

# 太赫兹检测技术\*

金飏兵<sup>1,†</sup> 单文磊<sup>2</sup> 郭旭光<sup>3</sup> 秦华<sup>4</sup>

(1 南京大学超导电子学研究所 南京 210093)

(2 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(3 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 太赫兹固态技术重点实验室 上海 200050)

(4 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 中国科学院纳米器件与应用重点实验室 苏州 215123)

2013-08-21 收到

† email: bbjin@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20131102

## Terahertz detectors

JIN Biao-Bing<sup>1,†</sup> SHAN Wen-Lei<sup>2</sup> GUO Xu-Guang<sup>3</sup> QIN Hua<sup>4</sup>

(1 Research Institute of Superconductors Electronics (RISE), Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(2 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(4 Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nanobionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

**摘要** 太赫兹(terahertz, 简称THz)检测技术是THz技术应用的一个关键环节, 它涉及物理学、材料科学、半导体技术、光电子学和超导电子学, 是一门综合性很强的技术。文章介绍了一些比较典型的THz检测技术的原理及其应用, 特别是国内学者在这方面的工

**关键词** 太赫兹脉冲, 相干检测和非相干检测, 超导太赫兹高灵敏检测器, 太赫兹量子阱检测器

**Abstract** Terahertz (THz) detection is a key link in the application of THz technology. It is a highly comprehensive technology, involving physics, material science, semiconductor technology, optoelectronics, and superconducting electronics. This paper introduces the principle and applications of some typical THz detectors, especially with regard to research in China.

**Keywords** THz pulse, heterodyne and direct detection, superconducting THz highly-sensitive detector, THz quantum-well detector

## 1 引言

THz技术在物理学、材料科学、生命科学、天文学、环境监测、信息技术和国防科技等方面都有巨大应用前景, 这个巨大的需求推动着THz

技术的发展<sup>[1-5]</sup>。目前, THz技术主要研究以下三个方面, 即太赫兹源、功能器件和检测技术, 其中太赫兹检测技术是一个很重要的部分。但是由于THz波段处于毫米波和红外波段之间, 传统的半导体器件(例如二极管和晶体管)因受到半导体制备技术和载流子迁移率的影响, 工作频率一般被限制在1 THz以下; 而基于量子机制的光子型半导体器件, 因受能隙频率的限制, 其最佳工作频率一般在10 THz以上的频段。因此, 在这一频

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA010204)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CBA00107和2014CB339800)、国家自然科学基金(批准号: 61071009)资助项目

段内, 开发和研究各种检测器, 以满足不同的实际需求, 已成为突破 THz 技术应用瓶颈的关键。在本文中, 我们描述了一些典型的太赫兹检测技术及其国内外的的发展状况, 特别介绍了国内学者的一些最新研究成果。

## 2 THz 检测技术的分类

THz 波检测技术主要分为 THz 超短脉冲的时域测量和连续波 THz 信号的测量<sup>[5]</sup>。超短脉冲的时域测量常采用光电导天线采样和利用非线性晶体的电光探测两种方法, 直接记录 THz 电场的振幅随时间变化的波形。在对连续波 THz 信号的测量中, 又分为相干(外差混频)检测和非相干(直接检测)检测。相干检测技术利用非线性器件, 把 THz 信号变换到可方便处理的较低频率的信号(也称中频信号)。相干检测技术灵敏度高, 且具有很高的频谱分辨率, 是目前高灵敏度检测常用的手段; 但相干检测技术结构复杂, 成本昂贵, 并需要高频率稳定度和一定输出功率的本振信号源, 这在 THz 波段是有较大难度的, 从而也使其应用范围受到较大的限制。直接检测技术是将被测信号直接转化为直流电流或电压信号, 因无需本振信号源和中频放大器等器件, 从而使系统结构简单, 动态范围宽, 便于小型化, 但它只能得到信号的幅度信息, 因此这种检测技术比较适用于阵列多像元成像检测系统。

## 3 THz 超短脉冲的时域测量

光导天线检测和电光检测是两种最常用的 THz 超短脉冲的测量方法, 广泛应用于 THz 时域光谱技术。光导天线主要是由两个沉积在半导体基底上的金属电极构成, 这个基底通常是在半绝缘 GaAs 片上低温生长的 GaAs 薄膜。当飞秒激光照射到光导天线的两个金属电极之间时, 会在电极的区间产生载流子, 使得电极两端的电阻下降到几百欧姆或更小的数值<sup>[6]</sup>。所产生的载流子被外加电场加速运动, 结果是在光生载流子的寿命

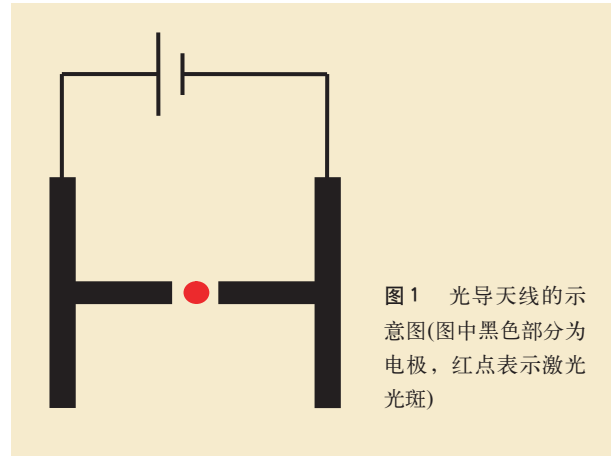


图1 光导天线的示意图(图中黑色部分为电极, 红点表示激光光斑)

时间内, 会产生一个正比于所接收的瞬间 THz 电场的电流, 该电流可以表示为  $J = ne\mu E(\tau)$ , 其中  $n$  是平均的电子密度,  $\mu$  是电子迁移率,  $E$  是 THz 脉冲电场的强度,  $\tau$  是检测脉冲和太赫兹脉冲之间的时间差。然后通过延迟线改变  $\tau$ , 就可以把整个 THz 脉冲描绘出来。

电光 (EO) 检测是基于非线性电光晶体的电光效应。其基本原理是利用电光晶体中的 Pockels 效应。Pockels 效应和光整流很接近, 表现在二阶非线性极化上非常相似, 如下式所示:

$$\begin{aligned} P_i^{(2)}(\omega) &= 2 \sum_{j,k} \epsilon_0 \chi_{ijk}^{(2)}(\omega, \omega, 0) E_j(\omega) E_k(0) \\ &= \sum_j \epsilon_0 \chi_{ij}^{(2)}(\omega) E_j(\omega) \end{aligned}, \quad (1)$$

