

3.1 引言

光纤的连接和处理是光纤应用中的重要问题。它涉及光纤的弯曲损耗、光纤的端面处理、光纤的固定、光纤的连接、光纤的熔接、光纤的抛磨、光纤的腐蚀等,本章将对这些光纤应用中的重要实际问题作简要介绍,最后对改变光纤传输特性的可能途径作简要介绍。

第2章介绍了因光纤制造和光纤材料,以及弯曲引起的光纤传输损耗。而构成光纤系统时因光纤耦合而产生的损耗,是光纤使用者更应关注的一种损耗因素。

光纤的弯曲损耗有两类:宏弯损耗和微弯损耗。光纤弯曲时,在光纤中传输的部分导模将由于辐射而损耗光功率。对此难于从理论上进行较细致而又准确的分析。主要原因是它和光纤的实际结构、折射率分布等因素关系较密切;对于多模光纤还应考虑模式间的功率耦合,情况更复杂。

本章对于耦合损耗,简要介绍了一些有实用价值的典型的耦合方式及其优缺点比较。

3.2 光纤和光源的连接

光纤和光源连接时,为获得最佳耦合效率,主要应考虑二者的特征参量相互匹配的问题。对于光纤应考虑其纤芯直径、数值孔径、截止波长(单模光纤)和偏振特性;对于光源则应考虑其发光面积、发光的角分布、光谱特性(单色性)、输出功率以及偏振特性等。下面对两种典型光源和光纤的耦合损耗进行分析。

3.2.1 半导体激光器和光纤的连接

半导体激光器的特点是:发光面为窄长条,长几十微米,宽零点几微米。当激励电流超过阈值不多时,是基横模输出,输出光强在垂直于光轴的平面内呈高斯分布。

$$I(x, y, z) = A(z) \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{x}{w_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{w_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.2.1)$$

式中

$$w_x = \frac{\lambda z}{\pi w_{0x}}, \quad w_y = \frac{\lambda z}{\pi w_{0y}} \quad (3.2.2)$$

式中, w_{0x} 、 w_{0y} 是高斯光束的腰宽,是近场的宽度; $A(z)$ 是只和 z 有关的常数,实验测定结

果与此相符。

图 3.2.1 给出了一个典型的半导体激光器发光的角分布。其特点是：在 x 方向（平行于 PN 结方向）光束较集中，发散角 $2\theta_{\parallel}$ 约为 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ （发散角定义为半功率点之间的夹角）；在 y 方向（垂直于 PN 结方向）发散角 $2\theta_{\perp}$ 约为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，所以半导体激光器发出的光在空间是窄长条，其远场图是一个细长的椭圆。这是光纤和半导体激光器耦合的困难所在。

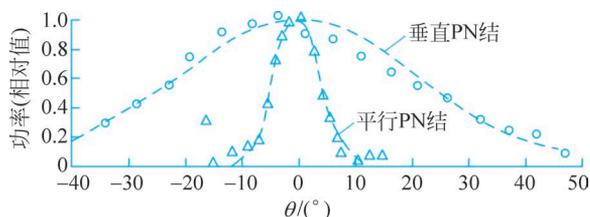


图 3.2.1 半导体激光器发光的角分布

1. 直接耦合

直接耦合就是把端面已处理的光纤直接对向激光器的发光面。这时影响耦合效率的主要因素是光源的发光面积和光纤纤芯总面积的匹配，以及光源发散角和光纤数值孔径角的匹配。显见，对于多模光纤，只要光纤端面离光源发光面足够近，激光器发出的光就能照射到光纤端面（由于光源发光面小）；对于单模光纤，由于纤芯很细，因此只有部分光能射入光纤，如图 3.2.2 所示。至于角度的匹配，光纤只能接收小于孔径角 $2\theta_c$ 的那一部分光。例如，对于数值孔径 $NA=0.14$ 的通用多模光纤，其孔径角 $2\theta_c$ 约为 16° ；在平行于 PN 结方向，光源的发散角 $2\theta_{\parallel}$ 仅 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ，只要距离 S 适当，全部光功率都能进入光纤；而在垂直于 PN 结方向，只有 $2\theta_c$ 内的光才能进入光纤。这种情况下的耦合效率可计算如下。

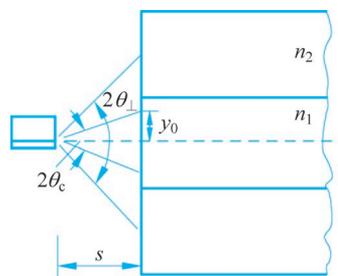


图 3.2.2 半导体激光器和光纤耦合的示意图

由激光器发出的总光功率为

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 2 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} I(x, y, z) dx dy \\
 &= 2 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} A(s) \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{x}{w_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{w_y} \right)^2 \right] \right\} dx dy = B \operatorname{erf}(\infty) \quad (3.2.3)
 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}
 B &= \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{2} w_y \right) A(s) \int_0^{\infty} \exp \left[-2 \left(\frac{x}{w_x} \right)^2 \right] dx \\
 \operatorname{erf}(A) &= \left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \right) \int_0^A \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \\
 t &= \frac{2y}{w_y}, \quad dt = 2 \frac{dy}{w_y}
 \end{aligned}$$

$\operatorname{erf}(A)$ 为误差函数。在 $z=s$ 平面内， B 为常数。显然，包含在光纤孔径角 $2\theta_c$ 内的光功率是

$$\begin{aligned}
 P &= 2 \int_0^{x_0} \int_0^{y_0} A(s) \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{x}{w_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{w_y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \\
 &= B \left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \right) \int_0^{2x} \frac{w_{0y} \tan \theta_c}{\lambda} \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \\
 &= B \operatorname{erf} \left(\frac{2\pi w_{0y} \tan \theta_c}{\lambda} \right)
 \end{aligned}$$

式中, x_0, y_0, θ_c 是在 $z=s$ 处的值。

若取光纤端面反射损失为 5%, 则光纤和半导体激光器直接耦合时, 其耦合效率的理论值为

$$\eta_{\max} = \frac{P}{P_0} \times 95\% = \frac{\operatorname{erf} [(2\pi w_{0y} \tan \theta_c) / \lambda]}{\operatorname{erf} [\infty]} \times 95\% \quad (3.2.4)$$

实际的耦合效率不仅和光纤的孔径角 θ_c 、激光器的近场宽度 w_{0y} 有关, 而且和耦合时的调整精度、光纤端面的加工精度有密切关系。图 3.2.3 给出了由式 (3.2.4) 算出的 $\eta_{\max} - w_{0y}$ 曲线。

【例 3.2.1】 对于 $w_{0y} = 0.05 \mu\text{m}, \lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 的激光器和 $\text{NA} = 0.14 (\theta_c = 8^\circ)$ 的光纤直接耦合, 其 η_{\max} 约为 20%。

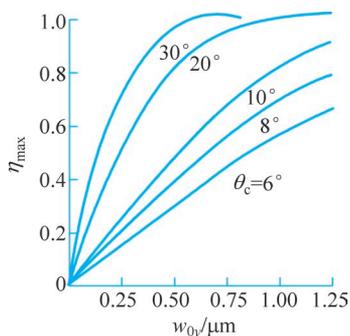


图 3.2.3 耦合效率和发光区宽度的关系

2. 用透镜耦合

利用透镜耦合可大大提高耦合效率, 下面介绍其典型方式。

1) 端面球透镜耦合

最简单的加透镜方法是把光纤端面做成一个半球形, 如图 3.2.4 所示。光纤端面透镜的做法可以是直接将光纤端面烧成半球形, 或将光纤端面磨平再贴一个半球形透镜。光纤端面加球透镜后的效果是增加光纤的孔径角, 由图 3.2.4 的几何关系可以证明, 带有球透镜的光纤的等效接收角 θ_c 为

$$\theta_c = \arcsin \left\{ n_1 \sin \left[\arcsin \left(\frac{a}{r} \right) + \arccos \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \right] \right\} - \arcsin \left(\frac{a}{r} \right) \quad (3.2.5)$$

