

PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源 温度传感器的性能

Performance of PDC-SiBCN ceramic based
wireless passive temperature sensor

余煜玺, 韩 滨

(厦门大学 材料学院材料科学与工程系 福建省特种
先进材料重点实验室, 福建 厦门 361005)

YU Yu-xi, HAN Bin

(Fujian Key Laboratory of Advanced Materials, Department of
Materials Science and Engineering, College of Materials,
Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

摘要:以耐高温聚合物先驱体陶瓷(PDC-SiBCN)为温敏介质材料,金属铂作为谐振腔材料,并在陶瓷表面开槽形成共面天线,制备出集开槽天线与谐振器一体的无线无源温度传感器,实现温度信息的无线无源传输。结果表明:传感器的谐振频率随测试温度的升高呈单调递减变化,PDC-SiBCN 陶瓷的介电常数随温度的升高而单调增加,其中热解温度为 1000 ℃ 的传感器测试温度达 1100 ℃,具有优异的耐高温性和介温特性。同一测试温度下传感器的谐振频率随直径的增大而减小,也随热解温度的升高而降低。通过对传感器的谐振频率-温度拟合曲线进行一阶偏导得到灵敏度方程,传感器在 1100 ℃ 的高温下有较高的灵敏度。传感器具有良好的循环稳定性能,在室温下实际无线传输距离达到 42 mm,当测试温度为 1100 ℃ 时传输距离可达 8 mm,可应用于高温恶劣环境下航空发动机的温度监控。

关键词: 聚合物先驱体陶瓷;温度传感器;耐高温

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.001319

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)01-0121-07

Abstract: The high temperature resistant polymer derived ceramic (PDC-SiBCN) was used as a temperature sensitive dielectric material, and metal platinum was used as a resonant cavity material, and a coplanar antenna was formed by slotting on the surface of the ceramic to fabricate a wireless passive temperature sensor integrating the slot antenna and the resonator. The sensor can realize the wireless passive transmission of temperature information. The results show that the resonant frequency of the sensor is declined monotonically with the increase of the testing temperature, the dielectric constant of PDC-SiBCN ceramic is increased monotonously with increasing temperature, and the sensor with a pyrolysis temperature of 1000 ℃ is tested up to 1100 ℃, which has excellent high temperature resistance and dielectric temperature properties. At the same test temperature, the resonant frequency of the sensor is decreased with increasing diameter and also is reduced with increasing pyrolysis temperature. The sensitivity equation is obtained by performing a first-order partial derivative of the resonant frequency-temperature fitting curve of the sensor, and the sensor has a high sensitivity at a high temperature of 1100 ℃. The sensor has good cycle stability, and it has an actual wireless transmission distance of 42 mm at room temperature and a transmission distance of up to 8 mm when the testing temperature is 1100 ℃, which can be used for temperature monitoring of aero-engine in high temperature and harsh environments.

Key words: polymer derived ceramic; temperature sensor; high temperature resistance

随着科技的快速发展,航天、航空、核电、国防、交通等领域对高温恶劣环境的温度监控显得越来越重

要^[1]。比如航空发动机工作中的高温恶劣环境,通常伴随着高压和高湿性、高腐蚀性气体。在如此恶劣的

环境中,现有的传统材料制备的温度传感器根本无法实现稳定、有效的监控^[2-3]。就目前而言,由于有线有源传感器中电池的使用寿命有限,外加电源时传感器的线路布局也是一个技术难题,因此有线有源温度传感器已经满足不了人们的需求,开发出在极端恶劣环境中稳定工作的无线无源温度传感器显得较为迫切^[4-5]。

2012年中佛罗里达大学的 Cheng 等^[6]根据 Al_2O_3 的微波介温性能设计了一种集谐振腔和开槽天线于一体的无线无源谐振式温度传感器,其测试温度可达 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 。该传感器以 Al_2O_3 为温敏介质材料,以铂为表面金属层,并在谐振器上表面开槽作为收发天线。但 Al_2O_3 材料在高温下抗热冲击性能较差,而且微波阶段的损耗很高,因此并不是传感材料的最佳选择。2017年李来超等^[7]以 SiCN 陶瓷为传感器介质材料,以金属铂为谐振腔材料,制备了无线无源温度传感器,并利用矢量网络分析仪对信号进行处理,测试温度仅达到 $610\text{ }^\circ\text{C}$ 。