其中  $\chi_{ij}^{(2)}(\omega) = 2 \sum_k \chi_{ijk}^{(2)}(\omega, \omega, 0) E_k(0)$  是电场引起的感性张量。(1)式显示静电场在非线性晶体中引起的双折射是正比于所加电场的幅度的。因此, 可以通过测量电场引起的双折射效果来得到所加电场的强度。图 2 是采用电光检测方法的原理示意图。待测量的 THz 脉冲和飞秒激光脉冲, 同向同轴(共线)地入射到电光晶体上。在理想情况下, 检测飞秒激光的群速度和 THz 的相速度在电光晶体中完美地匹配。在 THz 电场的作用下, 线偏振的飞秒激光的偏振状态发生变化, 即 THz 脉冲的电场引起的双折射对飞秒激光的偏振进行了调制。通过四分之一波片后, 无 THz 电场调制的线性检测飞秒激光被转换成圆偏振光, 即  $E^{NIR}(t) = E_x^{NIR} \sin(\omega t) + E_y^{NIR} \cos(\omega t)$ , 而被 THz 电场

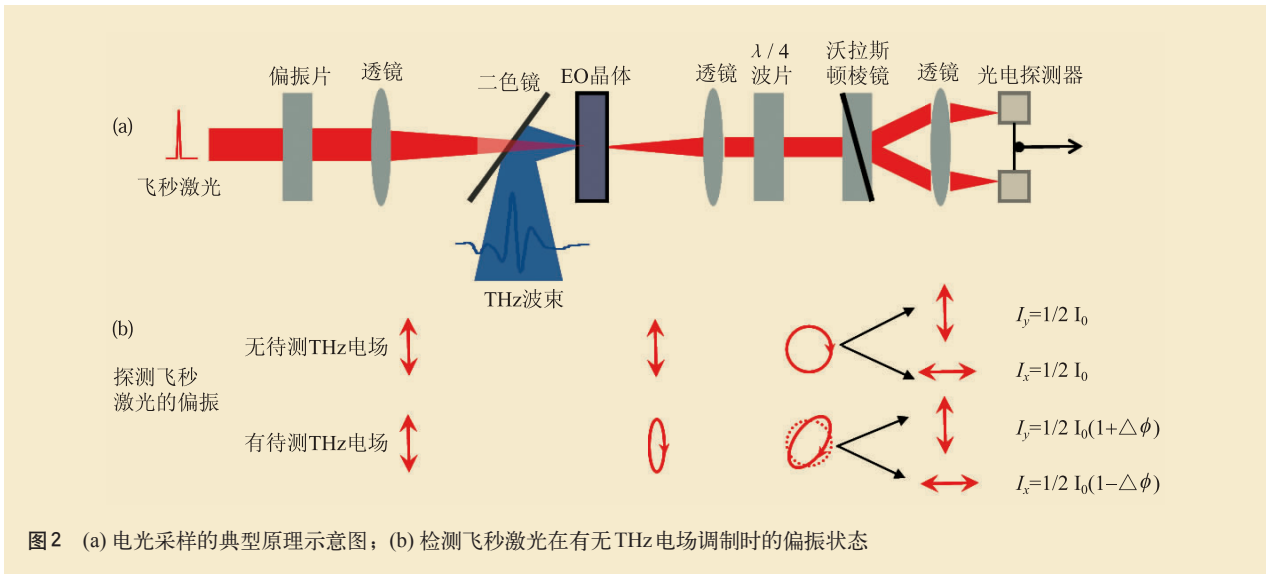


图2 (a) 电光采样的典型原理示意图; (b) 检测飞秒激光在有/无THz电场调制时的偏振状态

调制过的飞秒激光则形成椭圆偏振，即  $E^{NIR}(t) = E_x^{NIR} \sin(\omega t + \Delta\phi) + E_y^{NIR} \cos(\omega t)$ 。通过沃拉斯顿棱镜的分解，检测飞秒激光被分成两个垂直方向的分量，分别入射到两个平衡光电检测器上。两个光电探测器之间的信号差异  $I = I_x - I_y$ ，反映了探测飞秒激光两个垂直分量之间的相位差异  $\Delta\phi$ ，对于 ZnTe, ZnSe, GaP 等闪锌矿电光晶体，该差异  $\Delta\phi$  可以表示为<sup>[6, 7]</sup>：

$$\Delta\phi = \frac{\omega L}{c} n_0^3 r_{41} E_{THz} \quad (2)$$

其中  $L$  是电光晶体的厚度， $n_0$  是电光晶体中检测光波段的折射率， $r_{41}$  是电光晶体的电光系数。因此，两个光电检测器之间的信号差异直接正比于 THz 电场的大小，通过改变检测飞秒激光脉冲和 THz 脉冲之间的时延，就可以扫描得到整个时域的 THz 脉冲波形。目前，常用的电光晶体有 ZnTe, ZnSe, GaP, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> 等。

## 4 THz 连续波检测

### 4.1 相干检测

相干检测或超外差检测是指被测信号  $f_s$  与本振信号  $f_{LO}$  一起施加到一个非线性器件上，产生一个下变频信号(变频有两种方式，一种是上变频，一种是下变频。下变频是把信号频率变换到较低

频率，然后进行处理)，也就是中频信号  $f_{IF} = |f_s - f_{LO}|$ ，其工作原理如图3所示。相干探测不仅可以测量被测信号的幅度，还可以测量它的相位，而且相干检测通常有比较高的灵敏度和高的频率分辨率，适合于对信号进行频谱分析。

美国 VDI 公司可以研制出多种室温半导体肖特基二极管混频器(基波和谐波混频器)，频率范围从 75 GHz 到 1.7 THz。这些混频器是把平面电路和肖特基二极管集成在一个电路上，可以得到很好的性能，在 0.5 THz 以下，噪声温度小于 1000 K，在 1 THz 时，噪声温度大约为 5000 K，可应用于射电天文、大气监测、雷达以及制导和军事保密通信等领域<sup>[8]</sup>。

在 THz 高灵敏相干检测中，超导器件占有非常重要的地位。超导相干探测器主要有超导隧道结(SIS)混频器和超导热电子(HEB)混频器。超导隧道结混频器的核心是三明治结构的超导隧道结，它具有几乎理想的开关特性。当结两端的电压低于超导电极的能隙电压时，几乎没有电流能够通过；当结电压高于能隙电压时，电子可以借助量子隧道效应越过势垒。这个接近理想开关的高非线性特性满足了高效率混频的要求。基于量子效应的高度非线性特性，SIS 混频器能够实现高的变频效率，甚至能得到包含参量放大的变频增益<sup>[9, 10]</sup>。在高变频效率的同时，SIS 结混频器所

