

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210572

太赫兹石墨烯贴片式高温传感器的设计与研究<sup>\*</sup>翟荣锭<sup>1,2,3,4</sup> 吴倩楠<sup>1,2,3,4</sup> 王俊强<sup>1,3</sup> 苏宁宁<sup>1,2,3,4</sup> 李孟委<sup>1,3</sup>(1. 中北大学前沿交叉科学研究院 太原 030051; 2. 中北大学半导体与物理学院 太原 030051;  
3. 中北大学微系统集成研究中心 太原 030051; 4. 中北大学理学院 太原 030051)

**摘要:** 设计了一种太赫兹石墨烯贴片式高温传感器,可解决现有温度传感器测温量程小、尺寸较大和灵敏度较低的问题。该传感器由六边形石墨烯薄膜、氧化铝衬底和金三层结构组成。通过优化石墨烯结构尺寸、氧化铝衬底厚度,得到大量程、高灵敏度的太赫兹 MEMS 高温传感器的特征尺寸。结果表明:该温度传感器在 3.0~5.0 THz 频段内,测温范围可从 25 °C~1 050 °C,灵敏度为 0.259 GHz/°C,整体体积为 20 μm×21 μm×14.5 μm。该传感器具有优异传感性能和较大的测温量程,可为高温环境下的航空发动机、火箭发射系统、恶劣环境监测等系统的测温提供一种技术方法。

**关键词:** 石墨烯;氧化铝薄膜;温度传感;太赫兹

中图分类号: O469 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

## Design and research of terahertz graphene patch type high temperature sensor

Zhai Rongding<sup>1,2,3,4</sup> Wu Qiannan<sup>1,2,3,4</sup> Wang Junqiang<sup>1,3</sup> Su Ningning<sup>1,2,3,4</sup> Li Mengwei<sup>1,3</sup>(1. Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. School of Semiconductor and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
3. Center for Microsystem Integration, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
4. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A terahertz graphene patch-type high-temperature sensor is designed to solve the problems of the small temperature measurement range, large size, and low sensitivity. The sensor is composed of a hexagonal graphene film, an alumina substrate, and a three-layer gold structure. The characteristic size of the terahertz MEMS high temperature sensor with large range and high sensitivity is obtained by optimizing the graphene structure size and alumina substrate thickness. The results show that the temperature sensor can measure temperatures ranging from 25 °C to 1 050 °C in a frequency range of 3.0~5.0 THz, with a sensitivity of 0.259 GHz/°C and an overall volume of 20 μm×21 μm×14.5 μm. The sensor has excellent sensing performance and a wide temperature range, allowing it to provide a technical method for measuring the temperature of an aero-engine, rocket launch system, or harsh environment monitoring system in a high temperature environment.

**Keywords:** graphene; alumina film; temperature sensing; terahertz

## 0 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波<sup>[1]</sup>,介于微波与红外光之间。太赫兹波在安全通信<sup>[2]</sup>、医学应用<sup>[3]</sup>、雷达探测<sup>[4]</sup>、成像<sup>[5]</sup>等各种领域内存在广阔的应用前景。随着太赫兹通信技术的迅速发展,目前已有众多科学家设计了多种可调控的太赫兹器件,如太赫兹天线<sup>[6-8]</sup>、太赫兹

吸波器<sup>[9-11]</sup>、太赫兹探测器<sup>[12]</sup>、太赫兹反射器<sup>[13]</sup>及太赫兹传感器<sup>[14]</sup>等。传感器能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,温度传感器能感受温度并转换成可用输出信号的传感器<sup>[15]</sup>,是所有传感器中应用价值较高的器件之一,其每年保持两位数以上的增长率。太赫兹温度传感技术因其具有高分辨率、大量程、小尺寸且高稳定性等特点近年来引起了众多研究者的关注。