目前,国际上提出了一种新型的聚合物先驱体陶瓷 SiBCN (PDC-SiBCN),其具有优异的高温热稳定性^[8-9]、抗氧化性^[10]、高温电学特性^[11-12]和抗蠕变性^[13],并且陶瓷制备工艺简单。研究发现,PDC-SiBCN 陶瓷的介电常数随测试温度的升高而单调增加^[14-15],其具有优异的介温性能,是应用于极端环境传感器材料的不二之选。以 PDC-SiBCN 陶瓷作为传感器内部温敏介质材料、金属铂作为表面金属层所形成的谐振器,利用 PDC-SiBCN 陶瓷的介温特性,也就是随环境温度的变化,介电常数的变化会导致谐振频率发生相应的变化,通过建立陶瓷的介电常数与环境温度的变化关系即可得到传感器的谐振频率与温度的变化关系。设计以 PDC-SiBCN 陶瓷为温敏介质的无线无源温度传感器,其具有优异的耐高温性和介温特性^[9,15]。无线无源温度传感器主要由内部圆柱形 PDC-SiBCN 陶瓷片、表面金属层和上表面共面的开槽天线构成,当外部的审讯天线(开口波导天线)发射出宽带信号电磁波时,部分电磁波会经过传感器上表面的开槽天线耦合进入谐振器并发生谐振,经过谐振后满足一定谐振频率的电磁波会通过开槽天线反射出去,从而被审讯天线接收。

本工作采用先驱体转换陶瓷法制备出耐高温的 PDC-SiBCN 陶瓷,将其作为传感器内部的温敏介质材料,以金属铂作为谐振腔材料,制备出集开槽天线与谐振器于一体的 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器,明显减小了传感器的尺寸。研究 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器的谐振频率随温度的变化规

律,分析热解温度和直径大小对传感器谐振频率的影响,并对传感器在升温过程中的循环稳定性和无线传输距离进行分析与测试。

1 实验

1.1 传感器的制备

实验试剂:聚硼硅氮烷(PBSZ),淡黄色液体,制备耐高温 PDC-SiBCN 陶瓷的原材料,厦门纳美特新材料科技有限公司;导电铂浆,陶瓷表面的金属谐振腔材料,ESL-5542,常州帕特纳电子科技有限公司。

将先驱体液 PBSZ 在氮气氛围中进行交联,交联温度为 $160\text{ }^\circ\text{C}$,交联时间为 4 h 。然后,将交联后的块状固体经振动式球磨机球磨成粒径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的白色粉末。室温下,采用单轴冷压法工艺,在 5 MPa 的压力下,将白色粉末压制成圆柱形陶瓷素坯。为了增加热解后陶瓷片的致密度,使用冷等静压机在 150 MPa 的压力下进一步处理。将压片后的陶瓷素坯在氮气气氛中分别经 $1000, 1100, 1200\text{ }^\circ\text{C}$ 热解成 PDC-SiBCN 陶瓷。制备的陶瓷片为传感器的温敏介质材料,直径 $8\sim 13\text{ mm}$,厚度 $0.5\sim 2\text{ mm}$ 。对陶瓷片进行 $1000\text{ }^\circ\text{C}$, 12 h 的热氧化处理,然后在其表面进行抛光处理。

将导电铂浆均匀涂覆在 PDC-SiBCN 陶瓷表面,将涂好的陶瓷片经 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 4 h ,然后在空气中加热到 $980\text{ }^\circ\text{C}$,保温 30 min ,使陶瓷片表面涂覆的铂浆完全金属化,从而形成谐振腔。在涂刷铂浆的过程中,用长方形耐高温胶带将谐振腔表面的开槽天线保护起来。在表面铂浆干燥后再将耐高温胶带除去,即可得到开槽天线。图 1 为制备出的不同直径和热解温度的 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器(银色为外层金属铂,黑色为内部 PDC-SiBCN 温敏介质材料)。直径为 $9, 9.5, 11\text{ mm}$ 的传感器如图 1(a), (b), (c) 所示,分别命名为 STC-1, STC-2, STC-3, 内部陶瓷片的热解温度均为 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 1(d), (e) 分别是陶瓷片热解温度为 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 的传感器实物图,将其命名为 STC-4, STC-5, 传感器直径均为 9 mm 。上述制备的传感器尺寸与开槽天线的参数见表 1。

1.2 搭建测试系统

传感器的高温测试系统和传输距离示意图如图 2 所示。图 2(a)所示的高温测试系统主要包括加热炉、温度控制仪、升降台和矢量网络分析仪。温度传感器的谐振频率通过开口波导天线(OEWG 天线)输入矢量网络分析仪(AV3672B)进行测试与分析。在加热

