

## 用于超导太赫兹探测器的低温标准黑体辐射源\*

吴曼瑾<sup>1)</sup> 姚柏志<sup>1)</sup> 石粒力<sup>1)</sup> 陈本纹<sup>1)</sup> 吴敬波<sup>1)2)†</sup>张彩虹<sup>1)2)</sup> 金飏兵<sup>1)2)</sup> 陈健<sup>1)2)</sup> 吴培亨<sup>1)</sup>

1) (南京大学电子科学与工程学院, 超导电子学研究所, 南京 210023)

2) (紫金山实验室, 南京 211111)

(2022 年 1 月 14 日收到; 2022 年 4 月 3 日收到修改稿)

针对太赫兹超导探测器的测试需求, 开发了可用于低温环境的太赫兹标准黑体辐射源. 采用太赫兹时域光谱系统, 提取了伯克利黑体材料的介电常数, 并测试了它的反射系数. 另外, 设计了圆锥形结构的黑体辐射源, 仿真结果表明它具有较低的反射率. 在此基础上, 制备了装载于稀释制冷机中的黑体辐射源, 通过控制温度实现对黑体源辐射功率的调谐. 这一黑体辐射源能够满足太赫兹超导探测器的定标需求, 并将有助于高灵敏太赫兹辐射计的开发和应用.

**关键词:** 黑体辐射源, 太赫兹时域光谱技术, 反射系数, 黑体辐射功率

**PACS:** 87.50.U-, 78.20.Ci, 85.25.Am, 85.25.Pb

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220103

## 1 引言

太赫兹辐射计广泛应用于射电天文、遥感和气象探测等领域. 在射电天文研究中, 太赫兹辐射计被大量用于地基和星载天文观测装置, 如木星冰月探测器 (JUICE)<sup>[1]</sup>、阿塔卡马大型毫米/亚毫米波天线阵等<sup>[2]</sup>. 在气象探测领域, 辐射计可用于监测气候变化, 如欧洲气象卫星应用组织开发的第二代气象卫星 (Metop-SG) 搭载了微波探测仪和冰云成像仪<sup>[3]</sup>. 超导太赫兹探测器由于具有极高的灵敏度, 被广泛应用于太赫兹辐射计中. 根据物理机理的不同, 主要分为以下几类: 测热辐射计是利用太赫兹吸收引起电阻的变化, 包括转变边缘结探测器<sup>[4,5]</sup>和热电子测热辐射计<sup>[6,7]</sup>等; 超导动态电感探测器<sup>[4,8]</sup>是利用入射光子拆散超导电子对, 引起超导薄膜动态电感的变化实现高灵敏的探测; 量子电容探测器<sup>[9,10]</sup>

是利用超导电子对破坏后产生准粒子并引起量子电容的变化来实现高灵敏的太赫兹探测. 目前, 量子电容探测器已经可以实现太赫兹单光子的探测<sup>[11]</sup>, 并有望用于下一代太赫兹天文望远镜的成像阵列.

太赫兹辐射计的定标需要一个输出功率精确可控的辐射源, 输出功率的偏差直接影响辐射测量的精度<sup>[12–14]</sup>. 在太赫兹频段, 通常采用黑体辐射源作为定标光源<sup>[15,16]</sup>. 超导太赫兹探测器需要工作在低温环境中, 为了实现检测器的表征, 需要低温工作、功率可调的太赫兹辐射源作为测试光源. 因此, 研制工作于低温环境下的黑体辐射源对于开发太赫兹超导探测器至关重要. 低温黑体辐射源已在诸多国际天文探测项目中有所应用. 如在欧洲航天局的 JUICE 项目中, 辐射计采用的是圆锥形低温黑体作为校准目标<sup>[17]</sup>, 该黑体由锥形铝外壳和绝缘安装支架组成, 吸收层材料为环氧树脂和羟基铁粉混合物, 它可以工作在 150—405 K 环境中, 在

\* 科技部重点研发计划 (批准号: 2017YFA0700202, 2021YFB2800701) 和国家自然科学基金 (批准号: 62071217, 62027807, 6173110, 61871212) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jbwu@nju.edu.cn

工作频率 530—630 GHz 范围内反射系数均低于 -59 dB. 目前国内关于低温黑体的研究较少. 近来, 紫金山天文台史生才院士课题组<sup>[18]</sup>在超导太赫兹探测器的研究中, 采用了一种平板形低温黑体辐射源用于检测器表征. 该黑体源制备在直径 70 mm 的金属板上, 黑体材料为环氧树脂、炭黑和碳化硅颗粒的混合物. 通过调节温度, 在 1.4 THz 的辐射功率范围为  $10^{-21}$ — $10^{-14}$  W.

