增益和接近泵浦光功率大小的输出功率。通常用 1.06 μm 或 1.32 μm 的 Nd: YAG 激光器作为泵浦源，放大 1.12 μm 和 1.4 μm 的光信号。如果采用高阶斯托克斯线作为泵浦，由 1.06 μm 激光器产生的三阶斯托克斯线可泵浦放大 1.3 μm 的信号。另一种称为分布式 FRA，主要作为光纤传输系统中传输光纤损耗的分布式补偿放大，实现光纤通信系统光信号的透明传输，增益与损耗相等，输出功率与输入功率相等。主要用于 1.3 μm 和 1.5 μm 光纤通信系统中作为多路信号和高速超短光脉冲信号损耗的补偿放大用，亦可作为光接收机的前置放大器。作为损耗补偿放大应用时，光纤既是增益媒质，又是传输媒质，光纤既存在损耗，又产生增益，增益补偿损耗，实现净增益为零的无损透明传输。鉴于这种应用特点，在 1.5 μm 光纤通信系统中，均采用 α_p 比较低的 1.48 μm 半导体激光器作为泵浦光源。因此所需要泵浦功率较低，典型值为几毫瓦至十几毫瓦，通常传输距离可达几十至一百公里。为了实现长距离通信，每经几十公里后需再注入泵浦功率，构成分布式级联光纤喇曼放大。采用这种方案，贝尔实验室用 FRA 补偿光孤子脉冲的传输损耗，采用环路试验系统，每隔 41.7km 重复注入泵浦功率，使 55ps 的光孤子脉冲稳定

传输了 6000km。

1.3 光纤传感器

光纤传感是利用外界因素使光在光纤中传播的光参数发生变化,从而对外界因素进行测量的技术,光纤传感在目前具有广泛的应用。光纤是 20 世纪 70 年代作为光通信发展的一种新型材料,主要用玻璃预制棒拉制成纤维,所以称为光学纤维,简称光纤,与其他材料相比,光纤具有许多独特的性能。第一个特性是具有很好的传光能力,如单模光纤的光强损耗在 0.2dB/km 左右,也就是说光在光纤中传输 1km,输出光强为输入光强的 96%,传输 15km 后光强为原来的一半,所以光纤对某一波长范围的光透明度是很高的;第二个特性是带宽范围宽,虽然光纤的直径跟头发丝差不多,但一根光纤从理论上可以同时传输上亿路电话,可见光纤频带之宽;第三个特性是光纤本身是一个敏感元件,即在光纤传输过程中,光的振幅、相位、偏振态等特性会随检测对象的变化而相应地变化。光从光纤出射时,光的特性受到外界信息的调制,通过对调制光的检测,可以感知外界的信息。

与传统传感器相比,光纤传感器具有下列特殊的优越性:无电流、防爆、勿需接触、易移动、尺寸小、重量轻、易于安装、抗无线电干扰或电磁干扰、高灵敏度、可以实现远距离测量和控制。

目前,光纤可以传输许多物理量,如:光强、位移、温度、压力、声、张力、电磁场、辐射、流量、液位、化学分析、振动等。

应用领域涉及到自动化生产线、过程控制、汽车、机械工具、航空、供热、空调、器械、石油化工、地球物理、公共事业等。

最早,光纤首先用于一些简单的传感器,现在已发展到高精度领域,如应用于干涉技术的复杂传感器。这些装置的精度比常规传感器要高出 4~5 个数量级。除了军事上的水听器 and 陀螺仪以外,一般应用里不需要如此高的灵敏度。

光纤传感器分为强度调制、相位调制、波长调制、频率调制、偏振态调制,本章主要介绍强度调制和相位调制。强度调制光纤传感器一般与位移或其他物理扰动相联系,这种扰动与光纤发生作用,或与连接于光纤的机械调制器作用,引起接收到的光强发生改变。相位调制光纤传感器则是把传感光纤中光的相位与干涉仪装置里参考光纤中光的相位进行比较,其相位差能以很高的灵敏度测得。相位调制光纤传感器比强度调制光纤传感器更准确,应用更广泛,但更昂贵,常用于军事系统。工业上则多用强度调制光纤传感器。

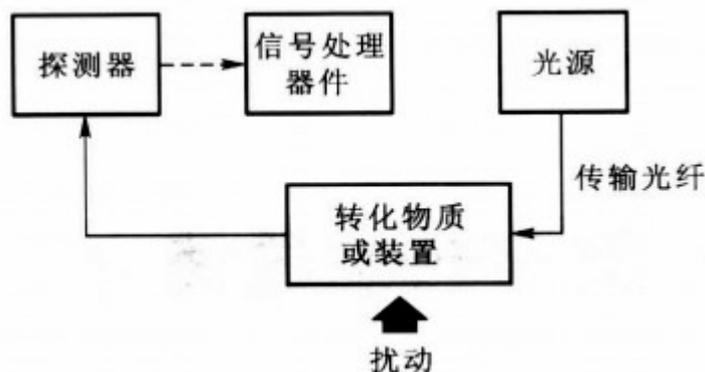


图 1.40 强度调制光纤传感器

强度调制光纤传感器，如图 1.40 所示。光损失可以是由于以下因素而引起：透射、反射、微小弯曲或吸收、散射、荧光等。

强度调制光纤传感器需要比相位调制光纤传感器更强的光通量来进行测量，因而需要采用大芯径的多模光纤或光纤束。测量透射、反射及微小弯曲的传感器主要采用强度调制，因为强度调制信号处理比较简单，所以强度调制光纤传感器在光纤传感器中有广泛的应用。

相位调制光纤传感器利用干涉技术检测压力、转速及磁场。前两者的应用有广泛的发展。

如图 1.41 所示是马赫—泽德尔 (Mach—Zehner) 干涉仪构成的一种相位传感器的框图。激光光源的出射光分成两束，分别在参考单模光纤及传感光纤中传输，后者经过一个扰动环境进入探测器。假如传感光纤与参考光纤中光的相位重合，则它们的干涉结果给出光的加强，若相位不一致，则发生干涉光强变弱。如果受扰动影响后，传感光纤在长度上或折射率上发生改变，则干涉图形产生变化。

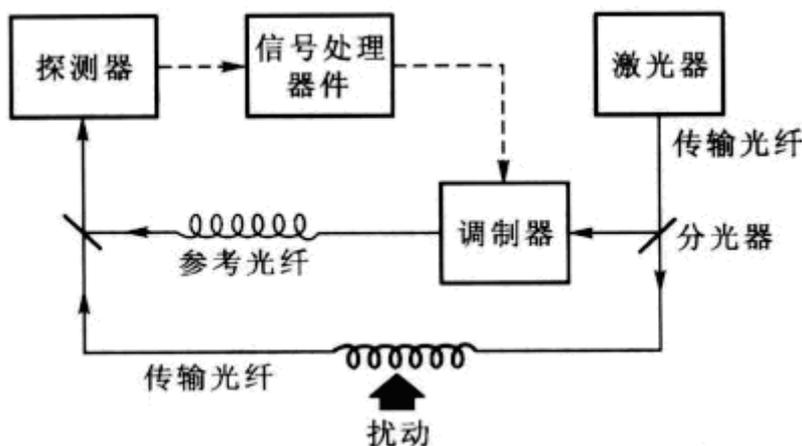


图 1.41 相位调制光纤传感器

1.3.1 强度调制光纤传感器

利用外界因素来改变光纤中光的强度，通过检测光强变化来测量外界物理量的传感器称为光强调制光纤传感器。光强调制光纤传感器主要有透射、反射和微小弯曲线型，其他还有吸收、散射、荧光、偏振和光栅型。光强调制光纤传感器在本质上是类似的。

