

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.10

保偏光纤截止波长测量技术研究

全治科, 高业胜, 张洪喜

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 研究了保偏光纤截止波长的测量技术, 给出了保偏光纤截止波长测量的实现方法, 建立了测量装置, 实现了不同类型保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量, 通过实验验证, 对影响保偏光纤截止波长测量结果的主要因素进行了分析。研究建立的测量系统, 对保偏光纤科研生产厂家开展相关测试具有一定的参考意义。

关键词: 保偏光纤; 截止波长; 测量

中图分类号: TB96; TH741

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0039-05

Investigation on the Cutoff-wavelength Measurement of the Polarization-maintaining Optical Fiber

QUAN Zhike, GAO Yesheng, ZHANG Hongxi

(The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: The cutoff-wavelength measuring methods of polarization-maintaining optical fiber (PMOF) has been investigated and the implement method has been presented. The established the cutoff-wavelength measuring device for the PMOF has realized the measurements of the fast- and slow-axis cutoff wavelength for some kinds of PMOF, respectively. By the validation experiment, The principle factors which influence the cutoff-wavelength measuring results have been analyzed. The built measuring system has certain significance on the relevant tests operated by those who study and manufacture the PMOF.

Key words: polarization-maintaining optical fiber; cutoff-wavelength; measurement

0 引言

保偏光纤是一种特殊的单模光纤, 作为研制光纤传感器的主要材料, 在光纤陀螺、光纤水听器传感器和 DWDM, EDFA 等光纤通信系统中广泛应用。以保偏光纤为核心器件制作的光纤传感器在导航、制导、瞄准稳定、卫星定位、人工智能、天文探测、矿藏勘探、开采、大地测绘、地震预报、海洋调查、救生、海底电缆等方面已得到普遍应用^[1-2]。目前, 国内从事保偏光纤科研生产的企事业单位有十余家之多, 随着中高精度光纤传感器研制生产技术的进一步发展, 保偏光纤性能参数测量和评估的需求越来越迫切, 保偏光纤的主要技术参数如串音、拍长, 国内已经具备了测量能力, 而在截止波长测量上, 还没有真正适用于保偏光纤的测量方法和技术, 保偏光纤科研、生产厂

家一般是采用单模光纤截止波长测量系统进行测量^[3], 没有考虑保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量, 其测量手段不完善, 测量不确定度大, 抑制了保偏光纤研制、生产水平的进一步提升。

1 测量技术方案的比较与选择

1.1 光纤截止波长的物理意义

截止波长是单模光纤的本征参量和基本参数, 它是确保光纤单模传输的光波长范围, 当截止波长小于工作波长时, 才能保证光在该光纤中的单模传输。保偏光纤截止波长的物理意义基本与单模光纤一致, 只不过这时的截止波长是指保偏光纤偏振轴的截止波长。

光纤中光纤的归一化频率 ν 与传导模的数目有如下关系:

$$\nu = \frac{2\pi n_1 a}{\lambda} \sqrt{2\Delta} \quad (1)$$

式中: n_1 为纤芯折射率; a 为纤芯半径, μm ; Δ 为相对折射率, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$; n_2 为包层折射率; λ 为光在真空中的波长, μm 。

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-05-16

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目 (J312011A002)

作者简介: 全治科 (1980-), 男, 工程师, 从事光电子计量技术研究工作。

根据阶跃光纤折射率分布及弱导近似理论,最低阶模为基模即 LP_{01} (HE_{11}) 模,次低阶模为 LP_{11} 模。随着 ν 减小,高阶模依次截止,光纤中传导模的数目也相应减少,当 ν 减小到使次低阶模 LP_{11} 模也不能传输时,光纤中只能传输 LP_{01} 模了。这时对应的归一化频率 ν_c 为

$$\nu_c = \frac{2\pi n_1 a}{\lambda_{ct}} \sqrt{2\Delta} \quad (2)$$

式中: ν_c 为归一化的截止频率; λ_{ct} 为截止波长,它表示次低阶模得以传输的最大波长。而基模可以在任何波长传播,因此,当 $\lambda > \lambda_{ct}$ 时,即当光纤的工作波长大于截止波长时,光纤才处于单模工作状态^[4-5]。

