

大面元太赫兹热释电探测器

张 鹏¹, 曹乾涛¹, 董航荣¹, 赵 鑫¹, 孙佳文¹, 吴 斌², 刘红元²

- (1. 中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555;
2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 针对太赫兹光束的光斑直径较大和传输途径不同的现状, 提出大面元太赫兹热释电探测器和多用途探测器结构研究, 用于自由空间和波导传输太赫兹光束功率的测试。首先使用有限元分析软件建立太赫兹热释电探测器模型, 开展热电耦合仿真设计; 其次使用精密研磨抛光工艺、平面集成电路微纳米加工技术、匀胶与剥离工艺、砂轮划片技术等工艺技术, 开展太赫兹热释电探测器研制; 最后创新设计装配在探测器结构上的套筒与波导适配器。理论分析和实验结果表明: 该方法设计的太赫兹热释电探测器具有噪声等效功率低、重复性高特点, 并且解决了自由空间与波导传输太赫兹辐射功率兼容测试问题。

关键词: 太赫兹探测器; 有限元分析; 自由空间; 波导

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190338

Large area terahertz pyroelectric detector

Zhang Peng¹, Cao Qiantao¹, Dong Hangrong¹, Zhao Xin¹, Sun Jiawen¹, Wu Bin², Liu Hongyuan²

- (1. China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China;
2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: In view of the large diameter and different transmission channels of terahertz beam, the large area terahertz pyroelectric detector and the multi-purpose detector structure were proposed to measure the terahertz beam power, which was transmitted in free space and waveguide. Firstly, a terahertz pyroelectric detector model was established by using the finite element analysis software, and the thermoelectric coupling simulation design was carried out. Secondly, the terahertz pyroelectric detector was developed by using precision grinding and polishing process, micro-nano processing technology of planar integrated circuit, homogenized and peeling process, and grinding wheel slicing technology. Finally, the sleeve and waveguide adaptor mounted on the detector structure were innovatively designed. Theoretical analysis and experimental results show that the terahertz pyroelectric detector designed in this method has the characteristics of low noise equivalent power and high repeatability, and solves the compatibility test problem of terahertz radiation power transmitted in free space and waveguide.

Key words: THz detector; finite element analysis; free space; waveguide

收稿日期: 2020-02-03; 修订日期: 2020-03-28

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金 (6142001190308, 614200103010117, 6140003010102); 安徽省自然科学基金 (1908085MF201)

作者简介: 张鹏 (1987-), 男, 高级工程师, 硕士生, 主要从事太赫兹测试技术方面的研究。Email: 364113561@163.com

0 引言

随着工艺技术的提升,太赫兹气体激光器、太赫兹自由电子激光器、太赫兹量子级联激光器、太赫兹返波管、太赫兹信号发生器等太赫兹源得到迅速发展,为太赫兹成像技术、太赫兹通信技术、太赫兹光谱测试技术、太赫兹遥感测试技术等领域的发展奠定了基础^[1-3]。

太赫兹源输出的太赫兹辐射功率大小与稳定性是主要技术指标,需要使用太赫兹探测器对太赫兹源输出功率进行测试,评价太赫兹源的性能。太赫兹电磁波的频率范围是 0.1~10 THz,能够在宽频率范围测试太赫兹辐射功率的探测器主要是热电型探测器,包括热释电探测器、热电堆探测器、Golay Cell、Bolometer 等^[4]。热释电探测器、Golay Cell、Bolometer 主要用于测试太赫兹脉冲辐射功率,热电堆探测器主要用于测试太赫兹连续辐射功率。在太赫兹脉冲辐射功率测试方面,Golay Cell 对振动比较敏感,需要进行防振设计,体积大、价格贵;Bolomete 需要在低温下工作,一般使用液氮制冷,体积大、价格贵;热释电探测器能够在常温下工作,具有体积小、价格便宜的特点,能够更好的嵌入太赫兹测试系统中,在红外、太赫兹波段具有广泛的应用。

目前,电子科技大学使用钽酸锂晶体研制了太赫兹热释电探测器^[5],光敏面尺寸是 1.2 mm×1.2 mm;中国科学院深圳先进技术研究院使用光敏面尺寸是 2 mm×1 mm 的热释电探测器开展了太赫兹成像测试研究^[6],太赫兹源产生的太赫兹光束通过自由空间传输,透过样品之后入射到热释电探测器;德国 PTB 对光敏面直径约为 30 mm 的太赫兹热释电探测器的光谱响应度进行了测试研究^[7];美国 Wright State University 使用光敏面尺寸是 $\Phi 5$ mm 的热释电探测器开展了太赫兹辐射功率测试研究^[8],太赫兹源产生的太赫兹波通过波导传输到热释电探测器;University of Michigan Ann Arbor 对光敏面尺寸是 $\Phi 5$ mm 的热释电探测器的响应度校准技术进行了研究^[9],太赫兹光束通过自由空间传输到热释电探测器。

综上所述,现有太赫兹热释电探测器的研究,主要体现在小尺寸光敏面,然而太赫兹激光器输出的太

赫兹光斑尺寸相对较大,需要使用大面元太赫兹探测器进行功率测试。另外,太赫兹源输出的太赫兹辐射主要通过自由空间或波导进行传输,如何使用同一个太赫兹探测器对两种传输方式的太赫兹辐射功率进行准确重复测试,还未见相关报道。因此,文中针对大面元太赫兹热释电探测器开展研究,提出一种基于太赫兹热释电探测器的自由空间和波导传输太赫兹辐射功率兼容测试方法。