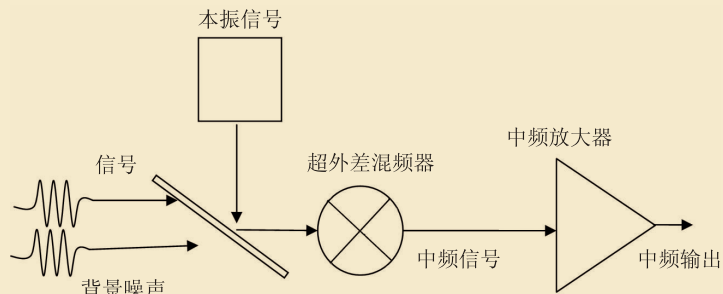


图3 相干检测的原理示意图

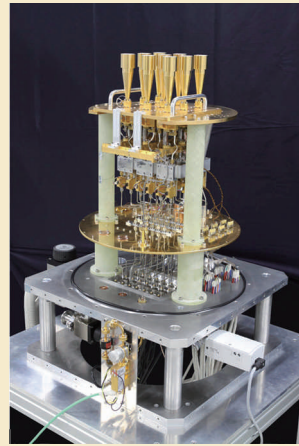


图4 装备于青海省德令哈的13.7 m望远镜上的超导成像频谱仪前端

需要的本振功率小(微瓦量级), 因此散粒噪声低。在理想状态下, 混频器噪声可接近量子极限( $T_{\min} = h\nu/k_B$ ,  $h$ 是普朗克常数,  $\nu$ 是工作频率,  $k_B$ 是玻尔兹曼常数)的水平, 实际应用中根据频率不同, 大约是2到10倍的量子极限。常用的Nb隧道结(是以金属铌为电极材料制成的一种电子器件, 电极中的电子能够通过量子隧道效应穿过电极之间极薄的绝缘层)在其能隙频率(700 GHz)以上工作时, 损耗增加, 性能下降。但配合采用高能隙超导材料(如NbN或NbTiN)作为电极材料或调谐电路材料时, 能够使SIS混频器的工作频段拓展到1—2 THz。1999年, 加州理工大学J.Zmuidzinas 研究组采用超导隧道结, 并用铌钛氮薄膜构成调谐电路, 在0.8 THz条件下, 获得混频接收器的噪声温度仅为205 K, 大约为5倍的量子噪声温度极限<sup>[11, 12]</sup>。另外, 欧洲空间局的Herschel空间天文台上装备的1.2 THz SIS接收机<sup>[13]</sup>, 可用于空间飞行。中国科学院紫金山天文台在将SIS接收机技术应用于射电天文学方面做了大量的工作, 在我国青海省德令哈的13.7 m口径毫米波望远镜上, 安装了SIS接收机, 开展CO分子云的观测。2010年, 紫金山天文台独立完成了100 GHz频段9波束边带分离型SIS接收机, 如图4所示。它不但是国内首台毫米波段多波束接收设备, 也是国际首次采用边带分离型原理的毫米波多波束接收机<sup>[14]</sup>。目前SIS混频器的单元器件的研究已经非常成熟, 发展方向是多像元应用, 特别是发展

大规模多像元集成化的超导混频接收机。大规模多波束(100—1000像元)能极大地提高天文观测效率, 在大气和对地空间观测方面也有潜在价值。

由于受到超导体能隙频率的限制, 在1.4 THz频率以上, 超导HEB是一个更好的选择<sup>[15]</sup>。2006年, 荷兰SRON研究所成功地将输出频率为2.8 THz的量子级联激光器(QCL)作为本振源, 驱动HEB工作, 在环境温度为2 K的情况下, 测得HEB的噪声温度近1200 K, 大约为8倍的量子噪声极限<sup>[16]</sup>。在国内, 中国科学院紫金山天文台把HEB器件安装在闭合致冷机中, 测得噪声温度在0.85 THz时为1350 K<sup>[17]</sup>; 南京大学超导电子学研究所经过几年的努力, 首先制备出高质量的外延超薄NbN膜, 在膜厚为3.5 nm时, 超导转变温度大于10 K。然后研究了不同厚度的NbN薄膜的输运特性, 测量了超薄膜在太赫兹波段的传输特性, 确定了超薄膜的能隙, 这些测量表明, 薄膜的转变温度随厚度减小而下降可能是由于量子尺寸效应引起的<sup>[18, 19]</sup>; 同时, 薄膜在直流测量和THz光谱测量中所得到的基本相同的正常态电阻率, 也反映了我们的超薄膜有很好的均匀性。在此基础上, 我们设计了低噪声的HEB器件, 如图5所示。我们HEB的核心是一个纳米超导微桥, 桥长0.4  $\mu\text{m}$ , 桥宽4  $\mu\text{m}$ , 薄膜厚度是3.5 nm。与此同时, 我们还搭建了完整的测试系统(见图6)。该系统可以利用Y因子方法测量混频器的噪声温度, 测量结果见图7。所得器件的噪声温度在

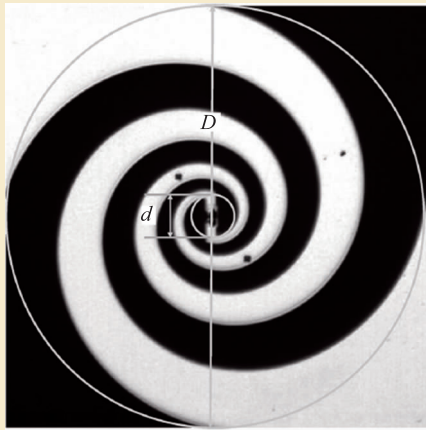


图5 超导HEB混频器的显微放大图(或电镜图)(图的中心部分是一个由3.5 nm厚的NbN膜所构成的超导微桥。桥长0.4 μm, 桥宽4 μm)

