

文章编号 1004-924X(2023)04-0442-08

# 面向 CMB 偏振实验的 220 GHz 钛超导 TES 探测器技术研究

罗强辉<sup>1,2</sup>, 缪巍<sup>1\*</sup>, 李费明<sup>1,2</sup>, 钟家强<sup>1</sup>, 王争<sup>1</sup>, 丁江乔<sup>1,3</sup>, 周康敏<sup>1</sup>,  
张文<sup>1</sup>, 任远<sup>1</sup>, 史生才<sup>1\*</sup>

- (1. 中国科学院紫金山天文台, 江苏 南京 210023;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

**摘要:**高灵敏度超导相变边缘探测器(Transition Edge Sensor, TES)在宇宙微波背景(Cosmic Microwave Background, CMB)辐射 B 模偏振探测方面具有重要的应用前景。本文设计并制备了 220 GHz 频段  $8 \times 8$  像元的天线耦合钛超导 TES 探测器, 实验表征了刻蚀前钛超导 TES 探测器的低温热导和噪声特性。实验结果显示, 钛超导 TES 探测器低温电声相互作用主导热导约为  $485.4 \text{ pW/K}$ , 同时钛超导 TES 探测器噪声等效功率优于  $5 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{0.5}$ 。原理上, 钛超导 TES 探测器热导在刻蚀后会进一步减小, 理论计算出刻蚀后钛超导 TES 探测器的热导约为  $38 \text{ pW/K}$ , 同时, 其热起伏等效噪声功率理论值约为  $9.2 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{0.5}$ , 因此, 钛超导 TES 探测器在刻蚀后的噪声等效功率性能会进一步提升。

**关键词:**高灵敏度; 超导相变边缘探测器; 热导; 噪声等效功率

中图分类号: TL81 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20233104.0442

## Development of a 220 GHz Ti superconducting TES detector array for CMB polarization experiment

LUO Qianghui<sup>1,2</sup>, MIAO Wei<sup>1\*</sup>, LI Feiming<sup>1,2</sup>, ZHONG Jiaqiang<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>1</sup>,  
DING Jiangqiao<sup>1,3</sup>, ZHOU Kangmin<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>1</sup>, REN Yuan<sup>1</sup>, SHI Shengcai<sup>1\*</sup>

- (1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;
  2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
  3. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)
- \* Corresponding author, E-mail: weimiao@pmo.ac.cn; scshi@pmo.ac.cn

**Abstract:** High-sensitivity superconducting transition edge sensor (TES) detectors have significant application prospects in the detection of the B-mode polarization of cosmic microwave background (CMB). In this study, we developed a 220 GHz antenna-coupled titanium (Ti) superconducting TES detector array ( $8 \times 8$ ) using a leg supporting structure. Before the supporting legs were fabricated, we measured the thermal conductance and the noise equivalent power (NEP) of the Ti superconducting TES detector. The measurement results show that the thermal conductance of the Ti superconducting TES detector, pri-

收稿日期: 2022-06-17; 修订日期: 2022-08-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11873099; No. 11922308)

marily determined by the electron-phonon interaction in the superconducting Ti microbridge, is approximately 485.4 pW/K. Moreover, the NEP of the Ti superconducting TES detector is approximately  $5 \times 10^{-17}$  W/Hz<sup>0.5</sup>. In principle, the thermal conductance of the Ti superconducting TES detector can be further reduced after its supporting legs are fabricated, which is approximately 38 pW/K. Meanwhile, the thermal fluctuation noise of the detector after its supporting legs are fabricated is approximately  $9.2 \times 10^{-18}$  W/Hz<sup>0.5</sup>. Thus, the noise performance can be further improved.

**Key words:** high sensitivity; superconducting TES detector; thermal conductance; Noise Equivalent Power(NEP)

## 1 引言

原初引力波是宇宙早期剧烈量子涨落产生的充满整个宇宙空间的引力波。探测原初引力波将有利于理解早期宇宙动力学过程,也有助于推进人们对量子引力等基本物理问题的理解。目前,探测原初引力波最好方式是宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)偏振实验,即探测CMB B模信号<sup>[1]</sup>。然而,CMB B模信号极其微弱(小于1 K的千万分之一),探测CMB B模信号需要超高灵敏度非相干探测器。