理想黑体源的发射率为 1, 为使黑体源接近理想情况, 需要尽可能地提高黑体辐射源的发射率. 黑体辐射源一般通过吸波涂层以及锥形、金字塔形等结构实现最大发射率. 根据基尔霍夫辐射定律, 高发射率的黑体源同时具有高吸收率. 制备宽频带、宽温度范围内的黑体辐射源, 首要解决的问题是寻找具有高损耗的涂层材料, 如炭黑颗粒、羟基铁粉等; 其次是设计优化辐射源的几何结构, 使得入射波尽可能多次反射在吸收层上. 目前, 圆锥形黑体空腔已被证明能够实现较低的反射率, 在半锥角为  $10^\circ$  时可以提供小于 -40 dB 的反射率<sup>[19]</sup>. 相比于楔形目标, 圆锥结构的高度对称性使其发射率与偏振无关.

为了满足超导太赫兹探测器的定标需求, 本文设计了可在低温工作的锥形黑体辐射源. 为了表征黑体涂层材料的性能, 测试了伯克利黑体材料的太赫兹介电常数和反射系数. 之后, 仿真了锥形黑体源的反射系数, 并制作用于稀释制冷机的黑体辐射源.

## 2 太赫兹探测器用黑体辐射源的结构和系统

本文设计的锥形黑体辐射源结构如图 1(a) 所示, 几何参数为  $r = 20.0$  mm,  $l = 94.0$  mm,  $\phi = 12^\circ$ . 黑体辐射源内部涂覆厚度为 2.0 mm 的吸收层. 吸收层采用的是 Bock 公司提出的一种属于伯克利黑体的非磁性吸波材料. 伯克利黑体的配比为: 68% 环氧树脂 (Stycast 2850 FT)、5% 催化剂 (Catalyst 24 LV)、5% 炭黑和 22% 玻璃微珠 (直径 180  $\mu\text{m}$ )<sup>[20]</sup>. 环氧树脂和催化剂用于固化掺杂炭黑的混合物, 并使其在低温下不易开裂. 玻璃微珠用于增加表面粗糙度, 减少入射波在涂层表面的直接反射, 从而增强吸收. 炭黑是由球形纳米级颗粒组成的链状结构, 它具有较高的电损耗, 均匀分散在混合物中可以有效地吸收入射电磁波.

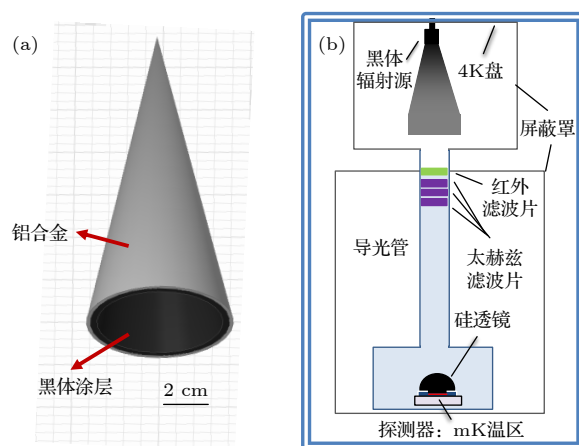


图 1 (a) 黑体辐射源的结构示意图; (b) 包含黑体辐射源的太赫兹探测器低温测试系统示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the structure of the black-body radiation source; (b) schematic diagram of the cryogenic terahertz detector test system including the black-body radiation source.

制备的黑体辐射源放置于图 1(b) 所示的稀释制冷机低温系统中, 并通过低热导的不锈钢螺母与 4 K 盘连接. 黑体源辐射的电磁波通过导光管中的红外滤波片 (Windows-TPX-D38.1-T2) 和三个同型号的太赫兹带通滤波片 (BPF 0.4 THz-47 Tydex), 并在硅透镜的聚焦下辐射到底部 mK 温区的探测器上. 在本系统中, 屏蔽罩用于抑制热辐射, 避免制冷机内外以及不同温区之间热量交换. 屏蔽罩上留有 20 mm 孔径的小孔安装导光管, 导光管用于导引黑体源辐射的太赫兹波, 太赫兹带通滤波片和红外滤波片用于滤除工作频带之外的辐射信号.