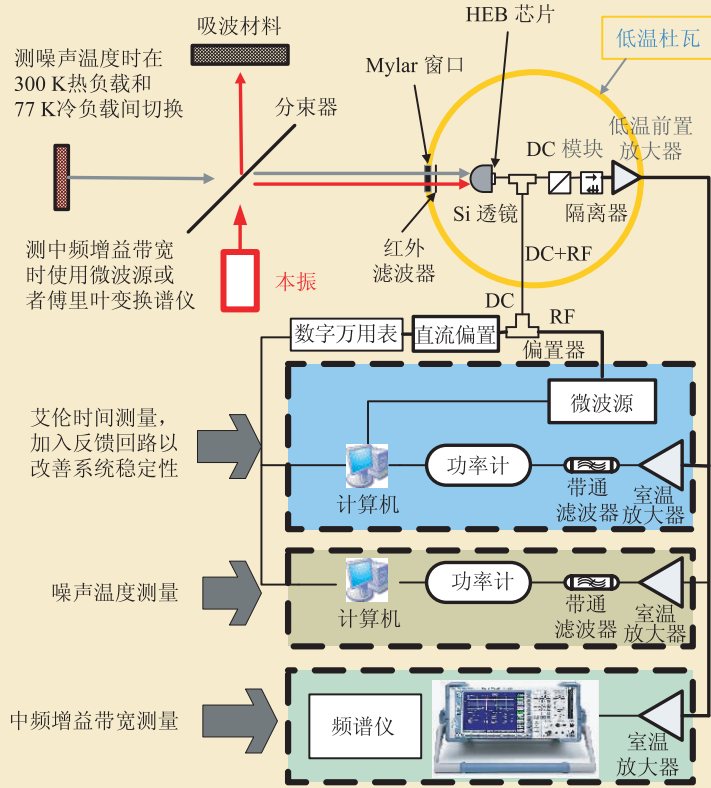


图6 HEB器件的测量系统, 包括噪声温度、艾伦时间以及中频带宽的测量

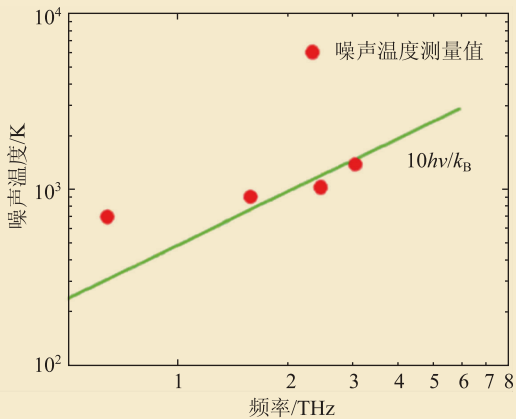


图7 HEB混频器在不同频率的噪声温度。图中绿线代表10倍的量子噪声极限

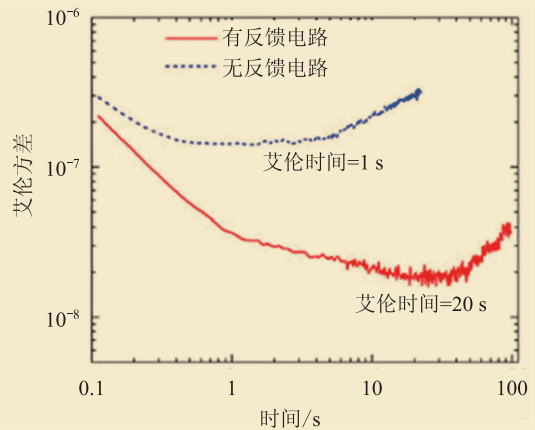


图8 HEB混频器的中频输出的艾伦方差与系统平均时间的关系, 红线和蓝线分别代表有和没有反馈回路的情况

2.5 THz 时为 1026 K, 该指标与国际上先进水平相当。另外, HEB 的稳定性也是一个重要参数, 它主要是由于本振信号功率的漂移引起的。为了改善系统的稳定性, 我们将可方便调节的微波信号通过 T 形偏置电路(Bias Tee)耦合到器件两端, 以补偿不易调节的 THz 本振功率的不稳定性, 并

建立了一个反馈电路, 可以自动调节所施加的微波功率, 使器件处于最佳偏置状态。通过这些工作, HEB 器件的稳定性得到很大的改善, 把表征稳定性的参数艾伦(Allan)时间从 1 s 提高到 20 s (见图 8)。从此可以看出, 我们已经掌握了从薄膜制备到低噪声 HEB 器件的设计和加工以及测量的

所有关键技术<sup>[20, 21]</sup>, 从而改变了依赖国外提供样品的情况, 并有望在我国的南极天文观测站等地发挥作用。

高温超导 Josephson 结也是一个很好的 THz 检测器。由于它的能隙频率可以达到 20 THz 以上, 因此可以覆盖整个 THz 波段。南京大学发展了多种制备高温超导 Josephson 结的方法<sup>[22]</sup>, 并在此基础上, 开展了毫米波和太赫兹波混频器的研究<sup>[23, 24]</sup>, 特别是利用高温超导 Josephson 结的强非线性构成谐波混频器, 把 Gunn 式管发射的 THz 信号(104.3 GHz)相位锁定到一个微波频率综合器的信号(2 GHz)上, 使得 Gunn 式管发出的信号的频率稳定度与微波频率综合器相同, 这大大提高了 THz 信号的频率稳定度<sup>[24]</sup>。日本东北大学与南京大学合作, 在 MgO 双晶基片上成功制备高质量的 Josephson 结, 实现了在 1.6 THz 附近的基波混频和微波与 THz 波之间的谐波混频, 谐波次数高达 490 次<sup>[25]</sup>。

我们还可以基于高温超导 Josephson 结的 THz 检测器构成 THz 频谱仪和全超导的接收机。当 THz 信号照射到超导 Josephson 结上, 它的  $I-V$  特性会发生变化, 电流台阶的位置对应于入射信号的频率, 而它的幅度变化与入射信号幅度的平方成正比, 通过这个对应关系, 我们可以确定入射信号的频谱。我们在一个 MgO 双晶基片上沉积 YBCO 薄膜, 刻蚀出一个超导微桥跨过双晶晶界, 形成双晶 Josephson 结, 并在结的外部集成一个对数螺旋天线, 用来收集 THz 信号。图 9 就是我们这种高温超导结所测量的 THz 频谱<sup>[26]</sup>。从结果可以看出, 我们的频谱分析范围可以达到 2.5 THz。我们还可以利用这种 Josephson 结作为探测单元, 与高温超导本征结所形成的 THz 辐射源结合在一起, 形成全超导的 THz 接收机<sup>[27]</sup>, 如图 10 所示。高温超导材料如 BSCCO 单晶等, 具有高度的各向异性, 层与层之间可以看成是 Josephson 耦合, 也就是层与层之间形成了一个 Josephson 结, 在外加

