文章编号：1672-8785(2020)09-0037-05

基于光纤光栅的射频同轴开关簧片温度测试研究

郭洪龙　闫继送　胡垒军　任从文　毕宗义　郎金鹏　刘志明

（中电科仪器仪表有限公司，山东 青岛　226555）

摘　要：对基于光纤光栅测温原理的射频同轴开关内部簧片温度检测进行了研究，并使用了由聚酰亚胺涂覆的光纤光栅。温度校准后，外界温度与光纤光栅中心波长拟合直线的线性度为 99.914%。温度每上升 1 ℃，中心波长漂移 10.39 pm。将校准后的光纤光栅置于射频开关簧片处进行测温试验。结果表明，射频开关的内部温度达到 300 ℃时，光纤光栅理论上的中心波长偏移误差为 0.02 nm，相应的温度重复测试误差为 2 ℃。该研究为射频同轴开关内部簧片的温度检测提供了有效方法。

关键词：光纤光栅；射频同轴开关；温度测量

中图分类号：TP212　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2020.09.006

Research on Temperature Detection of the Reed in RF Coaxial Switch Based on Fiber Grating

GUO Hong-long, YAN Ji-song, HU Lei-jun, REN Cong-wen

BI Zong-yi, LANG Jin-peng, LIU Zhi-ming

(China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 226555, China)

Abstract: In this paper, the temperature detection of the reed inside RF coaxial switch based on the principle of fiber grating is studied, and the polyimide coated fiber grating is used. After the temperature calibration, the linearity of the fitting straight line using the external temperatures and the center wavelengths of the fiber grating is 99.914%. The center wavelength drift is 10.39 pm for every 1 ℃ rise. The calibrated fiber grating is placed at the reed of the RF switch for the temperature measurement experiment. The experimental results show that when the internal temperature of the RF switch reaches 300 ℃, the theoretical center wavelength deviation error of fiber grating is 0.02 nm, and the corresponding repeated temperature measurement error is 2 ℃, which provides an effective method for detecting the reed temperature inside the RF coaxial switch.

Key words: fiber grating; RF coaxial switch; temperature measurement

收稿日期：2020-07-13

作者简介：郭洪龙(1988-)，男，山东青岛人，硕士，工程师，主要从事光纤传感、偏振控制和光电检测等方面的研究。E-mail: guohonglong@tju.edu.cn

0 引言

射频同轴开关广泛应用于广播与通信行业。它具有同轴屏蔽结构，在高频信号传输方面的应用最为广泛。它还具有低插入损耗、高功率容量、低电压驻波比和高带宽性能等优点[1]。随着科学技术的发展，通信速率和距离需求不断提高。射频同轴开关的工作频率越高、功率越大，热量就会越大[2]。尤其在宇航级大功率射频同轴开关的应用中，亟需解决由发热导致的射频同轴开关性能退化甚至产品损坏的问题[3]。因此，需要实时准确地测试射频同轴开关工作时的内部温度，从而精准分析射频开关随温度变化而失效的原因。

传统的射频同轴开关内部温度测试方法分为接触式和非接触式两类。其中，接触式测试一般采用热电偶测温，其优点是使用简单且成本低。但是需要将热电偶内置到射频同轴开关中，此时会对射频同轴开关的正常工作产生较大影响，而且温度变化响应速度较低。非接触式测试一般采用红外热像仪。该方法不会干扰被测射频同轴开关的正常工作，但是测温精度较低，难以做到对射频同轴开关内部特定部件温度的精准测试[4]。光纤光栅是利用波长对温度的敏感特性而制成的一种新的接触式光纤传感器。由于独特的电绝缘性能，光纤光栅在用于测温时具有较强的抗电磁干扰能力。此外，它非常纤细，对待测对象的干扰小且性能稳定，因此是理想的温度传感元件[5-8]。

本文就射频同轴开关在使用过程中的失效问题进行了相关检查，发现了失效原因，即正常工作时，内部温度过高导致连接的铜片发黑。为了准确实时地测试射频同轴开关正常工作时的内部温度变化，本文对基于光纤光栅的射频同轴开关内部簧片温度检测展开研究。我们使用了由聚酰亚胺涂覆的光纤光栅，并通过将校准后的光纤光栅置于射频开关簧片处来进行测温实验，最后对实验结果进行了分析。结果表明，该研究可以为射频同轴开关内部簧片温度检测提供有效方法。

1 基于光纤光栅的温度测试原理

在光纤中传输的光到达光栅时，符合特定条件的入射光会被反射。反射光的波长受纤芯折射率和光栅周期影响，即

$$\lambda_B=2n\Lambda \tag{1}$$

式中，λ_B 表示反射光的中心波长；n 表示传输光纤的有效折射率；Λ 为光栅常数，表示刻写的光栅周期。Λ 和 n 均受外界温度影响。温度变化时，光栅反射光的中心波长会发生漂移。由温度变化导致光栅反射光的中心波长漂移可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=(\alpha_s+\xi)\Delta T \tag{2}$$

