

热电型太赫兹探测器响应度校准技术

吴斌^{1,2*}, 刘红元², 王一昕³, 王洪超², 曹乾涛², 张鹏², 应承平²¹ 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555;² 中国电子科技集团有限公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;³ 重庆邮电大学国际学院, 重庆 400065

摘要 为保证太赫兹辐射强度测量的准确可靠,对热电型太赫兹探测器的响应度进行了校准。首先,基于替代法构建了太赫兹探测器响应度校准装置,该装置的合成标准不确定度为 2.4%。然后,在 1.63 THz 频率点处,利用校准装置对 12D-3S-VP 型太赫兹探测器进行了校准,得到的响应度校准结果为 197.6 mV/W,与厂家标称值一致。对自主研发的热电型太赫兹探测器进行了校准,得到的响应度和合成标准测量不确定度分别为 362.2 mV/W 和 2.7%。最后,将校准结果的标准偏差值与合成标准不确定度进行了比较,发现标准偏差值在合理范围内,这进一步证明了校准方法、校准结果以及不确定度分析的合理性。

关键词 探测器; 响应度; 校准; 太赫兹

中图分类号 TB96 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0404001

Responsivity Calibration Technology for Pyroelectric Terahertz Detector

Wu Bin^{1,2*}, Liu Hongyuan², Wang Yixin³, Wang Hongchao², Cao Qiantao²,
Zhang Peng², Ying Chengping²¹ Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China;² The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China;³ International College of Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract In order to ensure the accuracy and reliability of terahertz radiation intensity measurement, the responsivity calibration of pyroelectric terahertz detectors is carried out. First, a terahertz detector responsivity calibration device is constructed based on the substitution method, and the combined standard uncertainty of the device is 2.4%. Then, the 12D-3S-VP type terahertz detector is calibrated by the calibration device at the frequency point of 1.63 THz, and the responsivity calibration result is 197.6 mV/W, which is consistent with the value given by the manufacturer. The self-developed pyroelectric terahertz detector is calibrated, and the responsivity and the combined standard measurement uncertainty are 362.2 mV/W and 2.7% respectively. Finally, the standard deviation of the calibration result is compared with the combined standard uncertainty, and it is found that the standard deviation is in a reasonable range, which further proves the rationality of the calibration method, calibration results and uncertainty analysis.

Key words detectors; responsivity; calibration; terahertz

1 引言

热电型太赫兹探测器是将太赫兹辐射热信号转

换为电信号的器件,用于测量太赫兹辐射强度,在天文遥感、安全检测、医学探测等诸多领域中都得到了广泛应用。响应度参数是太赫兹探测器的一个重要

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-08-12; 录用日期: 2021-08-20

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金(6142001190308)

通信作者: *wubinw@126.com

参数,该参数的校准是太赫兹探测器得以可靠应用的前提。

为实现太赫兹热电探测器响应度参数的校准,需要先对太赫兹辐射量值进行溯源。德国国家计量院(PTB)Steiger 等^[1]实现了太赫兹辐射参数的绝对计量,将太赫兹辐射功率量值溯源至低温辐射计,实现了对 2.52 THz 频率处太赫兹辐射量的量值溯源。由于低温辐射计所用的涂层在太赫兹波段的吸收率无法准确测量,因此低温辐射计吸收腔在太赫兹波段的腔体吸收率无法准确评估。尽管窗口透过率、功率漂移、噪声和偏振等分量只有千分之几的不确定度,但腔体吸收率的不确定度为 7%,故最终的合成标准不确定度为 7.3%。随后,该团队又研制了新型镜反射体吸收标准辐射计,将不确定度优化至 1.6%^[2-3]。接着,他们基于该标准辐射计在 1~5 THz 频率范围内的多个频点对多款商用探测器开展了量传工作,测量不确定度优于 2.0%。