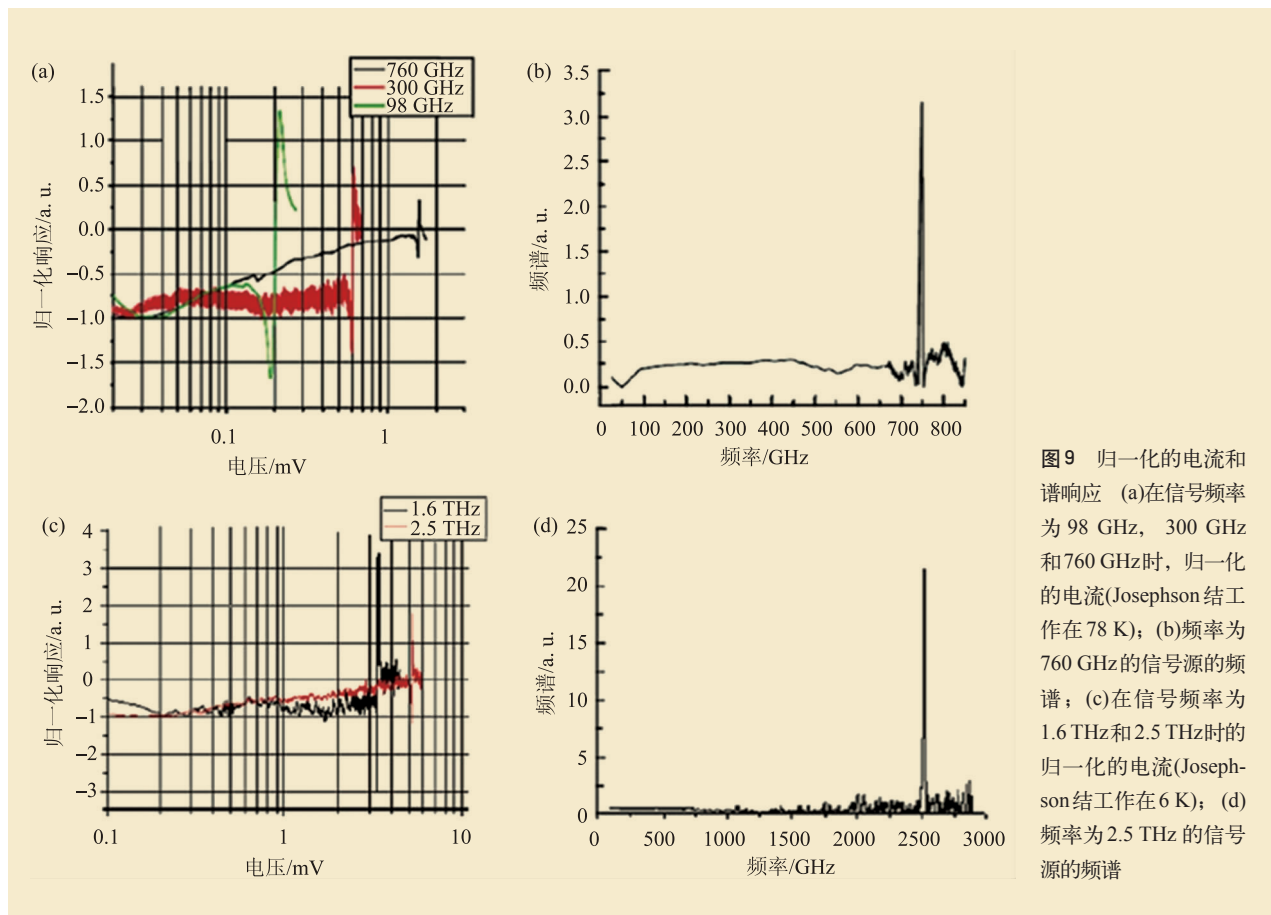


图 9 归一化的电流和谱响应 (a)在信号频率为 98 GHz, 300 GHz 和 760 GHz 时, 归一化的电流(Josephson 结工作在 78 K); (b)频率为 760 GHz 的信号源的频谱; (c)在信号频率为 1.6 THz 和 2.5 THz 时的归一化的电流(Josephson 结工作在 6 K); (d)频率为 2.5 THz 的信号源的频谱

偏置的情况下, 这些结会辐射出THz波, 形成一个电压调谐的THz源<sup>[28-30]</sup>。当这个辐射源照射到双晶结上时, 在0.5 THz时就可以观察到7个Shapiro台阶<sup>[27]</sup>, 这意味着我们的本征结THz辐射源的功率已经足以作为超导THz检测器的本振源, 这个工作为全高温超导接收机打下了坚实的基础。

### 4.2 非相干检测

非相干检测的原理大致可以用图11描述。被测信号和背景噪声通过光学元件(如透镜等)汇集

到探测器上, 引起探测器的某个物理特性发生变化, 再把这个特性转化为直流电流或电压信号, 经放大后读出。这种技术因无需本地振荡信号源和中频放大器等而使系统简单, 但一般只有幅度信息而没有相位信息, 而且对后端读出电路(低噪声放大器等)来说, 低噪声技术的要求比较高。这样的检测技术因其简单而多用于多像元成像检测系统。

爱尔兰 Farran 公司在常温下使用THz检测器

件时, 是利用半导体 GaAs 肖特基二极管做成直接检测器, 除后端读出系统和灵敏度与混频器的不同外, 器件的非线性伏安特性等与混频器的相同。在0.1 THz时, 其NEP(噪声等效功率)大约为 $10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 即使工作在1 THz时, 也可以测量功率为纳瓦级的小信号功率<sup>[31]</sup>。Virginia大学利用零偏置 Schottky 二极管, 在0.2 THz时, 波导系统的响应率是 $1000 \text{ V/W}$ , 准光系统是 $200 \text{ V/W}$ <sup>[32]</sup>。英国 TKI 公司室温高兰泡功率计等中功率检测器在3 THz以下时, 其NEP大约为 $5 \times 10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[33]</sup>。另外, 室温金属膜测辐射热检测器是一个用温度系数较大的材料制作成的电阻性元件, 这样当它吸收辐射时, 就能产生一个较大的电阻变化。除热噪声比低温工作的测辐射热计高2个量级外, 器件的检测和噪声机理与低温工作的测辐射热计的相同<sup>[34, 35]</sup>。目前南京大学也开展了常温 bolometer 型检测器的研究。他们开发出一种新的薄膜材料  $\text{Nb}_5\text{N}_6$ , 这种材料有比较

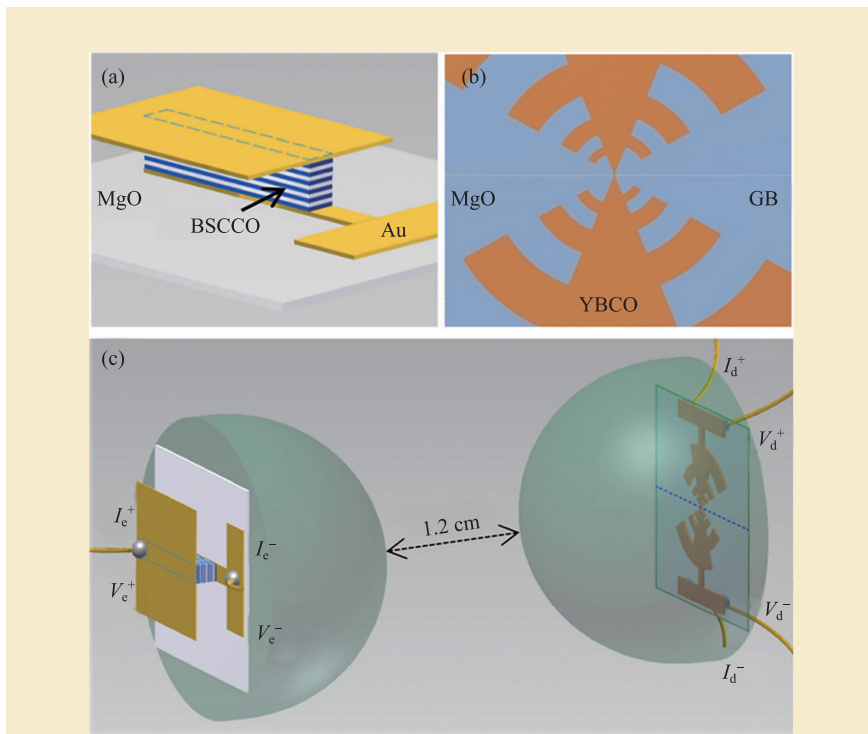


图10 组合BSCCO本征结THz辐射源和YBCO双晶结探测器的实验装置图 (a)BSCCO本征结示意图; (b)双晶结和对数螺旋天线; (c)源和探测器组合在一起时的空间位置图(图中淡绿色部分为超半球透镜)