收稿日期:2022-07-05

<sup>\*</sup> 基金项目:装备发展部预研项目、国防重点项目、山西省研究生教育改革研究课题(11012133)项目资助

目前,温度传感器的设计与制备在国内外已经取得了许多研究成果<sup>[16-23]</sup>。例如,2012年,美国的 Cheng 等<sup>[16]</sup>设计制备了基于氧化铝材料的无线无源温度传感器,测温高达 1 000 °C,在高温环境中具有良好的稳定性,尺寸在 22.86 mm × 5.93 mm × 1.016 mm。2019年,武汉科技大学的 Zou 等<sup>[17]</sup>设计了基于 CCP 结构和 InSb 的太赫兹超材料温度传感器,其工作频率范围在 0.4~2.0 THz,灵敏度为 10.3 GHz/°C,但检测范围仅为 -83 °C ~ -43 °C 之间,无法在高温环境下应用。2021年,印度 Appasani<sup>[18]</sup>设计了一种开槽花形谐振器的太赫兹超材料温度传感器,可实现温度调谐,工作频率范围在 0.4~2.2 THz,但温度测量范围为 -83 °C ~ -53 °C,无法在高温下应用。由此可见,现有的温度传感器普遍存在测温量程较小及灵敏度较低等问题,由于材料自身的属性限制了其在高温环境下的广泛应用,因此,降低太赫兹超材料传感器整体尺寸、提高测温量程和灵敏度成为了温度传感器研究的必然趋势。

本文提出了一种基于由石墨烯、氧化铝和金三层异质结构组成的太赫兹贴片式高温传感器。该传感器的主要工作原理是:环境温度的改变使得传感器衬底的电磁参数发生变化,进而引起电磁波共振频率的偏移,通过频率偏移反映温度的变化。通过优化石墨烯的形状、尺寸以及氧化铝薄膜衬底的厚度,得到具有高灵敏度的传感器结构的特征参数,与以往太赫兹温度传感器相比,具备小尺寸、大量程及高灵敏的特点,可为高温环境下的测温提供一种技术方法。

## 1 原理分析

### 1.1 石墨烯的电磁特性

石墨烯是一种新型蜂窝状二维平面碳原子材料,它具有较高的载流子迁移率,在室温下超过 100 000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>,其熔点高达 3 800 K,可承受超高温的外界温度,石墨烯的总电导率受带内贡献的影响<sup>[24]</sup>,其表面电导率通过 Kubo 式(1)和(2)计算得出:

$$\sigma(\omega, \mu_c, \tau, T) = \frac{2e^2 k_B T i}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \ln 2 \cosh \left[ \frac{\mu_c}{2k_B T} \right] + \frac{e^2}{4\hbar} \left[ H \left( \frac{\omega}{2} \right) + i \frac{4\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{H(\epsilon) - H \left( \frac{\omega}{2} \right)}{\omega^2 - 4\epsilon^2} d\epsilon \right] \quad (1)$$

$$H(\epsilon) = \frac{\sinh(\hbar\epsilon/k_B T)}{\cosh(\mu_c/k_B T) + \cosh(\hbar\epsilon/k_B T)} \quad (2)$$

式中: $e$ 是电子电荷, $\omega$ 是角频率, $\mu_c$ 是化学势, $\hbar$ 是约化普朗克常数, $k_B$ 是玻尔兹曼常数, $\tau$ 是弛豫时间, $T$ 是温度。石墨烯作用是能够有效辐射太赫兹电磁波。

在太赫兹频段内,频率越高,石墨烯的电导率越不受温度影响<sup>[23]</sup>,石墨烯的电导率主要受频率影响,石墨烯的总表面电导率由式(3)给出,其电导率可达 10<sup>8</sup> S/m<sup>[26]</sup>。

$$\sigma_s(\omega) = \frac{2e^2 k_B T i}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \ln \left( 2 \cosh \left( \frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right) \quad (3)$$

