
浅谈光纤及其制造技术分析

光纤通信技术的飞速发展，加快了“光速经济”的到来。为了适应通信技术和 Internet 的高速发展对超高速、超宽带、超大容量的通信系统的要求，除了需要研制出更好的光纤无源器件和有源器件外，还需要开发出超低损耗、长波长工作窗口的新型光纤材料，以及更合理的新型光纤结构和精良的制造工艺。（管内 CVD(化学汽相沉积)法、棒内 CVD(化学汽相沉积)法、PCVD(等离子体化学汽相沉积)法以及 VAD(轴向汽相沉积)法都是正确的光纤制作方式。

光纤材料

以 SiO₂ 材料为主的光纤，工作在 0.8 μm-1.6 μm 的近红外波段，目前所能达到的最低理论损耗在 1550nm 波长处为 0.16dB/km，已接近石英光纤理论上的最低损耗极限。如果再将工作波长加大，由于受到红外线吸收的影响，衰减常数反而增大。因此，许多科学工作者一直在寻找超长波长(2 μm 以上)窗口的光纤材料。这种材料主要有两种，即非石英的玻璃材料和结晶材料，晶体光纤材料主要有 AgCl、AgBr、KBr、CsBr 以及 KRS-5 等，目前 AgCl 单晶光纤的最低损耗在 10.6 μm 波长处为 0.1dB/km。因此，需要寻求新型基体材料的光纤，以满足超宽带、超低损耗、高码速通信的需要。

氟化物玻璃光纤是当前研究最多的超低损耗远红外光纤，它是以 ZrF₄-BaF₂、HfF₄-BaF₂ 两系统为基体材料的多组分玻璃光纤，其最低损耗在 2.5 μm 附近为 1×10^(的负三次方) dB/km，无中继距离可达到 1×10^(的 5 次方) km 以上。1989 年，日本 NTT 公司研制成功的 2.5 μm 氟化物玻璃光纤损耗只有 0.01dB/km，目前 ZrF₄ 玻璃光纤在 2.3 μm 处的损耗达到外 0.7dB/km，这离氟化物玻璃光纤的理论最低损耗 1×10^(的负三次方) dB/km 相距很远，仍然有相当大的潜力可挖。能否在该领域研制出更好的光纤，对于开辟超长波长的通信窗口具有深远的意义。

硫化物玻璃光纤具有较宽的红外透明区域(1.2-12 μm)，有利于多信道的复用，而且硫化物玻璃光纤具有较宽的光学间隙，自由电子跃迁造成的能量吸收较少，而且温度对损耗的影响较小，其损耗水平在 6 μm 波长处为 0.2dB/km，是非常有前途的光纤。而且，硫化物玻璃光纤具有很大的非线性系数，用它制作的非线性器件，可以有效地提高光开关的速率，开关速率可以达到数百 Gb/s 以上。

重金属氧化物玻璃光纤具有优良的化学稳定性和机械物理性能，但红外性质不如卤化物玻璃好，区域可透性差，散射也大，但若把卤化物玻璃与重金属氧化物玻璃的优点结合起来，制造成性能优良的卤-重金属氧化物玻璃光纤具有重要的意义。日本 Furukawa 电子公司，用 VAD 工艺制得的 GeO₂-Sb₂O₃ 系统光纤，损耗在 2.05 μm 波长处达到了 13dB/km，如果经过进一步脱 OH⁻的工艺处理，可以达到 0.1dB/km。

聚合物光纤自 19 世纪 60 年代美国杜邦公司首次发明以来,取得了很大的发展。1968 年杜邦公司研制的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 阶跃型塑料光纤 (SI POF), 其损耗为 1000dB/km。1983 年, NTT 公司的全氟化 PMMA 塑料光纤在 650nm 波长处的损耗降低到 20dB/km。由于 C-F 键谐波吸收在可见光区域基本不存在, 即使延伸到 1500nm 波长的范围内其强度也小于 1dB/km。全氟化渐变型 PMMA 光纤损耗的理论极限在 1300nm 处为 0.25dB/km, 在 1500nm 处为 0.1dB/km, 有很大的潜力可挖。近年来, Y. KOIKE 等以 MMA 单体与 TFPMA (四氟丙基丙烯酸甲酯) 为主要原材料, 采用离心技术制成了渐变折射率聚合物预制棒, 然后拉制成 GI POF (渐变折射率聚合物光纤), 具有极宽的带宽 (>1GHz.km), 衰减在 688nm 波长处为 56dB/km, 适合短距离通信。国内有人以 MMA 及 BB (溴苯)、BP (联苯) 为主要原材料, 采用 IGP 技术成功地制备了渐变型塑料光纤。日本 NTT 公司最近开发出氟化聚酰亚胺材料 (FULPI) 在近红外光内有较高的透射性, 同时还具有折射率可调、耐热及耐湿的优点, 解决了聚酰亚胺透光性差的问题, 现已经用于光的传输。聚碳酸酯、聚苯乙烯的研究也在不断的进行中, 相信在不久的未来更好性能的聚合物光纤材料得到开发和利用。

