# The Design of High Temperature Sensor Based on S-Type Electromagnetic Metamaterial*

ZHANG Chunli[1,2,3,4], WU Qiannan[1,2,3,4*], ZHAI Rongding[1,2,3,4], LIU Yanfei[1,2,3,4], LI Mengwei[2,3,4,5]

(1.School of Semiconductor and Physics, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
2.The Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
3.The Center for Microsystem Integration, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
4.College of Instrumentation and Intelligent Future Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
5.School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China)

**Abstract**: To solve the problems of small range and low sensitivity of metamaterial temperature sensors, an s-type metamaterial temperature sensor which is based on silicon carbide is designed. The simulation of the metamaterial temperature sensor is carreid out by using the CST Studio Suite. The length, width, thickness, strip clearance of the metal strip and thickness of substrate are designed and optimized when other structural parameters are determined. The optimal size of the sensor structure is determined. Meanwhile, the influence of the resonant frequency on the temperature is analyzed. These show that the average sensitivity can reach 5.674 MHz/℃ at 28 ℃ ~ 1 000 ℃. It is five times more sensitive than previously reported high temperature sensors. This high sensitivity temperature sensor can provide a technical means for high temperature measurement in aero-engine, weapon equipment and other systems.

**Key words**: temperature sensor; electromagnetic metamaterial; silicon carbon nitride; S-Type; high temperature sensor; high sensitivity
**EEACC**: 7230; 1300 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2024.03.003

# 一种基于 S 型电磁超材料的高温温度传感器设计*

张春丽[1,2,3,4], 吴倩楠[1,2,3,4*], 翟荣锭[1,2,3,4], 刘雁飞[1,2,3,4], 李孟委[2,3,4,5]

(1.中北大学半导体与物理学院, 山西 太原 030051; 2.中北大学前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051;
3.中北大学微系统集成研究中心, 山西 太原 030051; 4.中北大学仪器与智能未来技术学院, 山西 太原 030051;
5.中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

**摘 要**: 针对目前超材料温度传感器存在的量程小且灵敏度较低的问题, 设计了一种碳氮化硅基的 S 型超材料的高温传感器。通过 CST 电磁仿真软件对超材料温度传感器进行模拟仿真, 在其他结构参数一定的情况下, 对金属条的长度、宽度、厚度、条间隙及基板厚度等参数进行了设计与优化, 确定了传感器结构的最佳尺寸, 同时分析了传感器的谐振频率对温度的影响。结果表明, 在 28 ℃ ~ 1 000 ℃下平均灵敏度可达 5.674 MHz/℃。与之前报道的高温传感器相比, 灵敏度提高了 5 倍, 这种高灵敏度温度传感器可为航空发动机、武器装备等系统中的高温测试提供一种技术手段。

**关键词**: 温度传感器; 电磁超材料; 碳氮化硅; S 型; 高温传感器; 高灵敏度
**中图分类号**: O433 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2024)03-0389-07

电磁超材料(Electromagnetic Metamaterial)是一种具有自然界中未发现的新型电磁特性的合成结构材料[1]。近年来, 在微纳米尺度上设计和制造超材料的不断进步使超材料研究达到了先进水平, 超材料与传感之间的关系使两者的应用在这一特定领域有了新的发展。此外, 基于超材料的传感器研究已经取得了相当大的成果, 它可以检测物体的信息且不会对被测物体造成破坏, 其采用的无损检测技术引起了研究者们的兴趣[2-7], 例如将超材料应用在湿度、应力、温度、裂纹等传感器中[8-10], 其中, 温度传感是电磁超材料中的关键研究和应用领域。温度传感器系统是许多工业生产中不可替代的组件, 用于监控生产或确保安全, 如飞机、核反应堆和发电厂, 高灵敏度和简单的温度传感器对系统集成非常重要[11-13]。

2010 年, Varadan 等[14]研究了基于 LTCC 基片的电磁超材料温度传感器, 结果表明, 与电导率、热膨胀相比, 介电常数是引起谐振频率变化的主要原因(占 84.03%); 2012 年, Ekmekci 等[15]探索了以海水为背景介质的 SRR 温度传感特性, 得出了该传感器温度在 10 ℃ ~ 30 ℃的平均精度范围为 7.9 MHz/℃; 2014