1 透射型强度调制光纤传感器

透射型光纤传感器的概念通常与光束在开关结构里的干扰有关。这种传感器是一种良好的模拟传感器。如图 1.42 所示为这种强度调制的原理图，可分为径向位移测量和轴向位移测量的探头结构。通常入射光纤保持不动，而出射光纤可以径向或轴向位移，这样出射光纤的输出光强被它的位移所调制。如图 1.42(a) 所示，如果输入、输出均为同一种单模光纤，则轴向位移 d 与功率耦合系数 T 之间有下列关系

$$T = \exp\left(-\frac{d^2}{e_0^2}\right) \tag{1.21}$$

其中 e_0 为光纤中光斑尺寸。

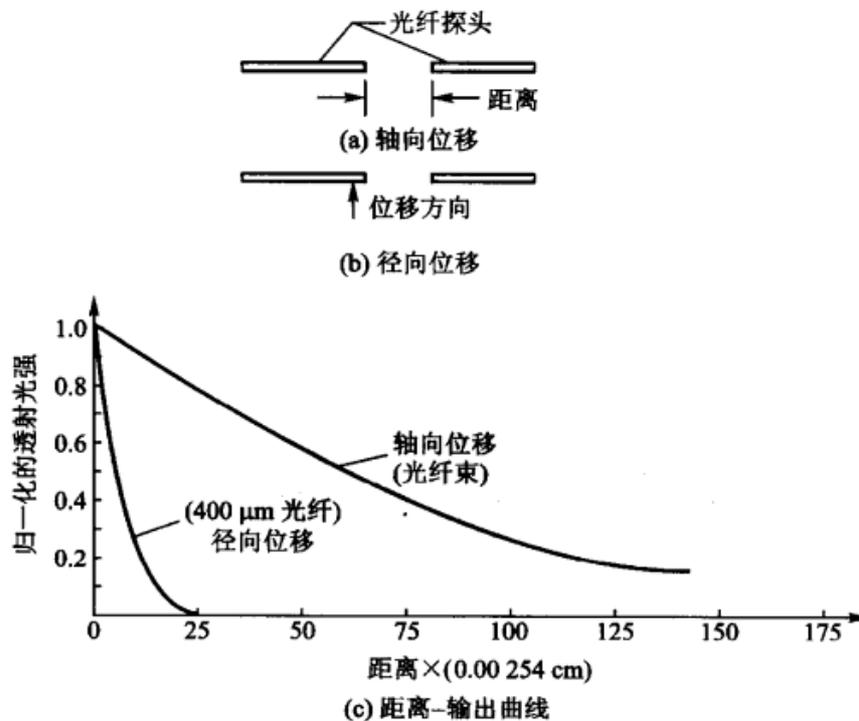


图 1.42 透射型强度调制光纤传感器原理图

图 1.42(c)给出的是一条输出与探头距离的关系曲线，这条曲线符合距离的平方反比律。还有一种更灵敏的透射方法利用了径向位移，如图 1.42(b)所示。

如果探头位移距离等于探头的直径，光就不会透过，所以大约在起始的 20% 位移处，其输出是线性的。

2 反射型强度调制光纤传感器

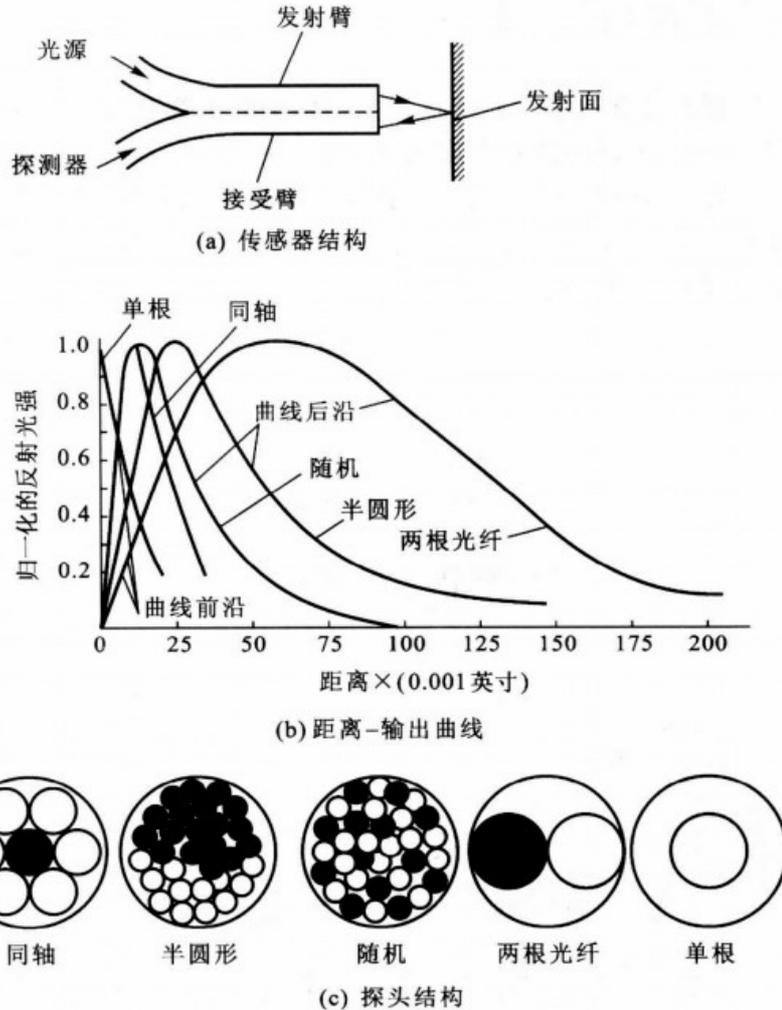


图 1.43 各种结构的反射型强度调制光纤传感器

由于反射型强度调制光纤传感器具有准确、简单、价格低廉等优点，所以应用极为广泛。如图 1.43(a)所示，它由两束或两根光纤组成，一束光纤把光传感到反射体，另一束光纤接收反射光并把光传感到探测器上。检测到的光强取决于反射体和探头的距离。如图 1.43(b)所示为检测到的光强和离反射体的距离的关系曲线。曲线的前沿可达到以百万分之一厘米的准确度测量位移。准确度取决于探头的结构。半圆形探头具有较大的动态范围，但与随机分布的探头相比灵敏度较差。两根光纤的探头具有更宽的动态范围。

对于需要比任何光纤结构的动态范围还要宽的使用场合，可以在光纤端面前增加一个透镜系统。利用与光纤探头相连的透镜系统，可以扩大动态范围

3 微小弯曲型强度调制光纤传感器

另一个让人感兴趣的强度调制光纤传感器是利用微小弯曲型强度调制光纤传感器。光纤弯曲后，少部分芯模能量会转化为包层模式能量，通过测量包层模式的能量或芯模能量的变化就能测量外界物理量。这种传感器在一些物理量的作用下使光纤弯曲时(如图 1.44 所示)，就会影响接收到的光能量。当压力使这种传感器受到挤压引起光纤弯曲时，可导致传输光能量随位移而减小。同反射型强度调制光纤传感器一样，它也具有价格低而准确度高的特点，还有一个重要的优点是微小弯曲型强度调制光纤传感器光路密封，可用于肮脏的环境。

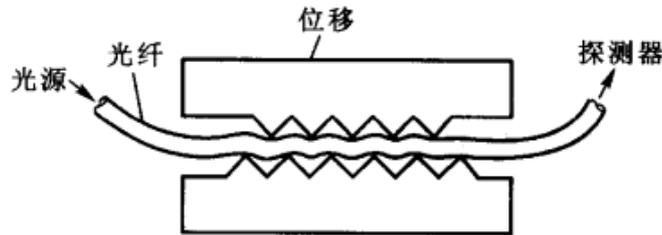


图 1.44 微小弯曲型强度调制传感器

4 本征型强度调制光纤传感器

本征型强度调制光纤传感器利用返回光光强的改变，不像透射、反射和微小弯曲型强度调制光纤传感器需要外界物理量的变化，它利用光纤芯的化学性质(包层可以是玻璃或塑料)来实现传感。基本机制有折射率变化、吸收特性、荧光等。

折射率变化是通过改变光纤的数值孔径来实现改变接收光能量的，许多聚合物包层材料的折射率随温度而变化，可用做温度传感器。如图 1.45(a)所示，液体折射率 $n(t)$ 随温度上升而减小，在纤芯折射率 n_0 不变的情况下可进行强度调制，采用这种调制可以做成光纤温度传感器。相反，如果采用塑料涂层作为光纤的包层，那么其折射率随温度降低而增加，利用这种光纤做探头，可以做成低温温度计。另外一种如图 1.45(b)所示，利用油扩散到光纤包层上改变折射率，使纤芯的光进入包层，从而测量水中的含油量。

通过改变光纤的吸收特性也可以测量外界因素。X 射线等辐射会使光纤材料的吸收损耗增加、光纤的输出功率降低，从而构成强度调制的测量辐射量的传感器。改变光纤成分可对不同的射线进行测量，如选用铅玻璃制成光纤，可对 X 射线、中子射线进行传感测量。用这种方法制成的光纤传感器具有灵敏度高、线性范围大、实时性、外形小巧等特点，既可用于卫星外层空间剂量的测量，也可