## 3 黑体涂层材料的电磁参数和反射系数

黑体材料样品制作流程如下: 将储存在容器中的环氧树脂加热 2—3 min, 待环氧树脂融化后取出并放置在混合容器中加热至 40—50  $^\circ\text{C}$ , 加热时间为 10 min. 之后, 加入催化剂混合, 等待 3 min 后, 加入炭黑及玻璃微珠并混合. 待混合物光滑无结块后, 将其浇筑进含有矩形孔的铜片中, 在室温下放置 6 h 直至固化. 制备的黑体样品尺寸为 23.0 mm  $\times$  10.0 mm  $\times$  2.0 mm.

采用图 2(a) 所示的太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS) 对制备的黑体样品进行表征, 并提取黑体材料的电磁参数. 将样品放置在太赫兹波束的

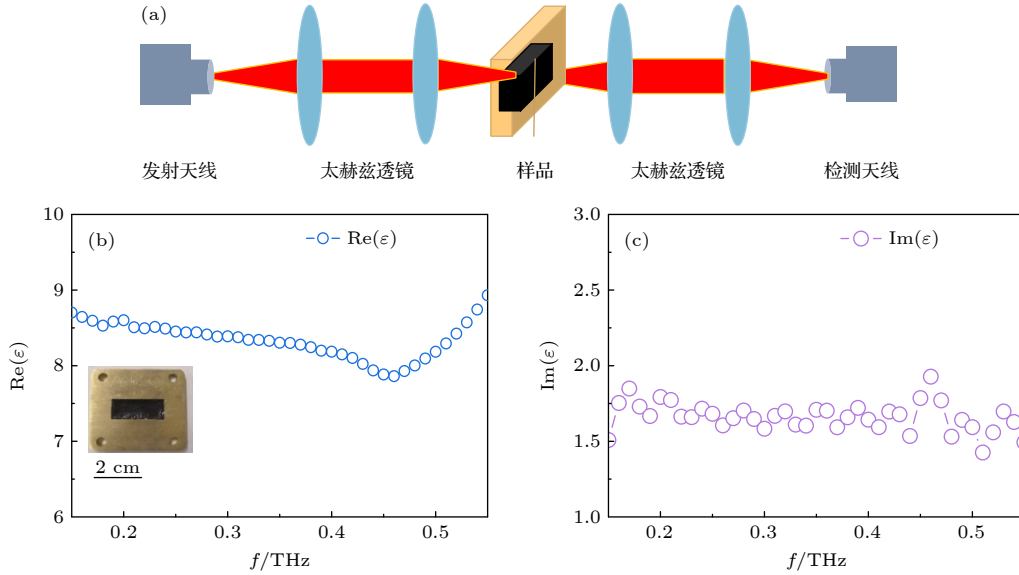


图2 黑体材料介电常数的表征 (a) THz-TDS 系统示意图; (b) 黑体材料的复介电常数实部与频率的关系, 左下角插图为填充黑体材料的矩形孔铜片样品照片; (c) 黑体材料复介电常数虚部与频率的关系

Fig. 2. Permittivity of blackbody materials: (a) Schematic diagram of the THz - TDS system; (b) real part of permittivity for blackbody material versus frequency, the inset in the lower left corner is a photo of the copper sheet with a rectangular hole filled with blackbody material; (c) imaginary part of permittivity for blackbody material versus frequency.

焦点位置, 并测试有无样品时太赫兹透射脉冲信号. 之后, 将测得的时域信号进行傅里叶变换, 从而得到样品的复传输系数谱. 根据不同频率下的传输幅度  $A(\omega)$  和相位  $\varphi(\omega)$ , 提取样品的复折射率  $n = n - j\kappa$ , 其中  $n$  为复折射率的实部,  $\kappa$  为复折射率的虚部, 即消光系数. 计算公式如下 [21]:

$$n = \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d} + 1, \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{c}{\omega d} \ln \frac{4n}{A(\omega)(n+1)^2}, \quad (2)$$

其中,  $\omega$  是角频率,  $d$  是待测样品厚度. 对于非磁性材料, 复介电常数可以表示为

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = (n - j\kappa)^2 = (n^2 - \kappa^2) - j2n\kappa. \quad (3)$$

测量得出的黑体材料复介电常数如图 2(b) 和图 2(c) 所示. 材料复介电常数的虚部表征了材料对电磁波的损耗. 如图 2(c) 所示, 测得的材料介电常数虚部在 200—500 GHz 范围内均大于 1.5, 高于文献 [19] 中报道的吸波材料. 这表明本文制作的黑体材料对太赫兹波具有较高的损耗.