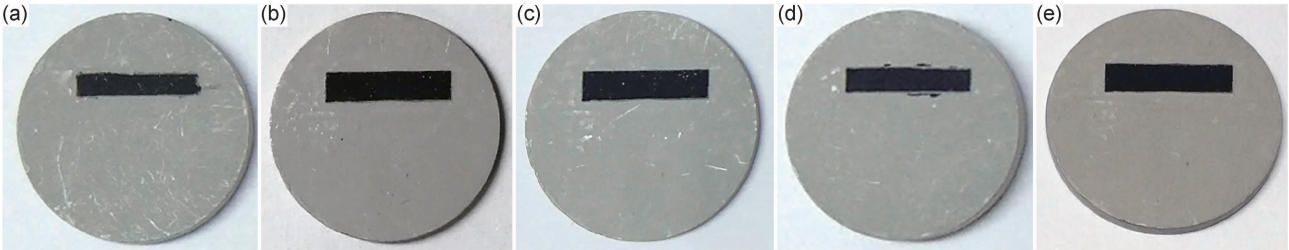


图 1 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器实物图 (a)STC-1;(b)STC-2;(c)STC-3;(d)STC-4;(e)STC-5

Fig. 1 Physical maps of PDC-SiBCN ceramic based wireless passive temperature sensors

(a)STC-1;(b)STC-2;(c)STC-3;(d)STC-4;(e)STC-5

表 1 无线无源温度传感器的尺寸与开槽天线的参数

Table 1 Wireless passive temperature sensor's size and the slot antenna's parameters

Name	Pyrolysis temperature/℃	Diameter of the sensor/mm	Thickness of the sensor/mm	Length of slot antenna/mm	Width of slot antenna/mm
STC-1	1000	9.0	1	5.0	0.80
STC-2	1000	9.5	1	5.2	0.85
STC-3	1000	11.0	1	6.0	1.00
STC-4	1100	9.0	1	5.0	0.80
STC-5	1200	9.0	1	5.0	0.80

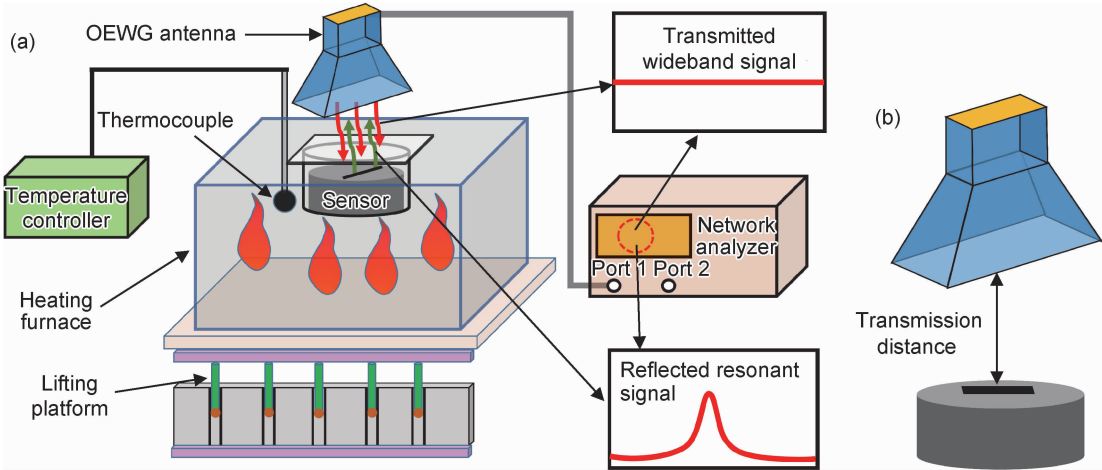


图 2 传感器的高温测试系统(a)和传输距离示意图(b)

Fig. 2 High-temperature measurement system (a) and transmission distance diagram (b) of the sensor

炉顶端中心区域加工一个开槽区域,并与内部加热炉膛相通,该区域用于放置和加热传感器。利用温度控制仪可以控制加热炉从室温升温至 1100℃,由于待测传感器处于加热核心区域,传感器的环境温度与加热炉温度接近。由图 2(b)可见,传感器的无线传输距离是 OEWG 天线的下表面与传感器上表面处开槽天线之间的垂直距离。测试时,OEWG 天线放置于传感器的正上方处,为了减少测试环境对 OEWG 天线的高温损害,将无线传输距离调整为 8 mm。

