

环境温度大范围变化对光纤布里渊频移的影响*

赵丽娟[†]

(华北电力大学生物质发电成套设备国家工程实验室, 保定 071003)

(2009 年 10 月 21 日收到; 2009 年 12 月 28 日收到修改稿)

搭建了光纤布里渊频移测量系统, 实现了色散位移光纤 20 °C 到 820 °C 布里渊频移的测量, 并对测量数据进行拟合. 在环境温度大范围变化时, 目前采用的布里渊频移-温度一阶线性关系式对测量数据分析误差较大, 针对这个问题, 本文从纯石英光纤的结构特点和材料的物性系数出发, 在分析光纤的热膨胀系数、光纤密度、折射率、弹性模量和泊松比与宽范围温度关系的基础上, 根据布里渊频移与各物性参数的关系式理论推导了宽范围温度变化与布里渊频移之间的二次项关系式. 理论推导结果与实验数据基本符合, 验证了理论分析的正确性, 从而为光纤宽范围布里渊温度传感奠定了基础.

关键词: 光纤, 高温传感, 布里渊散射, 布里渊频移

PACC: 4265C, 4281P

1. 引 言

分布式光纤温度传感技术可实现大范围空间温度场分布的实时测量, 在工业测量和监控中具有广阔的应用前景. 目前研究较多的分布式光纤温度传感技术利用了光纤中的后向自发拉曼散射效应, 该类技术已有一些产品出现在国际市场上, 但由于传感长度和分辨率的限制, 不能满足更多场合的应用. 布里渊分布型光纤传感技术是近 20 年来迅速发展起来的一种新型测量技术, 该技术可以实现长达 150 km 的测量范围^[1], 并能克服拉曼散射分布式光纤传感技术在测量精度上的限制, 在桥梁、水坝、石油管道、电厂和锅炉蒸汽管道等大型工程结构、大型建筑物等的健康诊断, 以及隧道火灾报警等领域具有广阔的应用前景.

目前, 就传感温度范围而言, 已经报道的基于布里渊分布式光纤温度传感技术的研究主要集中在 0 °C 到 200 °C^[1-7], 对高温范围的传感则报道甚少, 而一些特殊的工业应用场合迫切要实现更高温度的分布式传感. 因此, 对于高温传感的研究具有重大的理论意义和应用价值.

布里渊分布式温度传感系统普遍采用一阶线性关系式, 通过布里渊频移的变化确定温度变化信

息, 这在环境温度小范围变化时有较高的准确性^[7]. 当环境温度在大范围内变化时, 如仍用一阶线性关系式拟合则存在较大误差, 严重影响传感系统的温度测量精度. 所以, 本文研究主要基于大范围温度变化与布里渊频移关系的变化规律. 在研究传感光纤的结构特点和材料物性系数的基础上, 理论推导了大范围温度变化与布里渊频移之间的二次项关系式. 在此基础上, 实验测量了色散位移光纤 20 °C 到 820 °C 的布里渊频移, 并给出了拟合曲线. 实验测量结果与理论推导结果基本符合, 从而为大面积内布里渊光纤温度传感提供了理论和实验依据.

2. 理论基础

2.1. 传感机理

光时域反射 (OTDR) 技术是实现分布式光纤传感的关键技术. 在 OTDR 中, 当脉冲光在光纤中传输时, 在光纤的脉冲光发送端可以检测到由瑞利散射产生的背向散射光, 背向散射光与脉冲光之间的时间延迟提供对光纤位置信息的测量, 背向散射光的强度提供对光纤衰减的测量. 在基于布里渊光时域反射 (BOTDR) 技术中, 背向的自发布里渊散射代替了瑞利散射, 由于布里渊散射受温度影响, 因此

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2006AA09Z141) 和华北电力大学青年教师基金 (批准号: 200911006) 资助的课题.

[†] E-mail: hdzlj@126.com

通过测量布里渊散射便可以得到光纤的温度信息.

