

# 微波与热偏置下超导 HEB 太赫兹 直接检测器的性能比较<sup>\*</sup>

张一颀, 苏润丰, 陈健<sup>†</sup>, 吴培亨

南京大学 超导电子学研究所, 江苏 南京 210023

收稿日期: 2019-04-26; 接收日期: 2019-05-22

**【摘要】** 本文介绍了一种基于超导氮化铌(NbN)热电子测辐射热计(HEB)的太赫兹(THz)直接检测器, 并利用直流读出法和微波反射读出法, 对微波与热偏置下 HEB 直接检测器的性能进行了比较. 通过直流读出法, 在最佳工作点处, 测得微波偏置与热偏置条件下检测器的电流响应率分别为 244 A/W 和 20 A/W, 光学噪声等效功率 (NEP) 分别为 4.5 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$  和 6.8 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . 相比于热偏置, 微波偏置能够大大提高检测器的响应率. 此外, 我们利用微波反射读出法对微波偏置和热偏置下检测器的性能进行了比较. 两种读出方式均可很好的表征检测器的性能, 而相比于直流读出法, 微波反射读出法更易于扩展到多像素阵列, 同时具有很快的读出速度, 对快速 THz 脉冲信号的检测具有重要意义.

**关键词:** 太赫兹, 超导热电子测辐射热计, 噪声等效功率, 热偏置, 微波偏置

**PACS:** 74.25.Gz

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.02.007

## Superconducting HEB Terahertz Direct Detector with Microwave and Thermal Biasing

ZHANG Yidi, SU Runfeng, CHEN Jian<sup>†</sup>, WU Peiheng

Research Institute of Superconducting Electronics, Nanjing University, Nanjing, 210023

Received date: 2019-04-26; accepted date: 2019-05-22

**【Abstract】** A THz direct detector based on superconducting niobium nitride (NbN) hot electron bolometers(HEB) is introduced in this paper. The performance of HEB direct detector with microwave and thermal biasing is compared by using direct current readout method and microwave reflection readout method. Current responsivity and optical noise equivalent power (NEP) have been measured and compared respectively under thermal biasing and microwave biasing with direct current readout method. At the optimal operating point, the detectors with microwave biasing and thermal biasing have an optical responsivity of 244 A/W and 20 A/W. Using microwave biasing, 4.5 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$  of NEP can be obtained by choosing 0.3 GHz microwave frequency. In addition, we compare the performance of microwave biasing and thermal biasing by microwave reflection readout method. Both readout methods can well characterize the performance of superconducting HEB. Compared with direct current

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:61521001,11173015)、中央高校基本科研业务费专项资金资助和江苏省电磁波先进调控技术重点实验室资助的课题.

<sup>†</sup> chenj63@nju.edu.cn

readout method, this method allows easy expansion to multi-pixel array, and at the same time, it can operate with very high speed, which is important for fast THz pulse detection.

**Keywords:** terahertz (THz), superconducting hot electron bolometer, noise equivalent power, microwave biasing, thermal biasing

**PACS:** 74.25.Gz

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.02.007

**Reference method:** ZHANG Yidi, SU Runfeng, CHEN Jian, WU Peiheng, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0123 (2019)

## 1 引言

太赫兹波 (THz) 检测技术通常可分为直接检测和外差检测, 而超导热电子测辐射热计 (HEB) 既可以用作直接检测也可以用作外差检测. 一直以来, 超导 HEB 检测器由于其低噪声和所需要本振功率相对较低的特点, 被广泛用作频率超过 1.2 THz 的外差检测器, 在天文观测领域颇具竞争力<sup>[1,2]</sup>. 而当超导 HEB 检测器工作在超导转变温度 ( $T_c$ ) 附近时, 器件受到电磁波辐射会引起其温度变化<sup>[3,4]</sup>, 从而引起器件阻值的很大变化, 这样可以通过测量阻值的变化得到辐射电磁波信号的强度信息. 根据这一特性, 超导 HEB 芯片可用作直接检测<sup>[5]</sup>. 我们通常采用加热的方法使器件升温至  $T_c$  附近或选择合适频率微波注入的方法使 HEB 偏置在最佳工作点.

本文搭建了超导 HEB 直接检测系统. 在直流读出方式下, 通过微波偏置和热偏置将超导 HEB 偏置在最佳工作点, 分别测量和比较了超导 HEB 的电流响应率与光学噪声等效功率 (NEP). 同时, 我们利用微波反射读出法对微波偏置和热偏置的性能进行了比较. 通过上述实验, 我们发现微波偏置的 HEB 性能较热偏置有一定程度的提升. 此外, 相比于直流读出法, 微波反射读出法更易于扩展到多像素阵列, 同时具有很快的运算速度, 对快速的脉冲信号检测具有重要意义.

