

文章编号 1004-924X(2013)06-1410-07

# 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射

李宏光\*, 杨鸿儒, 薛战理, 于东钰

(西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

**摘要:**为了准确探测低温黑体的太赫兹辐射,研究了黑体的红外辐射和太赫兹各波段辐射的差异,构建了低温黑体太赫兹辐射探测装置,提出在该装置中采用窄带光谱滤光法抑制红外辐射和透过窄带太赫兹光谱。根据普朗克公式计算并对比了各波段太赫兹辐射及红外辐射的亮度值,理论数据显示 223~323 K 的低温黑体的红外辐射亮度是太赫兹辐射亮度的 4~10 倍。将在某一窄波长带宽范围内具有高透射比的太赫兹窄带光谱滤光片放置在黑体太赫兹辐射装置的探测器前,滤除红外辐射,并对黑体的太赫兹辐射量进行光谱分段探测实验。根据实验结果计算了黑体在不同太赫兹窄波段的辐射探测值的标准偏差,并对实验结果与黑体太赫兹辐射亮度理论计算值进行了比较。结果显示,窄带光谱滤光法可以实现低温黑体的太赫兹窄带辐射亮度探测。

**关键词:**黑体太赫兹探测;窄带光谱滤光法;锁相;真空低背景通道

**中图分类号:**O433.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1410

## Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method

LI Hong-guang\*, YANG Hong-ru, XUE Zhan-li, YU Dong-yu

(Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

\* Corresponding author, E-mail: optics\_lihg@126.com

**Abstract:** To detect the terahertz radiation of a low temperature blackbody accurately, the difference between infrared radiation and different terahertz radiations of the blackbody was researched. A low temperature blackbody terahertz radiometer was established with narrowband spectral filtering method. First, the emitted spectral radiances were calculated by Planck's law in various terahertz wave bands. The results show that the radiances of blackbody in the infrared band are four to ten times than that in the terahertz band from 223 K to 323 K. Then a low-pass filter and several band-pass filters were made up a filter combination with high transmission in various wavelengths. The filter combination was used to filter the infrared radiation and to transmit the terahertz radiation to implement the terahertz spectral radiance measurement. Experimental results reveal the deviations of terahertz narrowband radiations at different bands for the blackbody and indicate that spectral filtering method can realize the detection of terahertz radiation of the blackbody.

**Key words:** blackbody terahertz radiometer; narrowband spectral filtering method; lock in detection; vacuum reduced background cryogenic channel

收稿日期:2012-12-24;修订日期:2013-01-28.

基金项目:西安应用光学研究所科技创新基金资助项目(No. Y09222-3)

## 1 引言

太赫兹是指频率在 0.1~10 THz,即 30~3 000  $\mu\text{m}$ 波段的电磁辐射。近 30 年来,太赫兹技术已成为美国和日本等发达国家重点研究的战略性前沿技术,太赫兹辐射源的研制和太赫兹成像探测也日益成为国内外研究的热点<sup>[1-4]</sup>。太赫兹源辐射参数探测问题是制约高精度固态太赫兹辐射源研制技术的瓶颈,但太赫兹黑体可作为太赫兹辐射计量领域的标准源<sup>[5-7]</sup>。从理论上讲,自然界任何物体由于分子振动都会发出太赫兹辐射,温度为 3~100 K 的低温黑体辐射峰值波长在太赫兹波段。因此,黑体的太赫兹辐射特性是研究目标太赫兹辐射特性及其探测的理论基础。