超导相变边缘探测器(Transition Edge Sensor, TES)<sup>[2]</sup>是一种基于超导薄膜电阻-温度转变特性的高灵敏度非相干探测器。超导TES探测器在结构上主要包含一层超导薄膜,工作在正常态与超导态之间的一个很窄的温度区间。在此温度区间,超导薄膜的电阻具有很高的温度灵敏度,在恒压偏置下吸收光子信号引起电流变化,并通过低噪声电流放大器如超导量子干涉器(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)放大读出<sup>[3]</sup>,从而实现背景极限探测。

目前,超导TES探测器已被广泛应用于全球已建及规划中的CMB偏振实验望远镜<sup>[4-6]</sup>。然而,针对CMB偏振实验的超导TES探测器现大都集中在毫米波低频段(如90 GHz, 150 GHz等),为了在CMB偏振实验中有效扣除银河系本身的“前景”辐射干扰<sup>[7]</sup>,需要在多波段开展CMB偏振实验。为此,本文主要开展了220 GHz频段超导TES探测器技术研究,设计并制备了的双槽天线耦合钛超导TES探测器阵列,重点研究了悬臂梁(leg-supported)结构<sup>[8]</sup>刻蚀前钛超导TES探测器的低温热导和噪声特性,并预估了悬臂梁结

构刻蚀后钛超导TES探测器的热导特性。

## 2 8×8像元钛超导TES探测器设计

### 2.1 钛超导TES探测器总体结构

目前,超导TES探测器光学耦合方式主要有三种,分别是波导喇叭耦合<sup>[9]</sup>、相控阵天线耦合<sup>[10]</sup>和透镜天线耦合<sup>[11]</sup>,本文采用了透镜天线耦合方式。

图1(a)和图1(b)分别是天线耦合的8×8像元钛超导TES探测器和单像元钛超导TES探测器。这里,钛超导TES探测器主要包含220 GHz双槽天线、带通滤波器和SiN悬臂梁结构探测单元

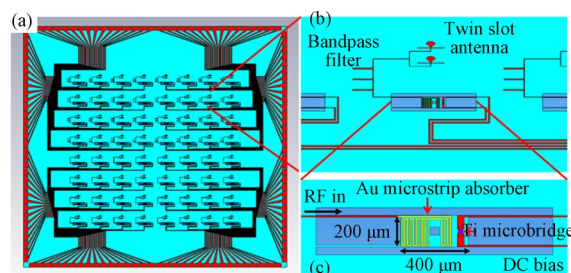


图1 (a) 220 GHz 8×8像元钛超导TES探测器阵列; (b) 单像元钛超导TES探测器结构图,主要包含双槽天线、带通滤波器和悬臂梁结构探测单元(400 μm×200 μm);(c) 悬臂梁结构探测单元,主要包含Au微带吸收体和超导钛TES

Fig. 1 (a) 220 GHz 8×8 Ti superconducting TES detector array; (b) Ti superconducting TES detector, consisting of a twin slot antenna, a bandpass filter, and a leg supporting unit with the size of 400 μm×200 μm; (c) Leg supporting unit, including an Au microstrip absorber and a superconducting Ti TES

元,其中悬臂梁结构探测单元主要由 Au 微带吸收体和超导钛 TES 构成,如图 1(c)所示。悬臂梁结构探测单元由位于 4 个角的  $10\ \mu\text{m}$  宽、 $400\ \mu\text{m}$  长 SiN 悬臂梁组成,这种细长型 SiN 腿可以很好地热隔离探测单元与外界热沉。

另外,左上角 SiN 腿集成了 RF in 微带线,用于耦合 CMB 辐射信号至探测单元。右边 SiN 腿集成了 DC bias 线,为超导钛 TES 提供直流偏置。钛超导 TES 探测器正常工作时,双槽天线耦合 CMB 辐射信号,经带通滤波器滤除带外信号后,最终被 Au 微带吸收体吸收转化为热能量,加热  $20\ \mu\text{m}$  长、 $20\ \mu\text{m}$  宽、 $50\ \text{nm}$  厚的超导钛 TES,进而实现 CMB 辐射信号探测。

## 2.2 双槽天线

本文采用了平面双槽天线耦合 CMB 辐射信

号。双槽天线是一种线极化耦合天线,具备良好的波束特性和交叉极化特性,适用于 CMB 辐射信号探测。

双槽天线一般设计规则如下:槽长度决定天线响应频率,槽宽度决定天线阻抗,槽间距决定天线波束对称性<sup>[12]</sup>。图 2(a)是根据上述规则设计的  $220\ \text{GHz}$  双槽天线,其中双槽天线槽长度为  $440\ \mu\text{m}$ ,宽度为  $18\ \mu\text{m}$ ,槽间距为  $270\ \mu\text{m}$ 。