**项目来源**: 山西省双一流人才计划建设项目(11012315); 山西省双一流学科建设国家一流课程建设项目(11013168); 山西省双一流学科建设项目(11013351); 山西省双一流学科国家级未来技术学院建设项目(11013169)
**收稿日期**: 2023-10-27 **修改日期**: 2023-12-09

年,张福利等[16]使用了钛酸钡($Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$,BST)作为介电型超材料的温度敏感介质,并分析了温度传感机制,得到了在 10 ℃~50 ℃的温度范围内其灵敏度约为 25 MHz/℃,同时也证明了钛酸钡的介电常数随着温度的升高而减小;2015 年,Karim 等[17]设计了闭环谐振器(CRR)和各种基于铌酸锂($LiNbO_3$)的开环谐振器,并比较了它们各自的温度灵敏度性能,这种传感器在 450 ℃~800 ℃温度范围内的灵敏度为 7.286 MHz/℃;2017 年,Karim 等[18]进一步设计了嵌入多层电介质基板中的 CRR 阵列,其采用 70%体积分数的氮化硼(BN)和 30%体积分数的钛酸钡($BaTiO_3$)的混合物作为介质基底,得到在 23 ℃~200 ℃温度范围内的灵敏度为 0.462 MHz/℃的温度传感器;程海涛等[19]设计了 50 ℃~1 050 ℃且灵敏度为 580 kHz/℃的温度传感器;2016 年,中北大学熊继军等[20]报道了一种中心频率为 2.4 GHz 的传感器,该传感器在 27 ℃~800 ℃的灵敏度为 190 kHz/℃。

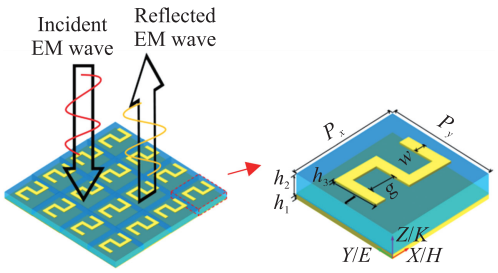
然而,上述介绍的基于超材料的温度传感器测温范围有限,高温下灵敏度较低,量程和灵敏度无法同时达到最优将限制其在实际中的应用。

本文提出了一种碳氮化硅基的 S 型超材料的高温传感器,其依赖于碳氮化硅衬底材料本身的属性,该材料在高温下的介电常数变化量较大,与以往的高温传感器相比,具有较高的灵敏度。通过分析一些结构参数对传感性能的影响,确定了传感器的最佳结构尺寸,最终得到谐振频率与温度的关系。

## 1 传感器的设计与基本原理

### 1.1 结构设计

本文设计的 S 型超材料温度传感器如图 1 所示。从图 1(a)可以看出,S 型结构的上表面被 $y$ 极化方向的入射波垂直照射。图 1(b)为超材料的单元结构图。超材料的基本单元由三层结构组成,上层由两个平行和三个垂直相连的金属条组成,$l$、$w$、$g$ 分别为金属条的长度、宽度、条间隙,金属条的厚度为 $h_3$;中间层采用厚度为 $h_2$ 的碳氮化硅材料;底层是厚度为 $h_1$ 的金属薄膜,其覆盖在介质层的下表面用来阻挡电磁波的透射。其中,上层的金属条与底层的金属薄膜均为金,金的电导率为 $4.561\times10^7$ S/m。该单元的结构周期性地排列在 $x$-$y$ 平面上,其单元几何尺寸为 $P_x=P_y=P=6.0$ mm。传感器单元结构的初始几何参数如表 1 所示。




(a) 周期结构图 (b) 单元结构图

**图 1 超材料温度传感器结构示意图**

**表 1 单元结构几何参数值**

| 参数 | 尺寸/mm | 参数 | 尺寸/mm |
|---|---|---|---|
| $P$ | 6.0 | $h_1$ | 0.065 |
| $l$ | 2.8 | $h_2$ | 0.1 |
| $w$ | 0.4 | $h_3$ | 0.035 |
| $g$ | 2.0 | | |

### 1.2 原理分析

该传感器的谐振频率为:

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_sC_s}} \tag{1}$$

式中:$L_s$、$C_s$ 分别为等效电感、等效电容,当 S 型结构及参数确定后,等效电容的大小由基板材料决定。

基板材料为聚合物衍生陶瓷碳氮化硅 SiCN(Polymer-Derived Ceramic Silicon Carbon Nitride, PDC-SiCN),由于其具有耐超高温的特性[21-23],因而在高温应用方面已成为热点。式(2)为 PDC-SiCN 的驰豫时间随温度的变化关系:

$$\tau(T)=\tau_0\exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \tag{2}$$

式中:$\tau(T)$是与温度相关的极化驰豫时间,$T$ 是温度,$\tau_0$是前因数,$E_\alpha$ 是活化能,$R$ 是气体常数。从式(2)可知,驰豫时间与温度呈负相关关系,而驰豫时间与 SiCN 介电常数的关系为:

$$\varepsilon'=\varepsilon_\alpha+\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\alpha}{1+\omega^2\times\tau(T)^2} \tag{3}$$

式中:$\varepsilon_s$ 是静态介电常数,$\varepsilon_\alpha$ 是高频极限下的相对介电常数,$\omega$ 是角频率。碳氮化硅的介电常数随温度的升高而逐渐增大,这种正相关性满足温度传感机制的要求。从文献[24]可知:在高温环境下,改变相同的温度导致基板材料介电常数较大的改变,则等效电容也会发生较大的变化,因而产生较大的频移量,传感器最终获得较高的灵敏度。

## 2 传感器的仿真与优化

### 2.1 仿真

利用三维电磁场仿真软件(CST Microwave Studio)对传感器的反射谱进行仿真模拟。如图 1(a)所示,有一束电场沿 $y$ 轴向极化的入射电磁波,并沿

$z$ 轴负向垂直传播并照在超材料结构的表面上。将 $x$ 方向、$y$ 方向设定为周期性边界状态，将 $z$ 方向都设定为开放边界状态。传感器的性能可通过响应曲线中的回波损耗来判断，在常温下传感器的谐振频率如图 2 所示。

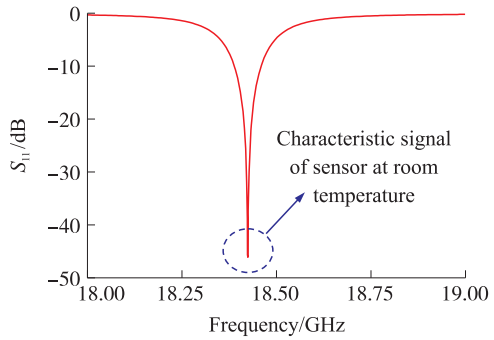
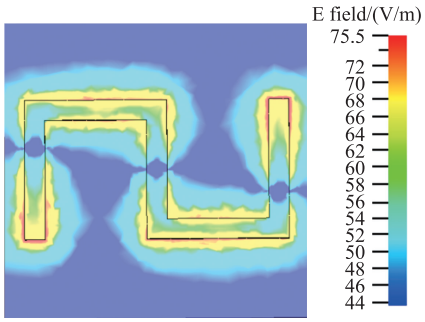


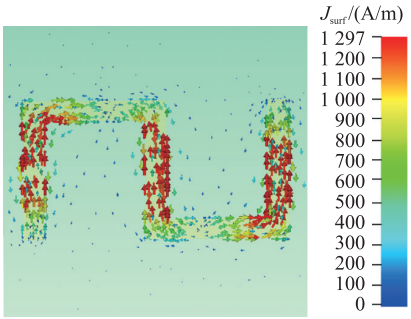

**图 2　常温下传感器的谐振频率**

图 2 表明，常温下在 18.425 GHz 处有一个明显的谐振，该谐振点上的回波损耗为−46.03 dB。

如图 3 所示，利用 CST 仿真软件得出在谐振频率 $f$=18.425 GHz 下的电场分布和表面的电流分布情况。从图 3(a)可以看出，电场集中于两个水平金属条、左侧金属条的下部和右侧金属条的上部；从图 3(b)可以看出，三个垂直的金属条都是电流的主要分布区，在水平金属条上几乎没有电流，这是因为在水平金属条的左右两个方向上都同时产生了电流，而这两个方向的电流会相互影响而不显示。