传感器的谐振频率由衬底材料的介电常数决定,传感器的谐振频率<sup>[22]</sup>由式(4)表示,综合式(4)~(7)可得出谐振频率与介电常数的关系。

$$f = \frac{c}{2(L + 2\Delta L) \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (5)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right) \quad (6)$$

$$W = \frac{c\sqrt{2}}{2f\sqrt{\epsilon + 1}} \quad (7)$$

其中, $c$ 是光速, $f$ 是谐振频率, $L$ 是贴片长度, $W$ 是贴片宽度, $\epsilon_{\text{reff}}$ 是有效介电常数, $\Delta L$ 是补片长度的延伸,它包括了边缘场,电场在贴片边缘出现边缘效应,这是电磁辐射的主要原因, $h$ 为衬底厚度, $\epsilon$ 为衬底的介电常数。

### 1.2 传感器传感原理

石墨烯高温传感器的传感原理如图 1 所示。当周围温度  $T$  逐渐升高时,直接导致温度敏感材料的介电常数  $\epsilon$  变化,进而导致传感器的谐振频率  $f_0$  将发生偏移,通过频率的偏移来反映环境的温度变化。通过接收传感器的回波损耗,即  $S_{11}$  参数,即可得到传感器在不同环境温度下的谐振频率,利用传感器谐振频率的偏移反映当前环境温度的变化。

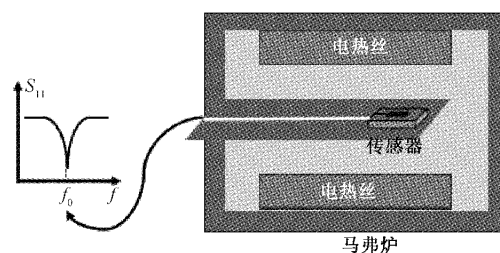


图1 石墨烯高温传感器的传感原理

### 1.3 氧化铝的电磁特性与温度的关系

氧化铝的介电常数随温度的升高而增大,当外界温度从 25 °C 升至 1 050 °C 时,氧化铝的介电常数从 9.7 递增至 11.4,在 100 °C ~ 1 000 °C 的温度范围内,每间隔 100 °C 其介电常数会有明显的变化,其数值分别为 9.73@100 °C, 9.86@200 °C, 9.98@300 °C, 10.07@400 °C, 10.21@500 °C, 10.41@600 °C, 10.62@700 °C, 10.84@800 °C, 11.02@900 °C, 11.2@1 000 °C。

因此,氧化铝作为传感器的衬底,其介电常数的变化将会反映传感器的谐振频率及灵敏度,即衬底介电常数可反映传感器的温度传感特性。

## 2 结构设计

本文设计了一种基于石墨烯的高温传感器,其结构如图 2 所示。该传感器由单层石墨烯薄膜、氧化铝衬底、背部金属三层异质结构组成。传感器的上表面是由厚度  $d=0.34\text{ nm}$ ,边长  $m=5\text{ }\mu\text{m}$  的单层石墨烯制成的六边形贴片,中间层是常温下介电常数为 9.7,厚度为  $14\text{ }\mu\text{m}$  的氧化铝薄膜,背部金属材料为 Au,整个传感器初始值长度  $l=20\text{ }\mu\text{m}$ ,宽度  $w=21\text{ }\mu\text{m}$ 。其结构参数如表 1 所示。

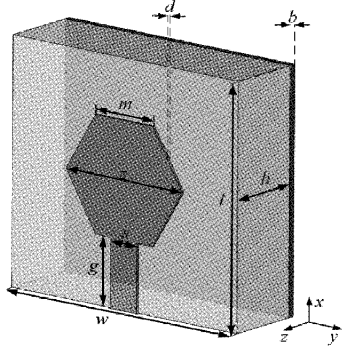


图 2 石墨烯高温传感器结构

表 1 太赫兹石墨烯高温传感器的结构参数

参数	数值/ $\mu\text{m}$
贴片边长 $m$	5
贴片长度 $z$	11
贴片厚度 $d$	0.000 34
微带线长度 $g$	6
微带线宽度 $s$	2.2
衬底厚度 $h$	14
基板长度 $l$	20
基板宽度 $w$	21
底层金属厚度 $b$	0.5

## 3 仿真分析

### 3.1 氧化铝衬底对传感器反射系数的影响

该传感器利用微带线侧馈方式分析传感器的回波损耗及谐振频率,同时利用时域有限差分法(finite difference time domain method, FDTD)分析了传感器在  $3.0\sim 5.0\text{ THz}$  的反射性能。