双槽天线耦合 CMB 信号后,经微带线 1 和微带线 2 耦合至带通滤波器,表 2 给出了微带线 1 和微带线 2 的具体参数。图 2(b)和图 2(c)是模拟计算双槽天线  $S_{11}$  散射参数和天线波束方向图,可以看出双槽天线在  $220\ \text{GHz}$  频段具有很好的响应特性。

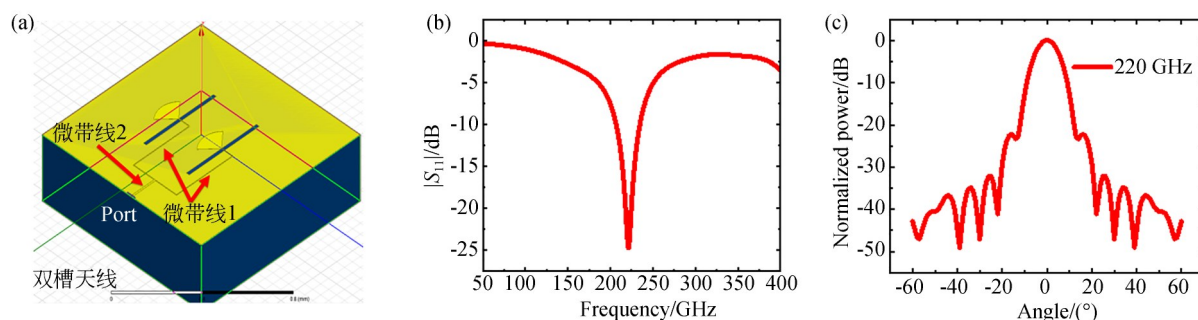


图 2 双槽天线结构示意图(a)、散射参数  $S_{11}$ (b) 以及波束方向图(c)

Fig. 2 Schematic view of the twin slot antenna (a) and simulated  $S_{11}$  of the twin slot antenna (b) and beam Pattern of the twin slot antenna (c)

表 1 连接双槽天线和带通滤波器微带线的具体参数

Tab. 1 Parameters of microstrip line used to connect twin slot antenna and bandpass filter ( $\mu\text{m}$ )

Conductor width of microstrip line 1	Conductor width of microstrip line 2	Thickness of dielectric layer	Dielectric constant
36	8.6	0.5	4.0

## 2.3 带通滤波器

为了抑制带外信号对钛超导 TES 探测器的影响,本文在双槽天线和悬臂梁结构探测单元之间连接了一个  $220\ \text{GHz}$  带通滤波器。该带通滤波器是由三段谐振器构成,如图 3(a)所示。表 2 给出了  $220\ \text{GHz}$  带通滤波器具体尺寸。图 3(b)

是利用 HFSS 电磁仿真软件模拟计算带通滤波器  $S_{11}$  和  $S_{12}$  散射参数。从模拟计算结果可以看出,该带通滤波器中心频率为  $220\ \text{GHz}$ ,  $-3\ \text{dB}$  所对应的响应带宽约为  $60\ \text{GHz}$ 。

图 4 是模拟计算  $220\ \text{GHz}$  双槽天线(蓝色线),带通滤波器(黑色线),以及两者共同作用后(红色线)的辐射信号耦合系数(彩图见期刊电子版)。从图中可以看出, $220\ \text{GHz}$  双槽天线带外抑制相对较差,其在  $100\ \text{GHz}$  和  $350\ \text{GHz}$  频段的耦合效率仍大于 0.2。但当其经过带通滤波器抑制带外信号后, $100\ \text{GHz}$  和  $350\ \text{GHz}$  频段的耦合效率几乎接近零,因此,连接带通滤波器使得双槽天线耦合的钛超导 TES 探测器具有更优的频响特性。

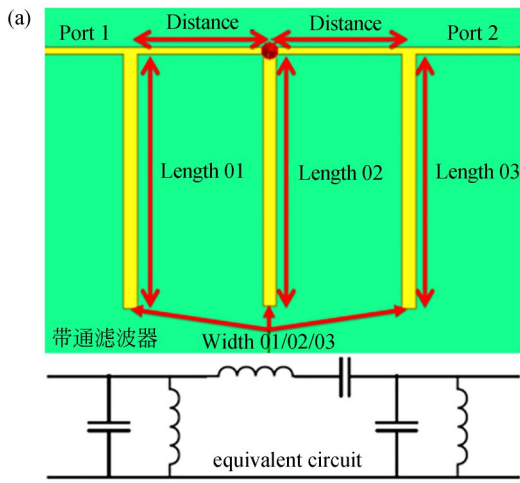


图 3 带通滤波器结构示意图和等效电路图(a)以及散射参数  $S_{11}$  和  $S_{12}$ (b)