(a) 电场分布

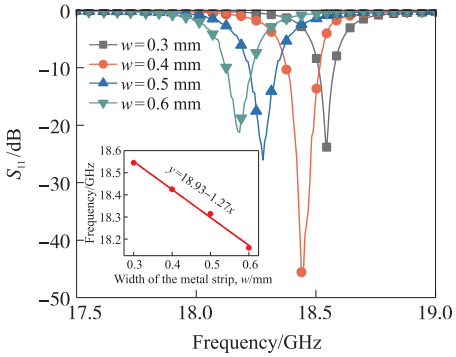



(b) 表面电流分布

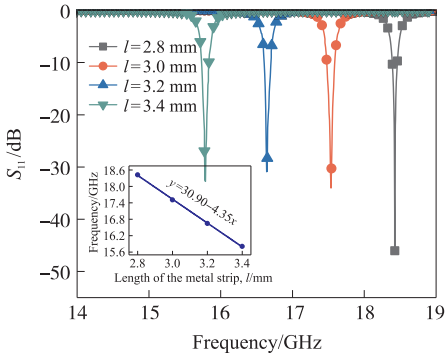
**图 3　传感器在 $f$=18.425 GHz 时的电场及表面电流分布**

## 2.2　优化

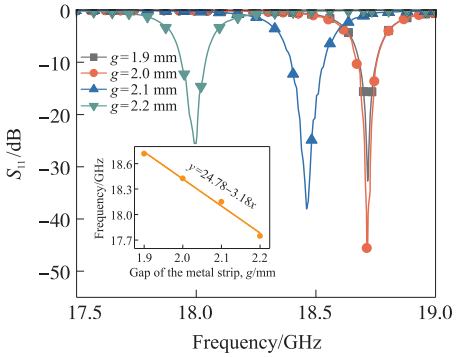
为了提高该温度传感器的灵敏度，通过 CST 仿真软件模拟了不同金属条的宽度 $w$、长度 $l$、金属条间隙 $g$、厚度 $h_3$ 对其灵敏度的影响，其中，在仿真优化的条件下保持其余参数的初始值不变以获得最敏感的结构参数。仿真结果如图 4 所示。



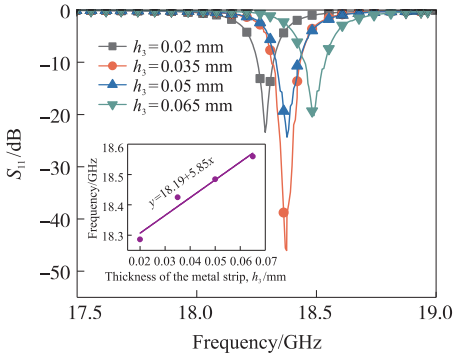

(a) 金属条的宽度$w$




(b) 金属条的长度$l$




(c) 金属条的间隙$g$




(d) 金属条的厚度$h_3$

**图 4　金属条结构参数的优化分析**

从图 4 可得到金属条的宽度 $w$、长度 $l$、间隙 $g$ 和厚度 $h_3$ 都会影响传感器的谐振频率。当 $w$、$l$、$g$ 增加时,会使谐振频率降低。图 4(a)所示是当 S 型谐振器单元金属条长度 $l=2.8$ mm、间隙 $g=2.0$ mm、厚度 $h_3=0.035$ mm 时的 $S_{11}$ 曲线,从图中可以看出:由于金属条的宽度 $w$ 的增大使谐振频率逐步地向低频区偏移,当 $w=0.4$ mm 时,$S_{11}$ 值大约是其余 $w$ 值对应下该值的 2 倍,约为−50 dB。品质因数 $Q$ 是共振频率与最大半宽度的比值,此处的 $Q$ 值较高,大约为 921.25。因此,$w=0.4$ mm 为金属条的最佳宽度;图 4(b)所示为 S 型谐振器单元金属条宽度 $w=0.4$ mm、间隙 $g=2.0$ mm、厚度 $h_3=0.035$ mm 时的 $S_{11}$ 曲线,从图中可以看出:谐振频率因 $l$ 的增加逐渐向低频处移动,$l$ 增加使式(1)中的 $L_s$ 增大,因而传感器的谐振频率减小。金属条长 $l$ 在 2.8 mm~3.4 mm 范围内频率的改变量大致相同,在 $l=2.8$ mm 时的半峰全宽较小,$Q$ 值较大,传感器具有较小的损耗,因此,$l=2.8$ mm 为金属条的最佳长度;图 4(c)所示为 S 型谐振器单元金属条宽度 $w=0.4$ mm、长度 $l=2.8$ mm、厚度 $h_3=0.035$ mm 时的 $S_{11}$ 曲线,增加金属条间隙 $g$,谐振频率向低频处移动,从图中可以看出,频率的改变量随着 $g$ 的增加而增大,而 $Q$ 值在 $g=2.0$ mm 时较高,因此,$g=2.0$ mm 为金属条的最佳间隙;图 4(d)所示为 S 型谐振器单元金属条宽度 $w=0.4$ mm、长度 $l=2.8$ mm、间隙 $g=2.0$ mm 时的 $S_{11}$ 曲线,随着 $h_3$ 的增加,谐振频率逐渐向高频处移动并且在 $h_3=0.035$ mm 时达到较大的 $Q$ 值,且有良好的回波响应,此处的 $S_{11}$ 值大约是其他金属条厚度下的 2 倍。因此,$h_3=0.035$ mm 为金属条的最佳厚度。