用于核电站辐射量的大面积监测。

在玻璃中掺入杂质可以产生荧光，也可以制成光纤传感器。这种传感器可以有两种不同的方法实现，一种是用光源来激发荧光，但激发情况受温度影响。另一种是利用外辐射激发光纤，然后检测荧光，这种方法可测量入射辐射的量级。

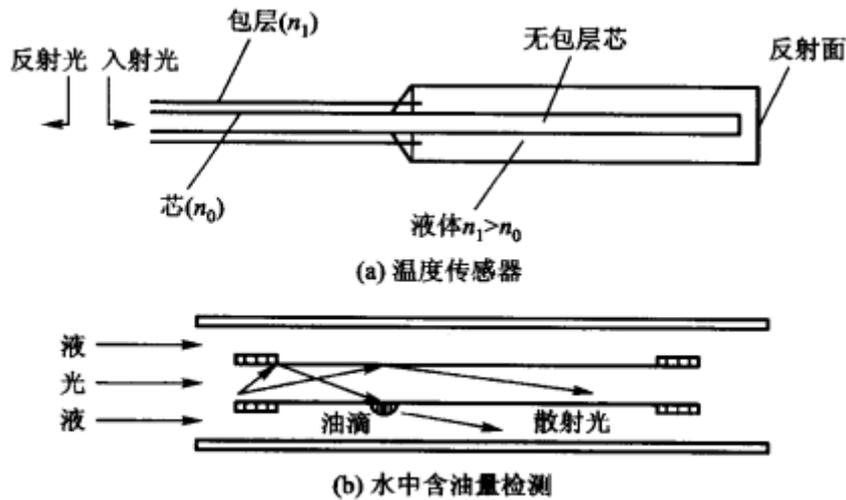


图 1.45 光纤温度传感器

1.3.2 相位调制光纤传感器

利用外界因素改变光纤中光波的相位，通过检测相位的变化来测量物理量称为相位调制。

光纤中光波的相位由光纤波导的物理长度、折射率及其分布、波导横向几何尺寸所决定。一般说，压力、张力、温度等外界物理量能直接改变上述三个波导参数，产生相位变化，实现光纤的相位调制。但是，目前的探测器都不能直接感知光波相位变化，必须采用光的干涉技术将相位变化转变为光强的变化，才能实现对外界物理量的检测。因此，光纤传感器中的相位调制技术应包括两部分，一是产生光波相位变化的物理机理；二是光的干涉技术。

与其他调制方法相比，由于采用干涉技术而具有很高的灵敏度，所以它是所有光纤传感器中最为人所知的。一般地说，这种光纤传感器包括相干激光光源和两根单模光纤组成的光路，光线通过分束器分束后入射到光纤。如果外界干扰影响两根相关光纤的其中一根，就会引起相位差，这个相位差可精确地检测出，位相差可用干涉仪测量。有四种干涉仪结构：马赫—泽德尔、迈克尔逊、法布里—玻罗和赛格纳克干涉仪，其中马赫—泽德尔和赛格纳克干涉仪分别在水听器 and 陀螺上应用非常广泛。

1 马赫—泽德尔干涉仪

马赫—泽德尔干涉仪结构如图 1.46 所示，激光器输出光束用 3dB 的光纤—光纤耦合器分束，即 50% 的光入射到单模传感光纤，50% 入射到参考光纤，两束光用另一个 3dB 的光纤—光纤耦合器重新会聚，然后检测会聚后光束的相位差。位相差是由传感光纤的折射率和长度引起的，如果传感光纤和参考光纤的路径相等或相位差是波长的整数倍，那么会聚的两束光相位差相等或相差 2π 的整数倍，会聚后光强最强。相反，如果两束光相差半个波长，那么会聚后的光强最弱。光纤长度改变半个波长就会发生 100% 的调制，这样的灵敏度可以检测出小至 10^{-15}m 的位移。

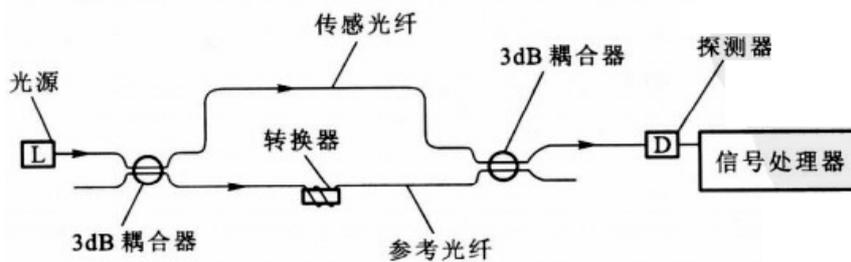


图 1.46 马赫-曾德尔干涉仪结构图

2 迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊干涉仪结构如图 1.47 所示，它与马赫—泽德尔干涉仪结构类似，但利用了光纤端面反射镜引起的反射。相干激光束由 3dB 耦合器分束，入射到传感光纤。参考光纤和传感光纤末端也带有反射镜，反射镜反射这两束光，经这两根光纤和 3dB 耦合器传输给探测器，这样引起的相位差就可检测出。对于迈克尔逊干涉仪，光纤长度相差 $\lambda/4$ 时，由于反射的缘故会引起 $\lambda/2$ 的光程差。马赫—泽德尔干涉仪与迈克尔逊干涉仪相比，在某种程度上类似于透射型和反射型光强调制光纤传感器。迈克尔逊干涉仪的优点在于减少了一个 3dB 耦合器。但是，它的主要缺点在于要求将光耦合器同时将光耦合进探测器和激光器，但返回激光器的光是噪声源。

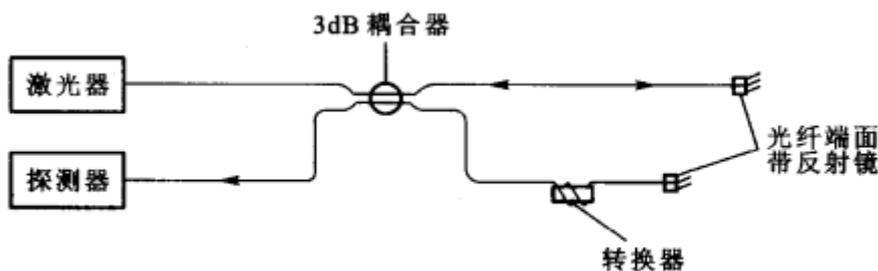


图 1.47 迈克尔逊干涉仪结构图

3 法布里—玻罗干涉仪

法布里—玻罗干涉仪结构如图 1.48 所示，光经光纤进入两端贴有高反射率的反射镜或直接镀有高反射膜的腔体，使光束在两个部分透射镜之间产生多次反射以形成多束干涉，再经探测器探测。不需参考光纤，它由入射光的连续反射引起干涉。入射的相干光在第一个部分透射镜上部分地反射回激光器(通常是 95% 反射，5% 透射)，透射光进入相干腔，在第二个透镜又部分地反射(95%)部分地透射(5%)通过探测器，经多次的反射。光在光纤中多次来回反射增大了相位差，从而获得了非常高的灵敏度。通常法布里—玻罗干涉仪比其他已讨论过的干涉仪灵敏度高一倍。

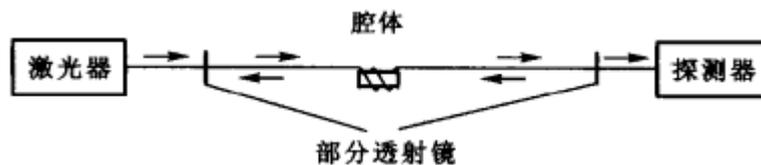


图 1.48 法布里-玻罗干涉仪结构图

4 赛格纳克干涉仪

赛格纳克干涉仪的结构如图 1.49 所示，激光光源发出的光由分束器或 3dB 耦合器分成 1:1 的两束光进入多匝环状单模光纤的两端，光纤两端出射光经分束器再送到探测器。它需用一个 3dB 的耦合器使光入射进环状单模光纤两端，进入光纤的光既有顺时针也有逆时针传播。当光纤环不动时，由于顺时针和逆时针的传播光程相同，不会引起相位差。但是，如果环状光纤以一定的方向转动(例如顺时针)，那么顺时针的传播时间就会减少；逆时针的传播时间就会增加，会聚的光束就会产生相位差，这样就可以实现对转动速度的灵敏检测。这种方法不需改变光纤长度和折射率。