1.2 几种常见的光纤截止波长测量方法

保偏光纤是一种特殊的单模光纤,且与普通单模光纤具有良好的兼容性,在截止波长的测量方法上,可以结合其自身的特点,选用合适的单模光纤的截止波长测量方法。

1.2.1 偏振法

基模 LP_{01} 在一般的介质光波导中由正交方向基本是线性偏振的两个模组成,其中一个模不受应力和弯曲或非理想的纤芯几何形状的制约^[6]。对于理想的光纤来说,在近似弱传输的有效范围内,不是线性偏振的高次模 TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} 可以简并,形成一个线性偏振的 LP_{11} 模,这种简并不稳定,当对光纤施加适当的微扰时,这种简并现象就会被消除,特别在光纤截止波长附近更是如此^[6]。基于这个原理,将被测光纤固定于 V 形槽中,通过产生应力来增强基模的偏振方向性,防止高次模以线性偏振的简并模态结构形式传输。测量原理如图 1 所示,在被测光纤中对每个波长都能激励起一个线性偏振光,通过一次光谱扫描测量出偏振度 α 和波长 λ 的关系曲线,以此来确定被测光纤的截止波长。

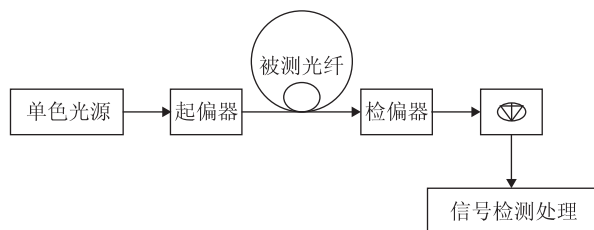


图1 偏振法测量单模光纤截止波长原理图

偏振度的计算公式为

$$\alpha = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

式中: $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 为每一个波长下对应检偏器两个正交位置测出的最大和最小光强度。

设 P_0 为基模 LP_{01} 传输的光功率, P_1 为不完全偏振的 LP_{11} 模的光功率,因为 LP_{01} 模是偏振的,对 $I_{\max}$ 的影响很大,对 $I_{\min}$ 的影响很小,而 LP_{11} 对输出功率影响很大,即

$$\begin{aligned} I_{\max} &= K(P_0 + P_1/2) \\ I_{\min} &= KP_1/2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: K 为常数。

在连续调整检偏器的情况下,测出每个波长下输出光功率对应的光强最大值 $I_{\max}$ 和最小值 $I_{\min}$,由公式(3)计算每个波长下的偏振度,利用波长与偏振度的关系曲线来确定被测光纤的截止波长。

该测量方法要求探测器响应的线性度要高,而且在公式推导过程中使用了一些实际测量过程中很难完全满足的假设条件,这就必然导致了测量准确度不高,其次其系统操作也比较复杂麻烦。

1.2.2 传输功率法

传输功率法是国际上推荐的测量单模光纤截止波长的基本方法。当光源发出的光注入到光纤后,就有可能在光纤中激励起除 LP_{01} 模以外的高阶模,如 LP_{11} 模。 LP_{11} 和 LP_{01} 在光纤中的传输不仅受到吸收和散射的影响,还要受到弯曲等因素的影响,产生一定的衰减。一般情况下,基模和高阶模受影响的程度不同,高阶模更易受到影响而产生明显的衰减,理论截止波长一旦高于工作波长时,高阶模就会急剧衰减。传输功率法基于这个原理进行截止波长的确定和测量,原理如图 2 所示。