Fig. 3 Schematic diagram of the 220 GHz bandpass filter as well as its equivalent circuit (a), and simulated  $S_{11}$  and  $S_{12}$  parameters of the bandpass filter (b)

表 2 220 GHz 带通滤波器参数

Tab. 2 Parameters of the 220 GHz bandpass filter ( $\mu\text{m}$ )

Length	Length	Width	Width	Distance
01/03	02	01/03	02	
334	330	21	18	192

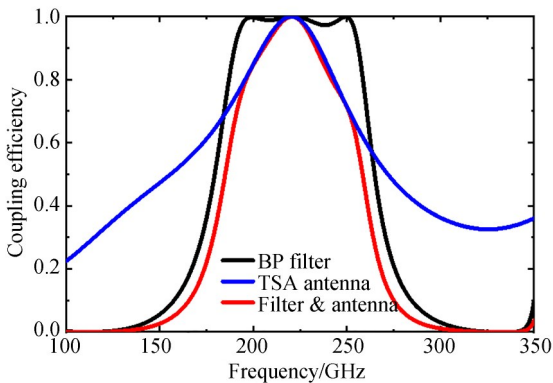


图 4 模拟计算双槽天线和带通滤波器耦合系数

Fig. 4 Simulated coupling efficiency

### 2.4 Au 微带吸收体

微带线存在导体损耗和介质损耗等。本文采用 Au 微带线作为吸收体,用于吸收 220 GHz 频段 CMB 辐射信号并转化为热能量。图 5(a)是设计 Au 微带线结构示意图,该 Au 微带线导带宽度为  $8.4 \mu\text{m}$ ,介质层厚度  $0.5 \mu\text{m}$ ,介质层介电常数为 4, Au 微带线总长度为  $2400 \mu\text{m}$ 。

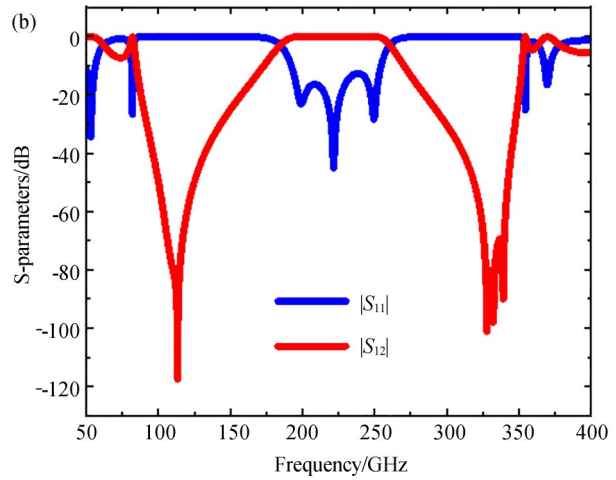


图 5(b)是模拟计算 Au 微带线  $S_{11}$  散射参数。其中, Au 微带吸收体中仿真反射设置的 Au 的方块电阻为  $12 \Omega$ ,在  $150 \sim 300 \text{ GHz}$  频段范围内,发现 Au 微带线  $S_{11}$  散射参数均小于  $-17.5 \text{ dB}$ ,对 CMB 辐射信号具有良好的吸收特性。

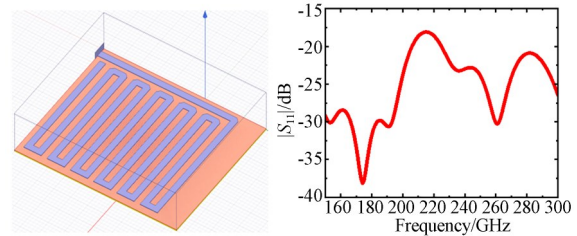


图 5 Au 微带吸收体结构图(a)以及散射参数  $S_{11}$ (b)

Fig. 5 Schematic of the Au microstrip line used as an absorber (a) and simulated  $S_{11}$  parameter of the Au microstrip line (b)

### 3 钛超导 TES 探测器芯片制备工艺

钛超导 TES 探测器芯片制备工艺主要采用了溅射、以及标准 Lift-Off 工艺<sup>[13]</sup>,悬臂梁结构探测单元由  $\text{XeF}_2$  气体刻蚀衬底得到。图 6 是制备完成后悬臂梁结构钛超导 TES 探测器探测单元光学显微照片。