## 2 超导 HEB 直接检测系统

### 2.1 超导 HEB 芯片

本实验中使用的超导 HEB 芯片是由 3.5 nm 厚的 NbN 薄膜沉积在高阻硅基片上制成的, 它由一个以测辐射热计 NbN 微桥为中心的正常金属金 (Au) 构成的对数螺旋平面天线组成. 运用电子束光刻技术, 光刻出宽度为 2  $\mu\text{m}$ 、长度为 0.18  $\mu\text{m}$  的微桥区域. 共面波导连接天线臂并用作电极.

图 1 是测得的超导 HEB 芯片的电阻—温度 ( $R$ - $T$ ) 曲线. 第一次超导转变温度 ( $T_{c1}$ ) 发生在 9.8 K 处, 这是超导 NbN 微桥的临界温度, 转变温度宽度 ( $\Delta T_{c1}$ ) 约为 1.4 K. 超导 NbN 微桥与天线金层之间的邻近效应导致第二次转变温度 ( $T_{c2}=9.1$  K).

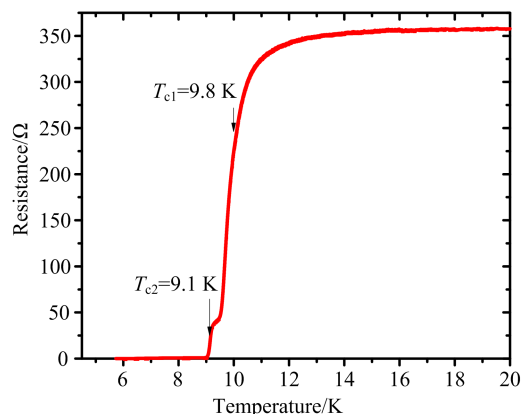


图 1 超导 HEB 的电阻—温度 ( $R$ - $T$ ) 曲线

### 2.2 系统搭建

基于直流读出的实验装置各个组成部分如图 2 所示. 黑体源是碳化硅 (SiC) 陶瓷热黑体 (最高温度可达 1073 K), 用于为检测器提供标准 THz 辐射信号. 斩波器用于将黑体辐射信号调制到一定频率, 调制后的信号通过 36  $\mu\text{m}$  厚的聚酯薄膜制成的 Mylar 膜窗口进入液氮杜瓦中的测辐射热计, 处于 77 K 温度的红外低通滤波器由 Zitex G-110 制成, 用于滤除外界红外辐射, 金属网带通滤波器的中心频率为 0.65 THz, 带宽约为 75 GHz. 超导 HEB 固定在高阻硅超半球透镜 (直径 10 mm) 的焦平面上, 实验中没有使用防反射 (AR) 涂层. 高阻硅超半球透镜用于将 THz 辐射信号耦合至超导 HEB. 温控仪通过改变加热电阻的温度来控制热偏置条件下超导 HEB 的温度. T 型偏置器和一个 20dB 衰减器连同超半球透镜的支架都固定在 4.2 K 液氮杜瓦的冷板上. 偏置盒为器件提供电压偏置, 同时读取 HEB 响应电流的变化. 利用锁相放大器和动态信号分析仪对放大后的信号进行测量.

当采用热偏置 HEB 的方式时, 温控仪通过加热电阻和温度计调整 HEB 的温度. 当采用微波偏置 HEB 的方式时, 温控仪不再控温加热, 只有微波源通过液氮杜瓦外的 SMA 端口将 HEB 芯片偏置在工作点.

### 2.3 NEP

NEP 是对一个直接检测器灵敏度的度量, 表征了检测器对待测信号的检测能力. NEP 定义为当测试带宽为 1 Hz 时检测器信噪比为 1 时所需要的最低入射功率.