2.2. 布里渊散射

根据经典理论,任何介质在常温状态下,均存在着由其组成粒子(原子、分子或离子)自发运动所形成的连续弹性力学振动,这种弹性振动引起介质密度随时间和空间周期性起伏,相应地在介质内部产生一个自发的声波场.当光定向地射入介质时,它将受到介质内自发声波场的散射作用,这就是布里渊散射.其散射光相对于入射光的布里渊频移 v_B 由介质的声学特性、弹性力学和热弹性力学特性决定,此外还与入射光频率 v_0 和散射角 θ 有关,则布里渊散射斯托克斯光相对于入射光的频移为

$$v_B = v_0 - v_s = v_{as} - v_0 = 2v_0 \frac{nV_a}{C} \sin(\theta/2), \quad (1)$$

式中, v_s 为斯托克斯光频率, v_{as} 为反斯托克斯光频率, n 为介质折射率, C 为真空中的光速, V_a 为光纤中的声速,其中声速 V_a 由下式给出:

$$V_a = \sqrt{\frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}, \quad (2)$$

式中, E , μ 和 ρ 分别为介质的杨氏模量、泊松比和密度.对于普通石英介质光纤,其散射光主要发生在背向,因此在后面的分析中,只考虑背向散射的情形,即 $\theta = \pi$.

3. 光纤布里渊频移与温度的关系

当温度变化时,温度通过热光效应使光纤折射率发生变化,而温度对声速的影响是通过对 E , μ 和

ρ 的调制来实现的.因此, n , E , μ 和 ρ 以及 v_B 均为温度 T 的函数,不妨记为 $n(T)$, $E(T)$, $\mu(T)$, $\rho(T)$ 和 $v_B(T)$,于是由式(1)和(2)式可得

$$v_B(T) = \frac{2v_0}{C} n(T) \times \sqrt{\frac{(1-\mu(T))E(T)}{(1+\mu(T))(1-2\mu(T))\rho(T)}}. \quad (3)$$

温度对密度和折射率的影响是通过热膨胀效应实现的,所以有必要对光纤的热膨胀系数与温度的关系进行分析.

3.1. 光纤的热膨胀系数与温度的关系

固体会因温度改变而引起长度变化,这种变化用线膨胀系数 α 来描述.如果长度为 l 的固体因温度上升 δT 而增长 δl ,这种材料的线膨胀系数 α 就由以下方程确定:

$$\alpha = \frac{\delta l}{l} \cdot \frac{1}{\delta T}. \quad (4)$$

实验显示,对于给定的材料, α 值不是常数,而是随温度变化而略有变化^[8],当温度变化范围很大时,热膨胀系数就会发生较大的变化.表1给出了的线膨胀系数随温度变化情况^[9].

一般而言,体积热膨胀系数是线热膨胀系数 α 的三倍,即为 3α .

通过实验数据,我们可以看出 α 是随着温度非线性变化的量,通过对表1的数据拟合,得出 α 在 $-50-1000$ °C 范围内与温度的关系式:

$$\alpha(T) = (0.3736 + 7.3362 \times 10^{-4} T - 6.0371 \times 10^{-7} T^2) \times 10^{-6}. \quad (5)$$

表1 (含水量 < 0.01%) 的纯石英线热膨胀系数

$T/^\circ\text{C}$	-50	0	25	50	100	200	300	400	500	600	800	1000
$\alpha/10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	0.25	0.38	0.41	0.43	0.48	0.53	0.56	0.57	0.57	0.56	0.54	0.54

3.2. 光纤密度与温度的关系

设一段光纤的质量为 M ,初始温度为 T_0 ,此时光纤的半径和长度分别为 α_0 和 l_0 .当该段光纤的温度变化到 T 时,密度为^[7]

$$\rho(T) = \frac{M}{\pi \alpha_0^2 l_0 [1 + \alpha(T - T_0)]^3} \approx \rho(T_0) [1 - 3\alpha(T - T_0)]. \quad (6)$$

由于 α 是随着温度变化的量,可知密度与温度之间

存在非线性关系.当温度从 20 °C 上升到 1000 °C 时,通过热膨胀系数可得光纤材料密度和温度之间的关系式

$$\rho(T) = 2200.1704 - 4.0358 \times 10^{-3} T + 3.86 \times 10^{-7} T^2. \quad (7)$$

3.3. 光纤折射率与温度的关系

光纤折射率与温度的关系可表示为^[7]

$$n(T) = n(T_0) + n'_T(T - T_0), \quad (8)$$

式中, n'_T 为折射率温度系数.