式中, r 为球透镜半径; a 为纤芯半径; n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。用这种办法可以显著地增加 θ_c , 从而增加耦合效率。对于多模光纤, 可把耦合效率从光纤为平端的 24% 提高到光纤为半球端的 60% 以上。图 3.2.5 是等效接收角 θ_c 和球半径 r 以及光纤芯半径 a 的关系。

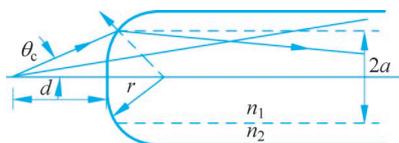


图 3.2.4 球面透镜的光路简图

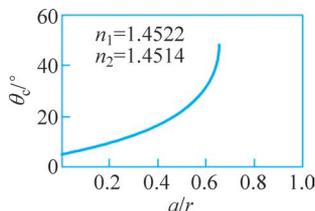


图 3.2.5 等效接收角 θ_c 和球半径 r 及光纤半径 a 的关系

2) 柱透镜耦合

利用柱透镜可把半导体激光器发出的光进行单方向会聚,使光斑接近圆形以提高耦合效率。也可利用球透镜和柱透镜的组合进一步提高耦合效率。这种耦合方式的缺点是它对激光器、柱透镜、球透镜以及光纤的相对位置的准确性要求极高,稍一偏离正确位置,耦合效率就急剧下降,甚至不如直接耦合。

3) 凸透镜耦合

一般用直径为 3~5mm,焦距为 4~15mm 的凸透镜,用图 3.2.6 所示的光路进行耦合,其优点是便于构成活动接头,或是中间插入分光片、偏振棱镜等光学元件。此光路中凸透镜也可用自聚焦透镜代替。自聚焦透镜的优点是几何尺寸小,平端面便于和光纤粘接;缺点是自聚焦透镜之平端面的反射面的反射光对光源有干扰作用。

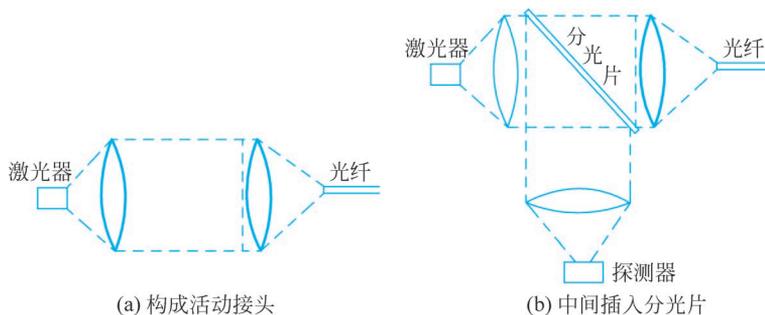


图 3.2.6 凸透镜耦合的光路简图

4) 圆锥形透镜耦合

把光纤的前端用腐蚀的办法或熔烧拉锥的办法做成图 3.2.7 所示的圆锥形式。前端半径为 a_1 ,光纤本身半径为 a_n 。当光从前端以 θ 角入射进光纤,经折射后以角 γ_1 射向芯包分界面 A,由于界面是斜面,所以 $\gamma_1 > \gamma_2$,如锥面坡度不太大,即圆锥长度 $l \gg (a_n - a_1)$ 时,则近似有

$$\frac{\sin\gamma_1}{\sin\gamma_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

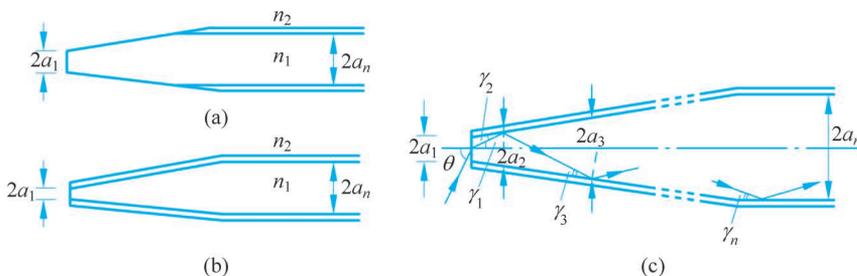


图 3.2.7 圆锥透镜耦合的光路简图

由此可得有圆锥时的孔径角 θ_c 和平端光纤的孔径角 θ'_c 之间的关系如下:

$$\frac{\sin\theta_c}{\sin\theta'_c} = \frac{\sin\gamma_1}{\sin\gamma_n} = \frac{\sin\gamma_1}{\sin\gamma_2} \frac{\sin\gamma_2}{\sin\gamma_3} \dots \frac{\sin\gamma_{n-1}}{\sin\gamma_n} = \frac{a_2}{a_1} \frac{a_3}{a_2} \frac{a_4}{a_3} \dots \frac{a_n}{a_{n-1}} = \frac{a_n}{a_1} \quad (3.2.6)$$

上式说明:有圆锥透镜的光纤的数值孔径比平端光纤增加了 a_n/a_1 倍。实验结果表明,用这种办法耦合效率可高达 92%,对于多模光纤这是一种行之有效的办法。因为此法要求光

纤前端直径 $2a_1$ 比激光器发光面大些,以获最佳耦合效果。而单模光纤芯径太小,无法满足这一要求。为此人们又提出如图 3.2.8 所示的倒锥形的耦合办法,使端面直径增加,以满足激光器和单模光纤耦合的要求。目前用这种办法耦合,其效率已达 90% 以上。

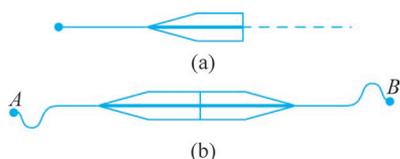


图 3.2.8 倒锥光纤耦合简图

5) 异形透镜耦合

为了满足激光器长条发光面和圆形光纤的耦合要求,人们还提出了一种异形透镜的耦合办法。透镜的一个端面为长条形,可与激光器发光面配合,另一个端面为圆形,可与光纤连接。最近由于微电子技术的不断进步,二元光学得以迅速发展。现已推出利用微型相位光栅以改变半导体激光器输出光波的空间分布的方法,此法可使半导体激光器输出的光斑由长条形分布改变为圆对称分布,以提高半导体激光器和光纤的耦合效率。预计此法有较好前景。

图 3.2.9 给出了光源和光纤耦合的一些典型的光路简图。对于单模光纤的耦合,其微型元件的制造、定位、固定以及抗干扰等问题都比多模光纤的耦合要困难。因为这时光纤的芯径要小很多。