对 S 型金属条各参数进行优化后,保持金属条的宽度、长度、间隙、厚度共 4 个结构参数不变,继续优化衬底的厚度,如图 5 所示。

由图 5 可知,当 $w=0.4$ mm、$l=2.8$ mm、$g=2.0$ mm、$h_3=0.035$ mm、其他结构参数不变时,增加衬底厚度 $h_2$,谐振频率因与其呈正相关关系,则逐渐向高频方向移动,这是因为 $h_2$ 增大,式(1)中的 $C_s$ 就会减小,该传感器的谐振频率便会增大。从图中可以看出:与图 4 相比,衬底厚度 $h_2$ 对频移影响较大,当衬底厚度 $h_2$ 逐渐从 0.05 mm 增加到 0.15 mm 的过程中,传感器的回波损耗先变大后变小,在 $h_2=0.10$ mm 时损耗最大,此处 $S_{11}$ 值大约为其他 $h_2$ 数值下 $S_{11}$ 值的 5 倍,且此处的 $Q$ 值较高。

由图 4 和图 5 可知,$w$、$l$、$g$、$h_3$ 和 $h_2$ 是影响传感器性能的主要结构参数。通过优化与分析该传感器结构中的各个参数,最终确定传感器单元的最佳结构尺寸,如表 1 所示。在 $w=0.4$ mm、$l=2.8$ mm、$g=2.0$ mm、$h_3=0.035$ mm、$h_1=0.065$ mm、$h_2=0.10$ mm 时,该传感器具有良好的回波响应,且 $Q$ 值可达 921.25。

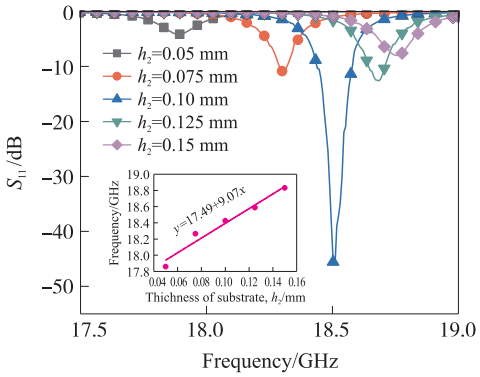



**图 5 衬底厚度 $h_2$ 的优化分析**

## 3 分析与讨论

经过优化分析后,确定传感器在常温下的谐振频率为 18.425 GHz,如图 2 所示。接着通过仿真分析了 28 ℃~1 000 ℃温度范围内不同温度下的谐振频率。以碳氮化硅为基板材料,从 28 ℃升高到 1 000 ℃时,基板的介电常数从 5.2 增加到 11.0。不同温度下的介电常数分别设置为 5.2(@28 ℃)、5.3(@200 ℃)、5.4(@300 ℃)、5.8(@400 ℃)、6.4(@500 ℃)、7.0(@600 ℃)、8.2(@700 ℃)、9.3(@800 ℃)、10.0(@900 ℃)和 11.0(@1 000 ℃)[24],因其与温度呈单调递增关系,同时影响着谐振器的谐振频率,所以随着温度的改变,谐振频率也会发生变化。为了说明这个现象,得到了图 6 所示的温度从 28 ℃到 1 000 ℃的传感器谐振频率曲线。