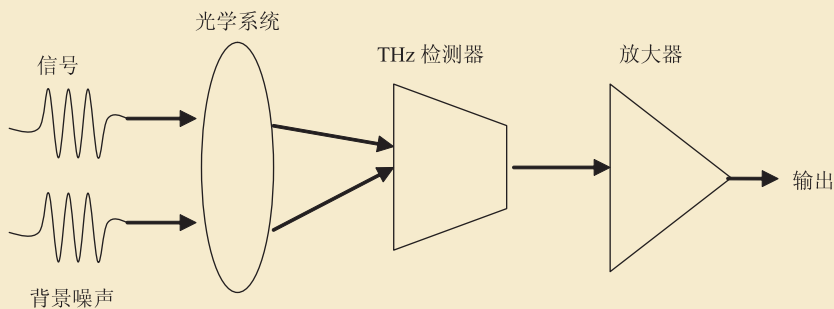


图11 非相干检测的原理示意图

高的电阻温度系数( $-0.7\% \text{ K}^{-1}$ )<sup>[36]</sup>。我们首先在Si基底上形成 $\text{Nb}_5\text{N}_6$ 薄膜微桥,并利用Al制的偶极天线有效吸收THz信号,在薄膜上感应的THz电流加热微桥,使其温度升高,从而改变 $\text{Nb}_5\text{N}_6$ 薄膜阻值,通过施加恒流偏置,便可产生一个变化的电压,从而达到检测太赫兹信号的目的。同时为了提高器件的灵敏度,我们刻蚀掉微桥下面的Si基底,形成空气桥的结构(见图12)。该探测器具有电压响应率高、噪声低、制作工艺简单、易制作大规模阵列、使用方便等优点,为太赫兹信号检测提供了一种有效的途径。在0.1 THz时,测量得到NEP为 $5 \times 10^{-11} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[37]</sup>,在0.22 THz到0.33 THz范围内,估算出NEP可以达到 $1.7 \times 10^{-11} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[38]</sup>,该探测器直到0.6 THz也有响应。

基于场效应自混频原理的THz检测器是一种新型的固态电子学THz检测器。检测器的基本结构与常规的场效应晶体管很相似,如图13(a)所示。不同之处在于,这类检测器具有一个与场效应栅极相集成的THz天线。由于THz天线的耦合作用,入射THz波在场效应沟道内会产生局域增强的THz电场。沿漏极到源极方向的横向THz电场( $E_x$ )对沟道内载流子的漂移速度进行调制,而垂直于沟道平面的THz电场( $E_z$ )调制载流子的浓度。由于源极和漏极之间的电流正比于载流子浓度与漂移速度的乘积,因此,单一频率的THz电场在源极和漏极之间诱导产生一个直流电流,即自混频电流<sup>[39, 40]</sup>。日本、法国、德国和美国的研究小组在该类探测器的研究中起步较早,实验验证了硅基CMOS场效应THz检测器、基于InGaAs/AlAs二维电子气和GaN/AlGaN场效应晶体管的THz检测器。其中,2010年日本松下和日本东北大学联合,采用90 nm的栅极偶极天线设计实现了1 THz下1100 V/W的电压响应率<sup>[41]</sup>,2011年,德国Wuppertal大学采用SOI—CMOS技术并集成了硅透镜,实

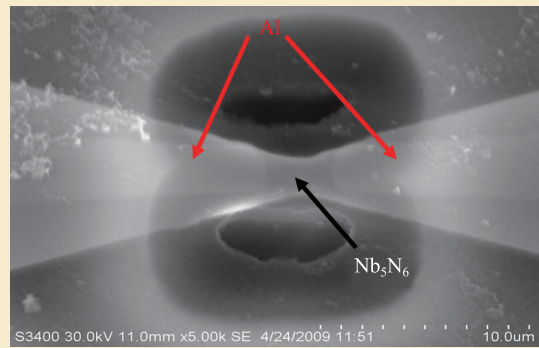


图12 器件的SEM照片,图中金属Al部分构成碟型天线,中间为我们的 $\text{Nb}_5\text{N}_6$ 微桥

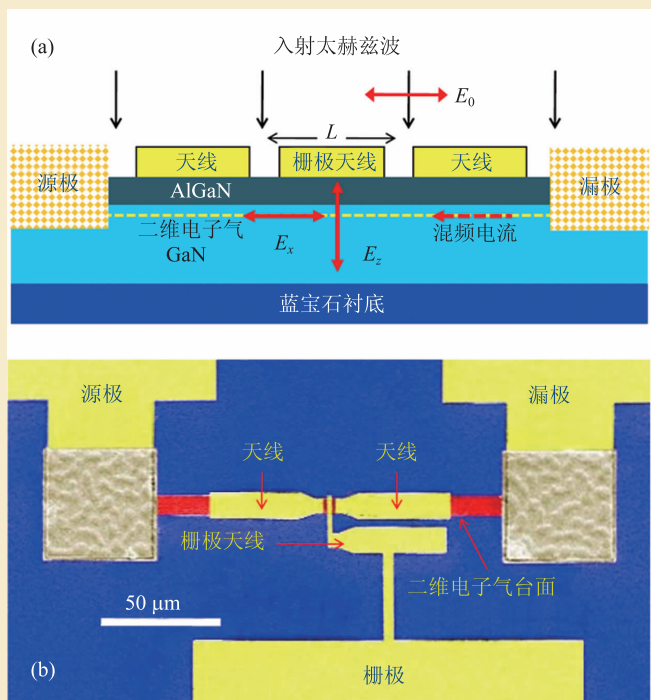


图13 自混频探测器的结构示意图和实际器件的显微照片

现了0.65 THz下2000 V/W的电压响应率<sup>[42]</sup>。中国科学院苏州纳米研究所开展了基于GaN/AlGaN异质结二维电子气的THz自混频检测器的研究,图13是自混频检测器的截面示意图和显微照片。他们结合THz天线下的THz电场分布和场效应缓变沟道理论,建立了完整的场效应自混频器件模型<sup>[43]</sup>。其探测器的灵敏度在室温和910 GHz时,在最佳的栅极电压工作点的电流响应率和电压响应率分别达到了80 mA/W和4000 V/W,噪声等效功率达到 $3 \times 10^{-11} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,略高于由探测器内