由于 THz 波段光子能量低,待测信号非常微弱,低温黑体的太赫兹辐射探测一直是个难题。目前,国内外只有德国物理技术研究院(PTB)开展了黑体的太赫兹辐射研究,并于 2009 年使用太赫兹黑体作为标准辐射源,实现了太赫兹辐射的功率探测<sup>[8]</sup>。由于黑体的红外辐射强于太赫兹辐射,这对太赫兹信号探测形成了巨大的干扰。因此,在探测黑体的太赫兹辐射时需要滤除红外辐射<sup>[9-10]</sup>。人们常用宽带滤光片抑制近红外和中红外辐射,对太赫兹波段的光谱辐射量的探测,还要组合使用窄带滤光片和宽带滤光片。使用的宽带滤光片型号有 LP50、LP100;窄带滤光片的型号包括 BP155、BP350、BP1400。在探测时可采用 4 种滤光片组合<sup>[8]</sup>,根据所选的太赫兹波段选择其中一种组合进行测量。其中,第一种包括两个 LP50 型号的宽带滤光片,透过峰值波长为 62.2  $\mu\text{m}$ ,光谱带宽为 41.9  $\mu\text{m}$ ;第二种包括型号分别为 LP50、LP50 和 LP100 三个宽带滤光片,透过峰值波长为 134.6  $\mu\text{m}$ ,光谱带宽为 98.7  $\mu\text{m}$ ;第三种包括型号分别为 BP155(窄带)、LP50、LP50 和 LP100 四个滤光片,透过峰值波长为 350.4  $\mu\text{m}$ ,光谱带宽为 49.9  $\mu\text{m}$ ;第四种包括型号分别为 BP1400、LP50、LP50 和 LPsuprasil-1 四个滤光片,透过峰值波长为 1 341  $\mu\text{m}$ ,光谱带宽为 196  $\mu\text{m}$ 。这些由宽带和窄带滤光片构成的组合滤光片均可以滤除红外辐射,但缺点是滤光片数较多,降低了光谱透射比。

本文在黑体太赫兹辐射探测时,采用窄带光

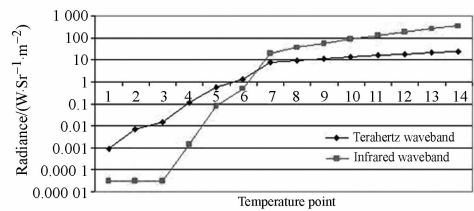
谱滤光法,即采用一片太赫兹窄带光谱滤光片实现了抑制红外辐射和透过窄带太赫兹光谱,完成了黑体在某一窄带太赫兹光谱段的辐射量探测。

## 2 不同温度黑体在太赫兹各波段和红外波段辐射亮度比较

黑体辐射亮度由普朗克公式(1)计算<sup>[8]</sup>,太赫兹波段为 30~3 000  $\mu\text{m}$ ,计算辐射亮度时  $\lambda_1 = 30 \mu\text{m}$ , $\lambda_2 = 3 000 \mu\text{m}$ ;由于实验时选用 LiTaO<sub>3</sub> 晶体制作的热释电探测器的响应波段为 0.02~20 THz,在红外波段的最小响应波长为 15  $\mu\text{m}$ ,故在计算黑体在红外波段辐射量时红外波段选择为 2~30  $\mu\text{m}$ ,由公式(1)计算辐射亮度时  $\lambda_1 = 2 \mu\text{m}$ , $\lambda_2 = 30 \mu\text{m}$ 。

$$L = \epsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda, \quad (1)$$

其中: $\epsilon$ 为黑体发射率, $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , $c = 2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$ , $k = 1.38054 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , $T$ 为黑体温度。



No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$T/K$	15	25	30	50	77	100	200	223	250	273	300	323	350	373

图1 不同温度黑体在太赫兹和红外波段的辐射亮度对比

Fig. 1 Radiance of variable blackbody in terahertz and infrared bands

图1为温度为15~373 K的黑体在太赫兹各波段的辐射亮度。由图可以看出,温度为3~100 K的黑体辐射峰值波长在太赫兹波段,但是由于辐射太赫兹光子的能量极其微弱,因此很难被探测到。黑体温度越高,其太赫兹辐射功率及亮度越高。223~323 K的黑体的太赫兹辐射量比3~100 K的黑体的太赫兹辐射量平均高约4~10倍,这给太赫兹辐射探测时红外辐射的滤除带来了很大的困难。由于太赫兹波段为30~3 000

$\mu\text{m}$ , 光谱范围很宽, 同一温度的黑体在太赫兹各波段辐射有很大差异。由公式(1)计算黑体在太赫兹各个波段和红外波段的辐射亮度值, 如表 1 所示, 其对数比较如图 2 所示。

表 1 黑体在太赫兹各个波段和红外波段的辐射亮度变化

Tab. 1 Relation of blackbody radiance in different terahertz and infrared wavebands  
( $\text{W}/\text{Sr} \cdot \text{m}^2$ )