美国标准技术研究院(NIST)White 等^[4]报道了一种垂直生长的碳纳米管阵列材料,他们利用 1.5 mm 长的碳纳米管阵列在 0.76 THz 频率处实现了 99% 的吸收率。基于这种材料的辐射计的功率响应测量不确定度为 3.3%^[5]。日本计量研究所(NMIJ)Iida 等^[6-7]研制了高灵敏度太赫兹辐射计,当置信水平为 95% 时,在 300 GHz 频率点处的不确定度为 3.1%,在 1 THz 频率点处的测量不确定度为 2.1%。基于上述功率标准对热电堆功率计在 1 THz 和 1.5 THz 频率处的探测功率进行了校准,扩展不确定度为 4.8%~9.0% ($k=2$),其中 k 为扩展因子。中国计量科学研究院(NIM)Deng 等^[5,8]研制了一种在太赫兹波段具有高吸收率的涂层,并将其用于太赫兹辐射功率(或能量)的计量,利用该涂层制成的标准太赫兹探测器可以将太赫兹辐射能量溯源到可以精确测量的电参量上,相应的不确定度为 1.6%。对该标准太赫兹探测器进行国际比对,形成了国家太赫兹功率标准,并在 0.6~0.9 THz 频率范围内开展了太赫兹探测器的校准研究。可见,美国 NIST 和日本 NMIJ 主要聚焦于太赫兹功率的定标。德国 PTB 和 NIM 均已开展了太赫兹探测器校准研究,综合考虑了太赫兹探测器的校准频率范围和主标准器性能,进而优化后的太赫兹探测器具有良好的通用性。

目前生产太赫兹探测器和太赫兹功率计的厂家主要有以色列 Ophir 公司、加拿大 Gentec 公司和英国 TK 公司,这些公司借助德国 PTB 解决了其生产

的部分产品的溯源性问题,其他部分的产品并没有经过校准。此外,这些产品在使用一段时间后计量特性会发生变化因而需要重新校准。然而,当前太赫兹探测器存在高精度宽波段多频点校准能力不足的问题,故在用太赫兹探测器实际上大多处于失校状态,这严重影响了太赫兹辐射量值的准确测量。为实现太赫兹功率参数的量值传递,以保证太赫兹源^[9]、太赫兹探测^[10-11]及功能器件^[12]量值的准确可靠,本文研究了太赫兹热电探测器响应度的校准方法。构建了太赫兹探测器响应度校准装置,将气体激光器作为太赫兹源,可在 0.84~7.00 THz 宽波段范围的多个频点处实现对太赫兹探测器的校准。将溯源至国家太赫兹功率标准的太赫兹辐射计作为主标准器,最小可测量功率为 μW 量级,功率测量不确定度为 2.0%,具有精度高和通用性强的优点。本文基于该装置在 1.63 THz 频率点处开展了对商用和自研太赫兹探测器响应度的校准研究。

2 太赫兹探测器响应度校准原理和校准装置构建

2.1 校准原理

响应度是太赫兹探测器的一个基本参数,对其进行校准的过程:1)从太赫兹激光器发出的单色、准直、功率稳定的太赫兹光束照射在响应度为 R_s 的标准太赫兹探测器上,记录下标准太赫兹探测器的输出电压 U_s ;2)将被测太赫兹探测器(DUT)置于太赫兹光路中,并使 DUT 的入射口与之前标准太赫兹探测器入射孔的中心位置重合,进而获得 DUT 的电信号输出 U_d 。根据以上参数就可以得到 DUT 的响应度^[13]

$$R_d = \frac{U_d R_s}{U_s} \quad (1)$$

2.2 校准装置设计与构建

依据校准原理,设计并构建了如图 1 所示的太赫兹探测器响应度校准装置。装置的光路部分由太赫兹辐射源、太赫兹衰减器、太赫兹会聚透镜、光阑、标准太赫兹探测器、导轨和挡光板组成。装置的主标准器为一台双通道标准太赫兹探测器,响应光谱范围为 0.3~10 THz,主标准器的响应度溯源至 NIM 的国家太赫兹功率标准,响应度值为 274.4 mV/W,测量不确定度为 2.0% ($k=1$),入光孔尺寸为 20 mm。装置中的太赫兹辐射源为英国爱丁堡公司生产的 F1RL-100 型 CO₂ 泵浦气体太赫兹激光器,该激光器可在多个波长点辐射出单色太