式中，$\alpha_s=\frac{1}{\Lambda}\frac{\Delta\Lambda}{\Delta T}$表示光纤光栅的热膨胀系数，可用于表征光栅常数随温度的变化情况；$\xi=\frac{1}{n}\frac{\Delta n}{\Delta T}$表示光纤光栅的热光系数，可用于表征有效折射率随温度的变化情况。因此，λ_B 与 ΔT 之间成线性关系。通过测量光纤光栅反射光的中心波长漂移，就可以反推出当时的环境温度[9-10]。图 1 为光纤光栅测温的原理示意图。

2 实验及结果分析

图 2 为射频同轴开关的实物图。它在工作时通过用电磁继电器控制图 2 右图中两个簧片的弹起与按下来实现通道选通。按下其中一个簧片时，图 2 左图中三个触点里有两个导通。虚线圈中的发黑簧片是由于温度过高而失效的簧片。本实验的目的是设计一种实时测试簧片温度的方法，为射频同轴开关的温度失效分析提供数据。

本文采用基于光纤光栅的射频开关簧片温度测试方法，并使用经紫外光刻蚀形成的折射率变化的光纤光栅。通过调整光纤常数，可以实现对特定波长光的反射。当温度发生变化时，光纤光栅常数也发生变化，相应的反射光中心波长产生漂移。通过检测该漂移量便可反推出环境温度的变化。制作完成后的光纤光栅比较脆弱且容易折断，因此对其进行涂覆。常