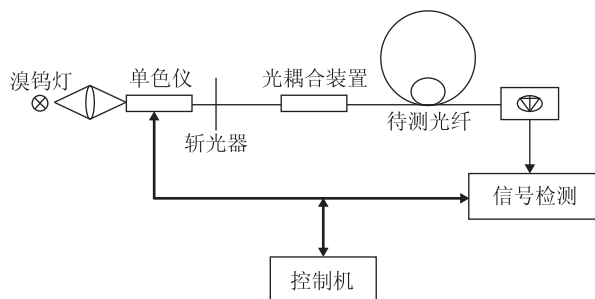


图2 传输功率法测量单模光纤截止波长原理图

以宽带光源卤灯为光源,发出的光经单色仪后通过耦合装置进入光纤,两者共同组成波长可调谐光源,通过斩光器对光束进行调制,提高光信号的信噪比。其中光源波长在所要求的范围内连续可调,光源的功率稳定性和波长稳定性应满足测试的要求。

信号检测仪的光谱响应与光源的光谱特性一致，可采用光功率计，在信号比较小的情况下，也可采用锁相放大器进行信号采集。探测器须具有良好线性的光敏面，且能采集来自光纤的全部光功率。

采用大圈、小圈两次测量功率比值确定截止波长，可克服光源输出光谱特性的影响，提高测量准确度，这种测量方法只需从大弯到小弯改变一次光纤状态；在整个测量过程中，只需进行一次空间光与光纤光的耦合工作，不需要多次注入，这样一方面减小了外界杂散光的影响，另一方面也改善了在测量过程中光纤等状态变化引起的测量不确定度的影响。

1.2.3 测量方法比较

两种不同的测量方法各具有不同的特点，具体描述见表 1 所示。

表 1 两种光纤截止波长测量方法比较

测量方法	优点	缺点
偏振法	适合于研究光纤中传输光偏振态与截止波长的关系。	对探测器线性度要求高，测量准确度低，系统操作繁琐。
传输功率法	国际上推荐采用的基准测量方法，测量精度较高。	对激励用光源输出功率稳定度要求较高。

通过对两种方法进行综合比较，可以看出，无论是测量精度或是方法的可操作性，传输功率法都具有较大的技术优势。

2 测量系统组成

基于传输功率法，我们建立了保偏光纤截止波长测量系统。实现该系统的主要技术难点是 600 ~ 1600 nm 范围内可变波长单色偏振光的产生和测量过程中光源输出的偏振光与被测保偏光纤某轴的对轴耦合，解决方案如下：自行研制了可变波长单色偏振光源，用于提供激励光源；采用保偏光纤熔接机、自制法兰盘及保偏光纤跳线组成保偏光纤对轴系统，实现了测量光路沿被测保偏光纤的两个轴的分别耦合；采用自编软件，实现对可变波长单色偏振光源及光功率接收设备的控制，用于记录测量数据并进行计算机处理，实现系统的自动测量。测量系统组成如图 3 所示。

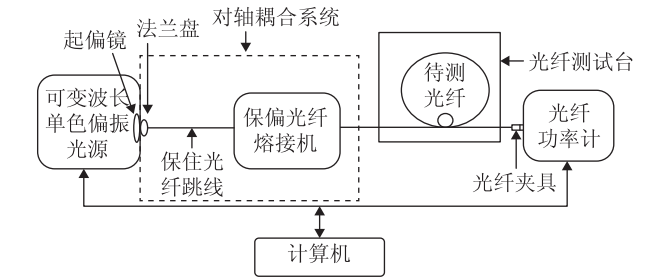


图 3 保偏光纤截止波长测量系统组成框图

可变波长单色偏振光源输出的光经对轴耦合系统注入待测光纤，光纤在直径 280 mm 的大圈放置状态下，有可能在光纤中激励起除 LP_{01} 模之外的高阶模，如 LP_{11} 模，高阶模传输的功率对弯曲十分敏感，而 LP_{01} 模所运载的光功率对弯曲不敏感，在直径 60 mm 的小圈状态下，截止波长附近几乎无高阶模传输，因此从不同弯曲状态下光纤功率随波长的变化得出截止波长。该测量系统可以通过保偏光纤对轴耦合系统，实现保偏光纤快慢轴的分别对轴，从而实现被测保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量。