黑体涂层材料具有极高的吸收系数, 根据能量守恒定理, 它有极低的反射率. 因此, 反射率可以作为验证材料是否符合黑体要求的指标. 利用图 3(a) 所示的反射型 THz-TDS, 对平面黑体样品的反射系数进行测试. 样品制作在直径为 5.0 cm 的

圆形铜板上, 伯克利黑体材料的厚度为 2.0 mm. 采用接触式轮廓仪对样品中心  $2.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$  区域 (position1 处) 进行表面粗糙度表征, 结果如图 3(c) 所示, 表面均方根粗糙度  $R_q \approx 11.24 \mu\text{m}$ . 尽管玻璃微珠的加入使得表面粗糙度增加, 但测试结果表明样品表面的粗糙度依然远小于测试波长.

利用 THz-TDS 对样品上两处位置的反射系数进行测试, 测试结果如图 3(d) 所示. 实际测得的反射率在 200—500 GHz 频率范围内均小于 -17 dB, 接近 -20 dB 的期望值. 这一结果表明该黑体材料对电磁波具有较强的吸收能力, 适合作为锥形黑体源的吸波涂层材料.

#### 4 圆锥形黑体源仿真与辐射功率计算

圆锥形黑体的几何光学模型如图 4(a) 所示, 假设入射光线平行于锥轴入射, 在吸收层上每一次反弹的入射角由  $\alpha_i$  表示,  $\alpha_i = 90 - (2i - 1)\phi$ ,  $i = 1, 2, 3 \dots M$ , 反弹次数  $M = 180/(2\phi)$ , 与半锥角有关. 我们制作的黑体辐射源半锥角  $\phi = 12^\circ$ , 对应的反弹次数  $M = 7$ . 入射波在吸收涂层上多次反射, 每次反射都将穿入厚度为 2.0 mm 的损耗材料, 从而产生较高的衰减. 锥形黑体的背衬材料为金属材料, 对入射波无透射.