波段 / $\mu\text{m}$	2~30	30~300	30~300	30~100	100~300	100~300	300~1000	300~1000	1000~3000
黑体/K	1	2	3	4	5	6	7	8	9
223	35.22	9.41	9.39	8.93	0.48	0.46	0.021	0.020	0.000 58
250	57.30	11.68	11.65	11.12	0.55	0.53	0.024	0.023	0.000 65
273	86.57	13.68	13.65	13.06	0.61	0.59	0.026	0.025	0.000 71
300	130.51	16.08	16.05	15.39	0.69	0.66	0.029	0.028	0.000 84
323	178.26	18.18	18.15	17.42	0.75	0.72	0.031	0.030	0.000 78

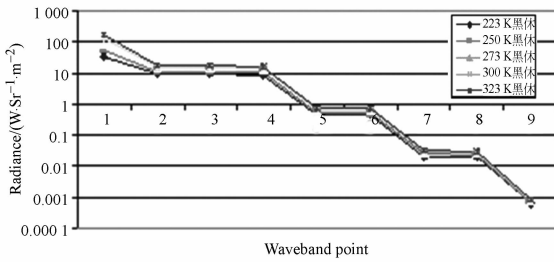


图 2 黑体在不同太赫兹波段的光谱辐射亮度值比较  
Fig. 2 Radiance of variable blackbody in several terahertz bands

由图 2 看出, 太赫兹波长越长, 光谱辐射亮度值越小。30~300  $\mu\text{m}$  波段比 1 000~3 000  $\mu\text{m}$  波段高了 5 个数量级。因此, 须对黑体太赫兹辐射进行光谱分段探测, 才能保证探测的准确性。变温黑体选择温度为 223~323 K, 有利于提高太赫兹辐射亮度测量的信噪比和准确度。

### 3 黑体太赫兹辐射窄带光谱滤光法原理

一般采用宽带滤光片滤除红外辐射, 但是由于黑体在整个太赫兹波段的光谱辐射亮度变化差  $10^6$  个数量级, 需要使用窄带光谱滤光片滤除红外辐射, 同时只允许所选窄带太赫兹波段的辐射透过该滤光片, 以有针对性地评价各个波段的探测信噪比。因此, 本文采用窄带太赫兹光谱组合滤光片实

现对黑体的太赫兹辐射量进行光谱分段探测。

#### 3.1 黑体太赫兹窄带光谱辐射亮度计算

太赫兹光谱窄带滤光片由三种不同波长的滤光片组成, 透过中心波长分别为 105, 200 和 301  $\mu\text{m}$ , 在峰值波长处的透射比分别为 75%、80% 和 86%, 阻隔波段透射比小于 4%。根据滤光片的光谱透射比数据, 取透射比为 20% 的波长为截止波长。其中, 滤光片透射比为 20% 时对应的太赫兹波长为 98 和 116  $\mu\text{m}$ , 光谱带宽分别为 18  $\mu\text{m}$ ; 2 号滤光片透射比为 20% 时对应的太赫兹波长为 176 和 230  $\mu\text{m}$ , 光谱带宽为 54  $\mu\text{m}$ ; 3 号滤光片透射比为 20% 时对应的太赫兹波长为 264 和 354  $\mu\text{m}$ , 光谱带宽为 80  $\mu\text{m}$ 。由公式(1)计算, 温度为 323 K 的低温黑体在 1 号滤光片对应的波段(98~116  $\mu\text{m}$ )的辐射亮度  $L_1$  为 0.309 3  $\text{W}/\text{Sr} \cdot \text{m}^2$ ; 在 2 号滤光片对应的波段(176~230  $\mu\text{m}$ )的辐射亮度  $L_2$  为 0.080 2  $\text{W}/\text{Sr} \cdot \text{m}^2$ ; 在 3 号滤光片对应的波段(264~354  $\mu\text{m}$ )的辐射亮度  $L_3$  为 0.026 3  $\text{W}/\text{Sr} \cdot \text{m}^2$ 。