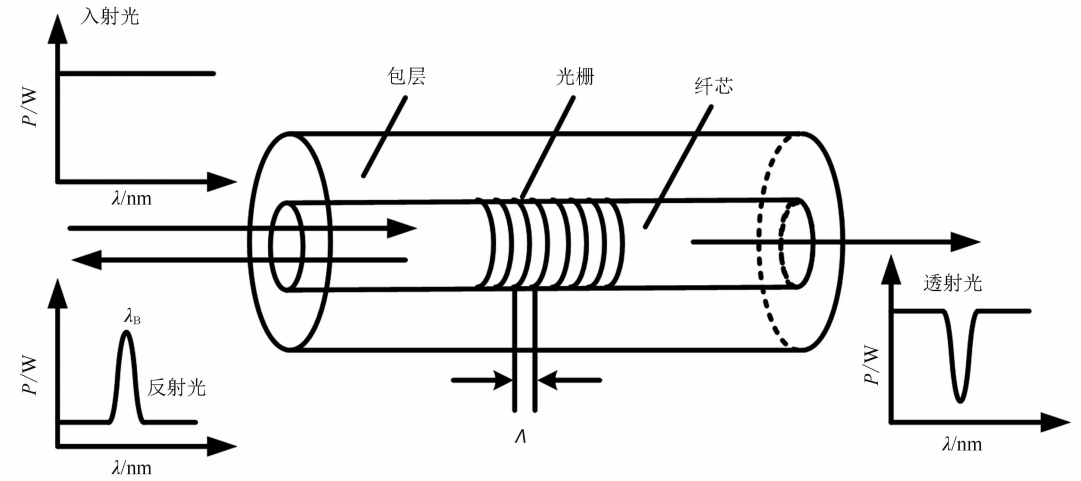


图 1 光纤光栅测温的原理示意图

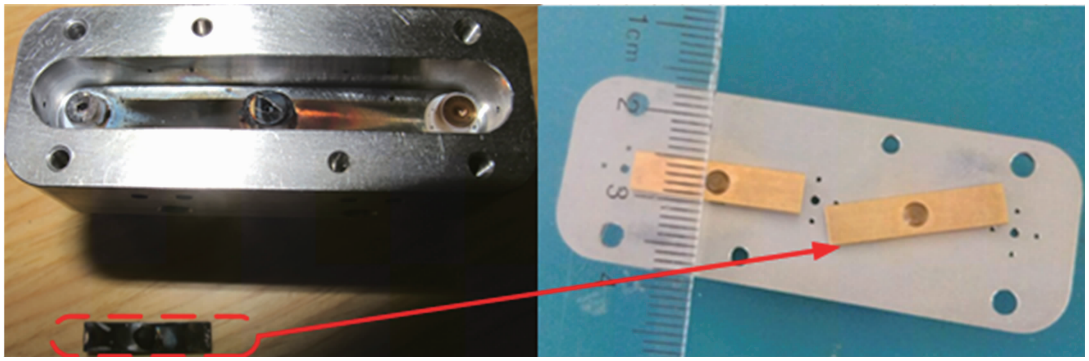


图 2 射频同轴开关的实物图

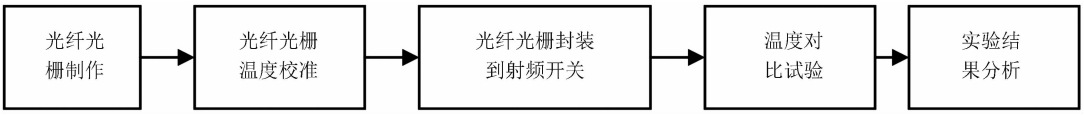


图 3 实验流程图

用的涂覆材料为丙烯酸酯。涂覆该材料后，光纤光栅的外径为 250 μm，但耐温能力较弱。测试温度高于 120 ℃时，涂覆层会变软脱落。因此，本文使用耐温能力强(可达到 150 ℃)的聚酰亚胺涂覆材料。

光纤光栅的栅区即为温度敏感区。栅区越长，反射光谱越窄，测温效果就越好。市场上使用最广泛的光纤光栅的栅区长度为 1 cm。图 2 右图所示为本文需要测试的簧片，其宽度为 5 mm。如果栅区过长，光栅反射光谱波形会发生畸变，从而影响测试精度。因此，设计了 5 mm 的聚酰亚胺涂覆光纤光栅(常温下的中心波长为 1550 nm)来进行测试。

具体的实验流程如图 3 所示。首先使用 Micro Optics 公司的光纤光栅解调仪对光纤光栅进行校准。温度测试频率为 2 Hz，即每秒解调温度两次。使用铂电阻温度计对光纤光栅进行标定，具体如下：将铂电阻温度计和光纤光栅都放入恒温水槽后再进行加温，记录不同时刻铂电阻温度计的读出温度和光纤光栅的反射光中心波长，接着作图并拟合出温度-波长曲线(见图 4)。结果表明，拟合曲线的线性度为 99.914%，方差为 5.46438×10^{-5}。温度每上升 1 ℃，中心波长漂移 10.39226 pm。

然后将校准后的光纤光栅粘贴到射频同轴开关上，具体如下：先对射频同轴开关进行开

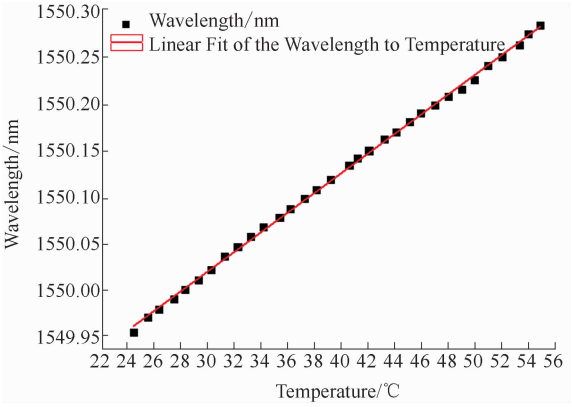


图 4 光纤光栅温度校准实验数据及拟合曲线

槽处理(开槽位置位于铜触点形成的平面向下 0.2 mm 处)；再将光纤光栅的栅区放到细槽中，并用 704 胶固定其中的一端；最后在上盖簧片上涂抹少量的导热硅脂，以便簧片将热量迅速传导到光纤光栅的栅区。粘贴封装好的射频同轴开关如图 5 所示。

由于没有大功率射频同轴开关信号源，我们通过将封装好的射频开关连同铂电阻温度计一起放入恒温槽中来模拟射频同轴开关工作时的升温过程。将恒温水槽缓慢升温并开始测试，记录不同时间铂电阻温度计的读出温度和光纤光栅的中心波长。通过直线拟合法得到两条曲线分别为 $\lambda_1=10.56\times10^{-3}T+1549.7814$ (nm)和 $\lambda_2=10.65\times10^{-3}T+1549.7746$ (nm)，如图 6 所示。两条曲线之间的偏差可能与光纤光栅粘贴过程中不可避免引入的残余应力有关。我们将两条曲线延长，当射频开关的内部温度上升到 300 ℃时，两条曲线的中心波长偏移误差为 0.02 nm，相应的温度重复测试误差为 2 ℃。该精度可以满足大部分的实际需求。