通常, 温度对折射率的影响, 都与热膨胀系数 α 联系在一起^[10],

$$n'_T = \frac{dn}{dT} = \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial n}{\partial T} - 3\alpha\rho \frac{\partial n}{\partial \rho}. \quad (9)$$

由(9)式可以看出 n'_T 是一个随温度变化的量, 所以折射率和温度之间存在非线性关系. 当温度从 20 °C 上升到 900 °C 时, 通过实验数据^[10] 拟合可得光纤材料折射率与温度之间的二次关系式为

$$n(T) = 1.4435 + 2.1233 \times 10^{-5} T + 0.6 \times 10^{-8} T^2. \quad (10)$$

3.4. 光纤物性系数与温度的关系

当温度发生变化时, 光纤材料的自由能会发生相应的变化, 使得光纤的物性系数(如弹性模量、剪切弹性模量、泊松比)发生变化, 进一步引起布里渊频移的改变.

3.4.1. 弹性模量 E 与温度的关系

在 20—1000 °C 的范围内, 弹性模量与温度之间具有线性关系^[11], 对实验数据进行拟合, 得出弹性模量与温度差的关系为

$$\begin{aligned} E(T) &= E(T_0) + E'(T - T_0) \\ &= (7.253 + 1.35 \times 10^{-3} T) \times 10^{10} \text{ N/m}^2. \end{aligned} \quad (11)$$

3.4.2. 泊松比 μ 与温度的关系

剪切模量 G 同样也是温度变化的线性函数^[7], 对实验数据进行拟合, 得出剪切模量与温度差的关系为

$$\begin{aligned} G(T) &= G(T_0) + G'(T - T_0) \\ &= (3.111 + 4.6 \times 10^{-4} T) \times 10^{10} \text{ N/m}^2. \end{aligned} \quad (12)$$

根据泊松比 μ 的定义和的各向同性, 可得出 μ 的表达式为^[7]

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{2G_0} \left[(E_0 - 2G_0) + \frac{1}{G_0} (E_0 G_1 - E_1 G_0) T^* \right. \\ &\quad \left. - \frac{G_1}{G_0^2} (E_0 G_1 - E_1 G_0) T^{*2} + \dots \right], \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $T^* = (T - T_0)/T_0$ 表示无量纲的温度变化. 由(10), (11)式和(13)式可得出 20—1000 °C 范围内泊松比与温度的二次关系式为

$$\begin{aligned} \mu(T) &= 0.17 + 8.77 \times 10^{-4} T^* - 2.60 \times 10^{-6} T^{*2} \\ &= 0.169 + 4.515 \times 10^{-5} T - 0.65 \times 10^{-8} T^2. \end{aligned} \quad (14)$$

根据(7), (10), (11)和(14)式, 结合(3)式可得出在 20 °C 到 820 °C 温度变化范围内布里渊频移与温度的二次项关系式:

$$\begin{aligned} v_{\text{BI}}(T) - 10000 &= 1070.3049 + 1.4599T \\ &\quad - 0.00039T^2. \end{aligned} \quad (15)$$

上式对应的布里渊频移与温度关系曲线如图 1 所示.

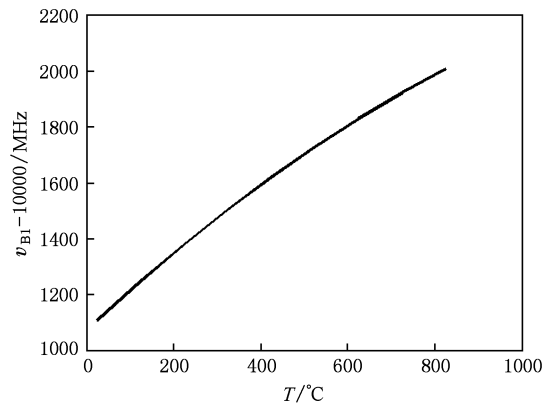


图 1 布里渊频移与温度关系的理论曲线

4. 实验系统及测量结果

测量布里渊频移-温度特性实验系统如图 2 所示. 光源采用中心波长 1.55 μm 、输出功率约 4 mW 和线宽小于 1 MHz 的半导体激光器(LD). LD 通过环形器将功率 3 mW 的连续光注入到传感光纤中, 来自光纤的背向散射光经环形器送入掺铒光纤放大器 EDFA(增益为 40 dB)进行放大. 通常, 除了微弱的布里渊散射信号外, 背向散射光中还包括远远大于布里渊散射的非涅耳反射和瑞利散射信号. 非涅耳反射信号产生于光纤的端面, 瑞利散射信号产生于光纤内部, 它们都会造成光谱分析仪中光电检测器的饱和. 因此, 本实验为了消除光纤末端的非涅耳反射, 在被测光纤末端把一小段光纤绕成直径小于 5 mm 的线圈. EDFA 的输出光经过插入损耗小于 2.6 dB、臂长由圆筒形压电陶瓷(PZT)控制的双通马赫-增德干涉仪(MZI), 该干涉仪在信号检测单元用作窄带光滤波器, 从光纤背向散射中滤除瑞利散射和非涅耳反射信号, 提取布里渊信号. MZI 的自由程为 21.2 GHz, 相当于常温下布里渊频移 10.6 GHz 的两倍, 对瑞利信号的抑制比大于 40 dB. 然后, 将 MZI 输出光的频谱通过精细度大于 200、自由程为 10 GHz 的扫描法布里-珀罗干涉仪(FPI)快