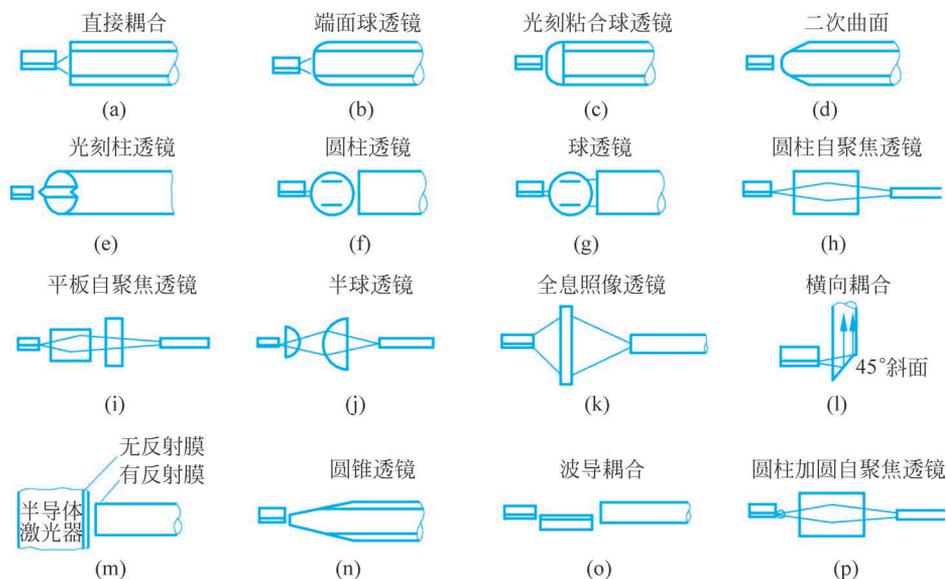


图 3.2.9 光源和光纤耦合的典型光路简图

随着科学技术以及微光学系统的发展,目前,光源与光纤的耦合已从上述单个透镜的耦合发展到透镜阵列的耦合,并有多种相应的透镜阵列问世。

3.2.2 半导体发光二极管和光纤的耦合

半导体发光管和半导体激光器从耦合的角度看,其主要差别是:前者为自发辐射,光发射的方向性差,近似于均匀的面发光器件,其发光性能类似于余弦发光体;后者为受激辐射,光发射方向性好,光强为高斯分布。

讨论耦合问题时,可把半导体发光管看成均匀的面发光体(即朗伯型光源),它在半球空

间所发生的总光功率 P_0 为

$$P_0 = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi B A_E \sin\theta \cos\theta d\theta = 2\pi B A_E \quad (3.2.7)$$

式中, B 为光源的亮度(单位面积向某方向单位立体角发出的光功率); A_E 为发光面积; θ 为光线与发光面法线的夹角,如图 3.2.10 所示。

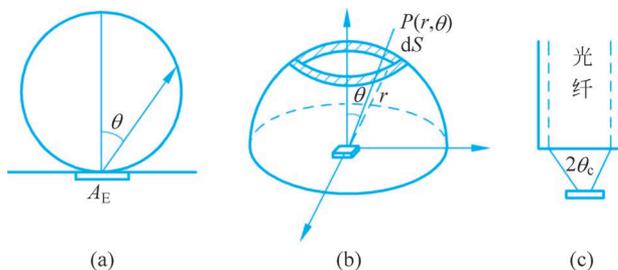


图 3.2.10 发光二极管光功率分布示意图

当发光面 A_E 比光纤截面小时,在空间一点 P 处,面积为 dS 内所能得到的光功率为

$$dP = B A_E \cos\theta d\Omega$$

再利用 $d\Omega = dA/r^2$, $dA = (r d\theta)(2\pi r \sin\theta)$, 即可求出光纤在孔径角 θ_c 内所接收到的光功率 P 为

$$P_0 = 2 \int_0^{\theta_c} 2\pi B A_E \sin\theta \cos\theta d\theta = 2\pi B A_E \sin^2 \theta_c \quad (3.2.8)$$

由此得半导体发光二极管和多模光纤直接耦合时的最大耦合效率为

$$\eta_{\max} = \frac{P}{P_0} = \sin^2 \theta_c = (\text{NA})^2 \quad (3.2.9)$$

由此可见,对于常用的多模光纤($\text{NA}=0.14$),其 η_{\max} 仅为 2%,对于一个功率为 5mW 的发光二极管,用这种方法耦合,其出纤功率仅为几十微瓦。对于发光二极管和光纤用透镜耦合的方式与前述激光器和光纤耦合的方式相似,不再赘述。

3.2.3 大功率 LD 阵列耦合技术

由于单片半导体激光器的输出功率限制在瓦量级,远不能满足高功率光纤激光器泵浦源的要求。为获得更高输出功率需采用多发光单元集成的激光二极管阵列(LD Array)。大功率半导体激光器阵列分为线阵列(LD Bar)和面阵列(LD Stack),其光纤耦合的主要技术路线有两个:光纤束耦合法和微光学系统耦合法。下面以线阵列为例简要介绍。

1. 光纤束耦合法

光纤束耦合法,即光纤阵列耦合法(如图 3.2.11 所示),是利用微光学系统将线阵列各发光单元发出的光在快轴方向进行准直和压缩后,与相同数目的阵列光纤一一对应耦合,然后通过合束光纤输出。是早期使用的一种光纤耦合技术,具有结构简单、耦合效率高、发光元间隙不影响光束整体质量和成本低的优点。大功率半导体激光器阵列在平行于 PN 结平面(慢轴)的方向发散角较小(数值孔径为 0.05~0.11),小于输出光纤的数值孔径(0.11 或 0.22),无须压缩。由于光纤束直径大,致输出激光的亮度和功率密度较低,因此只适用于对亮度和功率密度要求不高的系统,正逐渐被微光学透镜阵列耦合技术所取代。

2. 微光学系统耦合法

微光学系统耦合法是通过微光学系统(微透镜阵列、微棱镜阵列、微柱透镜等)对线阵列输出的光束进行准直、整形、变换和聚焦后,直接耦合入单根光纤输出。图 3.2.12 所示为微光学系统整形耦合的一个示例照片。



图 3.2.11 光纤束耦合法示意图

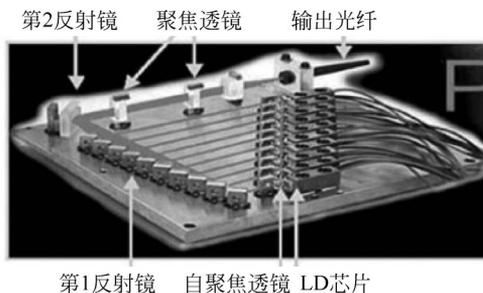


图 3.2.12 微光学系统整形耦合示例

由于 LD 阵列的快、慢轴方向上的光束具有非对称性,所以在快、慢轴方向上需分别进行准直。快轴的发散角大且为高斯光束,通常利用大数值孔径($NA > 0.85$)非球面微柱透镜准直,可在不过多增加透镜的条件下校正球差,如图 3.2.13 所示。慢轴方向是 N 个具有固定宽度和间隔的线发光元,通常采用球面微柱透镜阵列准直(如图 3.2.14 所示)。德国 LIMO 公司针对线阵列的慢轴准直专门设计了一种微透镜阵列(Telescope-Arrays)。该微透镜阵列由两个非球面微柱透镜阵列组成,更有效地压缩了慢轴发散角,获得了更高的激光亮度,并且将线阵列发光单元转化为一条均匀的发光线(如图 3.2.15 所示)。



