

文章编号: 2095-4980(2015)01-0027-04

## 利用电容结构改善太赫兹信号与检测器的耦合

徐磊, 涂学凑, 万超, 裴宇峰, 康琳, 吴培亨

(南京大学 超导电子研究所, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 对于 THz 频段的检测器, 当器件的尺寸远远小于检测信号的波长时, 可以获得快速的响应速度, 但耦合信号的能力会下降。为了提高检测器的信号耦合能力, 需要借助天线收集信号。因此天线的性能直接决定着器件的响应频段及灵敏度等参数指标。六氮五铌(Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>) 微测热辐射计太赫兹检测器采用平面集成天线的方式来耦合信号, 平面天线通过微加工技术, 经过光刻、剥离等过程, 集成在基片上, Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>置于平面天线的中心。针对 0.32 THz 的中心频率, 尝试采用电容耦合信号的设计方法, 提高了 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>的信号耦合能力。

**关键词:** 六氮五铌; 太赫兹检测器; 阻抗匹配; 电容耦合; 微测辐射热计

**中图分类号:** TN015

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201501.0027

## Terahertz signal detector improvement based on capacitive coupling structure

XU Lei, TU Xuecou, WAN Chao, PEI Yufeng, KANG Lin, WU Peiheng

(Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** A detector can achieve quick response when it is much smaller than the wavelength of the source signal in THz wave band at the expense of signal coupling capability. Therefore, an antenna is applied to collect signals in order to enhance the signal coupling capability of the detector. The properties of antenna determine the frequency response band, the sensitivity and other parameters of the detector directly. A planar-integrated antenna is adopted for signal acquisition in the Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer detector, which is fabricated by lithography, lift-off and other processes of micro-fabrication. The Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer is placed in the center of the planar antenna. Aiming for the center frequency of 0.32 THz, a special capacitive coupling design is proposed to improve the signal coupling capability.

**Key words:** Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>; THz detector; impedance matching; capacitive coupling; microbolometer

太赫兹检测器是太赫兹技术领域的关键部件之一<sup>[1]</sup>。微测辐射热计是目前应用最为广泛也是最为成功的太赫兹探测器之一, 它利用热敏材料的电阻率随温度变化的特性来检测太赫兹辐射。在早期, 人们曾经尝试用常用金属(铋<sup>[2]</sup>、铌<sup>[3]</sup>等)作为敏感材料, 但随着半导体材料及其制备技术研究的深入, 以氧化钒<sup>[4]</sup>和多晶硅<sup>[5]</sup>为代表的半导体薄膜材料已取代金属材料成为微测辐射热计敏感材料的主流。测辐射热计的重要系统指标有电压响应率、等效噪声功率(Noise Equivalent Power, NEP)、响应时间等。器件的电阻温度系数( $TCR = \alpha = 1/R \times dR/dT$ )在电压响应率方面起着重要作用。Bi(0.3% K<sup>-1</sup>)和Nb(0.1% K<sup>-1</sup>)的电阻温度系数相对较低, 从而导致了较低的直流电压响应率, 且该类金属材料测辐射热计的电阻温度系数也导致了较高的热损耗, 在其工作温度范围之外会导致器件性能不稳定, 因而限制了其应用范围。多晶硅和氧化钒材料的检测器具有相对高的TCR值, 但其优异的性能被限制在红外波段, 因此, 这些微测辐射热计对太赫兹检测需要进一步研究完善。

Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>薄膜室温下的电阻温度系数高达-0.7% K<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>, 远远高于Bi和Nb的TCR, 且对太赫兹信号具有很好的吸收性能, 非常适合制备太赫兹检测器件。Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>薄膜有较高的电阻率, 因此为了达到较好的阻抗匹配, 增加信号耦合能力, 设计、研制了天线耦合的Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>微测辐射热计检测器, 偶极子天线的中心频率为0.32 THz。为了达到更好的阻抗匹配, 天线采用电容耦合的结构, 以提高信号的耦合效率。Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub>微测辐射热计检测器工作于室温, 具有较高灵敏度, 响应速度快, 适合制作超大规模阵列芯片。

收稿日期: 2014-11-07; 修回日期: 2014-11-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863计划)

### 1 器件设计

太赫兹检测器主要由一对偶极子天线和 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 热敏电阻组成。偶极子天线将太赫兹信号耦合到热敏电阻上，热敏电阻吸收太赫兹信号发热从而电阻改变。实际中，Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 微桥不仅会有电阻效应，还会产生电感效应。设计了一种电容耦合的天线结构，在天线和微桥上直接生长一层 SiO<sub>2</sub> 作为电容并联在微桥上，中和 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 微桥的电感效应。改善前后的等效电路如图 1 所示。