#### 3.2 太赫兹光谱窄带滤光片原理

太赫兹光谱窄带滤光片在某一很窄的波长范围内透射比很高, 在大部分太赫兹波段和红外波段的透射比接近于零。该滤光片采用带不同小孔的网栅状轻金属薄片制成, 通过与某一波长的太赫兹波产生谐振来获得高透射比。金属薄片上小孔的几何形状、对称性和网格结构决定了透过的太赫兹波长和带宽入射角等<sup>[12-13]</sup>。滤光片太赫兹波透射比由在滤光片中金属和介质交界面的表面等离子体的动力学特性决定。电磁波入射到金属网格结构发生电磁感应, 在表面产生的电流在闭环网格中循环, 而电荷分布随时间的变化量由电磁场的幅度、相位和极化所决定。金属网格的光学特性可由基于传输线理论的等效电路表示, 当  $R \ll Z_0$  时, 电路的传输由公式(2)表示<sup>[14]</sup>。

$$T(\omega) \approx \frac{\omega^2 \omega_0^2 Z_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 R^2 + \omega^2 \omega_0^2 Z_0^2}, \quad (2)$$

式中:  $\omega_0$  是谐振频率,  $R$  是损耗阻抗,  $Z_0$  是谐振时 LC 电路的归一化阻抗。谐振波长  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$ , 滤光片的中心频率由金属孔的缝隙长度决定。网格间距与孔缝隙长度或宽度的比值越大, 滤光片通过的带宽越窄<sup>[14]</sup>。

太赫兹光谱窄带滤光片由 3 个分别透过不同波长的滤光片组成, 表示为 1~3 号, 透过峰值波

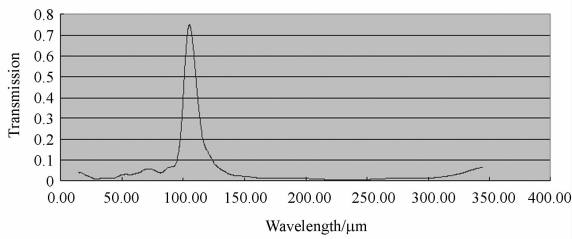


图 3 1号窄带滤光片的太赫兹光谱透射曲线

Fig. 3 Transmission curve of terahertz narrowband filter 1

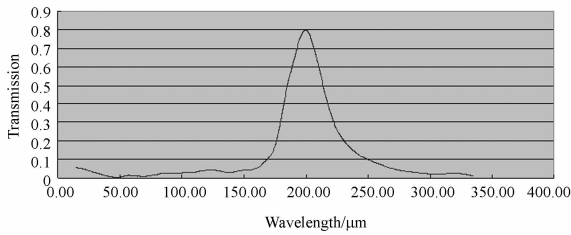


图 4 2号窄带滤光片的太赫兹光谱透射曲线

Fig. 4 Transmission curve of terahertz narrowband filter 2

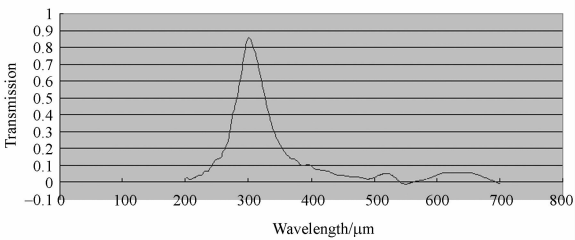


图 5 3号窄带滤光片的太赫兹光谱透射曲线

Fig. 5 Transmission curve of terahertz narrowband filter 3

长分别为 105, 200 和 301  $\mu\text{m}$ 。滤光片设计要求为:红外辐射透射比小于 5%,太赫兹辐射透射比大于 70%,所测的光谱透射比如图 3~5 所示。

#### 4 太赫兹辐射探测原理分析

太赫兹辐射探测装置如图 6 所示。太赫兹黑体的辐射腔直径为 28 mm,卡塞格林系统在黑体上的取样光斑直径为 22 mm。黑体辐射源面只有部分被探测系统接收,此时可用辐射亮度计算面源产生的辐照度。根据辐射亮度守恒定律,封闭光束在同种介质传输中忽略传输损失时,辐射源的亮度等于仪器接收端的亮度。由于斩光片转动的一个周期内,黑体的太赫兹辐射交替进入探测系统,故探测器接收到黑体经过光学系统会聚的辐射功率为斩光片调制前的一半,由公式(3)表示:

$$P = \frac{\tau_0 \tau_f \pi L_0 A D^2}{8b^2}, \quad (3)$$

式中: $L_0$  是黑体在太赫兹待测波段的辐射亮度,  $A$  是探测器接收面的面积,  $\tau_0$  是卡塞格林反射系统的太赫兹透射比,  $\tau_f$  是太赫兹滤光片的太赫兹透射比,  $D$  是卡塞格林系统的出瞳直径,  $b$  是成像系统像距。