图 3.2.13 非球面微柱透镜

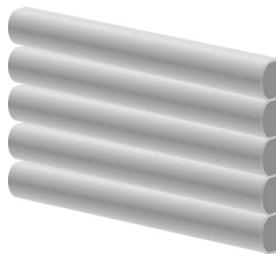


图 3.2.14 球面微柱透镜阵列

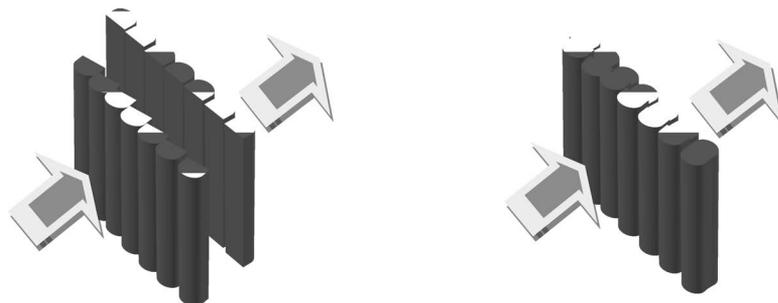


图 3.2.15 Telescope-Arrays 的两种结构

另外,线阵列的输出光束在快、慢轴方向的不对称造成光束质量不均衡,具体表现为两个方向上的光参数积差别很大,达 2~3 个数量级。因此,传统的成像光学系统无法将其聚

焦成对称光斑,必须采用特殊的光学器件对光束进行整形,以减小慢轴方向的光参数积,实现两个方向光束质量的均衡。目前已有文献报道的光束整形方法主要有双平面反射镜法、阶梯反射镜法、多棱镜阵列法、棱镜组折反射法、微片棱镜堆整形法和二维透射式闪耀光栅阵列法等,但是均存在器件加工困难、装调复杂等问题,导致耦合效率不高,距离商业化尚存在一定距离。

德国 LIMO 公司的产品 HOC(hybrid optical chip)——将快慢轴准直微柱透镜、光束整形变换系统和聚焦微柱透镜片上集成——技术成熟度较高,也可以对单管 LD 和 LD Stack 输出光进行光纤耦合。为达到最优耦合效果,需设计整形微光学系统的参数主要有发光单元的尺寸、周期、数目,快慢轴的发散角,线阵列的微笑效应(smile-effect),耦合光纤的纤芯直径与数值孔径等。由于对所用微透镜及其阵列的光学质量要求很高,因此制作和加工难度较大,导致成本较高。

3. 大功率半导体激光器光纤耦合产品

目前,国外公司占据着商业化大功率半导体激光器光纤耦合产品市场上的优势:如美国的 Coherent、SDL、Spectra-Physics 公司及德国的 LIMO 公司等。与国外同类产品相比,国内大功率半导体激光光纤耦合产品的性能参数和技术指标还有较大差距,所以尚无大批量应用。主要原因是所需基础单元技术面广,如半导体材料的生长和加工工艺、微光学透镜及阵列设计、制造技术和工艺等。

2017 年,德国公司针对光纤激光器泵浦和激光微材料加工应用,发布了波长 793nm、105 μm 的光纤耦合模块,该模块基于线阵列 LD,输出功率 32W、数值孔径 $\text{NA}<0.22$ 。使用芯径为 800 μm 、数值孔径 0.22 的光纤,输出最大功率达 500W,耦合效率非常高。

3.3 光纤和光纤的连接

3.3.1 光纤与光纤的固定连接

光纤固定连接是一种永久性的连接,其基本要求是:以最短的时间与最低的成本获得最佳的光纤与光纤系统其他部分的稳定接入。为增加中继距离,要求接头的损耗低,且性能稳定,而对于接续时间与成本则可降低要求。在光纤局域网(LANS)中,通信距离短但接头多,因此要求接头具备现场快速安装性能,对于接头损耗只作一般性要求。

根据光纤固定接头的光纤类型、连接光纤的形式和固定方法,可将其分为两类:多模机械式固定单根光纤接头或阵列光纤接头;多模熔焊法固定单根光纤接头或阵列光纤接头。

光纤固定连接技术中含有三个基本的操作环节:光纤端面制备、光纤对准调节、光纤接头固定。

在光纤的各种应用中,光纤端面处理是一种最基本的技术。光纤端面处理的形式可分为两种:平面光纤头与微透镜光纤头。前者多用于光纤和各种光无源器件以及光纤和光纤的连接与接续;后者则多用于光纤和各种光源及光探测器之间的耦合。光纤端面处理的基本步骤为涂覆层剥除、光纤端面制备和光纤端面检测。下面主要介绍光纤对准调节和光纤的固定。

1. 光纤对准调节

光纤对准调节技术包括无源对准与有源对准两种。无源对准技术利用光纤包层或支撑光纤的套管(衬基)的几何一致性来使光纤纤芯对准,前者称为直接对准,后者称为二次对准,典型的直接对准方法有V形槽法、三棒法和套管法。图3.3.1所示为多光纤V形槽结构示意图。

图3.3.2所示为三棒对准机构的结构。这种技术利用3根精密加工圆柱棒夹持光纤,3根棒与光纤的3条接触线提供了光纤准确对接的基准。

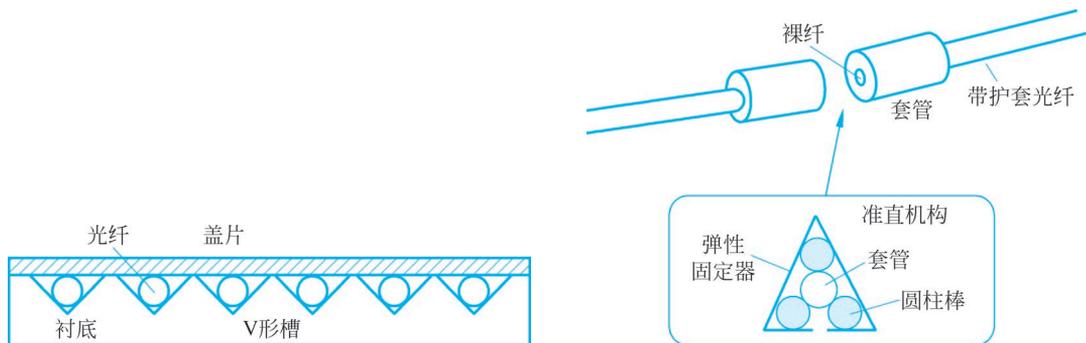


图 3.3.1 多光纤 V 形槽结构示意图

图 3.3.2 三棒对准机构结构示意图

套管法以一个精密配合的玻璃管、一个热缩管和一个能从中心孔加进黏合剂的套管作为精确对准的工具,套管端部张成喇叭形以便于插入光纤。

直接对准技术的主要优点是简便、迅速,适用于现场快速安装。其端面制备技术常采用刻痕拉断法。二次对准技术首先用一支撑件(如毛细玻璃管,陶瓷管等)来固定住光纤,然后调节支撑件来使光纤纤芯对准。这种结构坚固稳定,尤其适合于端面研磨抛光。

2. 光纤的固定

光纤的固定技术是光纤连接中最重要的、最基本的环节。如果在光纤接头的使用期(20~40年)之内,不能使接头性能保持稳定,光纤的高精度对准将不具备任何意义。理想的光纤固定技术应不增加连接损耗,节点的传输特性不随时间变化,能适应各种环境条件。常用的光纤固定技术包括胶粘、机械夹持和定位熔焊3种。

