

单模光纤 MFD 测试条件的探讨

0 引言

追溯至一、二十年前颁布的 ITU-T G.652 建议书和 IEC 60793-2 光纤产品规范中, 对非色散位移单模光纤(即通常称为 G.652 光纤或 B1.1 和 B1.3 光纤)的光纤截止波长 λ_c 的规定中曾有这样的说明: 由于光纤在成缆后会使得原来的 λ_c 变短, 因而光纤厂商可将光纤的 λ_c 设计成大于工作波长, 最长可略大于 1 350 nm; 因为即使光纤的 λ_c 大于工作波长, 只要成缆后的光缆截止波长 λ_{cc} 小于工作波长, 就能保证光纤的单模传输。但因光缆结构的差异, 成缆光纤相对于未成缆光纤的 λ_c 位移量并不确定, 所以无法建立成缆前后光纤的 λ_c 的对应关系。在此之后, 特别是近年来, 有不少 G.652 单模光纤产品的 λ_c 被设计为大于工作波长。虽然采用这样的光纤制造的光缆, 也许有利于改善光缆的宏弯损耗特性, 但也给光纤的模场直径(MFD)测试带来了一定的困扰。 λ_c 被设计为大于工作波长的 G.652 单模光纤在 1 310 nm 测试波长(与典型工作波长等同)下将呈现出非单模传输状态。对此, 如何合理考虑和正确建立 MFD 测试条件, 目前的国内和国际标准的测试方法中并未有明确的阐述和规定, 而这对于 MFD 的准确测试却十分重要。

1 MFD 的基本概念和定义

MFD 是单模光纤重要特征参数之一, 虽然表面上它仅是光纤几何性质的参数, 但实际上却影响着单模光纤另一个重要传输特性——宏弯损耗特性, 以及与光纤 λ_c 有着紧密的相关性。

根据光纤传输理论以及 ITU-T G.650.1 建议书的规定, 单模光纤 MFD 是对光纤中传输的基模 LP_{01} (或 HE_{11}) 场分布的一种量度, 即光纤横截面上该模式场强度的横向尺寸(MFD 的数学定义式与本文无直接关联, 故不展开讨论)。由此定义, MFD 系所传输基模(单个模式)的参数, 由光纤归一化频率 $V=(2\pi a n_1/\lambda)(2\Delta)^{1/2}$ 可知, 光纤 $\lambda_c=(2\pi a n_1/V_c)(2\Delta)^{1/2}$, 其中 V_c 为归一化截止频率, a 为纤芯半径, Δ 为纤芯—包层相对折射率差, n_1 为纤芯折射率。在光纤的结构参数(如 a , Δ)确定后, 光纤是否满足单模传输要求, 关键取决于传输波长 λ_c 。对于典型的通信类 G.652 光纤, $V_c=2.405$ 是第一高阶

模 LP_{11} 模或 TE_{01} 、 TM_{01} 和 HE_{21} 的截止条件, 此时 V_c 对应的 λ_c 应小于 1 310 nm, 因此在工作波长(即标准确定的通信传输波长)1 310 nm 和 1 550 nm 下, G.652 光纤应能实现单模传输。

但 λ_c 被设计为大于工作波长的 G.652 单模光纤, 在 1 310 nm 工作波长下其 LP_{11} 模或 TE_{01} 、 TM_{01} 和 HE_{21} 模并未截止, 即非单模传输状态, 因此在 1 310 nm 波长下测量该光纤 MFD 的结果是不符合 MFD 基本定义的数据。

2 MFD 的测试条件

从光源功率的利用效率角度出发, 单模光纤的注入条件应能充分激励基模。单模光纤性能测试时实际采用的注入方式有两种: **a.** LD(半导体激光二极管)光功率输出尾纤直接与被测光纤耦合。由于激光器典型的输出功率空间分布是 Gaussian 型或基本 Gaussian 型, 光能量集中在光束或光斑的中心, 与 G.652 单模光纤的基模场分布比较匹配, 故能够达到最大的耦合效率, 因而满足测试时所要求的充分激励基模的条件。**b.** 宽光谱的白炽灯加波长选择器(如单色仪), 输出光经透镜准直聚焦后注入被测光纤。这种白炽灯的光功率空间分布完全不同于激光, 它基本是均匀分布的, 这与光纤固有的基模场分布完全偏离, 所以与 G.652 单模光纤的耦合效率较差, 即相当部分光功率没能参与激励基模而被辐射掉。但在目前大多采用这种注入装置的 MFD 测试系统中, 白炽灯光功率水平尚能达到测试要求。