赫兹波,光束发散角小且易于操控。同时,通过配备的功率稳定控制模块可保证输出太赫兹功率的稳定性。将 CO_2 泵浦气体太赫兹激光器中 CO_2 激光模块的 10R24 支线作为泵浦光激发氘代甲醇 (CD_3OD) 气体分子,得到频率为 1.63 THz 的太赫兹激光输出,并且通过调整泵浦光波长和更换气体工作介质,该激光器可在 0.84~7.00 THz 频率范围内的一系列频率点处产生单色太赫兹辐射。所用的太赫兹衰减器由俄罗斯 Tydex 公司生产,其包含 4 片透过率各异的衰减片,这些衰减片可根据需要单独或组合使用,实现了对太赫兹波的定量衰减,并满足了校准过程对入射到探测器上的太赫兹功率值的需求。导轨为一维位移导轨,用于将标准太赫兹

探测器和 DUT 交替换入太赫兹光路。挡光板为一块金属片,能切断太赫兹光,用于实验环境噪声测量环节。聚 4-甲基戊烯-1 (TPX) 透镜为平凸会聚透镜,焦距为 100 mm,直径为 25.4 mm。调节探测器的位置,使其光敏面与透镜的距离约为 100 mm。在探测器前放置一个光阑来调整入射到探测器中的太赫兹功率值,为降低衍射效应对测量结果的影响,光阑孔应尽量靠近太赫兹探测器的入光孔。在本装置中,综合考虑探测器切换的便捷性和衍射效应的影响,选定光阑孔与探测器入光口的间距约为 2 mm,并且光阑孔的直径需要小于太赫兹探测器入光孔的尺寸,光阑孔直径的具体数值需要根据实验中用到的校准功率值来确定。

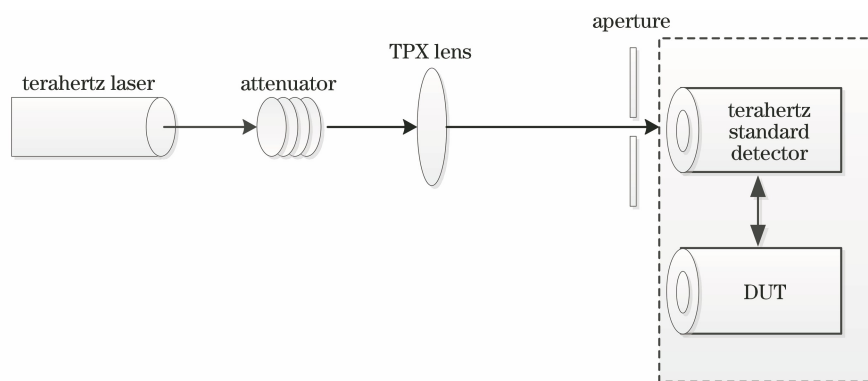


图 1 太赫兹探测器响应度校准系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of responsivity calibration system for terahertz detector

装置的工作过程:1) CO_2 泵浦气体太赫兹激光器产生的频率为 1.63 THz 的单色太赫兹波经太赫兹衰减器、太赫兹会聚透镜和光阑的调控后入射到标准太赫兹探测器上,用 Agilent 公司的 34420A 型数字多用表测量出标准太赫兹探测器的电压输出信号,数据采集卡采集该电压输出信号后传输至计算机;2) 利用控制导轨将标准太赫兹探测器移出光路,同时将 DUT 置于光路中,并保证 DUT 接收面的中心与移出光路前标准探测器接收面的中心重合,随后便可测量出 DUT 的电压输出信号。将测得的信号和标准太赫兹探测器的响应度代入(1)式即可计算被测探测器的响应度。在实际测量中,为减小环境辐射带来的干扰,需要用挡光板切断光路以进行噪声信号的测量。