图 6 模拟了不同温度下传感器的谐振频率曲线。仿真结果表明:当环境温度从 28 ℃升高到 1 000 ℃时,谐振频率发生了降低,相应地从 18.425 GHz 降低到 12.910 GHz。

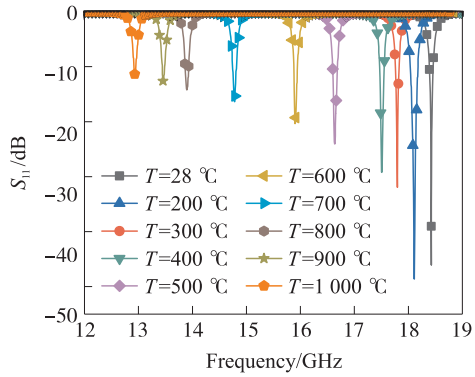



**图 6 从 28 ℃到 1 000 ℃的传感器的谐振频率曲线**

为进一步说明温度与回波损耗的关系,得到了图 7 所示的光谱图。

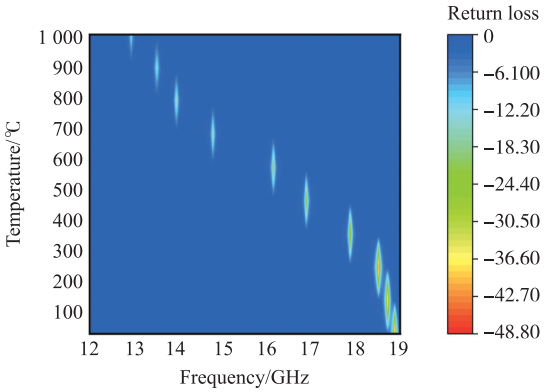



**图 7　温度与回波损耗 $S_{11}$ 的关系**

图 7 模拟了温度与回波损耗的关系。其结果表明:在同一频率下,当传感器达到某一温度范围时,随着温度的升高,回波损耗先增大后减小,最大回波损耗值所对应的温度为传感器发生谐振时的温度,即为传感温度。

灵敏度是衡量传感器性能的重要指标,通过对谐振频率偏移量与环境温度改变量的分析,得到灵敏度为:

$$S=\Delta f/\Delta T \tag{4}$$

式中:$S$ 为灵敏度,$\Delta f$ 为频移量,$\Delta T$ 为温度的变化量,在结构参数不变的情况下,对温度与频率进行了拟合分析,如图 8 所示。

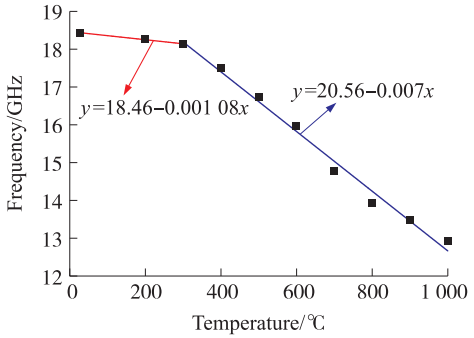



**图 8　谐振频率随温度变化的分段线性拟合曲线**

在 28 ℃~300 ℃、300 ℃~1 000 ℃的温度范围内,如图 8 所示,谐振频率有不同的变化率。然后再对各个数值展开线性模式的拟合,拟合效果为:

$$y=\begin{cases}18.46-0.001\ 08x & 0<x\leqslant 300\\ 20.56-0.007x & 300<x\leqslant 1\ 000\end{cases} \tag{5}$$

由图 8 可知,从 28 ℃到 300 ℃时,谐振频率降低了约 0.226 GHz;从 300 ℃到 1 000 ℃时,谐振频率降低了约 5.29 GHz,经分析后发现传感器在高温下拥有较高的灵敏度。当温度低于 300 ℃时,频移变化较小;当温度超过 300 ℃时,频移变化较大,因此该传感器在高温实际应用中可获得高灵敏度。接着从式(5)可知,在 28 ℃~300 ℃时,传感器的灵敏度为 1.08 MHz/℃;在 300 ℃~1 000 ℃时,其灵敏度为 7.0 MHz/℃。表 2 显示了本文与其他高温传感器性能的对比情况。