尽管在后一种注入方式中没能激励起基模的光功率能贡献于高阶模, 但对于光纤波导的特定设计(如 λ_c 小于工作波长)以及不短于 2 m 的被测光纤长度(高阶模一般传输不到 2 m 距离之后)的要求, 使得高阶模不会影响 MFD 的测试结果。

对于 λ_c 被设计为大于工作波长的 G.652 单模光纤, 在测试(或工作)波长下将存在高阶模的问题, 从而在上述注入方式下所测得的 MFD 结果偏离实际。因此, 在确定 MFD 测试方法和测试条件时, 应不再局限于考虑注入条件(无论光源的注入状态如何, 这种光纤均会有高阶模存在), 而应采取其他相应的措施以确保被测光纤单模传输。同时笔者认为, ITU-T G.650.1 建议书测试方法“注入条件

(launching condition)”条款中关于“可通过打小圈的方式来消除被测光纤中传输的高阶模”其实并不属于测试注入的问题。

3 MFD 试验验证及讨论

我们选择了 2 根 λ_c 小于工作波长 (1 310 nm) 和 2 根 λ_c 大于工作波长的 G.652 单模光纤进行了 MFD 测量试验探索, MFD 测量结果如表 1 所示。从表中可见: **a.** λ_c 小于工作波长的光纤 1 和光纤 2, 在两种弯曲状态时光纤均处于单模传输, 所以 MFD 的测试结果相同。 **b.** λ_c 大于工作波长的光纤 3 和光纤 4, 在 1 310 nm 波长下, 在两种弯曲状态时光纤分别处于非单模传输和单模传输, 对应的 MFD 值不同; 而在 1 550 nm 波长下, 光纤 3 和光纤 4 分别在两种弯曲状态时均处于单模传输, 因而仍具有相近的 MFD。

表 1 不同设计 λ_c 的 G.652 单模光纤不同传输状态下的 MFD

样品	λ_c/nm	样品弯曲 半径/mm	MFD/ μm	
			1310 nm	1550 nm
光纤 1	1 304	140	9.01	10.18
		40	9.01	10.19
光纤 2	1 267	140	9.25	10.58
		40	9.30	10.55
光纤 3	1 356	140	8.72	10.20
		40	9.09	10.24
光纤 4	1 378	140	8.87	10.40
		40	9.17	10.40

当样品弯曲半径为 140 mm 时, 光纤保持原有的 λ_c , 此时无滤除高阶模作用; 样品弯曲半径为 40 mm (是测量 λ_{cc} 时的标准弯曲条件) 时, 光纤原有 λ_c 减小至小于工作波长 (1 310 nm)。由于弯曲半径的减小是使较长 λ_c 变为较短 λ_{cc} 的主要因素 (其他非主要因素包括试样长度等), 因此表 1 中弯曲半径为 40 mm 时, 将保证 λ_c 大于工作波长的光纤处于单模传输, 所测得的光纤 MFD 值符合 MFD 的基本定义。

在 Gaussian 场近似 (G.652 单模光纤这样的阶跃型折射率分布类型满足这种近似) 的条件下, MFD (即 $2\omega_0$) 与波长 λ (在 $0.8 \leq \lambda/\lambda_c \leq 2$ 范围内) 以 1% 的误差满足下列关系: $2\omega_0 = 2a(0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}) = 2a[0.65 + 0.434(\lambda/\lambda_c)^{3/2} + 0.0149(\lambda/\lambda_c)^6]$ 。由于该关系式在特定波长范围内包括了非单模情况 (即 $\lambda/\lambda_c < 1$ 时), 所以对于表 1 中的光纤 3 和光纤 4, 在弯曲半径为 140 mm 时 $\lambda/\lambda_c < 1$ 情

况下的 $2\omega_0$ 小于弯曲半径为 40 mm 时 $\lambda/\lambda_c > 1$ 情况下的 $2\omega_0$ (实际上这里的 λ/λ_c 大致在 0.95~1.1, 从而该公式的误差应更优于 1%)。

4 结束语

综上所述, 笔者认为相关标准测试方法, 应专门针对单模光纤 λ_c 大于工作波长时的情况 (按设计目标, 这样的光纤实际成缆后能够满足单模传输条件), 明确规定 MFD 测试条件, 即采用诸如弯曲的方法使被测光纤处于单模传输状态, 需要指出的是这并不属于注入方面的问题。由于这样的规定是模拟了实际成缆光纤的典型状态, 因此对于 λ_c 大于工作波长时单模光纤实际应用的意义是显而易见的。

[参考文献]

[1]ITU. ITU-T G.650.1—2010 Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fiber and cable[S]. ITU: [s.n.], 2010.