2.3 校准装置不确定度分析与评定

响应度校准装置的测量不确定度来源为标准探测器响应度 u_1 、DUT 信号测试 u_2 、标准太赫兹探测

器信号测试 u_3 、太赫兹辐射源输出功率稳定度 u_4 以及环境噪声 u_5 ,这些不确定度分量之间可视作不相关。由于校准过程中采用的太赫兹功率值与标准探测器的校准功率值很接近,因此可不考虑标准太赫兹探测器非线性的影响。

标准太赫兹探测器的不确定度已经由 NIM 给出,在 0.3~10.0 THz 频率范围内为 2.0%。被测探测器和标准探测器的输出信号均由 34420A 型数字多用表采集,其不确定度很小。太赫兹源功率稳定性采用 B 类测量不确定度评定,根据调试经验,太赫兹源功率稳定性的不确定度分量为 1.2%。由于太赫兹光会被水蒸气吸收,故环境湿度对测量影响很大,测量时已经利用除湿机将环境湿度降到较低水平。据估计,湿度等环境影响引入的不确定度分量为 0.43%。根据上面的分析和评定结果,太赫兹光功率校准装置系统的不确定度来源与评定如表 1 所示。

表 1 响应度校准装置的不确定度分析

Table 1 Uncertainty analysis of responsivity calibration system

Source of uncertainty	Uncertainty	Uncertainty type	Probability distribution
Responsivity of standard detector	$u_1 = 2.0\%$	B	Uniform
Output measurement of DUT	$u_2 = 9.0 \times 10^{-5}$	B	Uniform
Output measurement of standard detector	$u_3 = 9.0 \times 10^{-5}$	B	Uniform
Stability of terahertz source	$u_4 = 1.2\%$	B	Uniform
Environment noise	$u_5 = 0.43\%$	A	Uniform

根据计量学理论^[13],校准装置的合成标准不确定度为

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2} = \sqrt{(2.0\%)^2 + (9.0 \times 10^{-5})^2 + (9.0 \times 10^{-5})^2 + (1.2\%)^2 + (0.43\%)^2} = 2.4\%。 \quad (2)$$

式中: u_i 表示第 i 个不确定度。

表 2 展示了德国 PTB、美国 NIST 等太赫兹功率计量及太赫兹探测器校准技术研究单位研究工作的对比情况,主要对校准频率、标准探测器测量不确定度、校准装置测量不确定度和通用性指标进行了

对比。可以发现,本文所用标准探测器的测量不确定度水平与国内外研究机构相当,校准装置的不确定度水平略低于 NIM 和德国 PTB,但校准装置的校准频率范围优于其他研究机构,具有良好的通用性。

表 2 太赫兹探测器校准研究工作对比

Table 2 Comparison of terahertz detector calibration research works

Institution	Calibration frequency /THz	Uncertainty of power standard ($k=1$)	Uncertainty of calibration system ($k=1$)	Universality
PTB	1.00–5.00	1.6%	2.0%	Good
NIST	0.76, 2.52	3.3%		
NMIJ	0.30, 1.00, 1.50	2.1%		
NIM	0.60–0.90, 2.52	1.6%	2.0%	Good
Our group	0.84–7.00	2.0%	2.4%	Good

3 太赫兹探测器响应度校准实验

3.1 校准方法与过程

采用建立的校准装置对加拿大 Gentec 公司的 12D-3S-VP 型和自研的 6342A 热电型太赫兹探测器在 1.63 THz 频率点处的响应度进行校准。实验室温度控制在 23~24 °C,相对湿度控制在 34% 以内。两只被测探测器均采用如下过程进行校准。

1) 调节太赫兹辐射源至功率稳定输出状态,调节太赫兹衰减器的强度透过率为 30%、光阑的通光孔径为 5.2 mm,使入射到太赫兹探测器的太赫兹功率为 5.15 mW。由于 5.15 mW 对应标准探测器的校准功率值,故采用该功率值可避免标准探测器非线性度对校准带来的影响,从而可提高校准精度。同时,保证光阑通光孔径尺寸小于标准探测器接收面的尺寸与被测探测器接收面的尺寸。