具体测量步骤如下：

- 1) 选择合适的一端为 FC/PC 接头的带尾纤的保偏光纤跳线，通过保偏光纤熔接机，与被测保偏光纤进行对轴熔接，处理好被测保偏光纤的另一端面后用光纤连接器连接；
- 2) 带尾纤的保偏光纤跳线接至可变波长单色偏振光源，被测保偏光纤绕成直径为 280 mm 的大圈后，将光纤连接器的一头接至功率接收装置；
- 3) 设置系统软件的测试参数后，由计算机采集自可变波长单色偏振光源输出的光通过被测光纤的功率谱；
- 4) 被测保偏光纤绕成直径为 60 mm 的小圈后，重复步骤 3) 采集功率谱；
- 5) 系统软件对两次采集的功率谱进行分析，根据被测光纤的弯曲衰减函数曲线，求出被测保偏光纤在某一轴的截止波长；
- 6) 通过对轴耦合系统对被测保偏光纤另一轴对轴，同样步骤完成被测保偏光纤另一轴的截止波长测量。

3 保偏光纤截止波长测量实验

系统研制完成后，进行了大量实验，测量了各类保偏光纤的截止波长。表 1 所附的测量数据，包括了熊猫和领结型保偏光纤，光纤芯径包括 80 μm 和

125 μm ，既有成品的保偏光纤跳线，也有保偏光纤裸光纤，因保偏光纤生产厂家目前只提供慢轴截止波长的数值，经与该系统测量值进行比较，测量结果吻合。

表2 各种保偏光纤截止波长测量结果

保偏光纤类型	λ_{c} 慢轴 测量结果/nm	λ_{c} 快轴 测量结果/nm	λ_{c} 慢轴 参考值/nm
1310 nm 熊猫跳线	1194	1110	1200
1550 nm 熊猫跳线	1358	1268	1365
1550 nm 领结跳线	1519	1358	1520
1310 nm 熊猫裸光纤	1146	1089	1139
850 nm 熊猫裸光纤	722	668	720

4 测量结果影响因素的分析

鉴于保偏光纤的特殊结构，本文对测量过程中涉及到的主要因素，包括光源的偏振态、光纤夹具的选择等对保偏光纤截止波长测量结果的影响进行了实验分析验证。

4.1 光偏振态、耦合注入对截止波长测量的影响

保偏光纤截止波长测量中，对轴耦合系统主要采用了保偏光纤熔接机的自动对轴模式，其对轴完成后光的偏振状态以及偏振态引起的光耦合的理想与否，是否会对被测保偏光纤截止波长的测量产生影响、产生什么样的影响并不清楚。利用对轴耦合系统分别对被测保偏光纤进行正常对轴、特征轴偏转15°对轴、特征轴偏转30°对轴三种情况进行了截止波长测量，测量结果如图4所示。实验结果表明，三种情况下，测量得到的快慢轴的截止波长数据相差非常小（测量数值的差异在5 nm之内），当特征轴偏转30°以上时，由于此时被测保偏光纤快慢轴的消光比进一步减小，耦合进被测保偏光纤的光同时分布在两个特征轴上，且功率大小差异不大，因此测量得到的弯曲损耗曲线不能反映出正确的测量结果。由此说明：基于保偏光纤的特殊结构，当对轴耦合偏离的角度比较小，一般不超过15°时，能保证被测保偏光纤快慢轴上的消光比足够大时，由此引起的光偏振态、耦合注入的变化并不影响截止波长的测量结果。