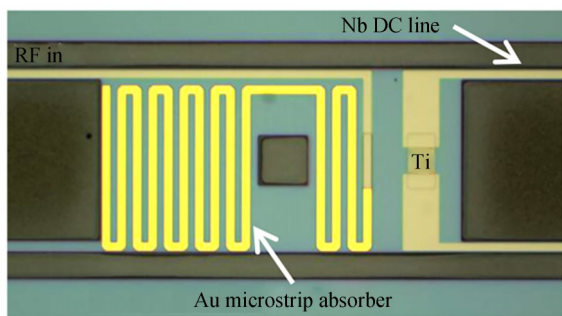


图 6 悬臂梁结构钛超导 TES 探测器探测单元光学显微照片

Fig. 6 Optical micrograph of the leg supporting Ti superconducting TES detector

#### 4 钛超导 TES 探测器实验结果及分析

本文采用了 Oxford Triton 400 稀释制冷机对钛超导 TES 探测器进行低温冷却,并研究了钛超导 TES 探测器悬臂梁结构刻蚀前(未采用  $\text{XeF}_2$  气体刻蚀 Si 衬底)的低温特性。图 7 是  $8 \times 8$  像元钛超导 TES 探测器在稀释制冷机内的安装实物图,钛超导 TES 探测器被安装于稀释制冷机最低温冷级(Mixing chamber 冷级)。

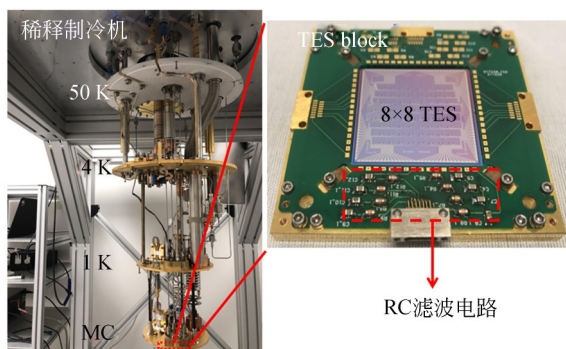


图 7  $8 \times 8$  像元钛超导 TES 探测器在稀释制冷机内安装实物图

Fig. 7 Photograph of the  $8 \times 8$  Ti superconducting TES detector array inside the dilution cooler

首先采用 SIM921 AC 电阻桥测试了  $8 \times 8$  像元钛超导 TES 探测器中两个像元(4-4 和 8-3,如图 8(a)所示)的电阻-温度转变特性。图 8(b)是钛超导 TES 探测器电阻-温度转变特性测试结果。从图中可以出来,钛超导 TES 探测器存在两

个超导转变温度,分别是 9 K 和 210 mK,其中 9 K 超导转变温度来源于 Nb 电极,210 mK 超导转变温度来源于超导钛 TES。

超导钛膜的转变温度一般在 380~410 mK<sup>[14-15]</sup>之间,推测本文中超导钛 TES 偏低的超导转变温度是由于微带线 Nb Ground 和 SiO 介质层的不平整性所致。另外,两个像元钛超导 TES 探测器电阻-温度转变特性具有很好的一致性,在 Nb 电极超导转变之前电阻均约为 1 k $\Omega$ (常温电阻约为 3 k $\Omega$ ),Nb 电极超导转变之后电阻约为 6.5  $\Omega$ ,超导钛 TES 超导转变之后电阻接近于零。

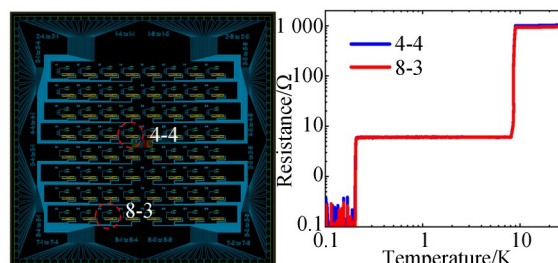


图 8  $8 \times 8$  像元钛超导 TES 探测器(a)和实测两个像元钛超导 TES 探测器电阻-温度转变特性(b)

Fig. 8  $8 \times 8$  superconducting TES detector array (a) and Measured resistance-temperature curves of two superconducting TES detectors (No. 4-4 and 8-3) (b)