卡塞格林系统的参数为:外径  $D_P = 160 \text{ mm}$ ;次镜是双曲面镜,外径  $D_S = 68 \text{ mm}$ ;入瞳和次镜平面相一致,其半径为 150 mm,中心屏蔽系数  $k_S = 0.425$ ;焦距为 325 mm;物距为 2 250 mm;视场为  $0.51^\circ$ ;像距为 380.7 mm。

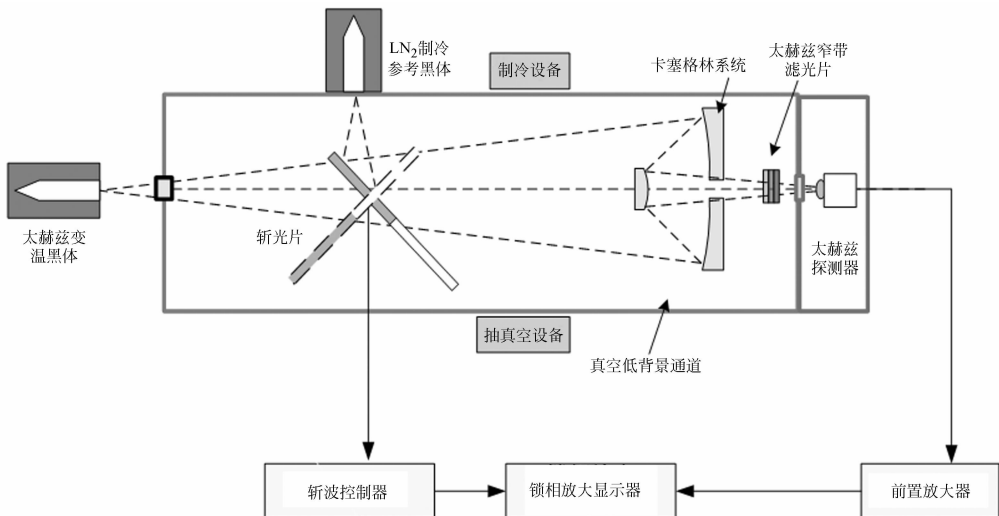


图 6 黑体太赫兹辐射探测装置

Fig. 6 Blackbody terahertz radiometer

太赫兹辐射探测装置的工作原理为:变温黑体的太赫兹辐射和液氮参考黑体的太赫兹辐射通过斩光片的旋转交替进入光学系统,被太赫兹探测器接收。斩光片由两个夹角为  $90^\circ$  的铝制反射片组成,反射片的作用是把液氮参考黑体的太赫兹辐射反射进入卡塞格林光学系统,同时挡住变温黑体的太赫兹辐射。在一个周期内,当斩光片旋转  $90^\circ$  后移出光学系统,变温黑体的太赫兹辐射进入卡塞格林光学系统。采用透镜和组合滤光片滤除红外辐射,对太赫兹波段辐射进行窄带滤波。斩波器的频率为 11 Hz,经过斩波器调制后探测器接收到的辐射为变温黑体和参考黑体周期性交替变化的太赫兹辐射,将其转换成周期性变化的电压信号,然后经锁相放大器把交流信号转换成直流电压信号。

探测器采用热释电探测器,材料采用  $\text{LiTaO}_3$ ,响应频段为 0.1~20 THz,即 15~3 000  $\mu\text{m}$ ,动态范围为 0.1  $\mu\text{W}$ ~10 mW,调制频率为 10~30 Hz。热释电太赫兹探测器输出的电压信号与输入的太赫兹辐射功率成比例,响应度取决于斩波器调制频率和太赫兹辐射波长,平均约为 1 000 V/W。