赛格纳克干涉仪的最典型应用就是光纤陀螺，和其他陀螺仪相比，它具有灵敏度高、体积小、成本低等优点。鉴于以上优点，光纤陀螺已成功用于飞机以及其他导航系统中。

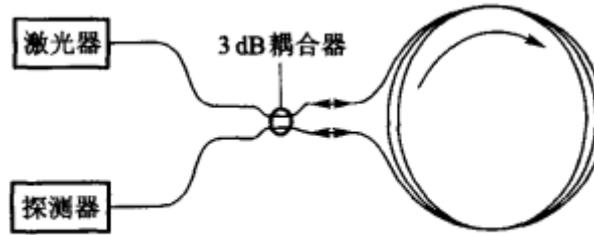


图 1.49 萨格纳克干涉仪结构图

1.3.3 位移光纤传感器

光纤位移传感器正在工业、军事和医疗应用等广大领域中发挥越来越大的作用。这是由于光纤具有两大优势：①可实现非接触高精度传感；②有可能与光传感器组合构成复合结构。

前面介绍强度调制光纤传感的基本原理和干涉型光纤传感器均可测量位移，基于实现位移传感测量的两种主要手段，可将这类传感器分为两类：反射型和微小弯曲型传感器。这一节将重点讨论这类传感器做位移测量的原理及在不同领域中的应用。

1 反射型位移光纤传感器

反射型位移光纤传感器的基本原理如图 1.50 所示。传感器由两根光纤臂组成(集束或单根光纤)，其中一臂将发射光传至反射目标，而另一臂则接收反射光并传给探测器。探测器接收到的光强取决于反射目标与光纤探头的距离，基本的响应曲线如图 1.51 所示。曲线有一峰值，该峰值的前沿很陡且呈线性，后沿与 $1/R^2$ 成正比，其中 R 为光纤探头和反射面的间距。

应用几何光学的理论对该曲线很容易理解。光线从光纤的发射臂中以一立体角(由数值孔径定义)出射。射到目标上的光斑大小由下式决定(假设光纤截面积尺寸远小于 R)

$$2R \tan \theta = D \tag{1.22}$$

式中， θ 为光纤出射端面法线和出射光发散角边缘的夹角， D 为光斑直径。

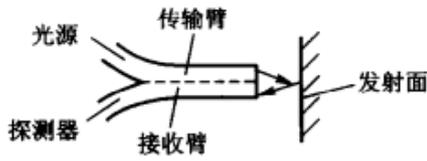


图 1.50 反射型位移光纤传感器

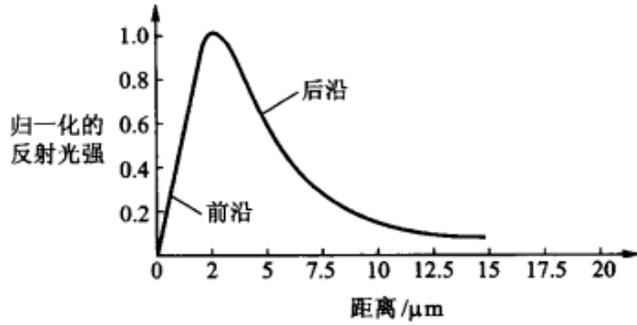


图 1.51 反射式位移光纤传感器响应曲线

因反射角等于入射角，所以反射回光纤探头出射面的光斑尺寸是目标板上光斑尺寸的两倍。当探头与反射面的距离增大时，光斑面积将与 R^2 成比例地增大(见图 1.52)。接收光强的变化将反比于光斑面积(正比于 $1/R^2$)，这是因为接收光纤臂的端面尺寸是固定的，光纤端面与反射光斑的相对重合面积随间距的增大而减小。随着探头不断接近反射目标至某一位置时，反射光线无法耦合进入接收光纤。在其临界位置(图 1.53 位置 2)有一最大值，接收光强在反射面与探头相接触时下降至零，如图 1.53 所示。

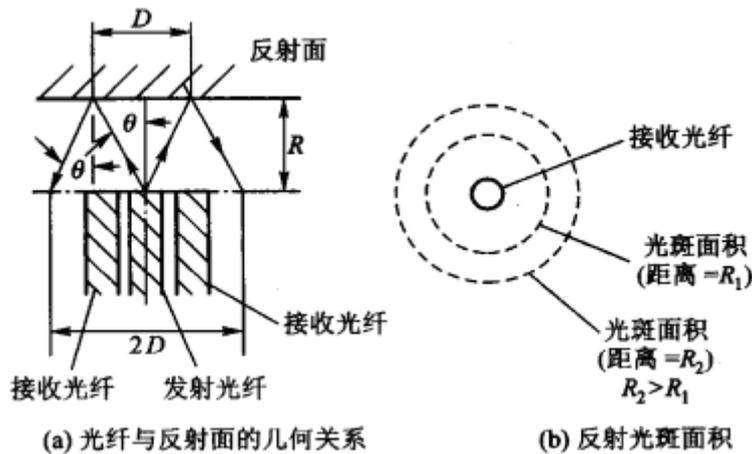


图 1.52 传感头处于峰值后沿

采用不同的光学结构可改变探测器的输出结果，由此得到不同的响应曲线。根据其动态范围和灵敏度可作相应的不同应用。例如，相对来看在随机排列结构中，发射光纤和接收光纤的芯距最小。因此，近目标时它有最高的灵敏度而远距离时灵敏度最差。在使用两根光纤的探头中，发射光纤和接收光纤的芯距(光纤中心距)最大，所以在近距离时其灵敏度最差。应注意到，在单光纤结构中，峰值前沿消失了，这是因为此时单根光纤同时具有发射和接收两种功能，当光纤与目标非常接近时，反射光仍能返回同一根光纤，即使探头与目标接触也是一样。当探头中使用光纤透镜(自聚焦透镜)时，也会引起峰值前沿消失，因为所用的透

镜使得光纤探头(光纤端面)不会进入产生峰值前沿的近距。

利用两个探头获得平均输出可提高灵敏度。考察如图 1.54 所示的装置，设定探头的初始位置，使得探头 A 和探头 B 的接收光强分别处于峰值前沿和后沿，并且使两个探头光强数值相等。当目标接近时，探头 A 的接收光强减小而探头 B 的接收光强增大。

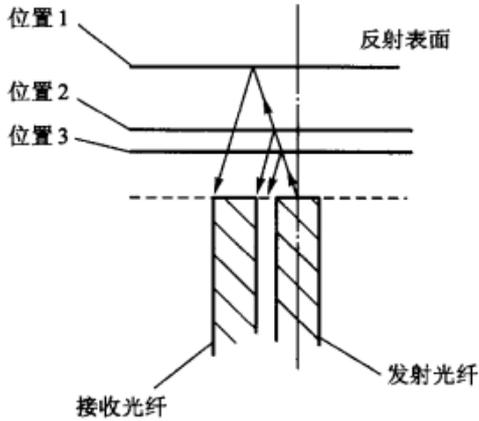


图 1.53 传感头处于峰值前沿

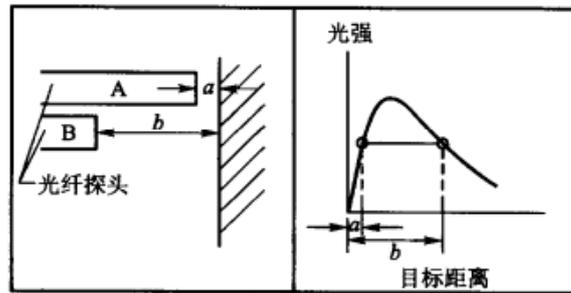


图 1.54 两反射型探头置于目标板

两个探头获得的输出差值要比任何单个探头的读数都大，因而可提高探测灵敏度。此外，除了可探测位移多少外还可获得移动方向的信息。

上面介绍的传感器的主要缺陷是其动态范围的局限性。当灵敏度达到 $2 \times 10^{-15} \text{m}$ 时，动态范围为 0.5cm。在许多应用中，要求传感器能在与反射目标相距较远(达几厘米)时使用。利用透镜系统与光纤探头组合，可将动态范围提高到 12.5cm 或更大，相应地将引起灵敏度下降。如图 1.55 所示给出一组使用不同焦距的透镜系统与随机排列结构探头组合所对应的响应曲线。除了焦距为无穷大的曲线外，其余曲线均有两个峰值。当探头与目标间距等于焦距时，输出最小，这一点很容易解释。此时物体正处于透镜的焦平面上，从光纤中出射的光在目标板上形成一个非常小的光斑并按原路反射回，因此接收到的光强最弱。当物体离开焦点时，发散光中将有较多的光反射到相邻的接收光纤，使输出增大。灵敏度最高的区域为峰谷前沿，改变透镜的焦距可得到不同的灵敏度和动态范围。大体上说，用 7.5cm 焦距的透镜可在距探测面 7.5cm 远处探，探测精度可达 0.0025cm，动态范围 2.5 cm。