由于衬底厚度可影响传感器的谐振频率,因此对该传感器的氧化铝薄膜衬底厚度进行了仿真分析。为了确定氧化铝衬底厚度的影响,通过控制变量法,将其余参数保持不变,当衬底厚度  $h$  为  $9\text{ }\mu\text{m}$  时,其回波损耗如图 3 所示,在  $3.0\sim 5.0\text{ THz}$  范围内,谐振频率为  $4.05\text{ THz}$ ,其回波损耗为  $-17.67\text{ dB}$ ,继续将衬底厚度按照  $1\text{ }\mu\text{m}$  步长逐渐增加到  $17\text{ }\mu\text{m}$ ,得出氧化铝薄膜厚度的回波损耗  $S_{11}$  的变化曲线如

图 3 所示。衬底厚度在  $9\sim 15\text{ }\mu\text{m}$  的变化范围内,该传感器的谐振频率随氧化铝厚度增加而降低。回波损耗在  $9\sim 14\text{ }\mu\text{m}$  的变化范围,随氧化铝厚度增加而增大;在  $14\sim 15\text{ }\mu\text{m}$  的变化范围,随氧化铝厚度增加而减小。衬底厚度在  $16\text{ }\mu\text{m}$  及  $17\text{ }\mu\text{m}$  时,传感器的回波损耗小于  $-5\text{ dB}$ ,其将不能用于温度测量。

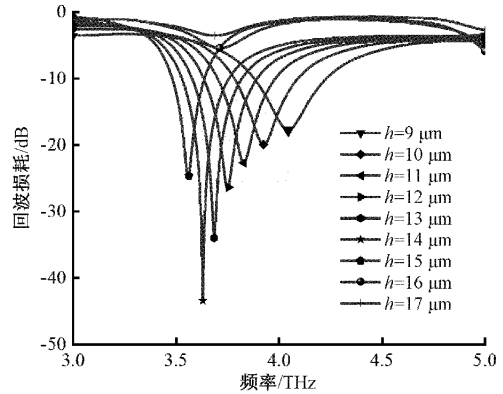


图 3 石墨烯温度传感器的在不同衬底厚度下的回波损耗

因此,确定该传感器衬底氧化铝薄膜的厚度为  $14\text{ }\mu\text{m}$  时为最优值,谐振频率较强,回波信号最大。谐振频率为  $3.636\text{ THz}$ ,回波损耗为  $-44.82\text{ dB}$ 。由此得出结论是通过改变传感器衬底的厚度,可以改变温度传感器的谐振频率和工作范围。衬底厚度对回波损耗、谐振频率及带宽的影响如表 2。

表 2 衬底厚度对回波损耗、谐振频率及带宽的影响

基板厚度	谐振频率	回波损耗	$-10\text{ dB}$ 带宽
$h/\mu\text{m}$	$f/\text{THz}$	$S_{11}/\text{dB}$	$B/\text{THz}$
9	4.050	-17.67	0.348
11	3.834	-22.52	0.278
13	3.690	-33.21	0.240
14	3.636	-44.82	0.226
15	3.564	-25.17	0.154

### 3.2 石墨烯结构对传感器反射系数的影响

为进一步了解该石墨烯结构对回波损耗特性的影响,首先分析了石墨烯层数对回波损耗特性的影响,在保证其他参数相同条件下对单层及多层石墨烯进行模拟分析,结果如图 4 所示。石墨烯层数由 1 层增加至 10 层,其回波损耗曲线重合,其谐振频率为  $3.602\text{ THz}$ ,回波损耗为  $-26.45\text{ dB}$ 。说明随着石墨烯层数的递增,该温度传感器的回波损耗几乎无影响,其谐振频率也无红移产生,因此,单纯的叠加多层石墨烯将对温度传感器回波损耗无影响。