除了熔接头外,几乎所有的光纤连接都离不开各种各样的胶粘剂。其中,环氧树脂胶应用最为广泛。但是胶粘方法的不足之处是难于满足长期可靠性的要求。

机械夹持固定是为临时连接两根光纤提供一种简便而迅速的固定方法,其基本原理是在光纤二次对准调节的基础上提供一种使光纤固定的夹持方式。几种常用的结构如图3.3.3所示。机械夹持结构与胶粘技术相配合,可以用作稳固的永久性光纤接头。

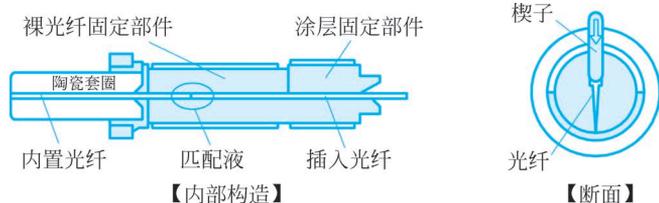


图 3.3.3 机械夹持固定光纤的示意图

光纤熔焊固定是所有光纤接头中性能最稳定、应用最普遍的一种,常用于永久性的光纤固定接头。熔接法需用精密的熔接设备,其主要特点是连接损耗最低。目前熔接损耗平均小于 0.1dB,甚至达到 0.05dB。影响光纤熔接性能的因素较多,大体可分为本征因素和非本征因素两类。本征因素是光纤自身因素,主要有:①模场直径不一致;②芯径失配;③纤芯截面不圆;④纤芯与包层同心度不佳。非本征因素包括轴心错位、轴心倾斜、端面分离、端面质量和光纤物理变形等。相关的解决方案可以在工艺类文献中查到。

3.3.2 多模光纤和多模光纤的直接耦合

对于多模光纤的直接耦合损耗,可用几何光学的方法进行分析和讨论。在以下的讨论中假设光功率在截面上分布均匀,光强的角分布和偏振也均匀,所用光纤是均匀折射率分布的多模光纤。通过计算可得光纤的透过率 T 为

$$T \approx \frac{16N^2}{(1+N)^4} [1 + F(\theta_1^2)] \quad (3.3.1)$$

式中, $N = n_1/n_0$, n_1 是纤芯的折射率, n_0 是周围媒质的折射率; θ_1 为光线入射角。由此可计算两光纤直接对接时由于轴偏离、轴倾斜等对耦合损耗的影响。

1. 轴偏离对耦合损耗的影响

设光纤芯半径为 a , 两光纤轴偏离为 x , 这时只有两纤芯重叠部分才有光通过。通过一定计算可得其耦合损耗 α_1 为

$$\alpha_1 \approx \frac{16N^2}{(1+N)^4} \frac{1}{\pi} \left\{ 2 \arccos\left(\frac{x}{2a}\right) - \frac{x}{a} \left[1 - \left(\frac{x}{2a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3.3.2)$$

图 3.3.4 给出了耦合损耗 α_1 和 x 的关系曲线。图中实线为理论值, 实验所用光纤为均匀芯, 其芯包折射率差为 $\Delta = 0.7\%$, 光纤长度分别为 500m 和 3m。 $N = 1$ 时为光纤两端面之间加了匹配液, $N = 1.46$ 则为两端面处于空气中的情况。由图中曲线可见, 只有当 $x/a < 0.2$ (满足两光纤轴偏离小于芯径的 1/10 时), 才能使耦合损失小于 1dB。

2. 两光纤端面之间的间隙对耦合损耗的影响

若两光纤端面之间间隙为 z , 则其耦合损耗 α_2 为

$$\alpha_2 \approx \frac{16N^2}{(1+N)^4} \left[1 - \left(\frac{z}{4a}\right) N(2\Delta)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.3.3)$$

α_2 和 z 的关系如图 3.3.5 所示。由曲线可见, 对间隙 z 的调整精度比对轴偏离 x 的要求低。

3. 两光纤之间的倾斜对耦合损耗的影响

两光纤轴之间的倾斜角为 θ (如图 3.3.6 中曲线左侧所示), 且当 θ 足够小时, 其轴倾斜引起的损耗 α_3 为

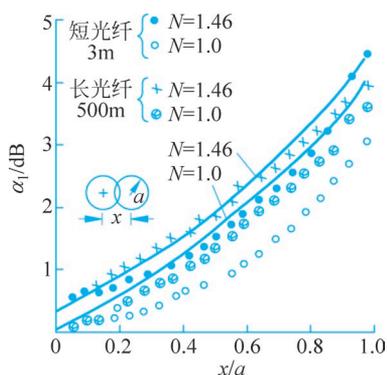


图 3.3.4 耦合损耗和轴偏离 x 的关系

$$\alpha_3 \approx \frac{16N^2}{(1+N)^4} \left[1 - \frac{\theta}{\pi N (2\Delta)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (3.3.4)$$

图 3.3.6 给出了轴倾斜引起的损耗 α_3 和 θ 之间的关系。由图中曲线可见,要使耦合损耗小于 1dB,其角偏离应小于 5° 。

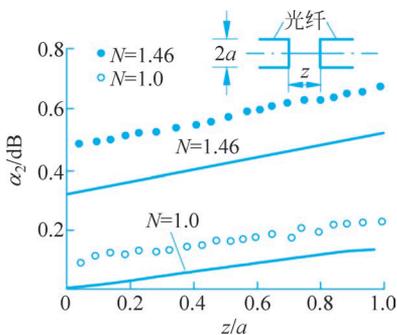


图 3.3.5 耦合损耗和间隙 z 的关系

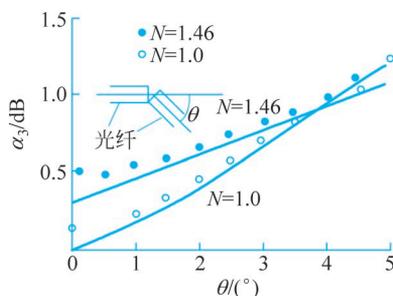


图 3.3.6 耦合损耗和轴倾斜 θ 的关系

4. 光纤端面的不完整性对耦合损耗的影响

若两光纤端面之间有匹配液 ($N=1.0$),端面的不完整性不会引起明显的耦合损耗。以下给出的结果都是针对 $N=1.46$ 的情况。

1) 端面倾斜

若两光纤端面和光纤轴不垂直,其夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,则由此引起的损耗 α_4 为

$$\alpha_4 \approx \frac{16N^2}{(1+N)^4} \left[1 - \frac{|N-1|}{\pi N (2\Delta)^{\frac{1}{2}}} (\theta_1 + \theta_2) \right] \quad (3.3.5)$$

α_4 和 $(\theta_1 + \theta_2)$ 的关系见图 3.3.7。从图中可以看出,光纤的芯包折射率差 Δ 值愈小,对端面倾斜的要求就愈高。

2) 端面弯曲

若两光纤端面不是平面,则由此引起的损耗 α_5 为

$$\alpha_5 \approx \frac{16N^2}{(1+N)^4} \left[1 - \frac{1}{2(2\Delta)^{\frac{1}{2}}} \frac{N-1}{N} \frac{d_1 + d_2}{a} \right] \quad (3.3.6)$$