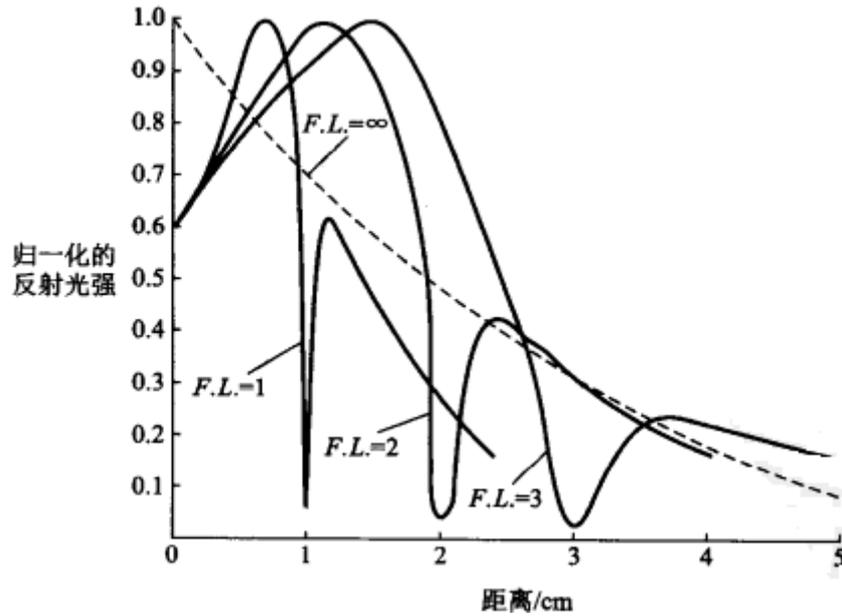


图 1.55 反射型光纤位移传感器与不同焦距的透镜系统与随机排列结构探头组合所对应的响应曲线

反射型光纤位移传感器的应用还存在一些困难。传感器所采集的位移数据与目标反射率的变化及目标板的倾斜程度都有关。在表征这一特性的实验过程中，使用了一些精磨光的比较板，其表面加工成不同的粗糙度。 $R_a = 2\lambda$ (λ 为氦氖激光器的波长 632.8nm) 表面近似为镜面，表面粗糙度从 4λ 、 8λ 、 16λ 逐渐增大到 32λ 。对不同的表面，其表面反射率变化的曲线如图 1.56 所示。随着表面粗糙度的增大，反射光强明显下降。然而曲线总的趋势保持不变，且在某一固定位置存在最大值。若在某项应用中始终使用同一块目标板并保持其表面清洁，则反射率的变化可以忽略。若要测量不同的表面的反射率，就需有一参考探头以补偿反射率的变化。传感器对于反射目标的旋转同样敏感，当偏离正常位置的偏转小于 $\pm 5^\circ$ 时，引起的误差很小(13%)。当旋转角较大时，接收到的反射光强下降非常明显。反射型光纤传感器的一个主要长处是可以实现非接触测量。然而在某些应用中，表面反射率会由于表面被污染而发生变化，因而需要使用封闭系统。在使用与线性电压位移转换器(LVDT)相似的光学系统中，虽需用机械动杆与待测部件接触，但可省去其他麻烦。光学传感是在一个封闭空间中实现，在封闭罩内传感器通过镜面的反射跟踪动杆的运动。

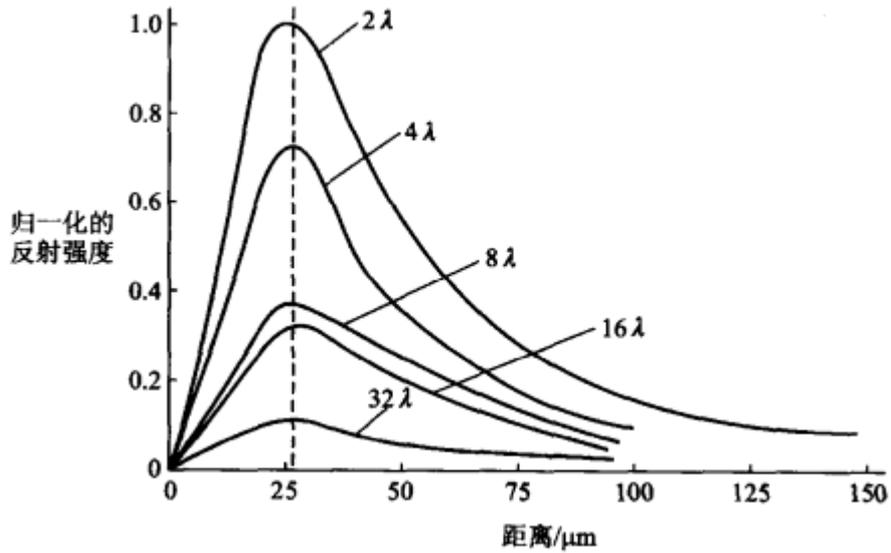


图 1.56 表面反射率变化的曲线

2 微弯型位移光纤传感器

光纤在弯曲时都将辐射能量。理论上，光纤包层中的能量场将趋于无穷大，所以，在某个辐射距离，由于传输路程较长，其能量对应的传输速度大于光速。而这是不可能的，所以此时波导效应消失，于是能量以辐射形式损耗。

影响微小弯曲(微弯)损耗的参数包括光纤的数值孔径、芯径、纤芯与包层的直径比以及光纤的变形周期。当施加一周期性微弯时，轴向传播常数为 β 和 β' 的模将发生模间耦合，所以

$$\Delta\beta = \beta - \beta' = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.23)$$

式中 Λ 是微弯周期。对于阶跃折射率分布光纤有

$$\Lambda = \frac{\pi a}{\sqrt{\Delta}} \frac{M}{m} = \frac{\sqrt{2} \pi n_1 a}{NA} \frac{M}{m} \quad (1.24)$$

式中， a 为纤芯半径， n_1 为芯层折射率， NA 为光纤数值孔径， M 为总模式数， m 为模式标号， Δ 为相对折射率差。

微弯传感器原理是基于将光纤中的芯模耦合到辐射模。当最高阶模发生辐射时，对应有最高的灵敏度。当 $M=m$ 时，式 (1.24) 可简化为

$$\Lambda = \frac{\sqrt{2} \pi n_1 a}{NA} \quad (1.25)$$

当数值孔径增大时，周期性扰动间隔必然减小，对应有高的灵敏度。减小芯径同样能使扰动间隔小。通常，大数值孔径光纤或细芯光纤传光能力较强，因而

需较大的弯曲以泄光。对于给定的光纤直径，增大芯和包层的直径比可提高微弯灵敏度，这是因为对于一定的偏移，粗纤芯有大的有效弯曲，故而有较多的光损耗。

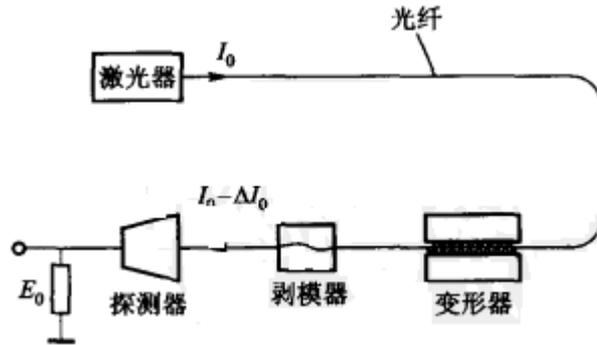


图 1.57 典型的两场型传感器结构

前面说明纤芯光泄漏极大地依赖于微弯周期 Λ ，当此周期趋近于光纤中传播光线的几何周期时会产生极强的谐振效应，此时光泄漏最多。用如图 1.57 所示的装置进行测量，实验中选用阶跃折射率光纤，用一紧固装置施加固定的压力。在主峰值对应的微弯周期下，最高阶模被耦合入辐射模。随着微弯周期的增大，灵敏度逐渐下降，因为低阶模的耦合比较困难。

微弯传感器有两类：亮场型和暗场型。亮场型微弯传感器测量光纤中的传输光强，其光强变化由微弯损耗决定。典型的亮场型微弯传感结构如图 1.57 所示。暗场传感器则测量通过包层泄漏的光。

在如图 1.57 所示的系统中，光以不同的入射角射入光纤。在微弯变形器上施以固定的压力，使光纤的微弯程度保持不变。显然，那些对应于高阶模的具有大入射角的光将有较大的微弯损耗。