2 结果与分析

测试中,传感器的谐振信号会受到 OEWG 天线

的反射和周围环境、传感器表面散射等干扰因素的影响,从而使谐振频率不能被直接测得,因此需要通过添加一个时域通道(TD)将传感器的谐振信号和干扰信号分离开^[7,15-16]。测试时将每个传感器的时域通道起始时间设置为 1 ns,终止时间设置为 21 ns。时域通道设置好之后,对传感器进行升温测试。图 3 为每个传感器在升温过程中的 S_{11} 信号响应,图中 S_{11} 曲线中峰的峰值对应的频率为传感器在此环境温度下的谐振频率。由图 3 可知,随着温度的升高,所有 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器的 S_{11} 信号曲线均向低频方向偏移,同时峰值均逐渐减小。这主要是因为:该温度传感器以 PDC-SiBCN 陶瓷为温敏介质材料,利用 PDC-SiBCN 陶瓷的介温特性,在测试温度范围内,陶

瓷的介电常数随温度的升高而增加,从而导致传感器的谐振频率降低, S_{11} 信号曲线向低频方向偏移。图 3(a)是传感器 STC-1 的升温 S_{11} 信号响应,当测试温度为 20 ℃时,传感器的谐振频率为 14.211 GHz,当温度升高至 1100 ℃,谐振频率降低至 13.953 GHz。图 3(b)是传感器 STC-2 的升温 S_{11} 信号响应,谐振频率从 20 ℃的 12.906 GHz 下降到 1100 ℃的 12.648 GHz。图 3(c)是传感器 STC-3 的升温 S_{11} 信号响应,谐振频率从 20 ℃的 11.464 GHz 下降到 1100 ℃的 11.244 GHz。以热解温度为 1000 ℃的 PDC-SiBCN 为温敏介质材料

时,制备的不同直径传感器的最高测试温度均达到 1100 ℃,具有优异的耐高温性。图 3(d)是传感器 STC-4 的升温 S_{11} 信号响应,谐振频率从 20 ℃的 13.877 GHz 下降到 900 ℃的 13.635 GHz。图 3(e)是传感器 STC-5 的升温 S_{11} 信号响应,谐振频率从 20 ℃的 13.738 GHz 下降到 800 ℃的 13.515 GHz。分别以热解温度为 1100,1200 ℃的 PDC-SiBCN 为温敏介质材料时,制得的传感器的测试性能会减弱,最高测试温度分别达到 900,800 ℃,这是因为当温敏介质材料 PDC-SiBCN 的热解温度升高时,其相应材料的介电损耗会增加^[15,17]。

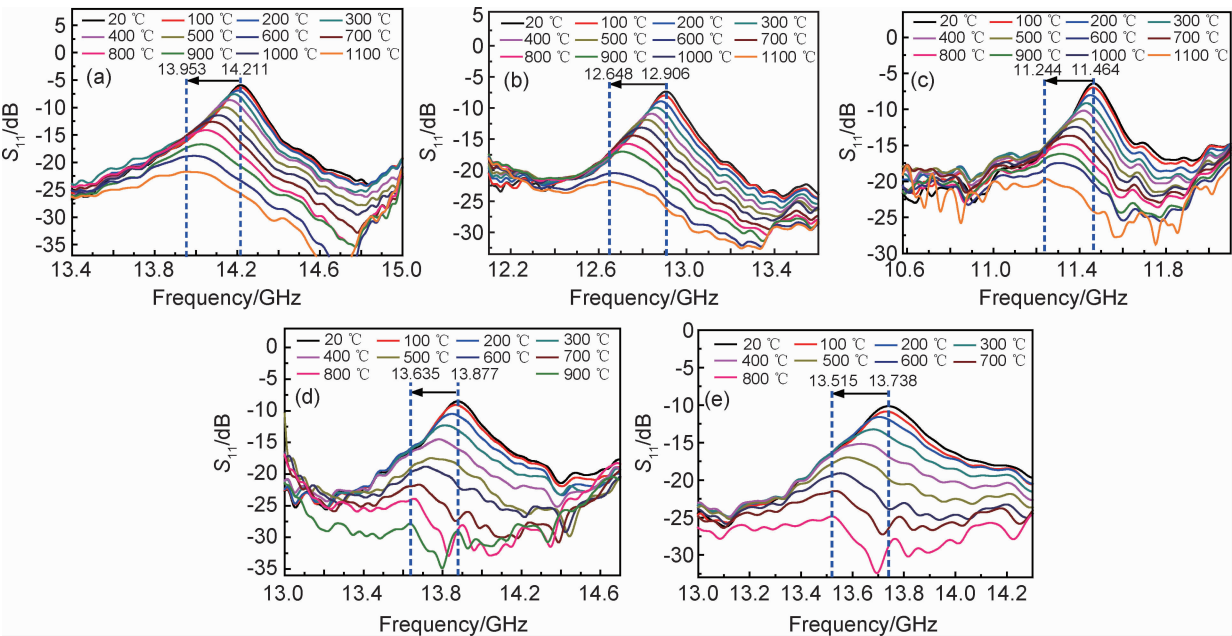


图 3 时域通道设置后测得的传感器在升温过程中的 S_{11} 信号响应
(a)STC-1;(b)STC-2;(c)STC-3;(d)STC-4;(e)STC-5