速扫描,进行频谱分析.最后,FPI的光电检测器输出信号经过模数转换器,通过电脑在35 s内平均2000次并显示,该平均系统的频谱分辨率为 ± 1 MHz.

被测光纤是商业上常见的色散位移光纤,纤长为110 m,将其缠成150 mm直径的光纤圈,缠绕时要非常小心以避免引入应力影响测量结果.然后将光纤置于恒温箱中,通过精确控制恒温箱温度来调节光纤的温度,恒温箱两侧打上小孔以便光纤与外界连接.为了尽可能减少外界因素影响,置于恒温箱外的光纤小于2 m.图3给出了色散位移光纤温度在20,194和402 °C时的布里渊散射光谱图.图中央的小峰值为瑞利散射光,两侧为布里渊斯托克斯和反斯托克斯光,布里渊频移通过斯托克斯或反斯托克斯谱峰的中心点变化计算得到.

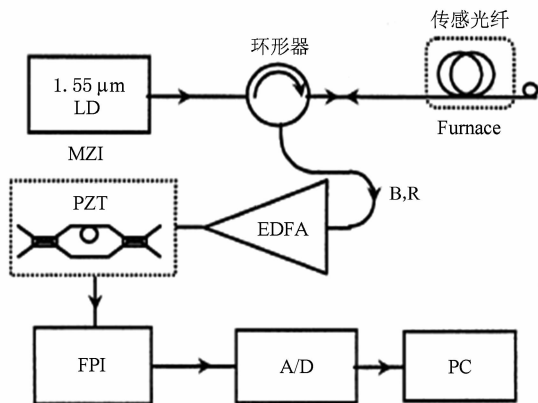


图2 布里渊频移-温度特性实验系统 B为布里渊散射光;R为瑞利散射光

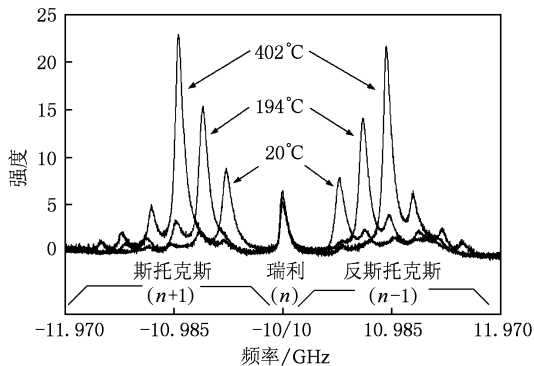


图3 色散位移光纤20,194和402 °C光背向散射光谱

将多次测量的布里渊频移数据进行平均,并绘出曲线,如图4所示.通过对实验数据进行最小二乘拟合,可得在20—820 °C范围内布里渊频移与温

度的二阶多项式关系式

$$v_{B2} - 10000 = 488.2 + 1.2694T - 0.0004T^2. \quad (16)$$

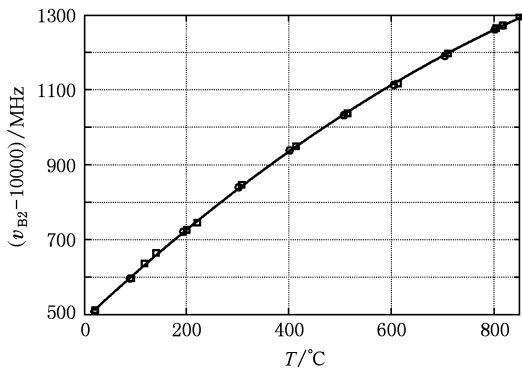


图4 光纤布里渊频移与温度关系的实验曲线

由图4可见,实验结果中温度与频移确实符合非线性关系,如果采用线性关系进行分析则存在较大的误差.理论分析结果和实验结果共同验证了温度在大范围变化时与频移成非线性的关系,而在20 °C到820 °C温度变化范围内利用二次项关系式拟合布里渊频移与温度关系误差非常小.