2) 将标准太赫兹探测器和 DUT 置于导轨上,并调节标准太赫兹探测器和 DUT 在导轨上的位置,以保证探测器的接收面中心与光阑孔中心一致。

同时,调节导轨就能实现标准太赫兹探测器和 DUT 在太赫兹光路中的切换。

3) 将标准太赫兹探测器置于光路中,用挡光板遮挡光路,测量并记录标准太赫兹探测器的噪声电信号 U_{Ns} 。在移出挡光板后,测量并记录标准太赫兹探测器的输出电信号值 U_s 。利用导轨将 DUT 置于光路中,用挡光板遮挡光路,测量并记录 DUT 的噪声电信号 U_{Nd} 。在移出挡光板后,测量并记录 DUT 的输出电信号值 U_d 。进行重复测量,共计 6 次。

DUT 的响应度的表达式为

$$R_{d,corrected} = \frac{U_d - U_{Nd}}{U_s - U_{Ns}} \cdot R_s。 \quad (3)$$

3.2 校准结果

对加拿大 Gentec 公司的 12D-3S-VP 型太赫兹探测器进行了校准,该探测器的入光孔直径为 12 mm。表 3 列出了对标准太赫兹探测器的噪声电信号 U_{Ns} 、标准太赫兹探测器的响应电信号 U_s 、DUT 的噪声电信号 U_{Nd} 以及 DUT 的响应电信号 U_d 进行 6 次测量的结果,并将根据测量结果计算出

的被测探测器的响应度值 $R_{d,corrected}$ 列在表 3 中的最后一列。

表 3 12D-3S-VP 型太赫兹探测器的校准数据

Table 3 Calibration data of 12D-3S-VP type terahertz detector

Time	U_{Ns}	U_s	U_{Nd}	U_d	$R_{d,corrected}$
1	0.006	1.457	0.005	1.052	197.999
2	0.006	1.421	0.007	1.024	197.219
3	0.004	1.385	0.005	0.996	196.908
4	0.005	1.411	0.004	1.031	200.433
5	0.006	1.422	0.006	1.028	198.049
6	0.005	1.386	0.005	0.987	195.120

6 次测量的 $R_{d,corrected}$ 的平均值为 197.600 mV/W, 与厂家标出的 200.00 mV/W 相接近, 该结果的测量不确定度由校准装置的不确定度与测量重复性构成, 重复性由 6 次测量得到的 $R_{d,corrected}$ 的标准偏差得到, 其值为 0.88%。因此, 采用所建标准装置对 12D-3S-VP 型太赫兹探测器响应度校准的测量不确定度为

$$u_{c,1} = \sqrt{(2.4\%)^2 + (0.88\%)^2} = 2.6\% \quad (4)$$

另外, 课题组前期自主研制了 6342A 型热电太赫兹探测器^[14], 其光谱响应区间覆盖整个太赫兹波段, 入光孔直径为 10 mm。采用构建的校准装置对其在 1.63 THz 频率点处的响应度进行了标定, 将测得的 U_{Ns} 、 U_s 、 U_{Nd} 、 U_d 值以及 $R_{d,corrected}$ 的计算值列在表 4 中, 由此可计算得到 6 次测量的 $R_{d,corrected}$ 的平均值为 362.2 mV/W, 标准偏差为 1.3%。采用所建标准装置对 6342A 型太赫兹探测器响应度校准的测量不确定度为

$$u_{c,2} = \sqrt{(2.4\%)^2 + (1.3\%)^2} = 2.7\% \quad (5)$$

表 4 6342A 型太赫兹探测器的校准数据

Table 4 Calibration data of 6342A type terahertz detector

Time	U_{Ns}	U_s	U_{Nd}	U_d	$R_{d,corrected}$
1	0.005	1.433	0.006	1.876	359.333
2	0.005	1.413	0.004	1.833	356.447
3	0.004	1.396	0.004	1.854	364.684
4	0.005	1.393	0.006	1.844	363.363
5	0.007	1.417	0.005	1.855	360.028
6	0.006	1.393	0.004	1.871	369.362

由表 3 和表 4 的校准结果及计算所得的标准偏差值可以发现, 对两种探测器校准数据的标准偏差均小于 2/3 合成标准不确定度, 从计量学角度证明了校准方法、校准结果以及不确定度分析与评定的合理性。