特殊的环境对光纤有特殊的要求, 石英光纤的纤芯和包层材料具有很好的耐热性, 耐热温度达到 400-500°C, 所以光纤的使用温度取决于光纤的涂覆材料。目前, 梯型硅氧烷聚合物 (LSP) 涂层的热固化温度达 400°C 以上, 在 600°C 的光传输性能和机械性能仍然很好。采用冷的有机体在热的光纤表面进行非均匀成核热化学反应 (HNTD), 然后在光纤表面进行裂解生成碳黑, 即碳涂覆光纤。碳涂覆光纤的表面致密性好, 具有极低的扩散系数, 而且可以消除光纤表面的微裂纹, 解决了光纤的“疲劳”问题。

新型结构的光纤

光纤的结构决定了光纤的传输性能, 合理的折射率分布可以减少光的衰减和色散的产生。为了改善光纤的波导性能, 特别是既想获得低损耗, 又想具有低色散, 以适应长距离、大容量通信的要求, 可以对光纤的结构进行设计, 控制折射率的分布。如采用三角形折射率分布的结构: 区配包层、凹陷包层、四包层结构, 加大波导色散, 从而使零色散波长产生位移, 设计出了 DSF (色散位移光纤), 即 G. 653 光纤, 它把零色散波长搬到 1550nm 的最低损耗窗口, 使光纤的损耗特性与色散特性得到了优化组合, 提高了光纤通信系统的传输性能。

G. 653 光纤在 1550nm 处的色散为零, 给 WDM (波分复用) 系统带来了严重的 FWM (四波混频) 效应, 为了克服 DSF 的不足, 人们对 DSF 进行了改进, 通过设计折射率的剖面, 对零色散点进行位移, 使其在 1530-1565nm 范围内, 色散的绝对值在 1.0-6.0ps/(nm.km), 维持一个足够的色散值, 以抑制 FWM、SPM (自相位调制) 及 XPM (交叉相位调制) 等非线性效应, 同时色散值也足够小, 以保证单通道传输速率为 10Gb/s, 传输距离大于 250km 时无需进行色散补偿。这种光纤即为 NZDSF (非零色散位移光纤), ITU-T 称之为 G. 655 光纤。

第一代 G. 655 光纤主要为 C 波段 (1530–1565nm) 通信窗口设计的, 主要有美国 Lucent 公司的 True Wave 和 Corning 公司的 SMF-LS 光纤, 它们的色散斜率较大。随着宽带光放大器 (BOFA) 的发展, WDM 系统已经扩展到 L 波段 (1565–1620nm)。在这种情况下, 如果色散斜率仍然维持原来的数值 (0.07–0.10ps/(nm²·km)), 长距离传输时短波长和长波长之间的色散差异将随着距离的增加而增大, 势必造成 L 波段高端过大的色散, 影响了 10Gb/s 及以上高码速信号的传输距离, 或者采用高代价的色散补偿措施; 而低波段端的色散又太小, 多波长传输时不足以抑制 FWM、SPM、XPM 等非线性效应, 因此, 研制和开发出低色散斜率的光纤具有重要的实际价值。

第二代 G. 655 光纤适应了上述要求, 具有较低的色散斜率, 较好地满足了 DWDM (密集波分复用) 的要求。第二代 G. 655 光纤主要有美国 Lucent 公司的 True Wave-RS 光纤和 True Wave-XL 光纤, 其色散斜率降低到 0.05ps/(nm²·km) 以下, Corning 公司的 LEAF (大有效面积光纤)、Pirelli 公司新近推出的 FreeLight 光纤, 把工作窗口扩展到 1625nm 处。最近, 美国 Lucent 公司新研制出了 LazrSpeed 多模光纤。第二代 G. 655 光纤成功地克服了光纤非线性所带来的传输损伤, 大大地提高了光纤通信系统的传输性能。

随着光纤通信系统的迅速发展, 又出现了 DFF (色散平坦光纤), 它采用特殊的双包层或多包层结构, 形成狭而深的折射率陷阱, 加强波导色散, 从而在 1300nm 和 1550nm 处获得零色散, 使光纤在 1300–1600nm 的波长范围内总色散趋于平坦, 使光纤的带宽得到扩展, 有利于 DWDM 及相干光通信的发展。

DWDM 系统希望能够在尽可能宽的可用波段上进行波分复用, 将各种不同速率和性质的业务分配给不同的波长, 在光路上进行选路与分插, 而可用波段内的 1385nm 附近羟基 (OH⁻) 吸收峰的存在, 造成了光功率的严重损失, 限制了 1350–1450nm 波段的使用。为此, 各个公司都致力于消除 OH⁻ 吸收峰, 开发出“无水峰光纤”, 从而实现 1350–1450nm 第五窗口的实际应用。美国 Lucent 公司开发出的 All Wave 光纤, 克服了 OH⁻ 的谐波吸收, 从而实现了 1280–1625nm 范围内完整波段的利用。这一有效工作波长范围的增大, 有利于通过增大波长通道之间的间距来降低对 OPD (光无源器件)、OAD (光有源器件) 的要求, 大大降低了通信系统的成本, 同时可以通过加大波分复用的密度, 实现光纤通信系统的超大容量传输。

强度调制—直接检测的通信系统可以实现高码速、大容量传输, 而且具有调制容易的优点, 但实质上是一种“噪声通信系统”, 而相干光通信—外差式的通信系统具有长中继、高传输速率优点, 它采用光的相位、偏振来传递信息。为了适应相干通信系统的要求, 已经研制出了“熊猫”型、“蝴蝶结”型和“扁平”型的高双折射保偏光纤, 以及具有“边坑”型的单模单偏振保偏光纤, 为未来全光通信奠定了基础。