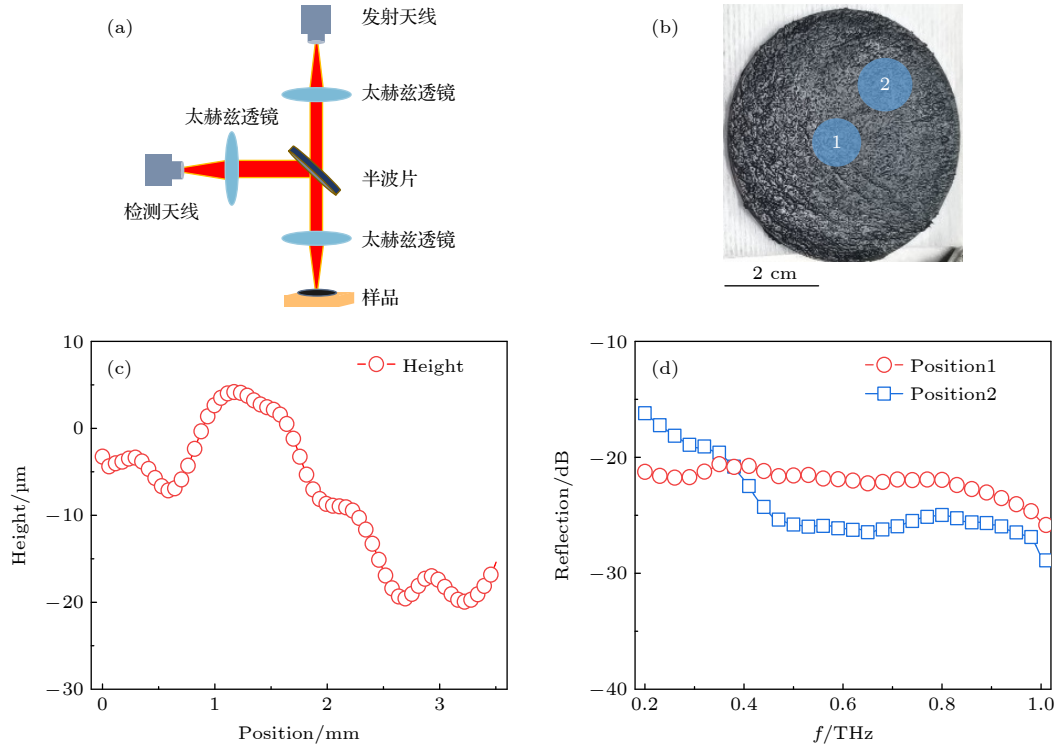


图 3 黑体材料反射系数表征 (a) 反射型 THz-TDS 系统示意图; (b) 平面黑体涂层材料样品, 1, 2 分别表示测试位置; (c) 样品表面粗糙度; (d) 不同位置的反射系数

Fig. 3. Reflectance characterization of blackbody materials: (a) Schematic diagram of the reflective THz-TDS system; (b) flat blackbody sample, 1 and 2 indicate the two test positions; (c) surface roughness of the sample; (d) reflectance at different positions.

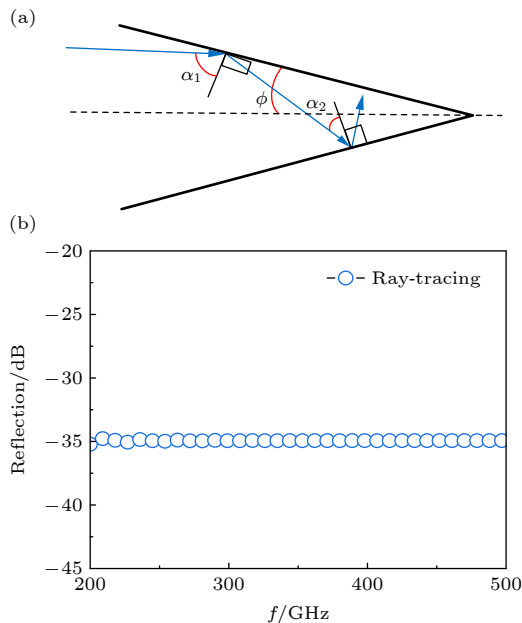


图 4 (a) 圆锥形黑体源光学模型; (b) 圆锥形黑体源反射系数仿真结果

Fig. 4. (a) Optical model of conical blackbody source; (b) simulated reflectance of conical blackbody source.

通过对黑体源反射率进行仿真, 可以判断黑体源接近理想黑体源的程度. 常见的锥形黑体目标反

射率的仿真方法有旋转体矩量法 (BoR-MoM)、有限元法 (FEM) 和射线追踪法 [22]. FEM 是基于体积计算的方法, 仿真大尺寸模型时, 其网格单元数量和所需内存较大, 对计算资源的要求较高. BoR-MoM 法利用物体旋转对称性, 虽然适合研究锥形黑体, 但对于 200—500 GHz 频率内的仿真仍然非常耗时. 综合考虑, 本文采用了较为简单快捷的射线追踪法. 尽管射线追踪法忽略了锥形开口处的边缘效应和锥尖处的近场效应, 给反射率计算结果带来一定的误差, 但该方法的优势在于耗时少、计算成本低. 文献 [22] 中给出的实例表明, 射线追踪法与 BoR-MoM 法具有一致性, 在 800 GHz 时两种方法得出的反射率仅相差 0.7 dB.

用 COMSOL 软件的射线追踪法对设计的锥形黑体源进行建模和仿真. 将前文表征的材料电磁参数作为仿真的材料输入参数, 模型尺寸如前所述, 仿真频率段设置为 200—500 GHz. 由于模型尺寸较大, 通过对称处理减少计算资源. 仿真得到的圆锥黑体源反射系数如图 4(b) 所示, 在 200—500 GHz 频率范围内反射系数可以达到 -35 dB, 这说明该黑体源具有较高的发射率, 可以满足对探



测器进行表征实验的要求.

制备的黑体辐射源实物如图 5(a) 所示, 锥体结构采用了厚度约 6.0 mm 的铝材, 锥体开口端两侧的凸起用于缠绕加热丝和固定温度传感器, 内部涂抹厚度约 2.0 mm 的吸波涂层. 将黑体辐射源与 4 K 平台连接, 通过控制加热丝、温度传感器和温控仪, 黑体辐射源可在 4—40 K 温度范围内进行调节, 从而对辐射功率进行控制. 黑体源辐射通过置于 Still 屏蔽层 (温度约为 0.7 K) 内的导光管和一系列滤波片入射到位于 mK 温区的探测器上.