根据探测器的响应度,令探测器接收面的面积  $A$  为  $6 \text{ mm}^2$ , $b$  取 380.7 mm, $\tau_f$  取 0.75,由公式(3)计算可得探测器对温度为 223~323 K 的黑体在太赫兹波段的响应值为 2.1~3.3  $\mu\text{V}$ ;然后将该电压响应值输入锁相放大器,并放大后输出测量信号电压值。当装置更换太赫兹滤光片后,其透射比也相应变化。

由于锁相放大器的最小电压探测能力为 10 nV,故采用锁相探测技术探测弱太赫兹信号可提高系统探测的信噪比。斩光片上的发射二极管和接收二极管用来提高频率为 11 Hz 的同步脉冲信号,以提高待测太赫兹信号的取样频率和相位。锁相放大器的作用为从噪声中提取出周期性变化的黑体的太赫兹信号,显示黑体辐射对应的电压值。改变黑体温度,逐一探测得到不同温度的黑体辐射对应的电压值,通过更换太赫兹窄带滤光片,可探测黑体的太赫兹窄带光谱辐射亮度。

装置中的黑体、平面反射镜、斩光片、光学系统和探测器均位于背景温度低于 80 K 的低背景真空通道中,周围背景的红外辐射干扰非常低,约为 0.23  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ,远低于温度为 300 K 的黑体辐

射量值  $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。而且  $10^{-4} \text{ mBar}$  的真空度可以有效降低大气的辐射、散射和吸收,有利于准确探测黑体的辐射亮度<sup>[11]</sup>。

## 5 探测实验及结果分析

在低温黑体太赫兹辐射探测装置上把太赫兹黑体的温度设置为 323 K 后,将 3 种 THz 窄带光谱滤光片分别放置在探测器前,滤除红外辐射,太赫兹辐射探测结果如表 2 所示。实验条件为:斩波器频率  $f_c$  为 9.96~10.59 Hz,锁相时间常数  $\tau = 3 \text{ s}$ 。探测器输出的信号经过锁相放大器放大后输出电压信号。不同太赫兹波长处的黑体辐射曲线与实测的电压曲线的对比如图 7 所示。

表 2 黑体窄带太赫兹辐射探测实验结果

Tab. 2 Terahertz narrowband detection data of blackbody

滤光片	$f_c$ /Hz	电压/ $\mu\text{V}$				标准偏差 $\frac{1}{n-1} \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}$
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$\bar{V}$	
1	10.59	6.2	7.8	5.4	6.47	1.2
2	10.04	2.04	2.64	1.75	2.14	0.45
3	9.96	0.36	0.27	0.44	0.36	0.09

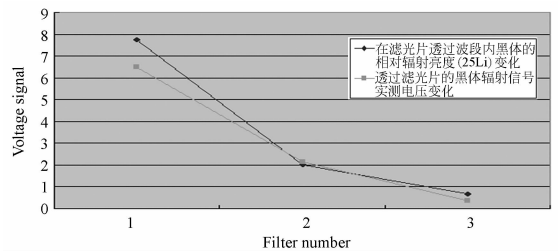


图 7 黑体的窄带太赫兹辐射理论值和透过 3 种滤光片后的电压实测值比较

Fig. 7 Comparison between calculated value of blackbody narrowband terahertz radiance and voltage testing results in three filters

由图 7 可见,3 种窄带滤光片分别放置在黑体探测装置上后,温度为 323 K 的黑体辐射探测电压平均值的变化趋势与其理论辐射曲线的变化基本一致,这说明基于光谱滤光法的黑体辐射探测装置在原理上能实现黑体的太赫兹辐射亮度测试。实验结果显示,测量结果的相对标准偏差分别为 18.5%、21% 和 25%,并随着太赫兹波长的