其次,针对石墨烯贴片的结构进行分析,在石墨烯贴片面积相同的条件下,为得出不同贴片的石墨烯结构将会对传感器的谐振频率及回波损耗的影响,分别进行设计对比矩形、圆形、正方形及六边形 4 种石墨烯贴片结构。4 种石

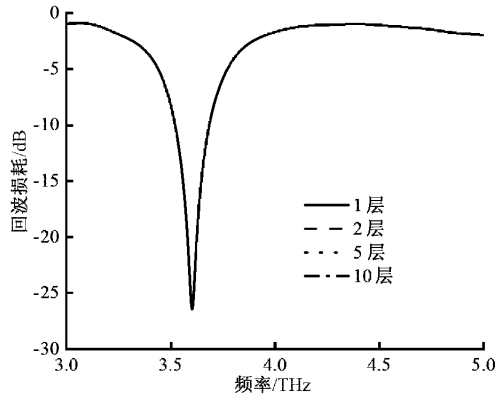


图4 多层石墨烯的回波损耗特性

石墨烯结构的传感器其贴片结构对回波损耗 S11 的影响如图5所示。

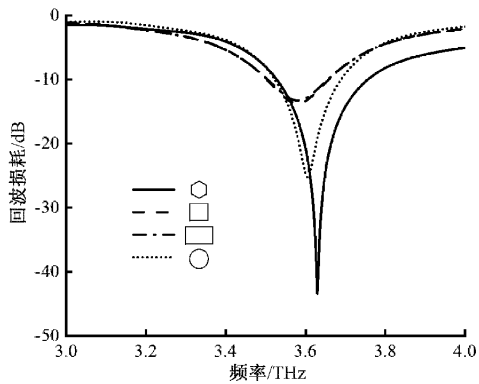


图5 不同石墨烯贴片结构的回波损耗仿真结果

由图5可知,六边形结构回波损耗为-44.82 dB@3.636 THz,正方形结构回波损耗为-13.73 dB@3.58 THz,长方形结构回波损耗为-13.25 dB@3.58 THz,圆形结构回波损耗为-25.25 dB@3.612 THz。经分析,六边形石墨烯结构谐振频率和回波损耗都最大,主要原因是石墨烯蜂窝状结构与六边形结构相近,在辐射时能更好的发生电磁共振现象。圆形贴片谐振频率较小,矩形及正方形谐振频率最小,回波损耗都最小且较为接近。因此,选择六边形石墨烯结构更为适合作传感器的贴片结构。

### 3.3 石墨烯温度传感器传感性能分析

为了得到传感器的温度传感性能,通过对 25 °C 至 1 050 °C 之间的部分温度进行模拟研究,温度以 100 °C 的步进进行一次模拟仿真。

该石墨烯传感器的谐振频率在不同温度下回波损耗如图6所示,该传感器的谐振频率及回波损耗在 3.0 ~ 4.0 THz 范围内都随温度升高而减小。

当外界温度从 25 °C 升高至 1 050 °C,该温度传感器的谐振频率由 3.636 THz 降低至 3.37 THz,回波损耗由 -44.82 dB 提升至 -22.79 dB。因此,该石墨烯温度传感器具有优异的温度传感性能。

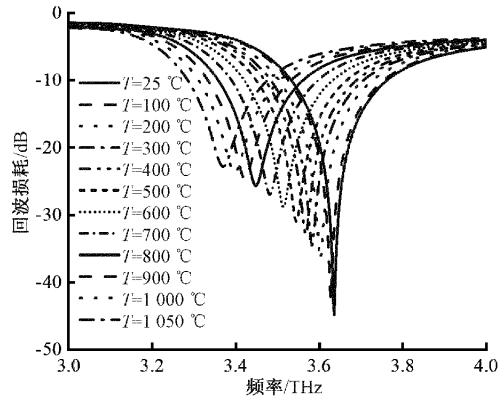


图6 不同温度下石墨烯高温传感器谐振频率的模拟结果

对该传感器的灵敏度进行模拟分析,仿真结果表明,在 25 °C ~ 1 050 °C 的温度范围内,对传感器的温度灵敏度进行线性拟合,拟合曲线如图7所示,其拟合表达式如式(8)所示。