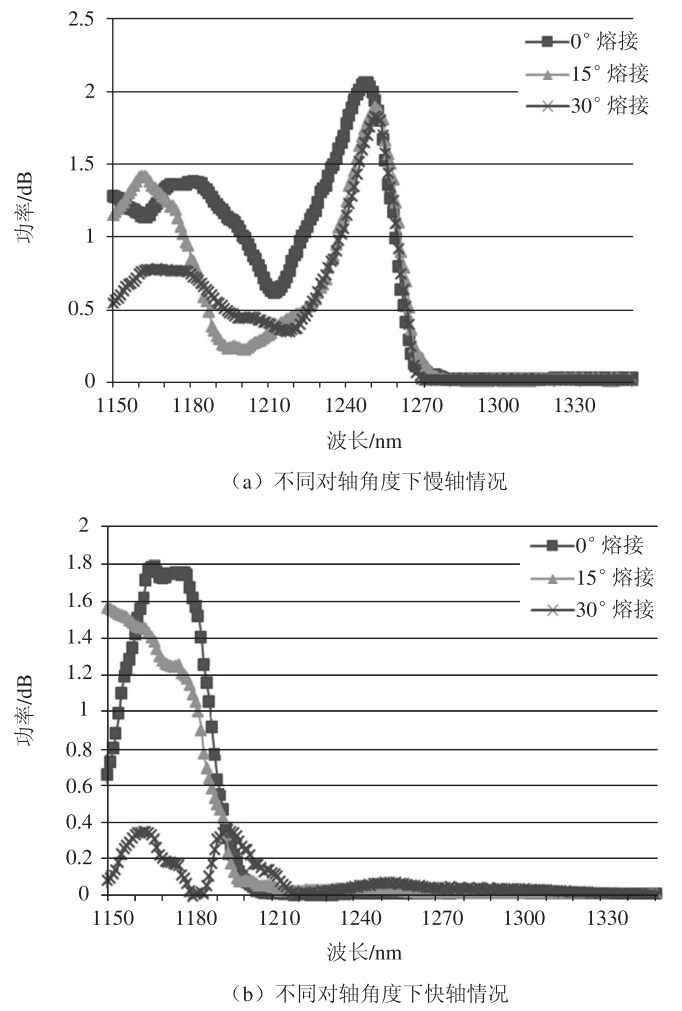


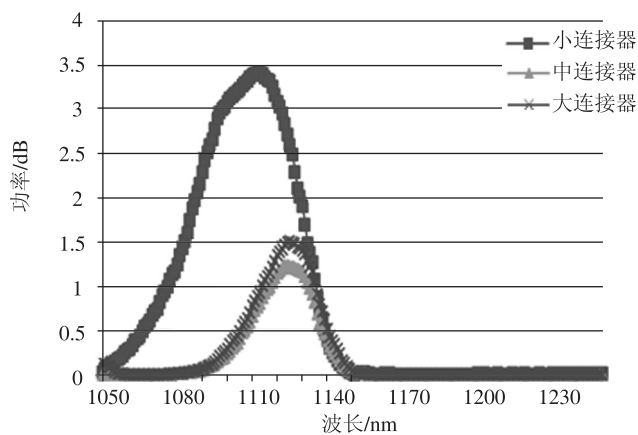
图4 不同对轴角度下截止波长测量曲线

图4中，正常对轴和15°对轴时，测得被测保偏光纤的慢轴截止波长分别为1266 nm和1270 nm，快轴截止波长为1197 nm和1196 nm；30°对轴时，慢轴截止波长为1265 nm，快轴截止波长无法测得。因此，一般情况下，当对轴耦合角度不大时，系统测得的截止波长的结果的差异并不大，当对轴角度增大至30°及以上时，光耦合轴上的功率损失较大，就会导致某个轴的截止波长无法正常测得。

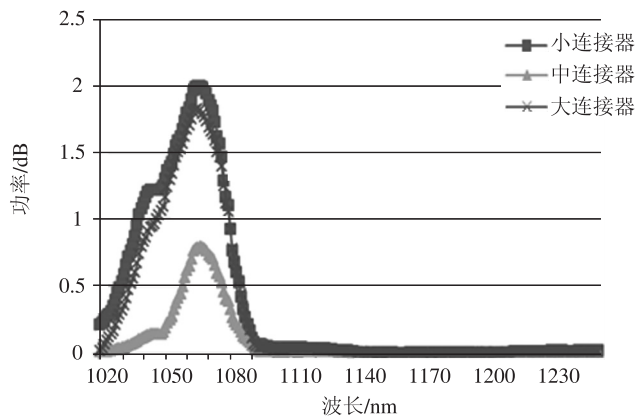
4.2 光纤连接器对截止波长测量的影响

由于保偏光纤是通过应力产生双折射的，所以保偏光纤传输光的偏振态对外界的应力比较敏感^[5]，在进行截止波长测量时不可避免地要使用光纤活动连接器等，这样就会对保偏光纤施加一定的应力，影响光传输的状态，从而可能对截止波长的测量产生影响。系统设计的对轴耦合系统，只涉及在被测保偏光纤的光输出端采用光纤活动连接器进行裸光纤的加持，将外界应力对测量结果的影响降到了最低程度，为了验