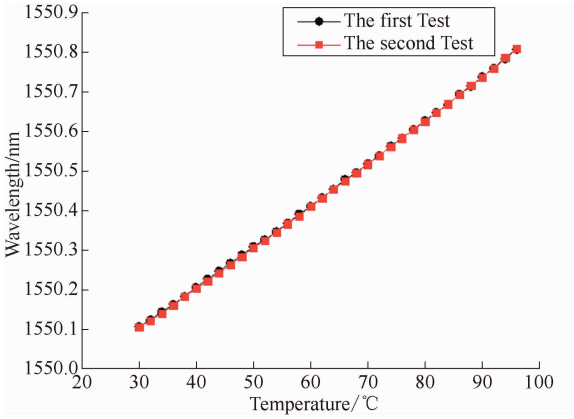


图 6 封装好的射频同轴开关的模拟升温试验

3 结论

本文对基于光纤光栅测温原理的射频同轴开关内部簧片温度检测进行了研究，并使用了由聚酰亚胺涂覆的光纤光栅。通过试验校准后，外界温度与光纤光栅中心波长拟合直线的线性度为 99.914%。温度每上升 1 ℃，中心波长漂移 10.39 pm。将校准后的光纤光栅置于射频开关簧片处进行了测温试验。结果表明，射频开关的内部温度达到 300 ℃时，光纤光栅的中心波长偏移误差为 0.02 nm，相应的温度重复测试误差为 2 ℃。该研究为射频同轴开关

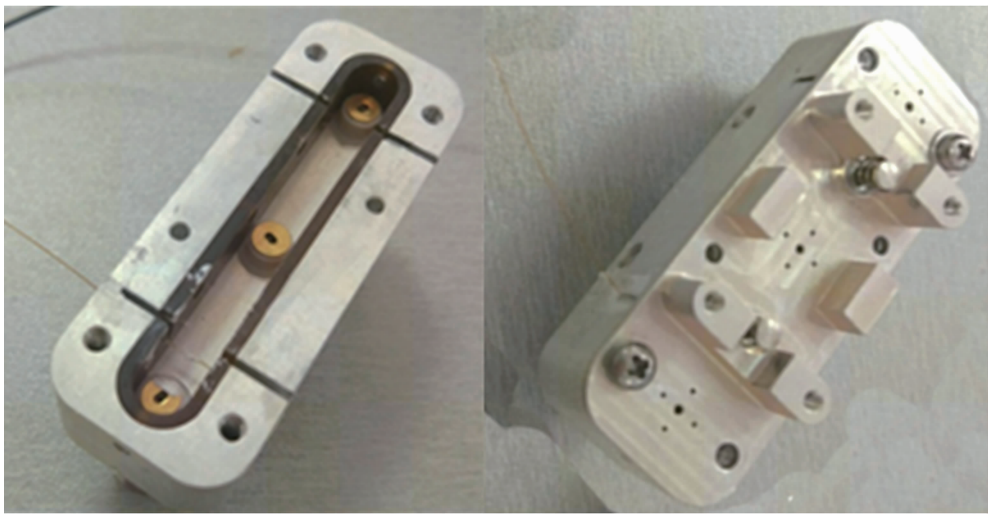


图 5 粘贴光纤光栅的射频同轴开关的实物图

内部簧片温度检测提供了有效方法。下一步可将本文方法用于大功率射频同轴开关的实际应用场景中，并研究射频开关的失效温度以及不同工艺和设计参数对失效温度的影响。

参考文献

[1] 朱永庆，吴世湘. 军用继电器的发展态势 [J]. **电子科学技术评论**，2005，**2**(1)：55-56.

[2] 张兴，郝一龙，李志宏，等. 跨世纪的新技术-微机电系统（MEMS）[J]. **电子科技导报**，1999，**6**(4)：2-6.

[3] 龚秀丽，孙绍强，李鑫. 射频开关在高低温电测试试验中的失效分析及改进 [J]. **电子设计工程**，2016，**24**(23)：115-121.

[4] 孙艳君，王宁，王磊，等. 基于 ZigBee 和红外技术智能家居控制系统的研究 [J]. **网络空间安全**，2016，**7**(6)：32-35.

[5] 江俊峰，闫金玲，王双，等. 环境变温下光纤布拉格光栅解调中滤波器扫描波动抑制研究 [J]. **光学学报**，2016，**36**(12)：1206001.

[6] Christopher K Y，Leung C K Y，Wan K T，et al. Review：optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. *Materials and Structures*，2015，**48**(4)：871-906.

[7] Bai W，Yang M H，Dai J X，et al. Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements [J]. *Optics Express*，2016，**24**(4)：3230-3237.

[8] Schubel P J，Crossley R J，Boateng E K G，et al. Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades [J]. *Renewable Energy*，2013，**51**：113-123.

[9] Li W S，Yan L X，Wen L Y，et al. Fiber Bragg Grating Sensor Multiplexing System based on FMCW [J]. *Applied Mechanics and Materials*，2013，**336-338**：232-238.

[10] 任伟，彭仁军，张东旭，等. 光纤光栅测温技术在航天器中的应用研究 [J]. **航天器工程**，2018，**27**(3)：73-78.