$$y = -0.259 \times 10^{-3}x + 3.66 \quad (8)$$

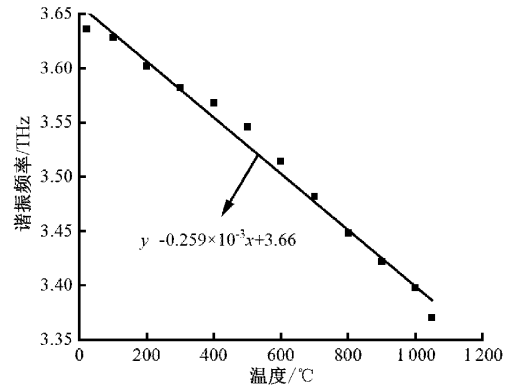


图7 石墨烯高温传感器的谐振频率随温度变化的关系及拟合曲线

图7表明传感器的谐振频率在不同温度下几乎呈线性变化,传感器在 3.0 ~ 4.0 THz 频段内具有大范围测温的能力。谐振频率随温度的升高而降低。温度灵敏度约为 0.259 GHz/°C。

表3所示为本文设计的传感器与其他传感器的性能对比。本文设计的传感器具有以下优点:第一,温度传感范围大,可满足高温测量;第二,谐振频率变化大,谐振频率信号较强,测温灵敏度较高;第三,整体体积小。

表3 太赫兹温度传感器的性能参数对比

文献	工作频率/THz	传感范围/°C	灵敏度/(GHz/°C)	尺寸/ $\mu\text{m}^3$
[9]	0.01~0.3	-73~227	0.319	80×80×200
[10]	1.2~2.4	-13~37	15.24	60×60×7
[19]	$11 \times 10^{-3} \sim 12 \times 10^{-3}$	25~1 000	$289 \times 10^{-6}$	$7\ 000 \times 7\ 000 \times 1\ 000$
本文*	3.0~5.0	25~1 050	0.259	20×21×14.5

注:\* 仅表示理论仿真

#### 4 工艺流程设计

本文设计的传感器主要可通过备片、氧化、高温处理和电镀工艺完成加工。主要流程如图 8 所示。

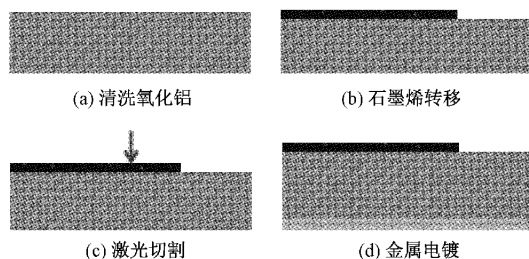


图 8 石墨烯贴片式高温传感器工艺流程

第 1 步,将氧化铝基板放置在溶液中清洗,如图 8(a)所示。

第 2 步,制备石墨烯薄膜。主要步骤为配置氧化石墨烯水溶液、抽虑、烘干。之后在高温炉中进行高温处理,以氮气作为炉中保护气,处理后,制得石墨烯薄膜。最后将石墨烯薄膜转移到氧化铝基板正面上,如图 8(b)所示,用激光进行切割成型,如图 8(c)所示。

第 3 步,在氧化铝背面进行金属电镀,如图 8(d)所示。

#### 5 结 论

本文提出了一种太赫兹石墨烯贴片式高温传感器,通过仿真分析并确定了传感器的结构尺寸、量程及灵敏度。仿真结果表明:在该高温传感器在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,测温灵敏度可达  $0.259\text{ GHz}/^{\circ}\text{C}$ ,优于同波段的其他传感器的灵敏度。该贴片式传感器结构简单,易于加工,且具有高灵敏度、小体积、测温量大等优点,为航空发动机、火箭发射系统等高温环境下的测温提供一种技术方法。