图 9 是采用 SQUID 电流放大器实测不同环境温度钛超导 TES 探测器(8-3)的伏安特性。可以看出,钛超导 TES 探测器在高于 210 mK 后失去超导特性进入正常态,测试电阻约为 6.3  $\Omega$ ,与钛超导 TES 探测器电阻-温度测试结果(如图 8(b)所示)一致。

众所周知,超导 TES 探测器存在如下能量转换关系<sup>[16]</sup>:

$$P_{\text{DC}} = K(T_c^n - T_{\text{bath}}^n), \quad (1)$$

其中: $P_{\text{DC}}$ 是施加到超导 TES 探测器的直流功率, $T_c$ 是超导 TES 探测器超导转变温度, $T_{\text{bath}}$ 是环境温度,K是热耦合系数(取决于材料特性和物理尺寸), $n$ 是温度指数(取决于热运输机制)<sup>[16]</sup>。依据不同环境温度下实测钛超导 TES 探测器伏安特性曲线,可以拟合出 K, $T_c$ 和  $n$  3 个参数。图 10 是不同环境温度下实测钛超导 TES 探测器的直流功率(钛超导 TES 探测器电阻为 0.5 倍正常态

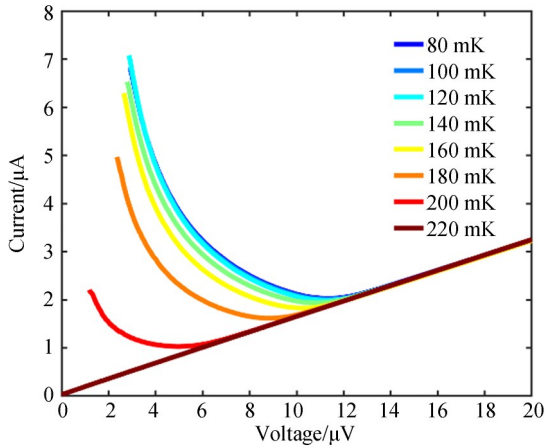


图 9 不同环境温度实测钛超导 TES 探测器电流-电压曲线  
Fig. 9 Measured current-voltage curves of the Ti superconducting TES detector (8-3) at different bath temperatures

电阻时的直流功率),图 10 同时给出了公式(1)拟合计算结果。可以发现钛超导 TES 探测器的拟合参数分别为  $K=1.2 \times 10^5 \text{ pW/K}^n$ ,  $T_c=207 \text{ mK}$ ,  $n=5.6$ 。由于钛超导 TES 探测器悬臂梁结构刻蚀前热输运机制主要是电声相互作用,拟合  $n$  指数结果与文献[17]给出结果基本吻合。另外,钛超导 TES 探测器热导可以表示为  $G=nKT_c^{n-1}$ ,则发现钛超导 TES 探测器电声相互作用主导的热导约为  $485.4 \text{ pW/K}$ 。

超导 TES 探测器灵敏度一般用噪声等效功率参数来表达。对于恒压偏置的超导 TES 探测器,通常利用电流信号作为响应来定义噪声等效

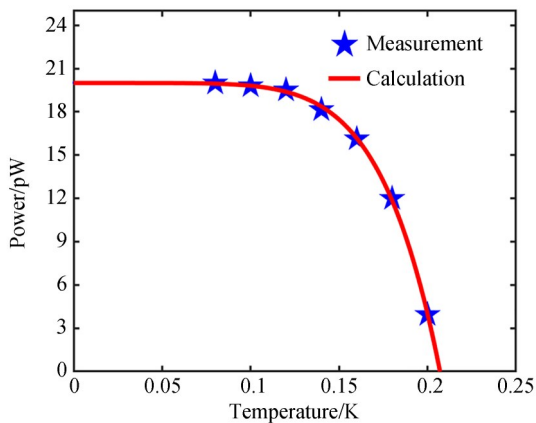


图 10 不同环境温度下钛超导 TES 探测器直流功率  
Fig. 10 Measured DC power of the Ti superconducting TES detector at different bath temperatures