5. 分析与讨论

通过对比(15)式和(16)式,图1和图4,可以看出理论分析和实验结果基本符合.但理论分析结果与实验结果仍然存在较小的误差,其可能的原因为:

1)理论分析是从熔融石英着手,而实验系统测量的光纤是商业上常见的色散位移光纤.色散位移光纤含有一定的掺杂,影响它的布里渊频移测量结果.

2)光纤具有一定的包层结构,而理论推导所用实验数据是利用块状纯石英测量得到的,光纤在高温加温过程中可能存在热应力从而影响布里渊频移的测量结果.

6. 结 论

本文分别从实验和理论的角度研究了布里渊频移与宽范围温度的变化规律.搭建了布里渊频移-温度特性测量系统,给出了20,194和402 °C时的典型频谱测量结果,并根据各个温度点的布里渊散射频谱图计算得到布里渊频移,从而绘出了布里渊频移温度变化曲线图.在分析光纤的热膨胀系

数、密度、折射率、弹性模量和泊松比与温度的对应关系基础上,理论分析得到环境温度宽范围变化与布里渊频移的二阶关系式,并与实验结果进行对

比,理论分析和实验结果基本相符. 本文的研究对实现基于布里渊频移的宽范围温度的高精度传感具有较大的指导意义.

- [1] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P 2005 *Opt. Soc. of Am.* **22** 1321
- [2] Yu Q R, Bao X Y, Ravet F, Chen L 2005 *Opt. Lett.* **30** 2215
- [3] Song M P 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 1111 (in Chinese) [宋牟平 2004 光学学报 **24** 1111]
- [4] Kwang Y S, Kazuo Hotate 2006 *IEEE Photonic Technol. Lett.* **18** 499
- [5] Guo S F, Lin W X, Lu Q S, Chen S, Lin Z Z, Deng S Y, Zhu Y X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2218 (in Chinese) [郭少峰、林文雄、陆启生、陈燧、林宗志、邓少永、朱永祥 2007 物理学报 **56** 2218]
- [6] Hasi W L J, Lü Z W, Li Q, He W M 2007 *Chin. Phys.* **16** 154

- [7] Hu X D, Hu X T, Liu W H 1999 *Tran. Tianjin University* **32** 678 (in Chinese) [胡晓东、胡晓唐、刘文晖 1999 天津大学学报 **32** 678]
- [8] Duncan T (Translated by Liu Y G, Zhou X G) 1993 *Advanced Physics* (Hong Kong: Pilot Pub Services) pp136—137 (in Chinese) [邓肯著 刘一贯、周显光译 1993 高级物理学(香港: 导师出版社) 第 136—137 页]
- [9] Narottam P B, Doremus R H 1986 *Handbook of Glass Properties* (New York: Academic Press)
- [10] Max-planck Institut für silikatforschung, Würzburg 1970 *J. Non-Cryst. Solids* **5** 123
- [11] Marx J W, Sivertsen J M 1953 *Appl. Phys.* **24** 81

Influence of environment temperature wide-range variation on Brillouin shift in optical fiber*

Zhao Li-Juan[†]

(National Engineering Laboratory for Biomass Power Generation Equipment, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(Received 21 October 2009; revised manuscript received 28 December 2009)

Abstract

The experiment for measuring Brillouin shift of optical fiber was set up. The Brillouin shift of a dispersion-shifted fiber was experimentally investigated in the range of 20 to 820 °C, and the data was fitted. When the environment temperature changes in a wide range, the measured data when fitted by a linear relation, will bring about large errors. We set out our study on the basis of the structure and material properties of fused silica, including the thermal expansion coefficient, the density, the refractive index, the Young's modulus, and the Poisson's ratio. The mathematical model for the temperature dependence of each of the parameters was built up. Based on the relationships between Brillouin shift and the material properties, the Brillouin shift has been formulated as a second-order polynomial of temperature over a wide temperature range. Compared with our experimental results, the theoretical results are in good agreement, which lays a foundation for the wide-range Brillouin distributed temperature sensor.

Keywords: optical fiber, high temperature sensing, Brillouin scattering, Brillouin shift

PACC: 4265C, 4281P

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA09Z141) and the North China Electric Power University Scientific Research Foundation for the Young Teachers (Grant No. 200911006).

[†] E-mail: hdzlj@126.com