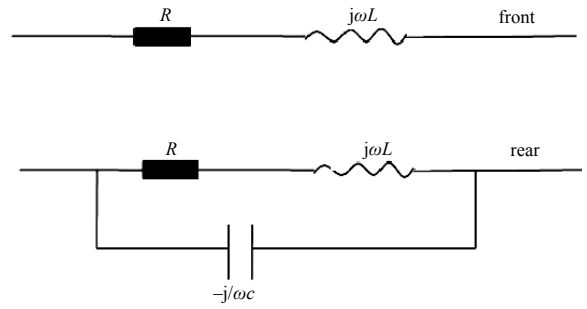


Fig.1 Equivalent circuit  
图 1 等效电路

### 2 器件制备

采用射频磁控溅射的方法，Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜生长在厚度为 0.3 mm 的高阻单晶硅(电阻率  $\rho > 1\,000\ \Omega \cdot \text{cm}$ ) 基片上。为了获得更高的电阻温度系数，用热生长的方法在高阻单晶硅基片上生长了一层厚度约为 100 nm 的二氧化硅绝热层，使得易于制备空气桥，降低基底上的热传导，提高检测器的辐射响应。该检测器中，电极和偶极子天线的材料均使用厚度为 200 nm 的金薄膜。为了使 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 微桥和偶极子天线获得更好的阻抗匹配，尝试在 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜和天线之间生长了一层 200 nm 厚的 SiO<sub>2</sub> 作为耦合电容。图 2 所示为该器件的制备工艺流程：

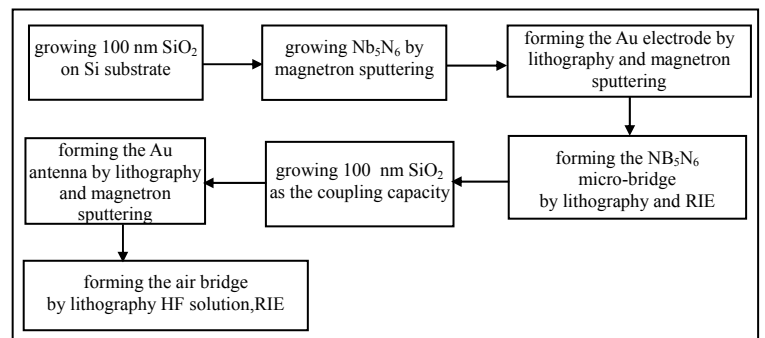


Fig.2 Fabricating process  
图 2 制备工艺流程

1) 在热氧化了 100 nm 厚 SiO<sub>2</sub> 的高阻硅衬底上，射频磁控溅射 120 nm 厚的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜；2) 光刻并采用直流磁控溅射的方法制备金薄膜电极；3) 光刻并采用反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)的方法，制备 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜微桥作为该检测器的热敏电阻，刻蚀气体为 SF<sub>6</sub>，气体气压为 4 Pa，射频功率为 300 W，时间为 55 s；4) 生长一层 200 nm 厚的 SiO<sub>2</sub> 作为耦合电容，提高微桥和天线的阻抗匹配；5) 光刻并溅射生长金薄膜作为偶极子天线；6) 光刻并采用湿法刻蚀以及 RIE 刻蚀，挖空气腔，降低衬底上的热传导，此次 RIE 在 8 Pa 的压力和 70 W 的功率条件下，在 SF<sub>6</sub> 气体腔室中进行了 8 min。制得的检测器如图 3 所示，Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜微桥的尺寸为长 8 μm，宽 4 μm。

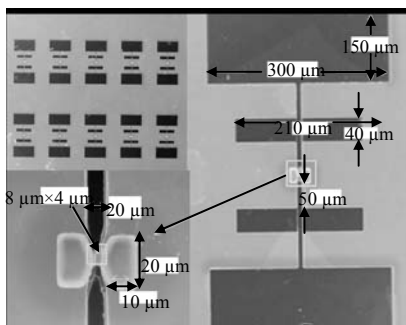


Fig.3 Detector  
图 3 检测器实物

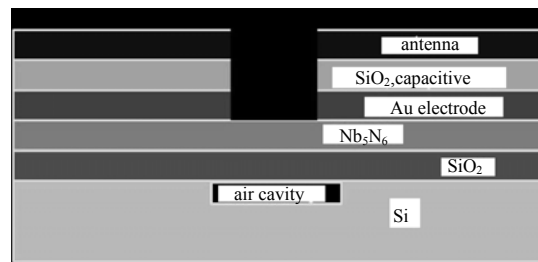


Fig.4 Cross-sectional view  
图 4 剖面图

含有空气腔的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜微桥的剖面结构示意图如图 4 所示。偶极子天线将入射的太赫兹信号耦合到 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜上，由于 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜的阻抗较大，使用偶极子天线可以获得较大的特征阻抗从而达到阻抗匹配的效果。偶极子天线与金电极之间的 SiO<sub>2</sub> 则一方面分离了电极与天线，另一方面起到耦合电容的作用，使微桥和天线获得较好的阻抗匹配。空气腔则杜绝了薄膜和衬底之间的热传导，提高了器件响应。