**表 2　不同类型超材料温度传感器的参数比较**

| Reference | Temperature Sensing Range/℃ | Operating Frequency/GHz | Substrate Material | Structure | Sensor Size/mm | Sensitivity/(MHz/℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| This paper | 28~1 000 | 18.425 | PDC-SiCN | S-Type | 6×6×0.1 | 5.674 |
| Ref. [20] | 50~1 050 | 5.07 | $Al_2O_3$ | Reflective patch | 9.3×8×0.635 | 0.58 |
| Ref. [25] | 50~1 000 | 5.12 | $Al_2O_3$ | Resonator/ Antenna Integration | 22.86×5.93× 1.016 | 0.40 |
| Ref. [26] | 28~1 100 | 2.42 | $Al_2O_3$ | SRR | $R=14, h=0.1$ | 0.95 |
| Ref. [27] | 25~1 000 | 11.34 | $Si_3N_4$ | CSRR-SICW | $R=7, h=1$ | 0.29 |

由表 2 可知,本文所提出的传感器通过使用高温陶瓷碳氮化硅材料扩大了传感器的传感范围,提高了其在高温下的灵敏度,相比于其他的超材料温度传感器而言,其灵敏度在相似的高温温度测量范围内可达传统的 5 倍,在高温环境下具有良好的应用价值,为高温传感提供了有效的技术手段。

## 4　总结

本文提出了一种基于碳氮化硅 SiCN(PDC-SiCN)的 S 型超材料温度传感器,得出该材料可使传感器在高温环境中具有较高的灵敏度。然后通过分析 S 型结构中金属条的长度、宽度、厚度、条间隙及金属薄膜和衬底的厚度对回波性能的影响,确定了传感器的最佳结构参数。最后,模拟仿真出温度与频率的函数关系,结果表明,温度从 28 ℃升高到 1 000 ℃时,该传感器的谐振频率从 18.425 GHz 下降到 12.910 GHz,在 28 ℃~300 ℃的灵敏度为 1.08 MHz/℃,300 ℃~1 000 ℃的灵敏度为 7.0 MHz/℃,28 ℃~1 000 ℃的平均灵敏度为 5.674 MHz/℃,与其他传感器[20,25-27]相比,具有较

高的灵敏度。此外,该传感器还具有结构简单、尺寸较小等特点,在航空发动机、武器装备、火箭发射、工业燃气轮机等系统中的高温环境下的温度测量方面具有一定的意义与价值。

**参考文献:**


[1] Cui T,Smith D,Liu R. Metamaterials:Theory,Design,and Applications[M]. Berlin,Germany:Springer Publishing Company,2009:1-392.

[2] Bhansali S,Rawat V,Jalal A,et al. Recent Advances in Metamaterial Split-Ring-Resonator Circuits as Biosensors and Therapeutic Agents[J]. Biosensors and Bioelectronics,2016,86(13):595-608.

[3] Zhang L,Sun X,Xu H,et al. Strain Sensitivity of Electric-Magnetic Coupling in Flexible Terahertz Metamaterials [J]. Plasmonics,2015,10(6):1331-1335.

[4] Hu X,Xu G,Wen L,et al. Metamaterial Absorber Integrated Microfluidic Terahertz Sensors[J]. Laser and Photonics Reviews,2016,10(6):962-969.

[5] Naqui J,Damm C,Wiens A,et al. Transmission Lines Loaded With Pairs of Stepped Impedance Resonators: Modeling and Application to Differential Permittivity Measurements [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques,2016,64(11):3864-3877.

[6] Su L,Martin F,Velez P,et al. Splitter/Combiner Microstrip Sections Loaded With Pairs of Complementary Split Ring Resonators (CSRRs): Modeling and Optimization for Differential Sensing Applications [J]. IEEE Transactionon Microwave Theory And Techniques,2016,64(12):4362-4370.

[7] Ozbey B,Unal E,Ertugrul H,et al. Wireless Displacement Sensing Enabled by Metamaterial Probes for Remote Structural Health Monitoring[J]. Sensors,2014,14(1):1691-1704.

[8] Chen T,Li S,Sun H. Metamaterials Application in Sensing[J]. Sensors,2012,12(3):2742-2765.

[9] Bakir M,Karaaslan M,Akgol O,et al. Multifunctional Metamaterial Sensor Applications Based on Chiral Nihility [J]. Optical and Quantum Electronics,2017,49(11):346.