#### 参考文献

- [1] LIU S G, ZHONG R B. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.
- [2] XIE S, LI H R, LI L X, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.
- [3] YE H, XI M R, CAO H Y, et al. Applications of terahertz technology in medical science and research progress [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(5): 4-13.
- [4] WANG J Y, ZHANG X C, ZHOU S Y, et al. The applications and development of terahertz radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(8): 844-850.
- [5] ZHANG Z, LIN X L, ZHANG J B, et al. Improvement method for terahertz imaging quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46 (11): 298-302.
- [6] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31 (12): 685-694.
- [7] THAMPY A S, DARAK M S, DHAMODHARAN S K. Analysis of graphene based optically transparent patch antenna for terahertz communications[J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2015, 66: 67-73.
- [8] KHAN M A K, ULLAH M I, ALIM M A. High-gain and ultrawide-band graphene patch antenna with photonic crystal covering 96.48% of the terahertz band[J]. Optik, 2021, 227: 166056, DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.166056.
- [9] LI W Y, CHENG Y Z. Dual-band tunable terahertz perfect metamaterial absorber based on strontium titanate (STO) resonator structure [J]. Optics Communications, 2020, 462: 125265, DOI:10.1016/j.optcom.2020.125265.
- [10] ZOU H J, CHENG Y Z. A thermally tunable terahertz three-dimensional perfect metamaterial absorber for temperature sensing application [J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(18): 2050207, DOI:10.1142/S0217984920502073.
- [11] CHENG Y Z, LI Z R, CHEN Z Z. Terahertz perfect absorber based on InSb metasurface for both temperature and refractive index sensing[J]. Optical Materials, 2021, 117: 111129, DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111129.
- [12] LI H, CHEN P, TIAN J S, et al. High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(2): 349-356.
- [13] 王建扬, 吴倩楠. 基于双层格栅的超材料太赫兹宽频反射器[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 329-337.
- [14] 霍红, 延凤平, 王伟, 等. 基于超材料的太赫兹高灵敏度传感器的设计[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 330-340.
- [15] 朱晓旭, 周修文. 温度传感器[J]. 电子测试, 2013, 5: 44-45.
- [16] CHENG H, EBADI S, GONG X. A low-profile wireless passive temperature sensor using resonator/antenna integration up to  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 369-372.

- [17] ZOU H J, CHENG Y Z. Design of a six-band terahertz metamaterial absorber for temperature sensing application[J]. *Optical Materials*, 2019, 88: 674-679.
- [18] APPASANI B. Temperature tunable seven band terahertz metamaterial absorber using slotted flower-shaped resonator on an InSb substrate[J]. *Plasmonics*, 2021, 16(3): 833-839.
- [19] SU S J, REN T, ZHANG L L. CSRR-SICW high sensitivity high temperature sensor based on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics[J]. *Micromachines*, 2021, 12(4): 459, DOI:10.3390/mi12040459.
- [20] 李焕,董和磊,韩磊,等. 基于HTCC的无线无源温度传感器的设计[J]. *电子测量技术*, 2021, 8: 150-154.
- [21] 杨加春,王彦明,李庆军,等. 探空温度传感器误差预测技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(12): 24-36.
- [22] 胡坤,封金财,杨兆,等. 结冰温度传感器的研制与应用[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(7):151-156.
- [23] 崔云先,黄金鹏,曹凯迪,等. 新型高温薄膜热流传感器的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 78-87.
- [24] SHALINI M, MADHAN M G. Design and analysis of a dual-polarized graphene based microstrip patch antenna for terahertz applications[J]. *Optik*, 2019, 194: 163050, DOI:10.1016/j.ijleo.2019.163050.
- [25] 耿莉,谢亚楠,原媛. 基于石墨烯的太赫兹方向图可重构天线[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 213-222.
- [26] BALA R, MARWAHA A, MARWAHA S. Comparative analysis of zigzag and armchair structures for graphene patch antenna in THz band[J]. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2016, 27(5): 5064-5069.

### 作者简介

翟荣锭,硕士研究生,主要研究方向为电磁超材料、太赫兹器件设计。

吴倩楠(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为射频微机电及太赫兹器件、电磁超材料。

E-mail:qiannanwoo@nuc.edu.cn