Fig. 3 Measured S_{11} signal response of the sensor during temperature rise after TD gating
(a)STC-1;(b)STC-2;(c)STC-3;(d)STC-4;(e)STC-5

在对每个传感器进行升温测试时,每隔 10℃记录 1 次谐振频率,传感器的谐振频率-温度曲线如图 4 所示。这 5 个传感器的谐振频率均随测试温度的升高而

单调减小。由图 4(a)可知,同一测试温度下,传感器的直径增加,其对应的谐振频率会减小。由图 4(b)可知,同一测试温度下,传感器内部温敏介质材料PDC-

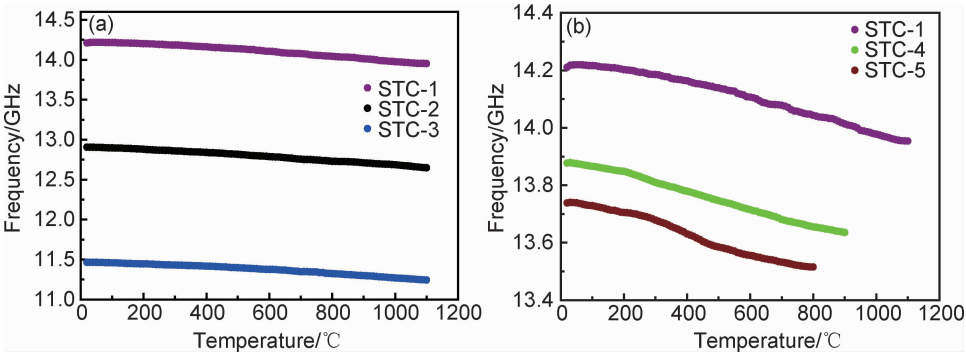


图 4 传感器的谐振频率-温度曲线 (a)不同直径;(b)不同热解温度

Fig. 4 Resonant frequency-temperature curves of sensors (a)different diameter;(b)different pyrolysis temperatures

SiBCN 陶瓷的热解温度升高,其对应的谐振频率会减小。

由表 1 可知传感器的厚度远小于直径,因此传感器中圆柱形谐振器的工作模式为 TM_{010} 模式,即横磁振荡模式,该模式下谐振器内部电场较为集中,只存在轴向方向的电场^[14-16]。在 TM_{010} 模式下工作的传感器结构简单,具有较小的体积和较高的稳定性,其谐振频率与传感器尺寸和介质材料介电常数有关。当不考虑槽天线的加载效应时,传感器的谐振频率 f 在 TM_{010} 模式下可表示为^[15]:

$$f = \frac{cP_{01}}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}}$$

(1)

式中: P_{01} 为第一类贝塞尔函数 $J(x)$ 的一次方根,在 TM_{010} 模式下取 $P_{01}=2.405$; c 为光速; a 为传感器的半径; ϵ_r 为 PDC-SiBCN 陶瓷的介电常数。由式(1)可计算出传感器内部 PDC-SiBCN 陶瓷与温度相关的介电常数。图 5(a)为传感器 STC-2 的谐振频率和陶瓷

的介电常数随温度的变化,图 5(b)为谐振频率-温度拟合曲线。由图 5(a)可见,黑色曲线为谐振频率-温度曲线,而蓝色曲线为介电常数-温度曲线,当温度从 20 ℃ 升高到 1100 ℃ 时,测得的传感器 STC-2 的谐振频率由 12.906 GHz 单调降低至 12.648 GHz,传感器内部 PDC-SiBCN 陶瓷的介电常数由 3.512 单调升高到 3.657,体现出 PDC-SiBCN 陶瓷优异的介温特性。将图 5(a)中传感器 STC-2 的谐振频率-温度曲线(黑色曲线)进行多项式拟合,拟合曲线如图 5(b)中的红色曲线所示,该传感器的拟合度为 0.99796。由于灵敏度是衡量温度传感器性能的一个很重要的参数,就需要对传感器 STC-2 的拟合曲线方程求一阶偏导,得到对应的灵敏度方程 $Y=-0.176809-0.000118393T$ 。由灵敏度方程可知,传感器 STC-2 的灵敏度从 20 ℃ 的 0.1792 MHz/℃ 增加到 1100 ℃ 的 0.3070 MHz/℃,灵敏度较高。