增加而变大。这说明黑体的太赫兹辐射量随着波长的变大而变小,探测的信噪比降低。

测量精度较低的原因主要有两个:一是热释电探测器的灵敏度比较低;二是每次测量时斩波器的频率有漂移,稳定性不够。该黑体探测装置的探测噪声主要来源于太赫兹热释电探测器自身的噪声。为提高低温黑体的探测信噪比,未来可采用工作温度为4 K的液氮制冷的测辐射热计(Bolometer)探测器来提高黑体窄带辐射亮度的探测信噪比。测辐射热计工作在4 K液氮制冷的环境下,采用电阻对温度变化敏感的金属或金属薄膜制成探测元件,其响应度为 $10^7$  V/W,比热释电探测器高4个数量级,可提高探测信噪比和信号稳定性。同时改进实验方法,采用频率稳定性更好的斩波器对黑体辐射进行调制,可减少黑

体的探测误差。

## 6 结 论

本文计算分析了温度在223~323 K的低温黑体的红外辐射和太赫兹各波段的辐射差异。在低温黑体太赫兹辐射探测装置上,采用太赫兹带通滤光片抑制比太赫兹辐射亮度高4~10倍的红外辐射;采用光谱窄带滤光片透过窄带太赫兹光谱,对黑体的太赫兹辐射量进行光谱分段探测实验,系统输出的电压值在微伏量级,变化趋势同黑体的理论辐射量相一致。实验结果表明,光谱滤光法从原理上可以实现低温黑体的窄带太赫兹辐射亮度探测,这为研究黑体及各种太赫兹源的辐射计量校准提供了技术支持。

## 参考文献:

- [1] MÜLLER R, HOEHL A. The metrology light source of PTB—a source for THz radiation[J]. *J. Infrared Milli. Terahertz Waves*, 2011, 32:742-753.
- [2] ZHANG X C. *Introduction to THz Wave Photonics* [M]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 2009.
- [3] 罗志伟,古新安,朱伟臻,等.掺碲硒化镓晶体在太赫兹波段的光学特性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2):354-359.  
LUO ZH W, GU X A, ZHU W ZH, *et al.*. Optical properties of GaSe : S crystals in terahertz frequency range [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 354-359. (in Chinese)
- [4] 刘英,潘玉龙,王学进,等.谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2065-2071.  
LIU Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Design of imaging system with harmonic diffraction element in-terahertz multi-band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2065-2071. (in Chinese)
- [5] DIETLEIN C. Broadband THz aqueous blackbody calibration source [J]. *SPIE*, 2007, 6548:65480M-1-6.
- [6] STEIGER A, GUTSCHWAGER B. Optical meth-

- ods for power measurement of terahertz radiation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21):21804-21814.
- [7] WERNER L, HÜBERS H W. Towards traceable radiometry in the terahertz region [J]. *Metrologia*, 2009, 46:160-164.
- [8] UTSCHWAGER B, MONTE C. Calculable black-body radiation as a source for the determination of the spectral responsivity of THz detectors [J]. *Metrologia*, 2009, 46:165-169.
- [9] LI H G, YANG H R. Study on detection and identification model of passive terahertz imaging system for extended target [J]. *SPIE*, 2010, 7854: 785413-1-7.
- [10] LI H G. Study on terahertz radiation test of blackbody [J]. *SPIE*, 2012, 8417:841730-1-6.
- [11] GUTSCHWAGER B, HOLLANDT J. A vacuum infrared standard radiation thermometer at the PTB [J]. *Int. J. Thermophys*, 2008, 29: 330-340.
- [12] LEE J W, SEO M A. Shape resonance terahertz filters [J]. *IEEE*, 2006, 46: S165-S169.
- [13] ZHAO ZH, WANG X Y. Polarization modulation terahertz filter based on metallic fractal structures [J]. *SPIE*, 2010, 7854:78540Y-1-7.
- [14] LEE Y S. *Principles of Terahertz Science and Technology* [M]. Berlin:Springer Science Media, 2009.

## 作者简介:



薛战理(1966—),男,硕士,高级工程师,主要从事低背景红外辐射计量技术的研究。E-mail: xzloptical@sina.com



于东铤(1986—),男,山东威海人,硕士,工程师,主要从事太赫兹探测及计量技术的研究。E-mail: tigerydy@126.com

## 导师简介:



杨鸿儒(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光探测及太赫兹探测方面的研究。Email: ehryang@126.com

## 通信作者:



李宏光(1981—),男,山东冠县人,博士研究生,高级工程师,主要从事太赫兹辐射和微弱光辐射探测及计量技术方面的研究。E-mail: optics\_lihg@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)