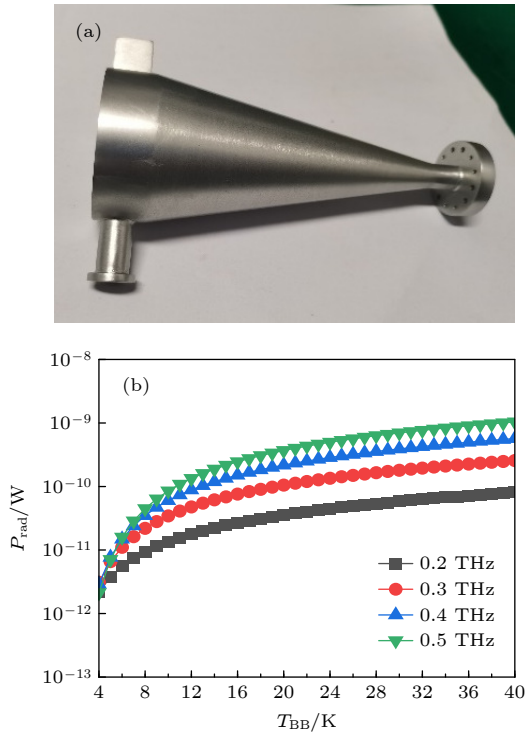


图 5 (a) 制备的黑体辐射源照片; (b) 200—500 GHz 黑体辐射功率随温度的变化关系

Fig. 5. (a) Image of a prepared blackbody source; (b) variation of blackbody power with temperature in the 200—500 GHz range.

入射到探测器上的辐射功率  $P$  表达式为<sup>[11]</sup>

$$P = \varepsilon_{\text{mesh}} \Omega_M A_A \int_{f_l}^{f_h} \frac{2T(f) h f^3 / c^2}{e^{\frac{hf}{k_B T_{BB}}} - 1} df, \quad (4)$$

其中,  $\varepsilon_{\text{mesh}}$  为探测器的吸收效率,  $\Omega_M$  为探测器接收辐射立体角,  $A_A$  为孔径面积,  $f_h$  和  $f_l$  为频率积分上下限,  $T(f)$  为滤波片的透射系数,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T_{BB}$  是黑体源温度. 根据器件参数和几何结构,  $\varepsilon_{\text{mesh}} = 0.45$ ,  $\Omega_M = 0.25$ ,  $A_A = 3.6 \times 10^{-5} \pi (\text{m}^2)$ .  $f_h$  和  $f_l$  由所选带通滤

波片的中心频率确定, 单层带通滤波片的带宽为 10%, 传输率为 90%. 假设 3 个相同的带通滤波片堆叠后, 总透过率  $T(f)$  为 0.73. 采用 (4) 式, 计算了不同频率下辐射到探测器上的功率随黑体源温度变化关系, 如图 5(b) 所示. 工作频率为 200—500 GHz, 黑体源温度从 4 K 升到 40 K, 其辐射功率变化范围为  $10^{-12}$ — $10^{-9}$  W. 工作频率越高, 辐射功率的调谐范围越大. 在 0.5 THz, 4 K 温度下最小辐射功率为  $2.13 \times 10^{-12}$  W.

通过改变温度, 辐射功率的调节范围超过 2 个量级. 尽管如此, 仍然难以满足检测器动态范围测试的需求. 目前, 半导体量子点探测器等太赫兹单光子探测器的动态范围在 3 个量级以上, 因此黑体辐射源的功率可调范围要超过其动态范围<sup>[23]</sup>. 未来的太空天文、气象观测等领域对太赫兹探测器动态范围的需求愈来愈高, 相应地, 黑体辐射源可调功率范围也需要进一步增大. 为了提高黑体源辐射功率的调控范围, 一是提高黑体辐射源的温度范围, 由 (4) 式可知, 黑体源的辐射功率与温度密切相关, 通过提高黑体温度的变化范围可以增大辐射功率的调控范围; 二是在光路中加入可调衰减片, 根据实验需要设定黑体源温度, 并调节衰减片的衰减片, 可以有效提升黑体辐射源功率的调节范围.