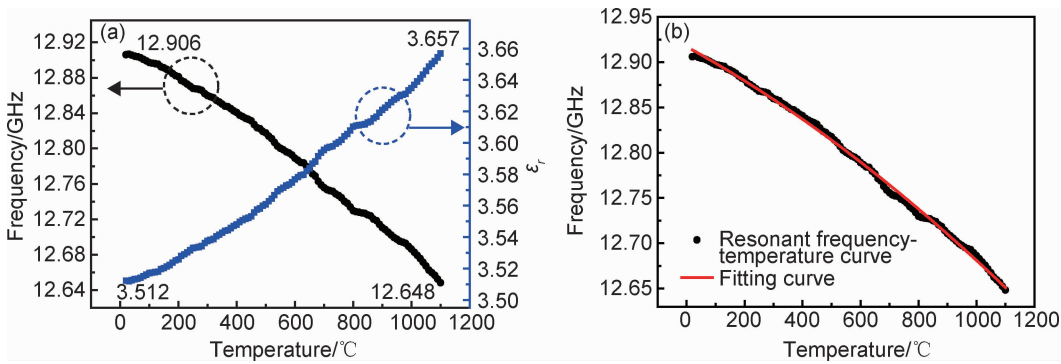


图 5 传感器 STC-2 的谐振频率和陶瓷的介电常数随温度的变化(a)和谐振频率-温度拟合曲线(b)
Fig. 5 Resonant frequency of sensor STC-2 and dielectric constant of ceramic versus temperature (a) and resonant frequency-temperature fitting curve (b)

图 6 为传感器 STC-2 的高温循环测试曲线。在 20~1100 ℃ 的测试温度范围内,对传感器 STC-2 进行 3 次循环测试。由图 6 可知,传感器 STC-2 的 3 次循环测试曲线(谐振频率-温度曲线)有较高的重叠性且重复,故 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器在高温测试时具有很高的循环稳定性能。

传感器的无线传输距离是无线无源温度传感器的一个重要指标,无线传输距离越大,传感器的实际应用领域就越广泛。由图 2(a)可见,固定 OEWG 天线的位置,通过控制升降台的高度来控制外部天线与传感器间的无线传输距离。图 7 为传感器 STC-2 在升温过程中的无线传输距离测试,图 7(a)~(d)分别为传感器 STC-2 在 20,200,600,1100 ℃ 的无线传输距离测试,图 7(e)为传感器 STC-2 的实际最大传输距离随温度的变化。由图 7(a)~(d)可知, S_{11} 响应曲线随无线传输距离的增大而向下偏移,传感器的信号强度减

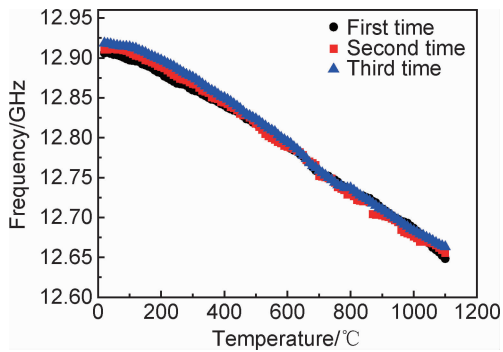


图 6 传感器 STC-2 的高温循环测试曲线
Fig. 6 High temperature cycle test curve of sensor STC-2

弱,这是因为随着传输距离的增大,耦合进传感器谐振器内发射天线的电磁波越来越少,在经过谐振选频后被发射天线接收的电磁波也越来越少。由图 7(a)可知,当温度为 20 ℃ 时,传输距离由 8 mm 升高至

42 mm, 传感器 S_{11} 响应曲线在谐振频率 12.906 GHz 附近仍然能观察到峰, 说明传感器在 42 mm 传输距离下能稳定工作, 并检测温度信息。因此, 传感器 STC-2 在 20 °C 室温下的实际最大传输距离取为 42 mm。而 2013 年 Li 等^[16] 设计的以 SiCN 为温敏元件、金属银为谐振腔的无线无源温度传感器, 室温下有效传输距离仅达到 20 mm。由图 7(b) 可知, 当温度升高至 200 °C 时, 传感器 STC-2 的实际最大传输距离取为 26 mm, 这是因为在 32 mm 传输距离下的传感器 S_{11} 响应曲线(金色曲线)峰的分辩率严重降低, 信号曲线在谐振频率 12.881 GHz 附近出现双峰, 从而不能保证该传感器在此传输距离下能稳定工作。由图 7(c) 可知, 传感器在 600 °C 高温下的实际最大传输距离为 22 mm。由图 7(d) 可知, 当温度升高至 1100 °C 时, 在