功率,可以表示为:

$$NEP(f) = \frac{i_N(f)}{\Re_I(f)}, \quad (2)$$

其中:  $i_N(f)$  是电流输出噪声谱密度,  $\Re_I(f)$  是电流响应率。根据小信号模型,超导 TES 探测器电流响应率  $\Re_I(f)$  可以表示为<sup>[18]</sup>:

$$\Re_I(f) = -\frac{1}{V_0} \frac{R_0}{R_0 - R_L}, \quad (3)$$

其中,  $R_0$  和  $R_L$  分别为超导 TES 探测器直流电阻和负载电阻。恒压偏置时,超导 TES 探测器直流电阻  $R_0$  一般远大于负载电阻  $R_L$ 。因此,超导 TES 探测器电流响应率可简化为  $-1/V_0$ 。图 11 是实测钛超导 TES 探测器电流噪声谱(其中钛超导 TES 探测器偏置电压为  $5.3 \mu\text{V}$ ,工作环境温度为  $80 \text{ mK}$ )。可以看出,在  $1 \text{ kHz}$  钛超导 TES 探测器电流噪声约为  $8.5 \text{ pA/Hz}^{0.5}$ ,根据公式(2)可得到对应噪声等效功率 NEP 为  $4.5 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{0.5}$ 。钛超导 TES 探测器的噪声主要来源于热起伏噪声、热噪声以及 SQUID 读出噪声等<sup>[18]</sup>。这里,根据钛超导 TES 探测器的热导结果估算了热起伏噪声等效功率  $NEP_{TFN} = \sqrt{4k_B T_c^2 G}$  (约为  $3.4 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{0.5}$ ),其在钛超导 TES 探测器噪声中占主导作用。

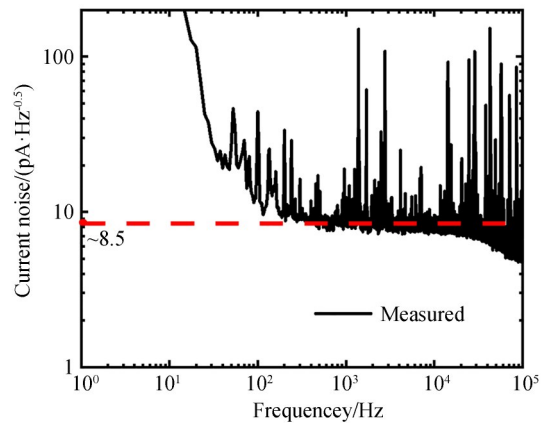


图 11 偏置电压为  $5.3 \mu\text{V}$  时超导 TES 探测器电流噪声谱  
Fig. 11 Measured current noise spectrum of the superconducting TES detector at the bias voltage of  $5.3 \mu\text{V}$

另外,钛超导 TES 探测器悬臂梁结构刻蚀后,钛超导 TES 探测器热导主要由悬臂梁结构决定,可以表示为:

$$G = \frac{\kappa_l \omega l}{l}, \quad (4)$$

其中： $\kappa_l$ 为悬臂梁结构的热传导系数<sup>[19]</sup>。对于SiN来说， $\kappa_l=0.001\ 58\ \text{T}^{1.54}\ \text{Wm}^{-1}\ \text{K}^{-1}$ 。在钛超导TES探测器中，SiN腿长度、宽度和厚度分别为400  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ 和1  $\mu\text{m}$ 。通过公式(4)，得到悬臂梁结构刻蚀后钛超导TES探测器热导约为38 pW/K，明显小于电声相互作用主导的热导。因此，在悬臂梁结构刻蚀后，钛超导TES探测器噪声等效功率性能将有望进一步提升，利用公式 $\text{NEP}_{\text{TFN}} = \sqrt{4k_B T_c^2 G}$ 可以理论计算出热起伏等效噪声功率约为 $9.2 \times 10^{-18}\ \text{W/Hz}^{0.5}$ 。

#### 参考文献：

- [1] STEVENS J R, GOECKNER-WALD N, KESKITALO R, *et al.* Designs for next generation CMB survey strategies from Chile [C]. *SPIE*, 2018, 10708: 698-712.
- IRWIN K D, HILTON G C. *Transition-edge sensors* [M]. Topics in Applied Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 63-150.
- [2] 杨勇, 曹喜滨, 王肃文, 等. STEP卫星加速度计测量头线圈的超导特性测试及改进[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2421-2429.
- YANG Y, CAO X B, WANG S W, *et al.* Test of superconductivity of pick-up coils for STEP accelerometer and their modification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2421-2429. (in Chinese)
- [3] LI H, LI S Y, LIU Y, *et al.* Probing primordial gravitational waves: Ali CMB Polarization Telescope [J]. *National Science Review*, 2019, 6(1): 145-154.
- [4] GALITZKI N, ALI A, K S "ARNOLD, *et al.* The Simons observatory: instrument overview" [EB/OL]. 2018: *arXiv*: 1808.04493. <https://arxiv.org/abs/1808.04493>
- [5] B C, ADE P A R, R W "AIKIN, *et al.* BICEP2 I: detection of B-mode polarization at degree angular scales" [EB/OL]. 2014: *arXiv*: 1403.3985. <https://arxiv.org/abs/1403.3985>
- [6] TRAINI A, TARTARI A, BORDIER G, *et al.* Dual-color antenna-coupled LEKID for next-generation multi-chroic CMB focal planes [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2018, 193(3): 170-175.