式中, d_1 、 d_2 为两端面弯曲的程度; α_5 和 $(d_1 + d_2)/a$ 的关系如图 3.3.8 所示。

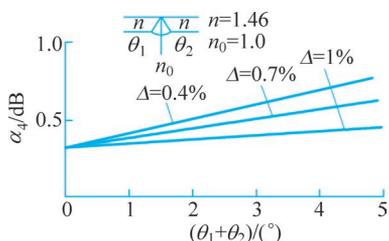


图 3.3.7 耦合损耗和端面倾斜的关系

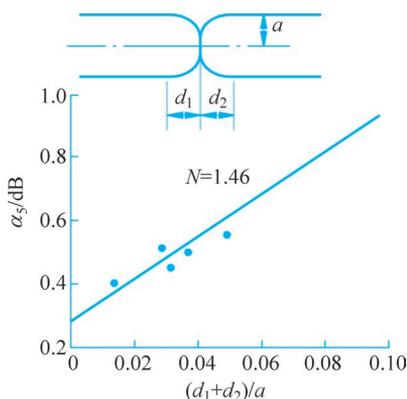


图 3.3.8 耦合损耗和端面弯曲的关系

5. 光纤种类不同对耦合损耗的影响

1) 光纤芯径不同

当光由细芯径的光纤输入粗芯径的光纤时,只有反射损失;反之,由粗芯径光纤输入细芯径的光纤时,将产生附加的耦合损耗 α_6 :

$$\alpha_6 \approx \begin{cases} \frac{16N^2}{(1+N)^4}(1-P)^2, & P \geq 0 \\ \frac{16N^2}{(1+N)^4}, & P < 0 \end{cases} \quad (3.3.7)$$

式中, $P=1-(a_2/a_1)$, a_1 、 a_2 分别为粗、细两种光纤的芯半径。图 3.3.9 给出了 α_6 和 P 的关系。

2) 折射率不同

光由纤芯折射率小(即数值孔径小)的光纤进入纤芯折射率大的光纤时只有反射损失,反之则有附加损耗,其值为

$$\alpha_7 \approx \begin{cases} \frac{16N^2}{(1+N)^4}(1-q)^{\frac{1}{2}}, & q \geq 0 \\ \frac{16N^2}{(1+N)^4}, & q < 0 \end{cases} \quad (3.3.8)$$

式中, $q=1-(\Delta_2/\Delta_1)$, Δ_1 和 Δ_2 分别为光纤 1 和 2 的相对折射率差。附加损耗 α_7 和 q 的关系如图 3.3.10 所示。

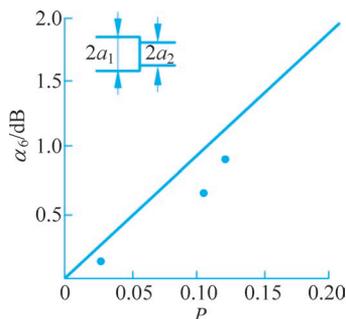


图 3.3.9 耦合损耗和芯径差的关系

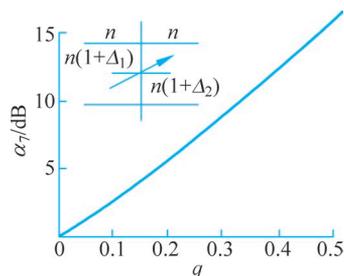


图 3.3.10 耦合损耗和折射率差的关系

3.3.3 单模光纤和单模光纤的直接耦合

计算单模光纤直接耦合的损耗和上述计算多模光纤耦合损耗的主要差别是:对多模光纤其端面光功率分布视为均匀分布,而对单模光纤其端面光功率则视为高斯分布。下面给出类似于多模光纤的两单模光纤连接损耗的计算结果。

1. 两光纤的离轴和轴倾斜引起的耦合损耗 α_1

$$\alpha_1 = 4.34 \left[\left(\frac{d}{s_0} \right)^2 + \left(\frac{\pi n_2 s_0 \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.3.9)$$

式中, d 为两光纤轴之间的间距; θ 为两光纤轴之间的夹角; s_0 为光纤的模斑半径。图 3.3.11 给出了 d 、 θ 和 α_1 之间的关系,由曲线可见,在同样耦合损耗时,其 d 和 θ 的允许误差比多模

光纤的要大。

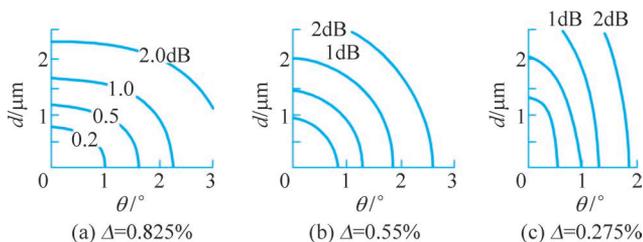


图 3.3.11 单模光纤耦合损耗和 d, θ 的关系

2. 两光纤端面间的间隙引起的耦合损耗 α_2

$$\alpha_2 = 10 \lg \left[\frac{1 + 4z^2}{(1 + 2z^2)^2 + z^2} \right] \quad (3.3.10)$$

式中

$$z = \frac{S_e}{k_0 n_2 s_2^2} \quad (3.3.11)$$

其中, S_e 为两光纤端面之间的距离。 α_2 和 z 之间的关系见图 3.3.12。它是单模光纤耦合损耗 α_2 和间隙 z 之间的关系曲线。

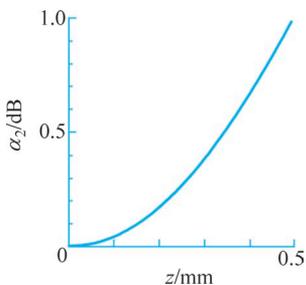


图 3.3.12 单模光纤耦合损耗和间隙 z 之间的关系

3. 不同种类光纤引起的耦合损耗 α_3

$$\alpha_3 = -20 \lg \left(\frac{2s_1 s_2}{s_1^2 + s_2^2} \right) \quad (3.3.12)$$

式中, s_1 和 s_2 为两光纤的模斑半径。 α_3 和 s_1/s_2 之间关系见图 3.3.13。由此曲线可见: s_1, s_2 之间的差别引起的损耗很小, s 变动 10% 时, 会引起 0.05dB 的损耗。

$$\frac{\delta s_0}{s_0} = \left| l \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \right| \left| \frac{\partial a}{a} \right| + \left| m \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \right| \left| \frac{\partial(\Delta n)}{\Delta} \right| \quad (3.3.13)$$

式中, l, m 是 λ/λ_c 的函数。由图 3.3.14 的曲线可见, 当 $\lambda/\lambda_c = 1.285$ 时, 芯半径的起伏对 s_0 几乎没有影响。在 $1 \leq \lambda/\lambda_c \leq 1.5$ 时, 有 $|l| \leq 0.4, |m| \leq 0.7$ 。

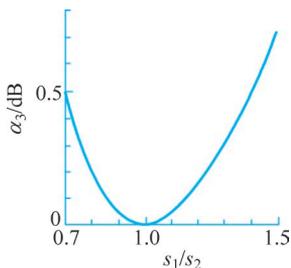


图 3.3.13 单模光纤耦合损耗和模斑半径 s_1/s_2 之间的关系

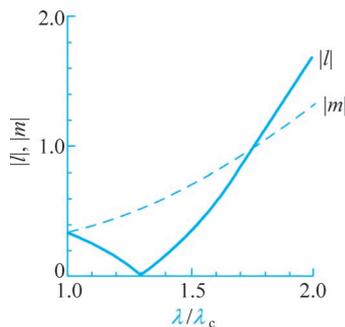


图 3.3.14 $|l|, |m|$ 和 λ/λ_c 的关系曲线

3.4 侧边抛磨光纤

光纤的抛磨是指用传统的光学冷加工方法(即光学玻璃的抛磨技术)加工光纤。光纤的抛磨有端面抛磨和侧边抛磨两种。光纤的抛磨和一般光学玻璃抛磨之间的重要差别是光纤抛磨的加工对象尺寸小。光纤尺寸细小,因此抛磨光纤时需要设计专用的夹具固定光纤、磨具,以及调整光纤和磨具之间的夹角,以保证可按设计要求加工出需要的平面,一定角度的斜面或曲面等。