4 结 论

系统性地从校准方法、校准装置设计与构建、校准流程、结果分析、不确定度分析与评定等环节对热电型太赫兹探测器的校准进行了研究, 实现了对两款热电型太赫兹探测器的高精度校准。校准结果显示, 在 1.63 THz 频率点处, 加拿大 Gentec 公司的 12D-3S-VP 型太赫兹探测器的响应度为 197.6 mV/W, 与厂家标称值相符合, 合成标准不确定度为 2.6%; 自研的 6342A 型太赫兹探测器的响应度为 362.2 mV/W, 合成标准不确定度为 2.7%。同时, 基于计量学理论证明了校准方法和不确定度分析的合理性。该研究工作实现了太赫兹功率参数标准的传递, 构建的校准装置的不确定度水平与日本 NMIJ 相当。此外, 通过更换工作介质等途径可实现 0.84, 2.52, 4.25 THz 等一系列频率点处响应度参数的校准, 故所构建的装置具有更好的适用性, 对太赫兹系统与器件量值的准确可靠可起到切实的保障作用。同时, 自研 6342A 热电型太赫兹探测器较 12D-3S-VP 型太赫兹探测器具有更高的响应度, 故其在弱信号探测方面更具有优势。

参 考 文 献

- [1] Steiger A, Gutschwager B, Kehrt M, et al. Optical methods for power measurement of terahertz radiation[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 21804-21814.
- [2] Müller R, Bohmeyer W, Kehrt M, et al. Novel detectors for traceable THz power measurements[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(8): 659-670.
- [3] Müller R, Gutschwager B, Hollandt J, et al. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, 36(7): 654-661.
- [4] White M G, Dowell M L, Lehman J H. Traceable terahertz power metrology at NIST[C]//2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), September 14-19, 2014, Tucson, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2014: 14771119.
- [5] Deng Y Q, Sun Q, Yu J, et al. Progress of terahertz radiometry and international comparison[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0314001.
邓玉强, 孙青, 于靖, 等. 太赫兹辐射功率计量研究进展与国际比对[J]. 中国激光, 2017, 44(3):

- 0314001.
- [6] Iida H, Kinoshita M, Amemiya K. Accurate measurement of absolute terahertz power using broadband calorimeter [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2018, 39(5): 409-421.
- [7] Iida H, Kinoshita M, Amemiya K, et al. Terahertz power calibration using absolute reference calorimeter [J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2019, 14(9): 1289-1294.
- [8] Deng Y Q, Sun Q, Yu J, et al. Broadband high-absorbance coating for terahertz radiometry [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5737-5742.
- [9] Feng S J, Dong L Q, Ma D N, et al. Terahertz waves generated through plasma under linear electrodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1030001.
冯世嘉, 董立泉, 马丹妮, 等. 线状电极作用下等离子体产生太赫兹波的研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1030001.
- [10] Xiao R W, Xiao J Y, Jin P, et al. High-efficiency visual terahertz detector based on three-dimensional porous graphene and cholesteric liquid crystal microcapsule [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1704002.
肖芮文, 肖俊羽, 金萍, 等. 基于三维多孔石墨烯和胆甾相液晶胶囊的高效可视化太赫兹探测器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1704002.
- [11] Feng H, Bu W H, Wang W J, et al. Passive terahertz imaging system for fast scanning of human body by a single detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0711002.
冯辉, 卜伟华, 王文静, 等. 单探测器快速扫描被动太赫兹人体成像系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0711002.
- [12] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001.
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001.
- [13] Zheng K Z. *Optical metrology* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 688-691.
郑克哲. *光学计量* [M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 688-691. [LinkOut]
- [14] Zhang P, Dong J, Han S L, et al. High responsivity terahertz detector based on Seebeck effect [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(8): 761-765.
张鹏, 董杰, 韩顺利, 等. 基于塞贝克效应的高响应度太赫兹探测器的研究 [J]. *红外技术*, 2017, 39(8): 761-765.