阻热噪声决定的理论计算值( $\sim 7 \times 10^{-12} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), 实验的结果与理论模型的预测结果基本一致<sup>[44]</sup>。

在低温非相干检测器方面, 热电子型 InSb 测辐射热仪是基于热电子效应和自由载流子吸收效应工作的。英国 QMC 公司制备的这种检测器在 0.3 THz 时的噪声等效功率  $\text{NEP} < 10^{-12} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 可测皮瓦级小信号功率<sup>[44]</sup>, 可应用于实验室检测以及雷达和安检等。利用高温超导体制备 Josephson 结, 其成本低, 使用方便, 具有广泛的应用前景。常用的双晶结具有制备工艺简单、成结一致性好、成品率高等优点, 并且双晶结对 THz 的高频响应也很敏感, 适用于 THz 检测器等高频应用器件。目前在 77 K 时已获得噪声等效功率  $\text{NEP}$  约为  $10^{-12} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  (测试条件为 0.1 THz)<sup>[45]</sup>, 可应用于快速频谱和物质的 THz 特征谱研究以及机载雷达中。

另外, THz 量子阱检测器 (THz QWP) 是一种基于半导体低维结构的光子型探测器, 其原理与中红外波段的量子阱检测器类似<sup>[46, 47]</sup>, 如图 14 所示。它通常是由数十个量子阱构成, 选择合适的量子阱势阱宽度和势垒高度, 可以使量子阱中第二个子能带(以下简称为子带)与势垒高度接近, 并通过掺杂, 在第一束缚子带上引入载流子。在量子限制方向(设为  $z$  轴, 非受限平面为  $xy$  面)施加偏压, 束缚载流子通过隧穿效应穿过厚势垒和通过热激发越过势垒的几率都非常小, THz QWP 处于高阻状态; 在光照情况下, 如果入射光子能量与第一和第二子带的能量差一致, 则第一子带上的束缚载流子会吸收光子, 发生子带

间的跃迁, 进入第二子带, 在外加偏压下形成光电流, 实现对入射光子的检测。与工作于中红外波段的量子阱光子检测器相比, THz QWP 中束缚态和连续态之间能量间距更小, 为了抑制由于热激发等因素产生的暗电流, 需要更低的工作温度(低于液氮温度, 最高工作温度约为 30 K), 并要求量子阱中载流子掺杂浓度更低, 导致器件的吸收效率和光增益降低, 进而降低了器件的响应率。

2004 年, 加拿大 NRC 刘惠春课题组研制成功基于传统量子阱检测器结构的光导型 THz QWP<sup>[46]</sup>, 并于 2005 年实现了可达到背景极限性能的 THz QWP<sup>[48]</sup>。2004 年, 瑞士 Faist 研究组研制成功光伏型量子级联太赫兹量子阱检测器<sup>[49]</sup>。基于量子点和量子环的太赫兹检测器也有报道<sup>[50]</sup>。中国科学院上海微系统与信息技术研究所与加拿大 NRC 合作, 研制成功光栅耦合能够正入射的 THz QWP<sup>[51]</sup>, 并进行了新型光耦合器的设计工作, 大幅度提高了探测器的性能<sup>[52, 53]</sup>。目前, THz QWP 工作温度最高可达 20 K, 响应波长覆盖 3.0—7.0 THz。与其他种类的太赫兹检测器相比, THz QWP 具有响应速度快、体积小、寿命长、稳定性高和工艺成熟等优点, 特别适合于太赫兹波段的高速检测与成像应用。

超导非相干检测器包括超导隧道结 (STJ) 直接检波器、惯动电感探测器 (KID) 和超导转变边缘传感器 (TES)。TES 的核心是一小片超导薄膜, 并通以电流, 将它加热到超导转变温度附近, 在外来 THz 辐照下, 超导薄膜吸收太赫兹光子造成的温度上升, 就可以使超导薄膜的电阻明显升高。电阻升高使得流过薄膜的加热电流减小, 进而使薄膜温度下降, 回到原来的状态, 使探测系统处于一个稳定状态。这个过程称为电—热反馈, 它提供了检测器读出的途径, 即利用高灵敏的电流计(通常用 SQUID)检测出加热电流的变化。TES 器件的关键在于探测器本身的绝热结构(一般采用镂空结构以减小热传导)以及对太赫兹辐射的耦合性能。TES 太赫兹检测器的噪声很低, 远低于大气背景噪声( $\text{NEP} \sim 10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), 能够达到  $\text{NEP} \sim$

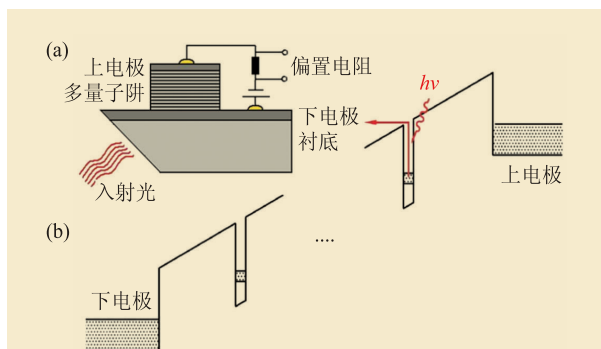


图 14 THz QWP 工作原理示意图 (a) 器件结构; (b) 器件能带结构和工作原理

$10^{-20} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  的水平。TES 检测器主要应用于射电天文领域。目前最大规模的 TES 检测器阵列应用是安装在美国的 JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) 望远镜上的 SCUBA2 探测器阵列<sup>[54]</sup>, 包含了 10000 个像元, 工作于 350 GHz 和 660 GHz 两个频段, 检测器噪声小于大气背景噪声。TES 检测器的主要困难除了器件本身的加工外, 还在于 SQUID 阵列读出技术, 目前 SQUID 阵列读出技术是由美国国家标准与技术研究院(NIST)所掌握, 欧洲也在积极发展该项技术, 希望打破美国垄断的局面。

TES 传感器出现于上世纪 40 年代, 但由于读出放大技术和电热反馈技术没有建立, 因此等待了 40 年之久才发展起来。与之相比, KID 检测器是 2003 年首次出现的新技术, 并得到迅速发展。KID 检测器的基本原理是基于超导电子对的密度受太赫兹辐射的敏感反应。当太赫兹光子的能量高于超导体的能隙时, 光子能够拆散超导电子对, 形成单电子(准粒子), 这个过程导致超导电子对的减少。利用超导薄膜构成谐振腔时, 由于谐振腔的等效电感中有一部分来自于超导电子对的惯性, 因此超导电子对密度的变化将导致谐振频率的变化。所以, 超导谐振腔频率的变化(或  $Q$  值的变化)可以反映对太赫兹光子的吸收情况。这种检测器受到广泛关注的主要原因是检测器的读出和复用非常直接和简便。只要将每个检测器像元做成频率有差异的谐振腔, 将它们弱耦合到读出传输线中, 就可以进行多路读出, 实现大规模像元的检测器阵列。KID 检测器的噪声水平与 TES 接近, 目前已经达到  $\text{NEP} \sim 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[55]</sup> 的水平。从 2007 年 KID 探测器阵列