侧边抛磨光纤是利用光学微加工技术,在一定长度的光纤上将圆柱形的光纤包层侧边磨掉一部分,如图 3.4.1 所示。其包层被侧边抛磨过的那段光纤的横截面相似于大写英文字母 D,而在未抛磨过的光纤段,仍是圆柱形。这种光纤有时也称 D 形光纤。

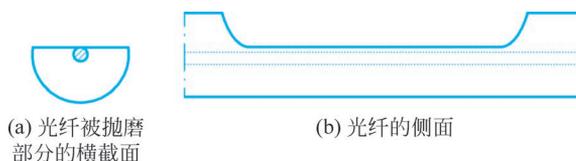


图 3.4.1 光纤被侧面抛磨的示意图

通常,足够厚度的光纤包层保证了在纤芯中传播的光场和在光纤包层中倏逝波场的能量不会泄漏到光纤外面。当用侧边抛磨或化学腐蚀的方法使光纤的包层厚度减小到倏逝波场存在的区域,也就是距纤芯仅几微米的区域时,就形成了一个纤芯中传输光的倏逝波场的“泄漏窗口”。在此“窗口”处,人们就有可能利用倏逝场来激发、控制、探测光纤纤芯中的传输光波的无损传播或泄漏。因为是利用侧边抛磨光纤包层中的倏逝场的原理做成器件或传感器,所以制成的器件也称为光纤倏逝场器件。普通光纤的低廉成本、对倏逝场区域的可为人为控制、制成的器件的插入损耗、偏振相关损耗、背向反射极小和易于与光纤系统熔接的特点,使得利用侧边抛磨光纤构造新型全光纤器件和多功能光纤传感器已成为研究开发的有效途径之一。

制作侧边抛磨光纤的关键是在距纤芯仅几微米的区域处,制作一个纤芯中传输光的倏逝波场的“泄漏窗口”。化学腐蚀方法很难控制此“泄漏窗口”形状。目前较好的方法是采用侧边抛磨法去除部分光纤包层,制作侧边抛磨光纤。

目前制作侧边抛磨光纤的方法主要有两种。一是光纤侧边弧形槽基块抛磨法。即将光纤胶固在一块上面开着弧形槽的玻璃基块上,然后将光纤与此基块一起在商用光学抛磨机上研磨,如图 3.4.2 所示。其缺点是要先在玻璃基块上开弧形槽,而且每根抛磨光纤都需要一个弧形槽基块。另外,要用环氧胶固定此光纤,抛磨完毕后,有时又需用化学溶剂来溶解环氧胶以取出磨好的光纤。这是一个成本高,效率和成品率低,又不够环保的方法。

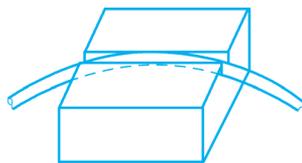


图 3.4.2 固定在弧形槽基块上进行侧边抛磨的光纤

针对上述缺陷,产生了光纤侧边轮式抛磨法。此法是将光纤置于一个旋转轮上,在轮上加研磨剂后,将光纤的侧边抛磨去一部分。其优点是:不必用胶固定光纤;工艺较简单,有

可能实现批量生产；制成的侧边抛磨区域的中部是完全平坦的，易于用其制作多种全光纤器件，并使批量工业生产成为可能。

典型的侧边抛磨光纤制成的器件包括全光纤偏振器、全光纤可变光衰减器、光纤传输特性监测仪、全光纤电光强度调制器、光纤滤光器和光纤倏逝场生物传感器等，详细机理与性能可参考相关文献。

3.5 光纤的腐蚀

纳米光纤探针可作为微小光源或微收集器。近年来，随着近场扫描光学显微镜以及光纤生物传感器的发展，采用化学腐蚀法制作纳米光纤探针的技术得到了广泛的应用。另外，化学腐蚀法还可应用于光纤光栅传感器的增敏，多参数同时测量以及具有倏逝场结构的光纤传感器等。

3.5.1 化学腐蚀法制作纳米光纤探针

纳米光纤探针通常由市售普通单模通信光纤加工而成。腐蚀液中 $\text{HF}(40\%)$ 、 NH_4F 溶液和去离子水的体积比为 $1:1:115$ ，置于塑料容器中；在腐蚀液上方注入约为 3mm 厚度的油脂密封层来防止挥发。腐蚀前需剥去光纤端部保护层、清洁、上光纤架固定；调节光纤架，使光纤垂直于液面，端部插入液面下少许。伸入腐蚀液内的光纤将被完全腐蚀掉，靠近液面的部分因浸润现象吸附少量腐蚀液，通过吸附力、重力和表面张力的平衡使腐蚀液面在光纤处形成弯曲（见图 3.5.1(a)），随着时间推移，光纤在弯曲液面处逐渐呈现倒立的近似圆台形（见图 3.5.1(b)），其下部光纤变成圆柱形，最终腐蚀至圆柱部分刚刚脱落时，形成一个倒立的近似圆锥形针尖（见图 3.5.1(c)）。

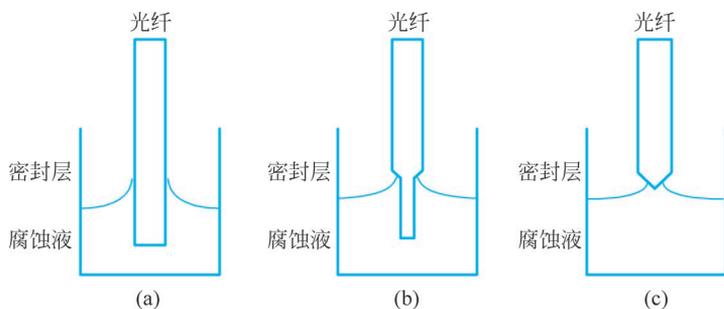


图 3.5.1 化学腐蚀法制备探针原理图

3.5.2 影响腐蚀效果的因素

当光纤浸入液体表面后，由于液体表面张力的作用，腐蚀液会沿光纤表面向上浸润，形成弯月形液面，如图 3.5.1 所示。当光纤表面吸附的腐蚀液的重力与液体表面张力达到平衡时，液面不再上升，达到稳定状态。弯液面高度作为光纤芯径的函数，可由流体力学杨-拉普拉斯方程决定。理论分析和实验结果表明：弯液面高度由光纤芯径、腐蚀液与光纤表面的接触角、腐蚀液的表面张力和密度决定。在腐蚀制备光纤探针的实验中，通过适当调整和选择上述参数，改变弯液面的高度，从而可以得到不同形状的光纤探针。

化学腐蚀法分为静态腐蚀法和动态腐蚀法。静态腐蚀是指在腐蚀过程中 HF 酸与光纤的位置保持相对静止不动。静态腐蚀法制备的探针锥角一般约为 30° 。以二甲苯作为有机保护层,使用浓度为 40% 的 HF 酸作为腐蚀液,采用静态腐蚀法制备光纤探针的腐蚀过程如图 3.5.2 所示。动态腐蚀法中,浸入腐蚀液中光纤在垂直方向上移动。光纤的垂直移动改变了腐蚀液弯液面在光纤表面的接触位置,而弯液面相对位置的变化使探针锥区长度发生改变,引起锥角的变化。在不改变腐蚀条件的情况下,动态腐蚀法可加工出多种锥角的光纤探针。