8 mm 传输距离下的传感器 S_{11} 响应曲线比较平滑, 在谐振频率 12.648 GHz 处峰的分辩率很高。但提高传输距离至 11 mm 和 14 mm 时, S_{11} 响应曲线(红色曲线与蓝色曲线)出现了很多小峰, 难以分辨在 1100 °C 时谐振频率 12.648 GHz 附近的峰, 因此传感器 STC-2 在 1100 °C 高温下的实际最大传输距离取为 8 mm。图 7(e) 更直观地体现出传感器的实际最大传输距离随温度的变化情况。由图 7(e) 可知, 在 20~1100 °C 的测试温度范围内, 传感器的实际最大传输距离随着测试温度的升高而降低, 这是因为传感器内部 PDC-SiBCN 陶瓷的介电损耗会随着测试温度的升高而增加^[14-16]。PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器可应用于高温恶劣环境下航空发动机的温度监控。

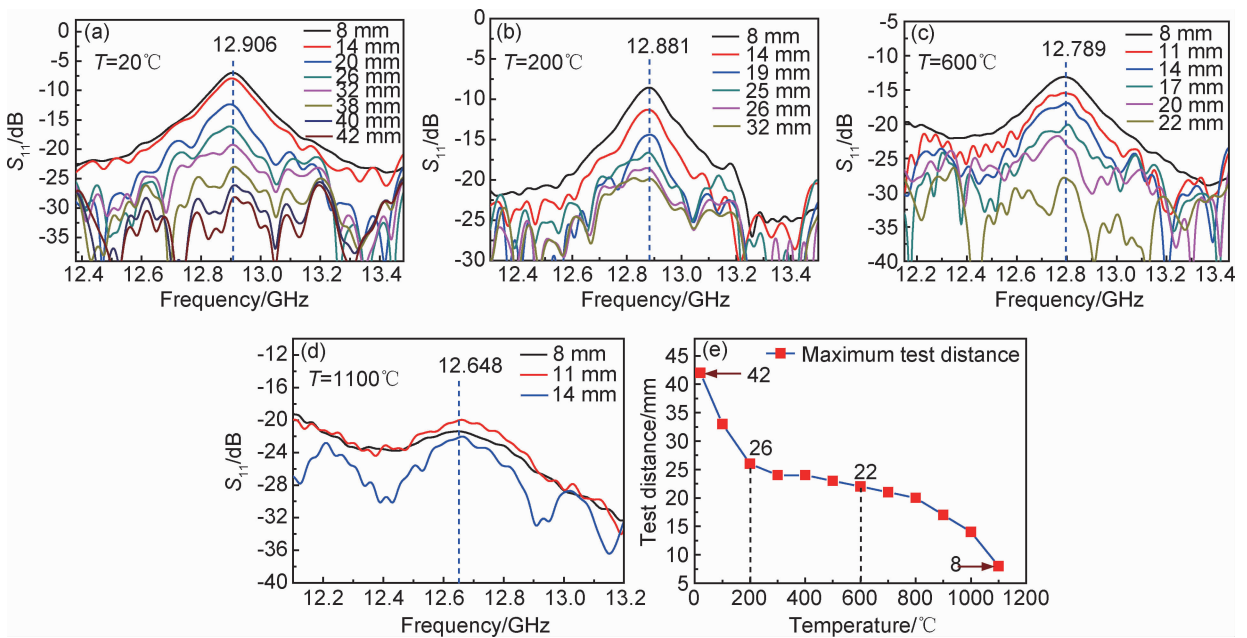


图 7 传感器 STC-2 在升温过程中的无线传输距离测试 (a)20 °C;(b)200 °C;(c)600 °C;(d)1100 °C;(e)实际最大传输距离
Fig.7 Wireless transmission distance test of sensor STC-2 during temperature rise
(a)20 °C;(b)200 °C;(c)600 °C;(d)1100 °C;(e)actual maximum transmission distance

3 结论

(1)采用先驱体转换陶瓷法制备出耐高温的 PDC-SiBCN 陶瓷, 并将其作为传感器内部温敏介质材料, 以金属铂作为谐振腔材料, 制备出不同直径和热解温度的 PDC-SiBCN 陶瓷基无线无源温度传感器。

(2)传感器的谐振频率随测试温度的升高单调减小, PDC-SiBCN 陶瓷的介电常数随温度的升高而单调增加, 其中热解温度为 1000 °C 的传感器测试温度达 1100 °C。同一测试温度下, 当传感器直径和热解温度增大时, 传感器的谐振频率减小。通过对谐振频率-温

度拟合曲线进行一阶偏导得到灵敏度方程, 传感器在 1100 °C 高温下有较高的灵敏度。传感器在测试稳定性和重复性方面表现优异, 传感器在室温下的实际无线传输距离可达 42 mm, 当测试温度为 1100 °C 时传输距离可达 8 mm。

参考文献

[1] GREGORY O J, YOU T. Ceramic temperature sensors for harsh environments[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(5): 833-838.