## 5 结 论

本文成功设计并制备了220 GHz频段 $8 \times 8$ 像元悬臂梁结构的天线耦合钛超导TES探测器，实验表征了悬臂梁结构刻蚀前钛超导TES探测器的热导和噪声等效功率特性。可以发现，悬臂梁结构刻蚀前钛超导TES探测器热导 $G$ 约为485.4 pW/K，在悬臂梁结构刻蚀后超导TES探测器热导 $G$ 有望减小至38 pW/K。另外，钛超导TES探测器的实测噪声等效功率NEP约为 $4.5 \times 10^{-17}\ \text{W/Hz}^{0.5}$ ，实现了地面背景极限的探测灵敏度。

- [7] 刘梦霞, 秦强, 董显山, 等. 基于硅-玻璃键合工艺的微惯性器件的材料热失配应力表征[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1715-1724.
- LIU M X, QIN Q, DONG X SH, *et al.* Characterization of thermal mismatch stress of micro-inertial devices based on silicon-glass bonding process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(8): 1715-1724. (in Chinese)
- [8] THORNTON R J, ADE P A R, AIOLA S, *et al.* The Atacama cosmology telescope: the polarization-sensitive actpol instrument [J]. *The Astrophysical Journal Letters Supplement Series*, 2016, 227(2): 21.
- [9] NGUYEN H T, KOVAC J, ADE P, *et al.* BICEP2/SPUD: searching for inflation with degree scale polarimetry from the South Pole [C]. *SPIE Proceedings*, "Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy IV. Marseille, France. SPIE, 2008.
- [10] POSADA C M, ADE P A R, ANDERSON A J, *et al.* Large arrays of dual-polarized multichroic TES detectors for CMB measurements with the SPT-3G receiver [C]. *SPIE Proceedings*, "Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VIII. Edinburgh, United Kingdom. SPIE, 2016: 290-300.
- [11] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- ZHONG SH SH. *Theory and Application of Microstrip Antenna* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1991. (in Chinese)
- [12] WANG Z, ZHANG W, MIAO W, *et al.* Elec-

- tron-beam evaporated superconducting titanium thin films for antenna-coupled transition edge sensors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(4): 1-4.
- [13] KARASIK B S, PEREVERZEV S V, OLAYA D, *et al.* Development of the nano-HEB array for low-background far-IR applications[C]. *SPIE Proceedings*, "Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V. San Diego, California, USA. SPIE, 2010: 355-364.
- [14] ZHANG W, ZHONG J Q, MIAO W, *et al.* Electrical characteristics of superconducting Ti transition edge sensors[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2016, 184(1): 11-16.
- [15] ZHANG W, MIAO W, WANG Z, *et al.* Characterization of a free-standing membrane supported superconducting Ti transition edge sensor [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(4): 1-6.
- [16] 钟家强. 太赫兹超导相变边缘探测器特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.  
ZHONG J Q. *Study on Characteristics of Terahertz Superconducting Phase Change Edge Detector*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [17] ZHONG J Q, ZHANG W, MIAO W, *et al.* Fast-response superconducting titanium bolometric detectors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 1-5.
- [18] LEIVO M M, PEKOLA J P. Thermal characteristics of silicon nitride membranes at sub-Kelvin temperatures [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(11): 1305-1307.

## 作者简介:



罗强辉(1997—),男,重庆荣昌人,硕士研究生,2020年于燕山大学获得学士学位,主要从事太赫兹探测器的研究。E-mail: luoqianghui@mail.ustc.edu.cn

## 通讯作者:



史生才(1965—),男,江苏南京人,中国科学院院士,射电天文学家,1996年于日本综合研究大学院大学获得博士学位,现为中国科学院紫金山天文台毫米波和亚毫米波技术实验室首席科学家,主要从事太赫兹超导探测器技术研究。E-mail: scshi@pmo.ac.cn

## 通讯作者:



缪巍(1981—),男,江苏南通人,博士,研究员,2010年于法国皮埃尔和玛丽居里大学获得博士学位,主要从事太赫兹超导探测器技术研究。E-mail: weimiao@pmo.ac.cn