### 3 测量结果

对于测辐射热计而言，如果吸收的电磁波能量全部转换为热量，可以用 Jones<sup>[7]</sup> 提出的直流电压响应率  $k$  来表

征, 直流电压响应率通过测量器件的  $I-U$  曲线计算获得, 具体由式(1)给出:

$$k = \frac{Z - R}{2I_b R} \quad (1)$$

式中:  $Z=dU/dI$ 为器件的动态电阻;  $R=U/I$ 为测辐射热计的直流电阻。

实验测得的  $I-U$  曲线以及直流电压响应率如图5、图6所示, 通过测量器件的  $I-U$  特性, 最终得到当偏置电流为0.52 mA 时, 器件达到的最大电压响应率  $k=430$  V/W。

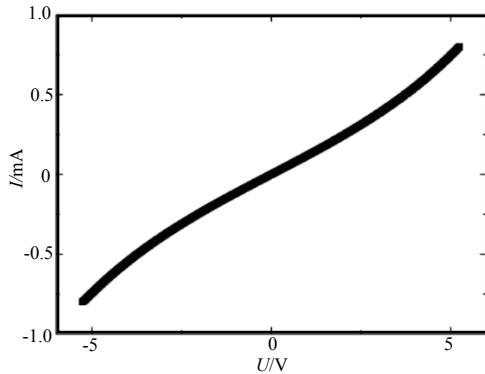


Fig.5  $I-U$  curve  
图5  $I-U$  曲线

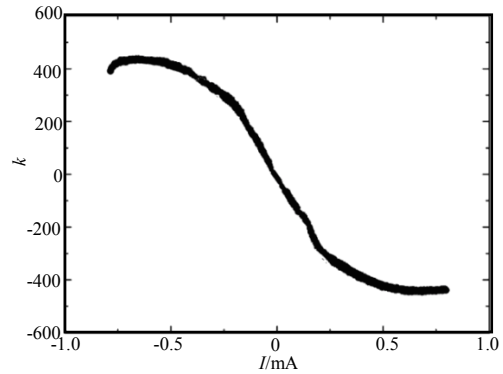


Fig.6 DC voltage response  
图6 直流电压响应

由于器件的直流电压响应率只是一个理论极值, 因此与上述的直流电压响应率相比, 射频电压响应率对于表征检测器更为实际<sup>[8]</sup>。为了测得太赫兹检测器的射频电压响应率, 采用的太赫兹源由VDI公司生产的AMC-336倍频器及安捷伦E8259D信号发生器组成, 信号发生器提供低频信号(9.26 GHz到13.88 GHz), 经AMC-336倍频得到太赫兹波段信号。太赫兹源的输出功率为0.5 mW左右, 与频率有关, 使用4 kHz的晶体管-晶体管逻辑电平(Transistor Transistor Logic, TTL)信号作为调制信号。使用2个离轴抛物面镜使太赫兹源喇叭输出的信号准直聚焦后入射到器件上, 器件的响应电压由锁相放大器读出。这里测量的频率范围为0.17 THz~0.375 THz(WR4.3和WR2.8 VDI喇叭)。图7为实验系统实物图。

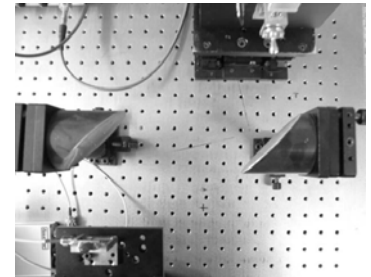


Fig.7 Measuring system  
图7 测量系统

实验中, 由于入射到器件的信号光斑尺寸远远大于器件的实际尺寸, 所以使用去卷积的方法得到器件的有效接收面积, 在有效接收面积内的能量为器件实际接收到的能量, 通过计算得到的有效电压响应率如图8所示。在0.32 THz频率处, 测得电压响应率达到最高, 为279 V/W。该实验结果比计算得到的直流电压响应率低, 这可能由于基底的干涉效应仍然存在, 另一方面, 虽然挖桥减少了热传导的损耗, 但仍然会有能力通过天线和衬底损耗掉, 因此需要使用有效电压响应率反映器件的真实性能。