微弯传感器的一个主要应用是测量位移。如图 1.58 所示即为在亮场型微弯传感测量中透射率与位移的变化曲线。该响应曲线具有三个性质不同的区域。第一段中，具有柔性的包层承受了起初的位移运动，从而减缓了光纤弯曲。微小的弯曲仅能使一些最易泄漏的模发生辐射。第二段为线性响应区，约占透射率测量段的 60% 多。通常也正是利用这一段做传感测量。位移量继续增大时，高阶模几乎全部损耗，传感器的灵敏度大幅度下降。

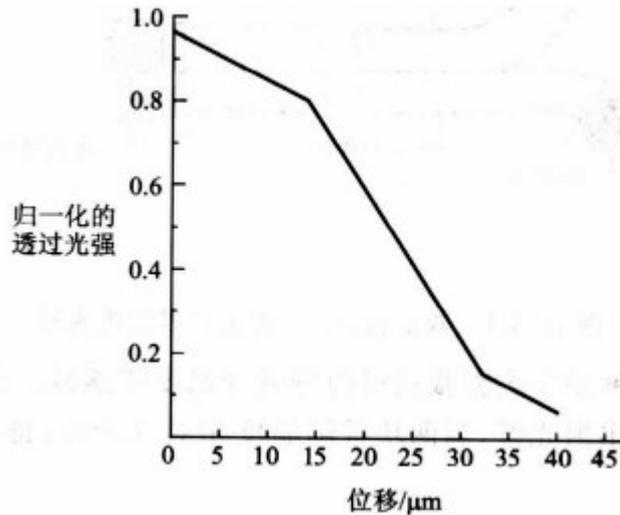


图 1.58 透射率与位移关系曲线

可以预料在暗场检测方式中测量光强效率将大为降低。因此，其响应曲线虽然在形状上相似，但其对纵轴的镜像曲线与亮场测量结果相比要减小。

在微弯型位移传感器的设计中需着重考虑其稳定性。大多数光纤外层都包以聚合物作为保护层，研究发现此类包层在高压和(或)升温时会流动，由此可能产生的滞后效应使测量精度无法大于 1%。使用金属包层可以减少滞后效应。

1.3.4 光纤温度传感器

光纤温度传感器能在强电磁场条件下进行工作。具有金属引线的传感器在电磁场下将产生涡流电动势，这不但会产生噪声，而且会使传感头发热，从而引起温度测量的误差。而不使用金属传感或传送的光纤温度传感器，具有最小的热传导、扩散和快的响应，因此环境波动对其的影响较小，准确度就有可能得到提高。

下面介绍几种应用于温度测量的光纤传感器，即反射型、微弯型、本征型以及几种独特的强度调制型。另外相位调制型也已被应用于温度传感之中。

1 反射型光纤温度传感器

在位移测量中已介绍了反射型传感器能非常精确地确定位置。如图 1.59 所示为一种粘在一起的双金属片作为传感头构成的反射型光纤温度传感器。这种双金属片被设计成在特定温度下产生瞬时作用，从而相对于探头顶端产生突然移动，因此在一组温度点产生开关作用。这种双金属片也能被设计成连续移动。在模拟方式中产生的位移与温度成正比。

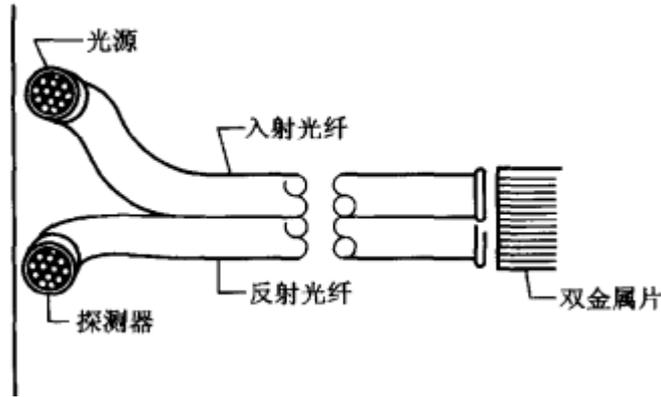


图 1.59 双金属片反射型光纤温度传感器

图 1.60 示出了另一种差分热膨胀式反射型光纤温度传感器。实际上，具有差分热膨胀的铝块和石英块，把光反射进出射光纤，当两块板随温度相对移动时，将产生干涉条纹的移动并被计数。

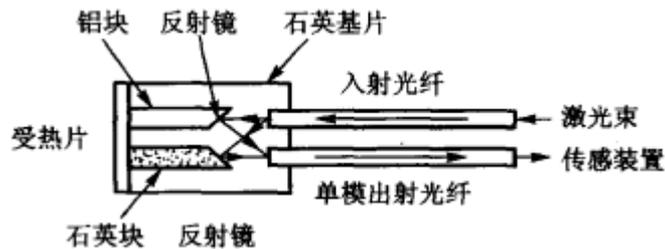


图 1.60 差分热膨胀式反射型光纤温度传感器

2 微弯型光纤温度传感器

微弯型光纤温度传感器作为温度传感有两种不同的形式。当温度变化时，光纤分别具有折射率差和曲率半径变化的功能。前面已叙述过，微弯损耗是纤芯和包层相对折射率差，即 Δ 的函数。对给定的弯曲强度， Δ 越小，光纤损耗越大，漏光越多。在有机包层的玻璃光纤中，温度效应是很明显的。这里，有机包层折射率对温度的依赖性大于玻璃纤芯，因此这种光纤常作为传感光纤，玻璃包层的玻璃光纤也能显示出这种特性。

用高热膨胀的弯曲机械装置引起光纤曲率半径随温度的变化，可获得灵敏的传感功能。很显然，相当小的曲率半径的变化可引起足够的损耗变化。如果设计一个连续多点测量传感器，就必须选择光纤和微弯传感头，可使局部过热时不会折断整个光纤。如图 1.61 所示为几种微弯型光纤温度传感器的结构图。如图 1.61(a)所示，光纤绕在能膨胀和收缩的管子上，它能连续传感管子的温度。如图 1.61(b)所示是一个点传感器，利用一个特殊的敏感点具有足够的热移动来进行传感。如图 1.61(c)所示类似于应变计，如果一个微弯敏感的光纤被高热膨胀材弯

曲，将引起光纤曲率的变化。

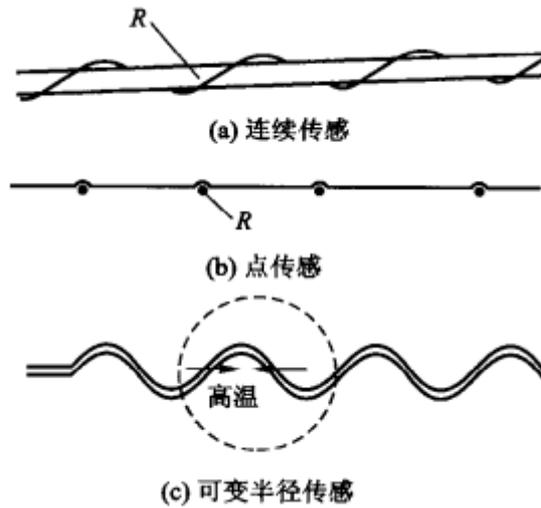


图 1.61 几种微弯型光纤温度传感器结构图

3 本征型光纤温度传感器

本征型光纤温度传感器是指光纤本身(纤芯、涂层)具有敏感功能，在光纤中透过的光强正比于环境的变化。本征型光纤温度传感器还包括吸收现象，已经发现，当一些稀土元素(如钕、铈)掺入传统光纤玻璃中，可产生温度敏感的吸收光谱。对掺钕光纤，在两个波长处具有单调温度函数的特性。

如图 1.62 所示，在 840nm 波长处，吸收随温度上升而减少，在 860nm 处则相反。对 500⁰C 进行校准，测定两个波长处的光强，其比值就可定出温度。通常这种传感器的测温范围为 0⁰C—800⁰C。