首次应用于天文试验观测以来, 性能逐渐提高, 但尚没有大规模应用。其原因包括一些需要解决的技术问题, 例如像元间的串扰, 太赫兹信号的耦合以及亚 K(温度小于 1 K)低温环境器件的测试技术等。

STJ 检测器与 SIS 混频器一样, 都是基于隧道结的检测器。不同的是, STJ 的检测原理是光子辅助隧道。当偏置电压在能隙之下时, 理想的隧道结中没有电流通过。但如果吸收外来太赫兹光子, 在太赫兹光子的辅助下, 准粒子能够获得足够动能, 隧穿势垒。因此隧道电流能够反映太赫兹光子的吸收。这种检测器与 TES 和 KID 相比, 具有明显的优点是速度快, 因此在信号快速变化的应用场合具有优势。STJ 检测器在光子检测中(X 射线,  $\gamma$  射线)已经获得了应用, 不但能够测量高能光子流量, 而且还能得到高分辨率光谱。在太赫兹检测领域, STJ 仅有有限的尝试, 在实验室的条件下, 噪声性能目前可达到  $\text{NEP} \sim 10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[56]</sup>, 主要问题在于读出电路噪声较大, 大规模复用读出技术尚不成熟。

## 5 结束语

经过多年的努力, 太赫兹检测技术已经取得了很大的进展, 许多技术的性能指标已经接近于其理论的极限。发展新的器件工作原理, 提高单元器件的性能以及开发大规模阵列太赫兹检测器是目前一个工作的重点, 同时 THz 技术的大规模应用也会推进 THz 检测技术的迅速发展。

致谢 感谢吴培亨院士提出许多宝贵的意见。

## 参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang Xi-Cheng. Nature Material, 2002, 1:26
- [2] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用. 北京: 北京大学出版社, 2007 年 7 月第一版
- [3] Tonouchi M. Nature Photonics, 2007, 1:97
- [4] Hangyo M *et al.* Inter. J. of Infrared and Millimeter Waves,

2005, 26:1661

- [5] Sizov F. Opto-Electronics Review, 2010, 18(1):10
- [6] Daryoosh Saeedkia ed. Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications. Woodhead Publishing Limited, 2003

- [7] Boyd R W. Nonlinear Optics. San Diego: Academic Press, 1992. Chap. 10
- [8] <http://www.virginiadiodes.com>
- [9] Duzer T Van, Turner C W. Principles of Superconductive Devices and Circuits. Elsevier, 1981
- [10] (意)巴罗尼(Barone A), (意)帕特诺(Paterno G)著, 崔广霁, 孟小凡译. 约瑟夫森效应原理和应用. 北京: 中国计量出版社, 1988
- [11] Kawamura J *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 75: 4013
- [12] <http://www.submm.caltech.edu/cso/>
- [13] de Graauw Th *et al.* Astronomy and Astrophysics, 2010, 518 (L6): 1
- [14] Shan W *et al.* IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(6): 593
- [15] Semenov A D *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2002, 15: R1
- [16] Hajenius M *et al.* In: Wolfgang Wild ed. the Proceedings of the 17th International Symposium on Space Terahertz Technology. 2006, 347—350
- [17] Jiang L *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, 17 : 395
- [18] Kang L *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2003, 16 : 1417
- [19] Kang L *et al.* J. Appl. Phys., 2011, 109 : 033908
- [20] Chen J *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2009, 19 : 278
- [21] Jiang Y *et al.* Science China-Information Science, 2012, 55 (1): 64
- [22] Wu P H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1987, 26: L1579
- [23] Song J M *et al.* IEEE Trans. On Mag., 1989, 25: 911
- [24] Wang H B *et al.* Appl. Phys. Lett., 1995, 66: 370
- [25] Chen J *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71: 707
- [26] Xu W W *et al.* Science China-Technological Sciences, 2010, 53 (5): 1247
- [27] An D Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 102: 092601
- [28] Ozyuzer L *et al.* Science, 2007, 318 : 1291
- [29] Wang H B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102 : 017006
- [30] Wang H B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 105 : 057002
- [31] <http://www.farran.com>
- [32] Liu L *et al.* 20th International Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville, 20—22 April 2009
- [33] <http://www.terahertz.co.uk/TKI/tkins.html>
- [34] MacDonald M E *et al.* IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 1995, 43( 4): 893
- [35] Bourgeois O *et al.* Review of Scientific Instruments, 2006, 77: 126108
- [36] Lu X H *et al.* Chin. Sci. Bull., 2009, 54: 3344
- [37] Lu X H *et al.* In: Proceedings of 33rd International Conference on IRMMW-THz. California, USA, Sept. 2008
- [38] Tu X C *et al.* Chin. Phys. B, 2013, 22 : 040701
- [39] Stephen A M. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1987, MTT-35(4): 425
- [40] Dyakonov M I, Shur M S. IEEE Trans. Electron Devices, 1996, 43: 380
- [41] Tanigawa T *et al.* Device Research Conference at South Bend. IN, June 22, 2010, p. IV. A-9
- [42] Sherry H *et al.* IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Baltimore, MD, 2011. 365—368
- [43] Sun J D *et al.* Appl. Phys. Lett., 2012, 100 : 173513
- [44] <http://www.terahertz.co.uk/QMCI/qmc.html>
- [45] Chen J *et al.* IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2005, 15 : 530
- [46] Liu H C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 84 : 4068
- [47] Schneider H, Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetectors: Physics and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [48] Luo H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 231103
- [49] Graf M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 84: 475
- [50] Su X H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 031117
- [51] Zhang R *et al.* IEEE Electron Device Lett., 2011, 32: 659
- [52] Guo X G *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2012, 48: 728
- [53] Guo X G *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2012, 48: 1113
- [54] Holland W S *et al.* arXiv: 1301.3650v1, 2013
- [55] Mazin B A. The 13th International Workshop on Low Temperature Detectors. LTD13, 2009
- [56] Ariyoshi S *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 920

#### 读者和编者

## 《物理》有奖征集封面素材

均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至: [physics@iphy.ac.cn](mailto:physics@iphy.ac.cn); 联系电话: 010-82649470; 82649029

期待您的参与!

为充分体现物理科学的独特之美, 本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰, 色泽饱满, 富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。被选用的封面素材提供者,

《物理》编辑部