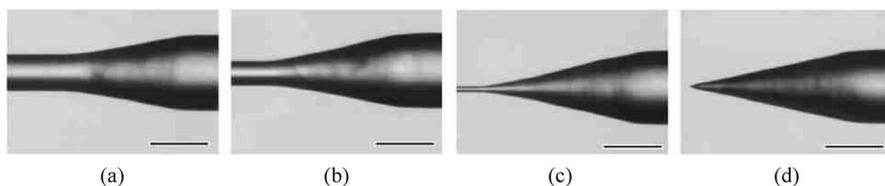


图 3.5.2 静态化学腐蚀法制备的光纤探针显微镜照片

结论是:静态腐蚀法的优点是具备自终止的特点,无须人为干预。通过选择不同的保护液类型,可制备不同锥角的探针。动态腐蚀法通过控制光纤和腐蚀液的相对移动速度制作不同外形的光纤探针,探针锥角具有较大的变化范围,但是腐蚀结束需要手动终止。由于选择腐蚀法源于对不同光纤材料腐蚀速度的不同,特别适用于特种光纤探针的制备。

3.6 光纤的改性

光纤的改性是指改变光纤的传输特性,改变光纤传输特性的方法主要有两类,一种是改变光纤的外形和结构;另一种是改变光纤的折射率大小和分布。利用机械加工的切割、磨抛,化学加工的腐蚀,以及热加工的烧蚀,改变光纤的端面、直径等,属于前一种。而利用掺杂、外场效应(力学、热学、磁学、电学、光学等效应)改变光纤的折射率则属于后一种。

用前一种方法改变光纤传输特性的具体做法,已在本章的前几节作了较详细的介绍,下面对后一种方法做简要介绍。

3.6.1 掺杂效应

掺杂效应是光纤技术中用于改变折射率最基本,也是最早应用的方法。光纤中纤芯和包层折射率不同,就是用掺杂方法获得的,一般是在纤芯中掺杂锗、Ge 等以获得高于纯石英(包层材料)的折射率。在自聚焦光纤棒中,则是用热扩散的办法掺杂,以获得纤芯中的变折射率分布。而目前用于光纤激光器和光纤放大器的掺杂光纤,则是在纤芯中掺有稀土元素。纤芯中掺有荧光材料的光纤,则构成有荧光效应的特种光纤。

由此可见,在光纤中掺杂的主要功能有两个:一是改变光纤的传输特性,其作用是通过掺杂改变光纤的折射率,从而改变光纤的损耗、色散、带宽等传输特性;二是改变光纤用途,通过掺杂可使光纤具有特种功能,例如具有荧光功能、抗辐射功能、对辐射更敏感的功能等。

3.6.2 光敏效应

一定波长和一定强度的光波,入射到光纤芯,会引起纤芯折射率的变化,这就是光敏

效应。

200nm 附近的紫外光入射到光纤芯(石英芯或聚合物光纤芯)会引起纤芯折射的变化,这是一种典型的光敏效应,是制作光纤光栅的基础,对不同纤芯材料,能产生光敏效应的波长也不相同,例如 200nm 附近的紫外光,对熔石英(SiO_2)、聚合物(PMMA 等)、硫化物等材料都有光敏效应。此外 600nm 附近的红光对聚合物光纤和硫化物光纤也有光敏效应,但对熔石英则无光敏效应。光敏效应引起的折射率的变化可维持一段时间,至于折射率变化持续时间的长短则和若干因素有关,其原因仍在探索中。

另一种光敏效应则是大功率光场引起的非线性效应,其中包括光克尔效应(Kerr effect)。它是大功率密度光场引起的折射率变化,从而引起光纤中的自聚焦效应(在纤芯中形成因折射率变化而构成的热透镜),这是光纤激光器等大功率激光传输时损伤光纤的主要因素之一。

3.6.3 非线性效应——Raman 效应和 Brillouin 效应

这是一种强光引起的入射光波长变化的效应,是一种非线性光学效应,是分布式光纤传感器(分布式 Raman 光纤温度传感器和分布式 Brillouin 温度/应变传感器)的基础。关于这一类非线性效应,在第 2 章已有介绍。

3.6.4 力学效应

光纤受力后,由于材料的弹光效应,会引起光纤折射率改变,这就是改变折射率的力学效应。这是构成保偏光纤的基础,也是构成光纤偏振器件(光纤偏振控制器等)的基础,关于外力引起光纤折射率变化的情况,可参看本书第 2 章或有关参考资料。

3.6.5 热学效应

热学效应是指光纤温度改变引起的折射率的变化,其原因是光纤材料折射率的温度效应。根据材料折射率随温度变化关系(此关系式可以从光学手册中查出),可计算出这种变化的大小。

3.6.6 电磁效应

电磁效应是指光纤在外电磁场作用下引起的折射率变化。电场引起的折射率变化由电光效应(Pockels 效应和 Kerr 效应)计算。磁场引起的折射变化则由磁光效应(法拉第效应)计算。其计算公式参看第 2 章节或参看有关资料。

思考题与习题

- 3.1 试分析弯曲引起的光纤损耗的机理及其计算的主要困难所在。
- 3.2 分析计算光纤微弯损耗的主要困难所在。
- 3.3 光纤和光源耦合时主要应考虑哪些因素?为什么?
- 3.4 光纤和 LD 或 LED 耦合时主要困难是什么?试列举提高耦合效率的主要途径。你对此有何设想?

- 3.5 光纤和光纤耦合时,主要应考虑哪些因素?为什么?
- 3.6 试分析比较光纤的各种连接方式的相同点和不同点及其可能的应用。
- 3.7 试分析光纤通过透镜耦合时引起损耗的因素。
- 3.8 单模光纤和单模光纤连接时,比多模光纤和多模光纤直接连接的公差要求低,为什么?试分析其物理原因。
- 3.9 计算单模光纤的耦合和计算多模光纤的耦合有何差别,为什么?
- 3.10 一功率为 -10dBm 的光信号,输入一个 1×16 的光纤耦合器,若耦合器无附加损耗,输出端功率均分。试计算每个输出端的功率。
- 3.11 一功率为 -10dBm 的光信号,输入一个 1×20 的光纤耦合器。若输出端功率均分,每个输出端口输出的功率为 -30dBm 。试计算此耦合器的附加损耗。
- 3.12 一功率为 -20dBm 的光信号,输入一个分束比为 $90/10$ 的耦合器。如耦合器无附加损耗,试计算两端口的输出功率。
- 3.13 当光从一根 $62.5/125\mu\text{m}$ 的多模光纤进入另一根 $50/125\mu\text{m}$ 的多模光纤时,因芯径失配引起的损耗是多少?
- 3.14 当光从芯径为 $9\mu\text{m}$ 的单模阶跃折射率光纤进入芯径为 $50\mu\text{m}$ 的渐变折射率光纤。试计算由芯径失配引起的损耗。
- 3.15 当光从数值孔径为 0.275 的 $62.5/125\mu\text{m}$ 的渐变折射率光纤进入数值孔径为 0.13 ,芯径为 $9\mu\text{m}$ 的单模光纤。试计算仅由数值孔径失配引起的损耗。如光纤端面光为均匀分布,则由于光纤截面失配引起的损耗是多少?