## 5 结 论

本文对伯克利黑体材料的电磁参数和反射系数进行了测试分析, 获得满足黑体辐射源需求的涂层材料. 基于射线追踪法, 对锥形黑体辐射源在太赫兹频段的反射系数进行了仿真, 结果表明辐射源在太赫兹频段的反射系数达到 -35 dB. 基于这些结果, 制备了装载在稀释制冷机中的黑体辐射源, 并开发了温控系统对该黑体源的太赫兹辐射功率进行调节. 上述结果表明, 本文设计的低温黑体辐射源可以满足超导太赫兹探测器的定标需求. 这一工作对于高灵敏超导太赫兹探测器的设计开发和应用具有一定的参考意义.

## 参考文献

- [1] Grasset O, Dougherty M K, Coustenis A, Bunce E J, Erd C, Titov D, Blanc M, Coates A, Drossart P, Fletcher L N, Hussmann H, Jaumann R, Krupp N, Lebreton J P, Prieto-Ballesteros O, Tortora P, Tosi F, Hoolst T V 2013 *Planet. Space Sci.* **78** 1

- [2] Brown R L, Wild W, Cunningham C 2004 *Adv. Space Res.* **34** 555
- [3] Schröder A, Murk A, Wylde R, Jacob K, Pike K, Winser M, Pujades M B, Kangas V 2017 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **7** 677
- [4] Farrah D, Smith K E, Ardila D, Bradford C M, DiPirro M, Ferkinhoff C, Glenn J, Goldsmith P, Leisawitz D, Nikola T, Rangwala N, Rinehart S A, Staguhn J, Zemcov M, Zmuidzinas J, Bartlett J, Carey S, Fischer W J, Kamenetzky J, Kartaltepe J, Lacy M, Lis D C, Locke L, Lopez-Rodriguez E, MacGregor M, Mills E, Moseley S H, Murphy E J, Rhodes A, Richter M, Rigopoulou D, Sanders D, Sankrit R, Savini G, Smith J D, Stierwalt S 2019 *J. Astron. Telesc. Inst.* **5** 020901
- [5] Beyer A D, Kenyon M E, Echternach P M, Day P K, Bock J J, Holmes W A, Bradford C M 2012 *J. Low Temp. Phys.* **167** 182
- [6] Sizov F, Rogalski A 2010 *Prog. Quantum Electron.* **34** 278
- [7] Sizov F 2010 *Opto-Electron. Rev.* **18** 10
- [8] Baselmans J J A, Bueno J, Yates S J C, Yurduseven O, Llombart N, Karatsu K, Baryshev A M, Ferrari L, Endo A, Thoen D J, de Visser P J, Janssen R M J, Murugesan V, Driessen E F C, Coiffard G, Martin-Pintado J, Hargrave P, Griffin M 2017 *Astron. Astrophys.* **601** A89
- [9] Shaw M D, Bueno J, Day P, Bradford C M, Echternach P M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 144511
- [10] Bueno J, Shaw M D, Day P K, Echternach P M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 103503
- [11] Echternach P M, Pepper B J, Reck T, Bradford C M 2018 *Nat. Astron.* **2** 90
- [12] Randa J, Walker D K, Cox A E, Billinger R L 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 50
- [13] Skou N, Le Vine D 2006 *Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis* (Norwood : Artech House)
- [14] Schröder A, Murk A, Wylde R, Schobert D, Winser M 2017 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **55** 7104
- [15] Draper D W, Newell D A, Teusch D A, Yoho P K 2013 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **51** 4731
- [16] Yagoubov P, Murk A, Wylde R, Bell G, Tan G H 2011 *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves* Houston, Texas, USA, October 2–7, 2011 p1
- [17] Jacob K, Schroder A, Kotiranta M, Murk A 2016 *41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves* Copenhagen, Denmark, September 25–30, 2016 p1
- [18] Shi Q, Li J, Zhi Q, Wang Z, Miao W, Shi S C 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **65** 239511
- [19] Houtz D A, Emery W, Gu D, Jacob K, Murk A, Walker D K, Wylde R J 2017 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **55** 4586
- [20] Persky M J 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 2193
- [21] Han X H, Zhang J, Yang Y, Ma Y T, Chang T Y, Cui H L 2016 *Spectrosc. Spect. Anal.* **36** 3449 (in Chinese) [韩晓惠, 张瑾, 杨晔, 马宇婷, 常天英, 崔洪亮 2016 光谱学与光谱分析 **36** 3449]
- [22] Schröder A, Murk A 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 1850
- [23] Shi L L, Wu J B, Tu X C, Jin B B, Chen J, Wu P H 2021 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **51** 054203 (in Chinese) [石粒力, 吴敬波, 涂学凑, 金颀兵, 陈健, 吴培亨 2021 中国科学: 物理学 力学 天文学 **51** 054203]