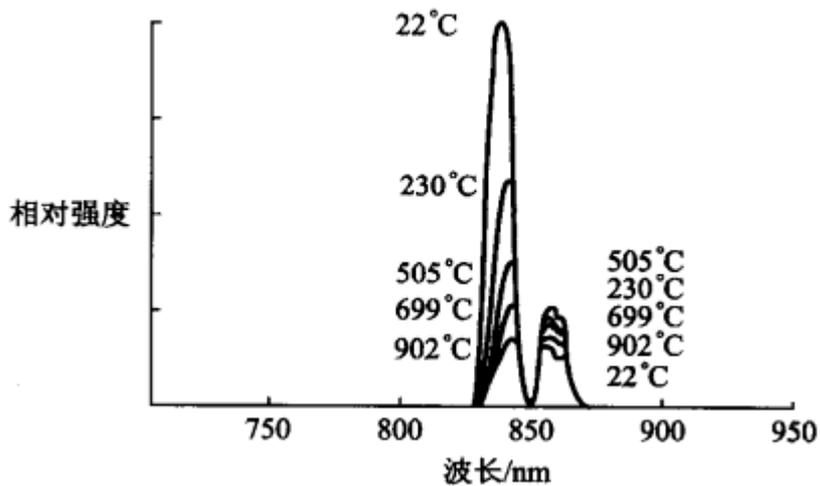


图 1.62 掺钕光纤温度传感的吸收光谱

有必要说明一下，前述的微弯温度传感器是一种折射率变化机理的本征型光

纤温度传感器，本征型的一个非常重要的特征是激活机理。典型的，如果本征敏感发生在包层中，则必须应用微弯或大弯，使在纤芯中通过的光发生相互作用。

4 光纤光栅温度传感器特性的实验研究

实验装置下图所示：

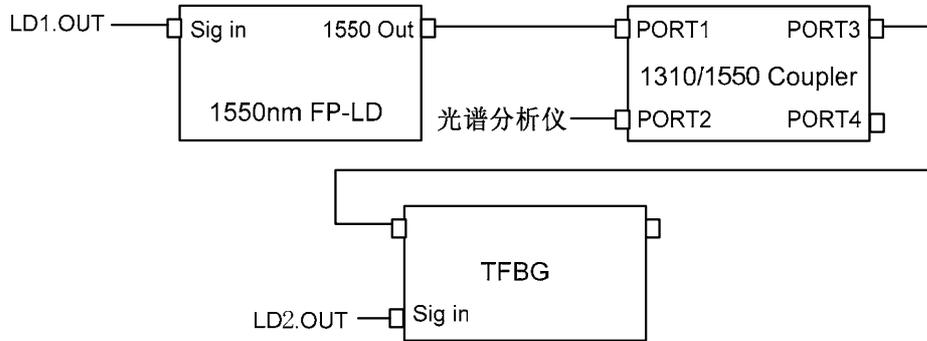


图 1.63 光纤光栅温度传感器实验装置图

上图中，1550 FP-LD 为 1550nm 的激光器，用于产生单色激光，LD1 OUT 接函数信号发生器 (SIG)，其作用是为 1550nm 激光器提供驱动电流。1310/1550nm Coupler 为光纤光栅耦合器，这个器件有四个端口，作为输出端的两个端口会平分输入端的功率。TFBG 为光纤光栅温度传感器，作用是反射特定波长的光波，其 LD2 OUT 接至函数信号发生器。

当紫外光照射光纤时，光纤的折射率将发生永久性的变化，该作用称为光纤的光敏性。光纤光栅是利用光纤材料的光敏性，通过紫外光曝光的方法使折射率沿光纤光栅长度方向形成周期性的永久变化(如图 1.64)。其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的滤光器或反射镜，当一束宽光谱光经过光纤光栅时，满足光纤光栅布拉格条件的波长将产生反射，其余的波长透过光纤光栅继续传输。

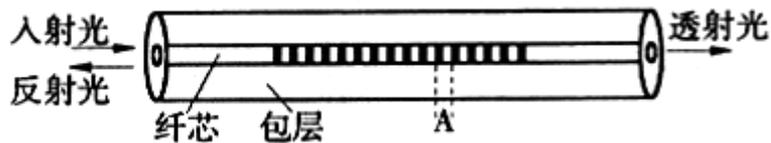


图 1.64 光纤光栅的剖面结构图

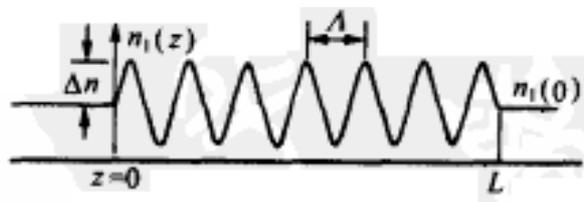


图 1.65 光纤光栅的芯层折射率分布图

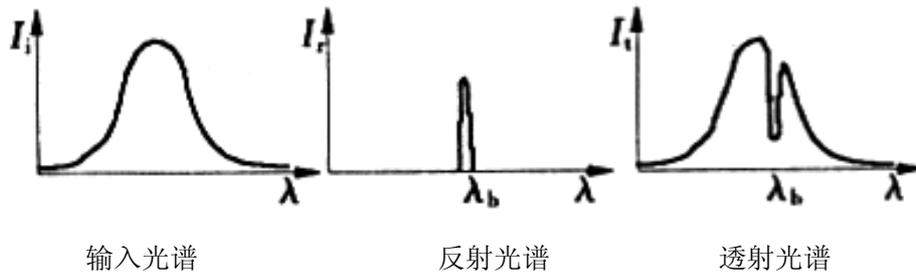


图 1.66 光纤光栅的输入光谱、透射光谱和反射光谱

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。从图 1.66 我们可以清楚的看到光纤光栅对于光反射的情况。只有波长满足布拉格条件的光波长可以被反射，其它的都可以透过。

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

$$\Delta\lambda_T = [(\alpha + e)\Delta T]\lambda_B \tag{1.26}$$

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。本实验测量用光纤光栅作温度传感时的定标曲线。

将 1550nm 激光器的驱动电流置于 20mA，通过 LD2.OUT 端口将光纤光栅 TFBG 的温度分别置于 -10℃、-5℃、0℃、5℃，利用光谱仪测量各温度下传感系统的 Bragg 反射波长 λ_B 。测量结果如下。