测量检测器 NEP 时, 根据普朗克黑体辐射定

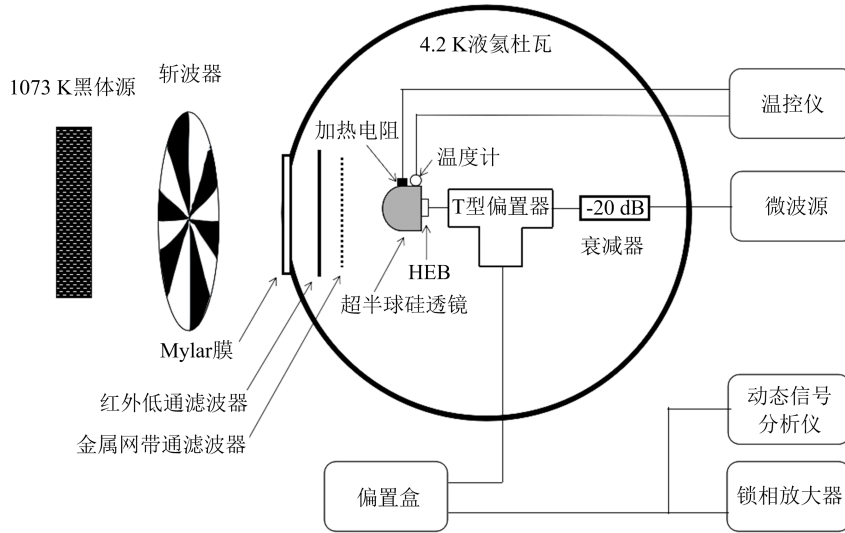


图 2 超导 HEB 直接检测系统

律,黑体源的输入信号功率表达式如下:

$$\Delta P = h\nu B \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{hot}}\right) - 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{amb}}\right) - 1} \right] \quad (1)$$

式中,普朗克常量  $h \approx 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,玻尔兹曼常量  $k \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,频率  $\nu = 650 \text{ GHz}$ ,带宽  $B = 75 \text{ GHz}$ ,  $T_{hot} = 1073 \text{ K}$ ,  $T_{amb}$  为室温  $295 \text{ K}$ . 计算得  $\Delta P \sim 0.8 \text{ nW}$ .

$NEP$  为噪声等效功率,代表最小可检测光学功率,并表征了检测器的灵敏度. 其表达式如下:

$$NEP = \frac{i_n}{S_I} \quad (2)$$

式中,  $i_n$  是用  $295 \text{ K}$  黑体阻挡杜瓦窗口时斩波频率处的噪声电流,  $S_I$  是检测器的光电流响应率,其表达式如下:

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta P} \quad (3)$$

式中  $\Delta I$  是转换系数为  $1 \text{ mV}/\mu\text{A}$  的偏置盒中直流放大器的电流响应.

### 3 测量与结果

#### 3.1 直流读出下的测试结果

对于热偏置,如图 3 所示,我们通过改变超导 HEB 的工作温度,获得了一组电流—电压 ( $I$ - $V$ ) 曲线,从图 3 可以看出,在一定温度范围内,当芯片温度上升时,负差分电阻区逐渐消失,临界电流受到抑制,接触电阻增大,我们认为,在 HEB 的衬底下加

热,与金电极接触的 NbN 薄膜超导态受到破坏,从而导致接触电阻的增加. 当温度升高至  $T_c$  时,这部分 NbN 薄膜的超导态被完全破坏,芯片转变为正常态. 我们找到超导 HEB 的最佳工作点,此时工作温度为  $9 \text{ K}$ ,偏置电压为  $1.4 \text{ mV}$ ,偏置电流为  $52 \mu\text{A}$ ,在该偏置点得到的电流响应率为  $20 \text{ A/W}$ ,计算得到  $NEP$  约为  $6.8 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

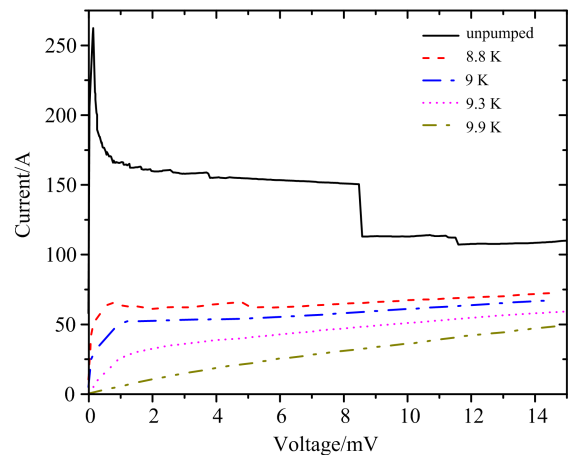


图 3 在不同温度下的电流—电压 ( $I$ - $V$ ) 曲线族

对于微波偏置,图 4 所示为微波频率  $0.3 \text{ GHz}$  和  $1 \text{ GHz}$  时,超导 HEB 的  $I$ - $V$  曲线. 我们在  $0.3 \text{ GHz}$  微波频率的  $I$ - $V$  曲线中观察到了电流谷现象,电流响应较高的工作点通常临近负差分电阻区. 当选择  $1 \text{ GHz}$  微波频率时,在最佳工作点处,偏置电压  $1.6 \text{ mV}$ ,偏置电流为  $70 \mu\text{A}$ ,在该偏置点得到的电流响应率为  $98 \text{ A/W}$ ,测得的  $NEP$  约为

7.9 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . 当选择 0.3 GHz 微波频率时,在最佳工作点处,偏置电压 2.2 mV,偏置电流为 42  $\mu\text{A}$ ,在该偏置点得到的电流响应率为 244 A/W,测得的 NEP 约为 4.5 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ .

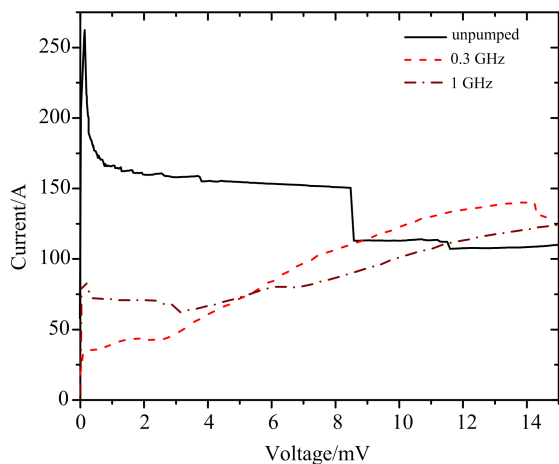


图 4 0.3 GHz 和 1 GHz 微波频率注入下的电流—电压 ( $I$ - $V$ ) 曲线

总结微波与热偏置条件下的实验数据,我们发现微波偏置的 HEB 直接检测器的电流响应率比热偏置的高很多,当选择 0.3 GHz 微波频率注入时,微波偏置的电流响应率比热偏置高约一个量级,尽管噪声随着响应度的增加有所升高,并且临近负阻区产生更高的本征噪声,但与热偏置相比,通过选择合适的微波频率,可以使 NEP 降低至 4.5 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . 为了减小测量误差,我们尽可能增加噪声谱测量的取样次数. 测量的数据清楚地表明,适当的微波偏置能够使 NEP 在一定程度上能够得到改善.

### 3.2 微波反射读出下的测试结果

Shurakov 首先提出并实现了一种超导 HEB 检测器微波反射读出方法<sup>[6]</sup>. 超导 HEB 吸收电磁波信号后阻抗会发生变化,从而使得微波网络的反射系数产生变化,最终使得超导 HEB 芯片上反射回来的微波功率改变. 为了进一步探究采用微波反射读出法时微波与热偏置的 HEB 作为 THz 直接检测器的性能,我们搭建了图 5 所示的装置:

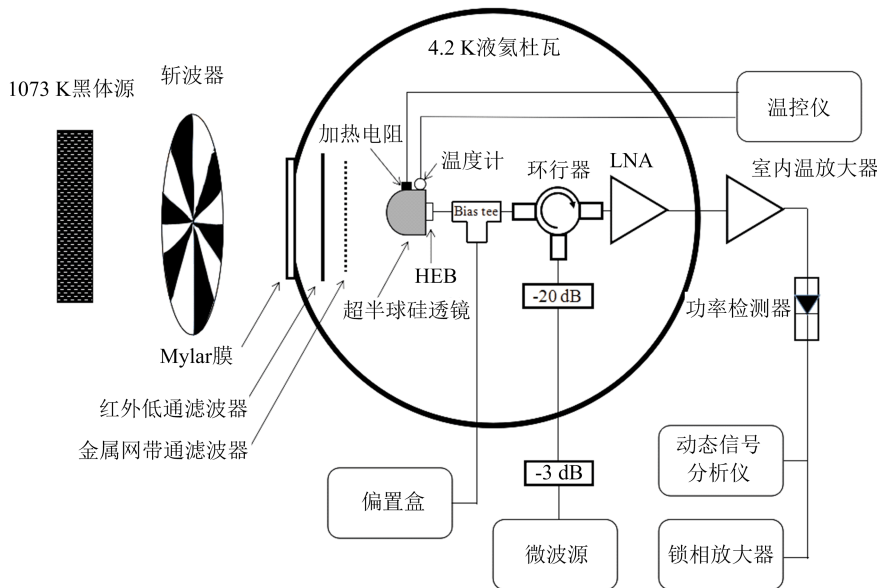


图 5 基于超导 HEB 的 THz 直接检测器微波反射读出的实验装置

采用热偏置时,温控仪通过加热电阻使超导 HEB 偏置在最佳工作点,同时通过注入功率较低的微波来读出信号. 室温低噪声放大器(LNA)用于进一步放大信号. 采用微波偏置时,我们选用 1.5 GHz 的微波来偏置超导 HEB 芯片,如图所示,注入的微波通过环形器将微波加到 HEB 芯片上,环形器的作用是使得注入的微波不会被放大器直接吸收,同时还能让从 HEB 反射的信号通过它被放大器接收