证这种夹持产生的应力对保偏光纤截止波长测量结果的影响,分别采用 NEWPORT、国内其他厂家及自行设计的三种光纤活动连接器(分别对应大、中、小),对被测光纤进行了截止波长测量,鉴于光纤连接器的应力比较小,还采用在被测光纤某一部位施加不同应力,进行截止波长测量,测量结果如图 5 所示。



(a) 不同连接器下慢轴情况



(b) 不同连接器下快轴情况

图 5 不同连接器下截止波长测量曲线

图 5 中,采用代表施加不同应力的小连接器、中连接器和大连接器的情况下,被测保偏光纤慢轴的截止波长分别为 1146, 1145, 1148 nm, 快轴截止波长分别为 1090, 1089, 1091 nm。虽然由于应力的影响等,

导致耦合功率降低,但是测量结果的差异不大。

从实验结果来看,压力对保偏光纤截止波长的测量结果具有一定的影响,当应力较小(三只不同类型的光纤连接器)时,这种影响不明显,不足以对测量结果产生较大影响;当应力足够大时,会对测量结果产生一定影响,因此,在保偏光纤截止波长测量过程中,应尽可能的自然放置被测光纤,防止因变形产生的应力对测量结果产生影响。

5 结束语

截止波长作为单模光纤的特征参数,其测量技术值得研究,尤其是作为特种光纤广泛应用的保偏光纤的截止波长的测量。本文通过方法研究和系统研制,开展了各型保偏光纤截止波长的测量,实现了保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量,并对影响保偏光纤截止波长测量结果的因素进行了实验验证分析。根据该测量系统的使用情况来看,虽然还存在光源功率小、对轴耦合系统设计不完善等需要进一步改进的地方,但是这种测量技术无疑能够实现保偏光纤截止波长的快速测量,可以为保偏光纤科研生产厂家在该项参数的测量上提供技术支持,促进该参数的量值统一。

参 考 文 献

- [1] 夏天豪. 波长调制型光纤传感器及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [2] 马迎建, 冯丽爽, 南书志. 保偏光纤偏振特性测试系统 [J]. 电子测量技术, 2006, 29 (4): 31-32.
- [3] 毕聪志, 吴衍记. 适用于光纤陀螺的保偏光纤特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (增刊): 566-569.
- [4] 郑克哲, 杨照金, 项道才. 光学计量 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 605-606.
- [5] 何珍宝. 光纤与光缆的截止波长 [C] //中国通讯学会 2001 光缆电缆学术年会论文集. 北京: 中国通讯学会, 2001.
- [6] 周义海. 用偏振法测量单模光纤截止波长. 光纤与电缆及其应用技术, 1986 (4): 64-67.

“世界计量日” 宣传活动在清华大学举办

2016 年 5 月 20 日, 国家质检总局在清华大学举办“世界计量日”中国主题活动。国家质检总局支树平局长发表了“量值定义世界, 精准改变未来”的主旨讲话。支树平局长在讲话中指出: 今年世界计量日的主题为“动态世界中的计量”, 这既站在了计量发展的最前沿, 也闪耀着哲学智慧的光辉。计量是探索动态变化世界的钥匙。正是因为对量的认识不断深化, 测量手段不断进步, 测量精度不断提升, 人类认识世界和改造世界的能力不

断增强, 才推动了人类世界的动态发展变化。世界是动态的, 对计量的需求也是动态的。

支树平局长指出: 中国政府高度重视计量发展, 一直不懈努力, 逐步建立起科学的计量工作体系, 保证了全国单位制的统一和量值的准确可靠, 为世界计量发展作出重要贡献。计量应当摆在经济社会发展更加突出重要的位置, 纳入国家和地区发展的总体规划, 成为国家治理的重要工具, 成为国家核心竞争力的重要组成部分。

(摘自中国计量测控网)