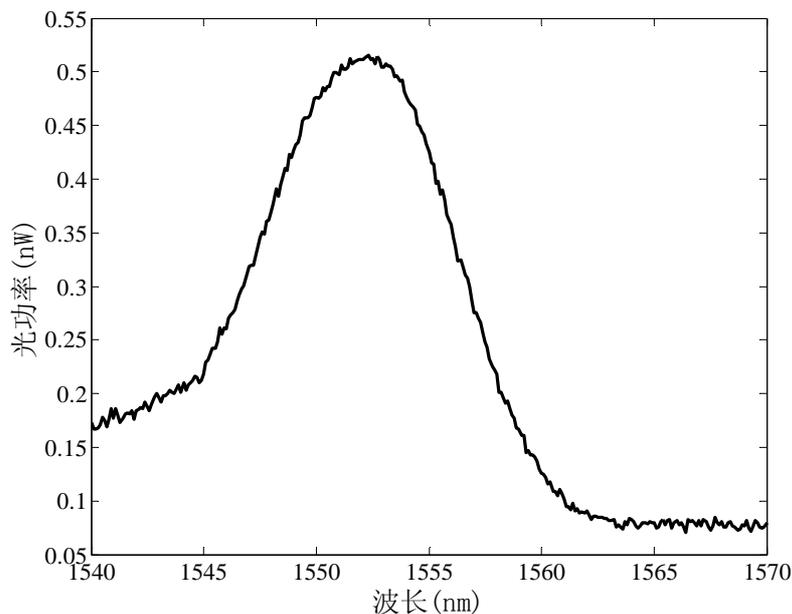


图 1.67 -10℃时系统反射光谱图

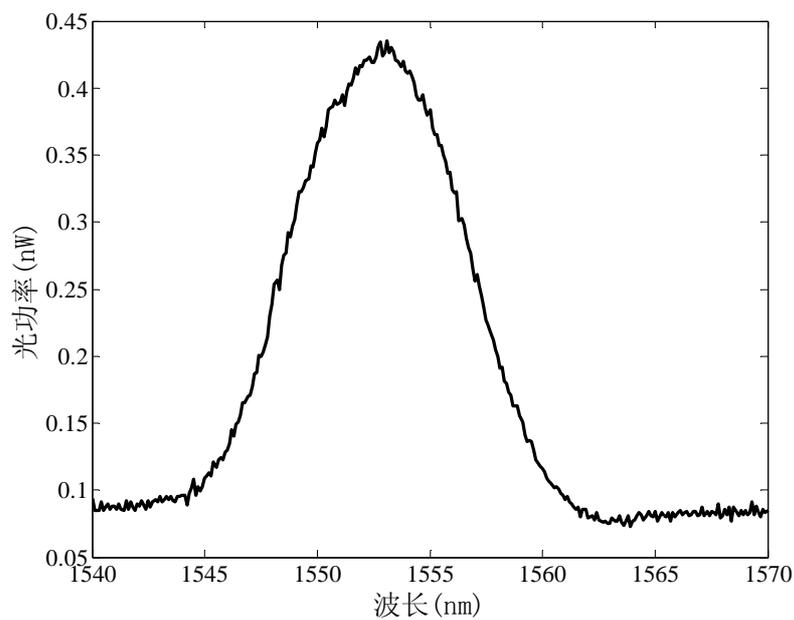


图 1.68 -5℃时系统反射光谱图

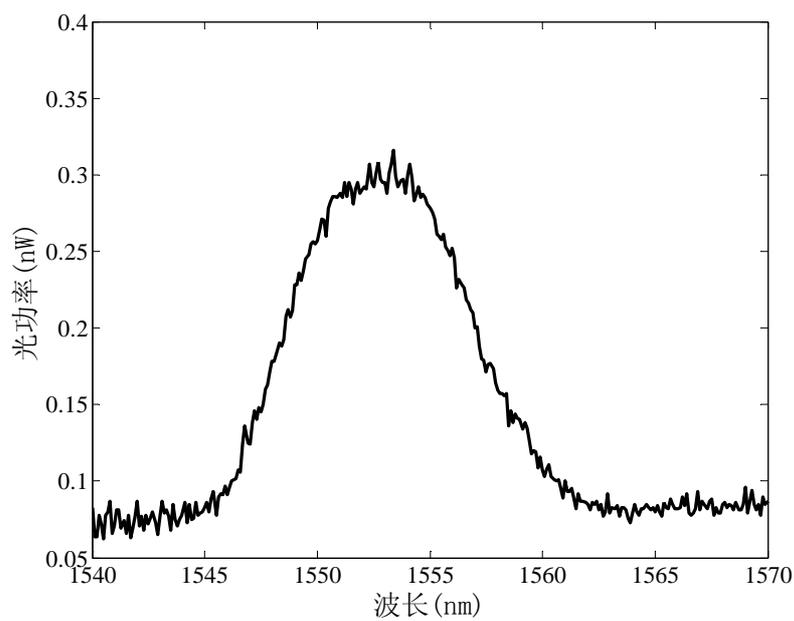


图 1.69 0℃时系统反射光谱图

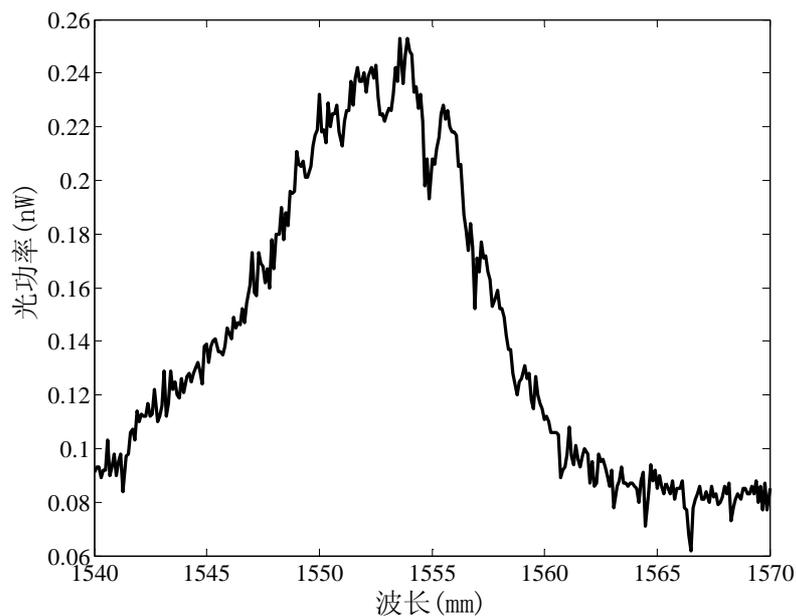


图 1.70 5°C时系统反射光谱图

由以上测量数据可得不同温度下系统的 Bragg 反射波长 λ_B ，测量数据如下表。

表 1.8 不同温度条件下布喇格反射波长的测量数据

T/°C	布喇格反射波长(nm)
-10	1552.3
-5	1553.1
0	1553.4
5	1553.9

由上表数据可绘出布喇格反射波长与温度关系曲线图。

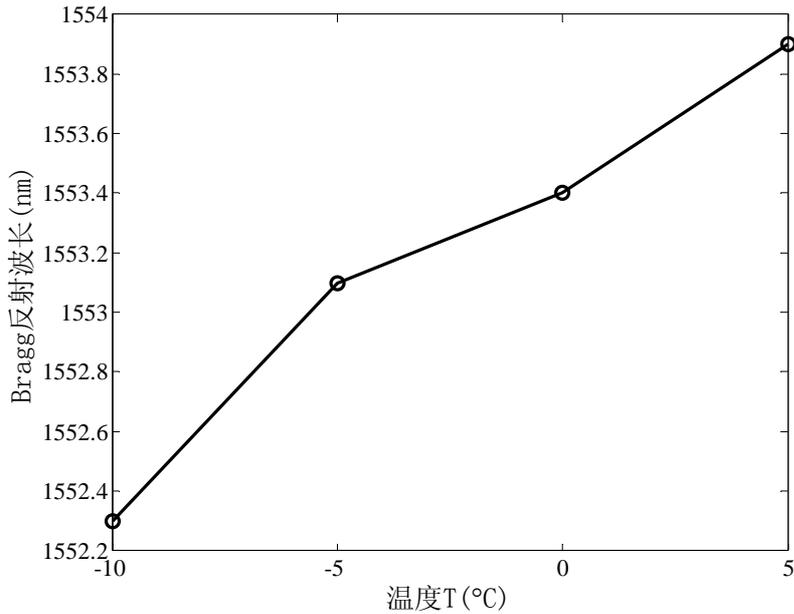


图 1.71 布喇格反射波长与温度关系曲线图

将温度 $T_0 = -10^\circ\text{C}$ 设为基准温度，对应的布喇格反射波长 $\lambda_B(T_0) = 1552.3\text{nm}$ 。利用表 1.8 的数据可计算出温度发生变化时的波长漂移($\Delta\lambda_B = \lambda_B(T) - \lambda_B(T_0)$)、相对波长漂移(即 $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B(T_0)}$)与温度改变的关系。计算结果如下表。

表 1.9 波长漂移、相对波长漂移与温度改变关系的计算数据

相对温度改变(T/°C)	波长漂移(nm)	相对波长漂移
0	0	0
5	0.8	0.000515
10	1.1	0.000708
15	1.6	0.00103

通过上面的实验数据得知，光纤光栅温度传感器的布拉格反射波长对环境温度十分敏感，当温度为 -10°C 、 -5°C 、 0°C 与 5°C 时测量的光纤光栅温度传感器的布拉格反射波长分别为 1552.3nm、1553.1nm、1553.4nm、1553.9nm，即当环境温度升高时，传感器的反射布拉格波长向长波长方向漂移。温度改变量为 5°C 、 10°C 、 15°C 时对应的波长漂移量分别为 0.8 nm、1.1 nm、1.6 nm，相对波长漂移量分别为 0.000515、0.000708、0.00103，波长变化与电流变化呈线性的关系，可利用反射布拉格波长漂移量来监测环境温度的变化。

5 光纤温度传感器的应用

温度传感器的应用是很广泛的，从较低温的生物过程监视到高温工程测量。

其中反射式双金属片传感器、荧光传感器和黑体辐射传感器应用较广。

双金属片光纤温度传感器在 $5^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围内是有效的。它被用在工程控制、空气压缩和工业处理的设备测温之中，其结构牢固、耐撞击和振动，但尺寸比光纤本征型光纤温度传感器大，这限制了它的动态响应。

荧光光纤温度传感器没用金属元器件，能被放在非常小的盒子中，携带方便，它尤其适用于要求抗电磁干扰的场合。由于其准确度高、尺寸小，更适于生物和生理应用，也能用于治癌时射频对局部组织进行加热的场合的测温之中，而且是很成功的。任何使用较低温的场合(如食物处理和硫化橡胶处理)，都可用这种传感器。这种传感器在高压装置的医疗器械中也是很有用的。若探测到局部发热，这预示着装置失灵的开始。

黑体辐射光纤温度传感器的测温范围为 $500^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ，其尺寸小，响应快，因此在许多高温过程中得到应用，如在蒸汽机中监示热流。

本征(如吸收)型光纤温度传感器具有测温的敏感机理。它可用于电动机和变压器的绕组中，发出过热警告。也能用于分布温度传感器中。