进行放大. 低温 LNA 的噪声温度低于 12 K,在 1.2 ~ 1.8 GHz 的频带上增益约为 33 dB. 这样注入的微波信号就起到偏置 HEB 和读出阻抗变化两个作用. 20 dB 衰减器用于减少外界噪声以及同轴线的震动对 HEB 的影响. 偏置盒为 HEB 提供电压偏置.

图 6 是基于微波反射读出法测得的微波与热偏置  $I$ - $V$  曲线,对于热偏置,最佳工作点处的偏置电

压为 2.5 mV, 偏置电流为 42  $\mu\text{A}$ , 测得的  $NEP$  约为 9  $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ . 对于微波偏置, 最佳工作点处的偏置电压为 2.36 mV, 偏置电流为 27  $\mu\text{A}$ , 测得的  $NEP$  约为 5.5  $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

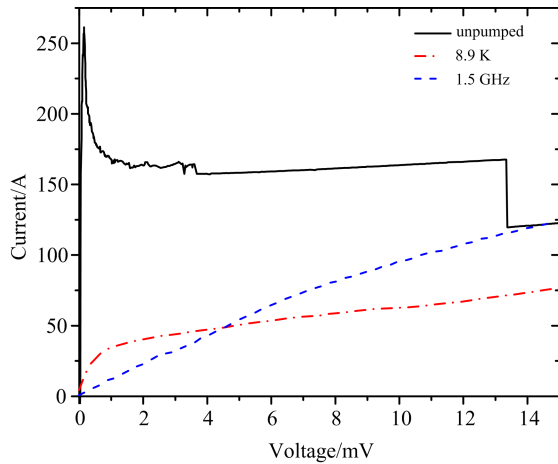


图 6 基于微波反射读出法的微波与热偏置  $I-V$  曲线

总结微波反射读出下的实验数据, 我们发现, 1.5 GHz 微波偏置的超导 HEB 直接检测器的电流响应率比 8.9 K 热偏置的 HEB 高很多, 虽然在微波偏置条件下检测器的噪声随着电流响应率的增加

有所升高, 但信噪比没有降低. 我们测得到的在微波偏置下超导 HEB 的  $NEP$  为 5.5  $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 相较于热偏置, 有一定程度的改善.

## 4 结 论

本文比较了热偏置和微波偏置下超导 HEB THz 直接检测器通过直流读出和微波反射读出的性能. 当采用直流读出法时, 对于微波偏置, 测量出其电流响应率为 244 A/W,  $NEP$  约为 4.5  $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 而对于热偏置, 测量出其电流响应率为 20 A/W, 微波偏置的电流响应率比热偏置高出一个数量级. 相比于热偏置, 微波偏置能够节省液氦, 而且电流响应率较大, 对前置 LNA 的噪声性能要求没有热偏置苛刻. 此外, 我们还对基于微波反射读出的方案进行了实现和比较. 采用微波偏置方案得到  $NEP$  为 5.5  $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 相较于热偏置, 微波偏置的电流响应率也显著提高. 相比于直流读出法, 微波反射读出法更易于扩展到多像素阵列, 同时具有很高的检测速度, 有望应用于 THz 快速成像、THz 脉冲检测等系统.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] S. Cherednichenko, V. Drakinskiy, T. Berg, P. Khosropanah, E. Kollberg, *Rev. Sci. Instrum.*, **79** (2008), 034501.
- [ 2 ] P. Putz, C. E. Honingh, K. Jacobs, M. Justen, M. Schultz, J. Stutzki, *Astron. Astrophys.*, **542**(2012), 1.
- [ 3 ] W. Miao, W. Zhang, J. Q. Zhong, S. C. Shi, Y. Delorme, R. Lefevre, A. Feret, T. Vacelet, *Appl. Phys. Lett.*, **104** (2014), 052605.
- [ 4 ] Y. A. Ren, W. Miao, Q. J. Yao, W. Zhang, S. C. Shi, *Chin. Phys. Lett.*, **4** (2011), 28.
- [ 5 ] 李先锋, 姜寿禄, 陈健, 吴培亨, *低温物理学报*, **39** (2017), 62.
- [ 6 ] A. Shurakov, Tong C-Y E, P. Grimes, R. Blundell, GGolt'sman, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **5** (2015), 81.