#### 4 结论

设计、制备、测量了一种工作在室温下的太赫兹检测器。采用  $Nb_5N_6$  材料作为热敏电阻, 通过一定的结构设计使偶极子天线具有较高的特征阻抗, 并采用耦合电容的结构, 获得天线与  $Nb_5N_6$  微桥之间较好的阻抗匹配, 提高了耦合效率。实验测得, 在0.32 THz 频率处检测器的有效电压响应率达到最高值 279 V/W。在今后的工作中, 可以通过改善器件的制备工艺, 进一步提高器件电压响应率和减少噪声来提高器件的灵敏度。

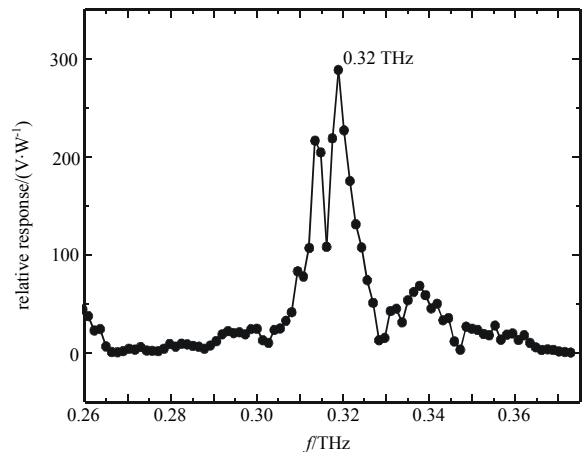


Fig.8 Voltage response  
图8 电压响应率

## 参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nat. Photonics, 2007,1(2):97-105.
- [2] Neikirk D P,Rutledge D B,Muha M S,et al. Far-infrared imaging antenna-arrays[J]. Appl. Phys. Lett., 1982,40(3):203-205.
- [3] Macdonald M E,Grossman E N. Niobium microbolometers for far-infrared detection[J]. IEEE T Microw. Theory, 1995,43(4):893-896.
- [4] Lee A W,Hu Q. Real-time,continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. Optics letters, 2005,30(19):2563-2565.
- [5] Chong N,Ahmed H. Antenna-coupled polycrystalline silicon air-bridge thermal detector for mid-infrared radiation[J]. Applied Physics Letters, 1997,71(12):1607-1609.
- [6] T Xuecou,K Lin,L Xinhua,et al. Nb<sub>3</sub>N<sub>6</sub> microbolometer arrays for terahertz detection[J]. Chinese Physics B, 2013,22(4):040701.
- [7] Rejones. The general theory of bolometer performance[J]. Opt. J. Soc. Am., 1953,43(1):1-10.
- [8] Bowyer E T,Villis B J,LI J,et al. Picosecond dynamics of a silicon donor based terahertz detector device[J]. Applied Physics Letters, 2014,105(2):021107.

## 作者简介:



徐磊(1989-),男,江苏省镇江市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹通信.email:xuleiorange@126.com.

涂学凑(1987-),男,江西省余干县人,博士,主要研究方向为太赫兹检测器。

万超(1987-),男,陕西省汉中市人,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹检测器读出电路。

裴宇峰(1990-),男,江苏省无锡市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹检测器读出电路。

康琳(1961-),女,南京市人,教授,主要研究方向为薄膜及其器件。

吴培亨(1939-),男,江苏省张家港市人,院士,教授,主要研究方向为超导电子学、超导电子器件的高频(微波到太赫兹波段)应用。

(上接第26页)

- [7] 张泽林,尚丽平,邓琥. 基于 LabVIEW 的太赫兹时域光谱系统数据采集实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(4):491-495. (ZHANG Zelin,SHANG Liping,DENG Hu. Data acquisition realization of terahertz time-domain spectroscopy system based on LabVIEW[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):491-495.)
- [8] 赵自然,王迎新. 便携式太赫兹时域光谱仪的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):57-61. (ZHAO Ziran, WANG Yingxin. Development of a portable terahertz time-domain spectrometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):57-61.)

## 作者简介:



翟召辉(1985-),男,河北省晋州市人,博士,助理研究员,主要从事瞬态太赫兹光谱成像及诊断技术.email:zxzhaohui@126.com.

钟森城(1986-),男,广东省梅州市人,硕士,主要从事高功率太赫兹脉冲源研究。

孟坤(1984-),男,山东省青岛市人,硕士,主要从事太赫兹技术及其在生物医学中的应用研究。

刘乔(1973-),男,四川省泸州市人,博士,主要从事太赫兹光谱成像技术及其在武器物理和生物医学中的应用。

李江(1989-),男,重庆市人,硕士,主要从事高速太赫兹通信领域研究。

朱礼国(1983-),男,四川省绵竹县人,博士,主要从事太赫兹技术、快光电技术及其在武器物理和生物医学中的应用研究。