# Cryogenic blackbody calibration source for superconducting terahertz detectors<sup>\*</sup>

Wu Man-Jin<sup>1)</sup> Yao Bo-Zhi<sup>1)</sup> Shi Li-Li<sup>1)</sup> Chen Ben-Wen<sup>1)</sup>

Wu Jing-Bo<sup>1)2)†</sup> Zhang Cai-Hong<sup>1)2)</sup> Jin Biao-Bing<sup>1)2)</sup>

Chen Jian<sup>1)2)</sup> Wu Pei-Heng<sup>1)</sup>

1) (*Research Institute of Superconductor Electronics, School of Electronics Science and Engineering,*

*Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

2) (*Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China*)

( Received 14 January 2022; revised manuscript received 3 April 2022 )

## Abstract

Blackbody radiation source has been widely used as a calibration source for terahertz (THz) radiometers in recent decades with the applications of THz detection technology in the fields of aerospace, astronomy and remote sensing. We develop a THz blackbody calibration source capable of working in the cryogenic environment and having adjustable radiation power for the calibration of THz superconducting detectors. The ideal blackbody source has an emissivity and absorptivity of 1 and the reflectance coefficient is used to indirectly characterise the performance of the developed blackbody source. In this work, we use a mixture of epoxy, catalyst, carbon black and glass beads as blackbody absorbing material. The real part and imaginary part of the complex dielectric constant of Berkeley blackbody material are extracted from the THz time-domain spectra, and its reflection coefficient is measured. We use this material to design a conical blackbody radiation source, and simulate it as well. The simulation result show that it has low reflectivity below  $-35$  dB in a frequency range of 0.2–0.5 THz. We fabricate a conical blackbody radiation source that is mounted in a dilution refrigerator, and use filters and light-guiding systems to make the detector for measuring the radiation by the THz light of a specific wavelength. The radiation power can be tuned by changing its temperature. The relationship between radiation power and temperature shows a power tuning range of  $10^{-12}$ – $10^{-9}$  W in the frequency range of 0.2–0.5 THz with a minimum power value of  $2.13 \times 10^{-12}$  W. The designed blackbody radiation source can meet the calibration requirements of THz superconducting detectors, and will contribute to the development and application of highly sensitive THz radiometers.

**Keywords:** blackbody radiation source, terahertz time-domain spectroscopy, reflection coefficient, blackbody radiation power

**PACS:** 87.50.U–, 78.20.Ci, 85.25.Am, 85.25.Pb

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220103

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2017YFA0700202, 2021YFB2800701) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62071217, 62027807, 6173110, 61871212).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jbwu@nju.edu.cn](mailto:jbwu@nju.edu.cn)



## 用于超导太赫兹探测器的低温标准黑体辐射源

吴曼瑾 姚柏志 石粒力 陈本纹 吴敬波 张彩虹 金飏兵 陈健 吴培亨

## Cryogenic blackbody calibration source for superconducting terahertz detectors

Wu Man-Jin Yao Bo-Zhi Shi Li-Li Chen Ben-Wen Wu Jing-Bo Zhang Cai-Hong Jin Biao-Bing  
Chen Jian Wu Pei-Heng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 168702 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220103

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 锶原子光晶格钟黑体辐射频移评估

Evaluation of blackbody-radiation frequency shift in strontium optical lattice clock

物理学报. 2019, 68(9): 093701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182294>

#### 基于超快自旋-电荷转换的太赫兹辐射源

Terahertz emitters based on ultrafast spin-to-charge conversion

物理学报. 2020, 69(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200715>

#### 球几何中辐射源粒子抽样方法的改进

Modification of method of sampling radiation source particle in spherical geometry

物理学报. 2020, 69(11): 119501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200024>

#### 高速太赫兹探测器

Ultrafast terahertz detectors

物理学报. 2018, 67(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180226>

#### 太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

#### $\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ 单晶自旋重取向的掺杂效应与磁控效应的太赫兹光谱

Terahertz spectroscopy study of doping and magnetic field induced effects on spin reorientation in  $\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$  single crystals

物理学报. 2020, 69(20): 207802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201518>