[2] FERNANDEZ A F, GUSAROV A I, BRICHARD B, et al. Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 2002, 41

- (6): 1246-1255.
- [3] HERFURTH P, MAIER D, LUGANI L, et al. Ultrathin body InAlN/GaN HEMTs for high-temperature (600°C) electronics [J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(4): 496-498.
- [4] 马洪宇, 黄庆安, 秦明. 谐振式 MEMS 温度传感器设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2022-2027.
MA H Y, HUANG Q A, QIN M. Design of resonant MEMS temperature sensor[J]. Optical and Precision Engineering, 2010, 18(9): 2022-2027.
- [5] CAGLIANI A, FISCHER L M, LYAGER J, et al. Investigation of peptide based surface functionalization for copper ions detection using an ultrasensitive mechanical microresonator [J]. Sensors and Actuators: B, 2011, 160(1): 1250-1254.
- [6] CHENG H, EBADI S, GONG X. A low-profile wireless passive temperature sensor using resonator/antenna integration up to 1100°C [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 369-372.
- [7] 李来超, 余煜玺, 黄奇凡, 等. PDC-SiCN 陶瓷基无线无源温度传感器的制备[J]. 功能材料, 2017, 48(7): 7169-7172.
LI L C, YU Y X, HUANG Q F, et al. Fabrication of PDC-SiCN ceramic based wireless passive temperature sensors[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(7): 7169-7172.
- [8] SARKAR S, GAN Z, AN L, et al. Structural evolution of polymer-derived amorphous SiBCN ceramics at high temperature [J]. The Journal of Physical Chemistry: C, 2011, 115(50): 24993-25000.
- [9] 谭僖, 刘伟, 曹腊梅, 等. LaPO₄ 涂层对 C 纤维增强 SiBCN 陶瓷基复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(6): 106-112.
TAN X, LIU W, CAO L M, et al. Effects of LaPO₄ coating on properties of carbon fiber reinforced SiBCN ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(6): 106-112.
- [10] MÜLLER A, GERSTEL P, BUTCHEREIT E, et al. Si/B/C/N/Al precursor-derived ceramics: synthesis, high temperature behaviour and oxidation resistance[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(12): 3409-3417.
- [11] CHEN Y, YANG X, CAO Y, et al. Effect of pyrolysis temperature on the electric conductivity of polymer-derived silicoboron carbonitride [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(10): 2163-2167.
- [12] HERMANN A M, WANG Y T, RAMAKRISHNAN P A, et al. Structure and electronic transport properties of Si-(B)-C-N ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(10): 2260-2264.
- [13] KUMAR N V R, PRINZ S, CAI Y, et al. Crystallization and creep behavior of Si-B-C-N ceramics [J]. Acta Materialia, 2005, 53(17): 4567-4578.
- [14] REN X, EBADI S, CHEN Y, et al. Characterization of SiCN ceramic material dielectric properties at high temperatures for harsh environment sensing applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(2): 960-971.
- [15] CHENG H, REN X, EBADI S, et al. Wireless passive temperature sensors using integrated cylindrical resonator/antenna for harsh-environment applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1453-1462.
- [16] LI Y, YU Y X, SAN H S, et al. Wireless passive polymer-derived SiCN ceramic sensor with integrated resonator/antenna [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(16): 163505.
- [17] YE F, ZHANG L, YIN X, et al. Dielectric and EMW absorbing properties of PDCs-SiBCN annealed at different temperatures [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(8): 1469-1477.

基金项目:国家自然科学基金(51675452);国防科技工业核动力技术创新中心专项科研项目(HDLCXZX-2019-ZH-025)

收稿日期:2018-11-13;**修订日期:**2019-02-26

通讯作者:余煜玺(1974—),男,博士,教授,主要研究极端环境应用的新材料与器件,联系地址:福建省厦门市思明区思明南路 422 号厦门大学材料学院(361005),E-mail:yu_heart@xmu.edu.cn

(本文责编:杨 雪)