[10] 王青敏. 可调介质超材料的设计与应用研究[D]. 北京:北京邮电大学,2020.

[11] Kairm H,Delfin D,Shuvo M,et al. Concept and Model of a Metamaterial-Based Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications[J]. IEEE Sensors Journal,2014,15(3):1445-1452.

[12] Yan D,Yang Y,Liang T,et al. Low-Cost Wireless Temperature Measurement: Design,Manufacture,and Testing of a PCB-Based Wireless Passive Temperature Sensor[J]. Sensors,2018,18(2):532.

[13] Childs P,Greenwood J,Long C. Review of Temperature Measurement[J]. Review of Scientific Instruments,2000,71(8):2959-2978.

[14] Varadan V V,Ji L M. Temperature Dependence of Resonances in Metamaterials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2010,58(10):2673-2681.

[15] Ekmekci E,Turhan-Sayan G. Multi-Functional Metamaterial Sensor Based on a Broad-Side Coupled SRR Topology with a Multi-Layer Substrate[J]. Applied Physics A:Materials Science and Processing,2013,110(1):189-197.

[16] Zhang F,Chen L,Wang Y,et al. Thermally Tunable Electric Mie Resonance of Dielectric Cut-Wire Type Metamaterial[J]. Optics Express,2014,22(21):24608-24913.

[17] Karim H,Shuvo M A I,Delfin D,et al. Development of Metamaterial Based Low Cost Passive Wireless Temperature Sensor[J]. Proceedings of SPIE,2014,9061:90612K.

[18] Karim H,Delfin D,Chavez L A,et al. Metamaterial Based Passive Wireless Temperature Sensor[J]. Advanced Engineering Materials,2017,19(5):1600741.

[19] Cheng H T,Ebadi S,Ren X H,et al. Wireless Passive High-Temperature Sensor Based on Multifunctional Reflective Patch Antenna up to 1 050 Degrees Centigrade [J]. Sensors And Actuators A:Physical,2015,222(11):204-211.

[20] Xiong J,Wu G,Tan Q,et al. Dielectrically Loaded Cylindrical Resonator-Based Wireless Passive High-Temperature Sensor[J]. Sensors,2016,16(12):2037.

[21] Colombo P,Mera G,Riedel R,et al. Polymer-Derived Ceramics:40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society,2010,93(7):1805-1837.

[22] Riedel R,Mera G,Hauser R,et al. Silicon-Based Polymer-Derived Ceramics:Synthesis Properties and Applications—A Review,Dedicated to Prof Dr Fritz Aldinger on the Occasion of his 65th Birthday[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan,2006,114(1330):425-444.

[23] Kroke E,Li Y,Konetschny C,et al. Silazane Derived Ceramics and Related Materials[J]. Materials Science and Engineering:R:Reports,2000,26(4):97-199.

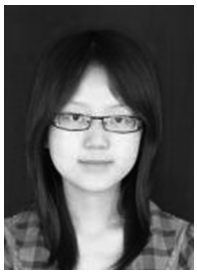
[24] Xu C,Xu S,Daniel J,et al. Temperature and Pressure Wireless Ceramic Sensor(Distance=0.5 Meter)for Extreme Environment Applications [J]. Sensors,2021,21(19):6648.

[25] Cheng H,Ebadi S,Gong X. A Low-Profile Wireless Passive Temperature Sensor Using Resonator/Antenna Integration Up to 1 000 ℃ [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2012,11(10):369-372.

[26] Lu F, Tan Q, Ji Y, et al. A Novel Metamaterial Inspired High-Temperature Microwave Sensor in Harsh Environments [J]. Sensors, 2018, 18(9): 2879.

[27] Su S, Ren T, Zhang L, et al. CSRR-SICW High Sensitivity High Temperature Sensor Based on Si3N4 Ceramics [J]. Micromachines, 2021, 12(4): 459.

**张春丽**(1993—),女,山西吕梁人,汉族,现为中北大学硕士研究生,从事不同衬底材料在高温环境下的射频性能研究,321774242@qq.com;



**吴倩楠**(1988—),通讯作者,女,山西太原人,汉族,博士研究生,中北大学教授,从事射频微机电器件,电磁超材料方向研究,qiannanwoo@nuc.edu.cn。