1 设计与制作

热释电探测器主要有热释电材料和光束吸收材料组成,光束吸收材料均匀涂覆在热释电材料上表面。文献 [10] 详细描述了影响热释电探测器性能的因素,文中不再赘述。

在热释电材料方面,钽酸锂晶体具有热释电系数高、居里温度高、价格便宜等特性,在热释电探测器研制方面具有广泛的应用,因此文中选择钽酸锂晶体作为太赫兹热释电探测器的热释电材料。目前常见的钽酸锂晶体厚度一般大于 500 μm ,热容较大、信号响应时间长,并且输出信号微弱,不便于检测。钽酸锂晶体的厚度与热容成正比,为了提高太赫兹热释电探测器的性能,需要减薄钽酸锂晶体,文中采用单面研磨与抛光的工艺减薄钽酸锂晶体。在光束吸收材料方面,通过研究发现碳纳米管在宽频率范围对太赫兹光束具有较好的吸收,因此文中选择多壁碳纳米管制作光束吸收材料。

文中设计的太赫兹热释电探测器的光敏面直径是 10 mm,使用有限元分析软件对太赫兹热释电探测器芯片进行建模,并开展热电耦合仿真设计,建立的结构模型如图 1 所示。在热电耦合仿真设计时,太赫兹热释电探测器芯片的初始温度是 23 $^{\circ}\text{C}$ 、输入热流密度的重复频率是 10 Hz。通过热电耦合仿真设计,钽酸锂晶体厚度在 200 μm 时,不仅具有较好的热释电效应,而且能够兼顾工程化应用需求,因此文中设计的太赫兹热释电探测器芯片的晶体厚度为 200 μm ,经过热电耦合仿真之后,太赫兹热释电探测器芯片在 0.05 s 的温度场等值线如图 2 所示,温度随时间变化曲线如图 3 所示。从仿真结果得知,太赫兹热释电探测器芯片在加载热流密度时,温度随时间增加而增

大, 温度变化率也随时间增加而增大, 能够产生较好的极化电流。



图 1 太赫兹热释电探测器结构模型

Fig.1 Structural model of THz pyroelectric detector

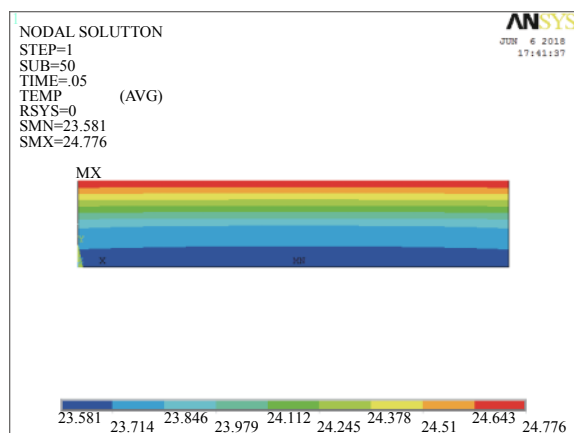


图 2 温度场等值线图

Fig.2 Contour maps of temperature fields

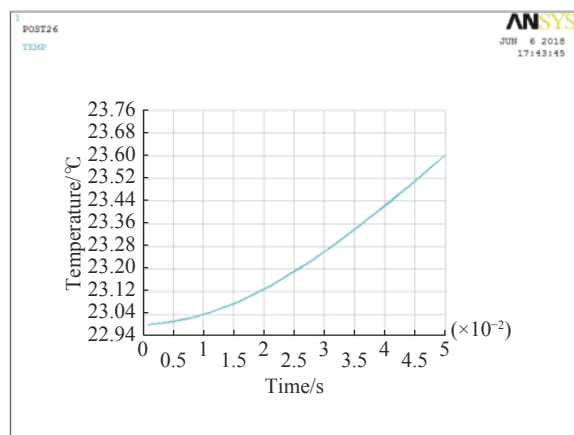


图 3 温度随时间变化曲线

Fig.3 Temperature curve over time

根据仿真设计结果, 文中首先使用精密研磨抛光机开展钽酸锂晶体的减薄与抛光工艺研究, 采用不同粒度的刚玉研磨粉及 $0.75\ \mu\text{m}$ 的氧化铈抛光粉将直径 $50.8\ \text{mm}$ 、厚度 $500\ \mu\text{m}$ 的钽酸锂晶体减薄到 $200\ \mu\text{m}$; 其次使用平面集成电路微纳米加工技术在钽酸锂晶体上、下表面分别制作上、下电极; 然后使用匀胶与剥离工艺在上电极表面涂覆一层碳纳米管薄膜, 最后使用砂轮划片机划切电路外形, 完成太赫兹热释电探测器芯片的制作, 如图 4 所示。为了提高太赫兹热释

电探测器芯片的性能, 文中把太赫兹热释电探测器芯片粘结在中间悬空的陶瓷衬底上, 然后将陶瓷衬底装配在管壳中, 通过金丝键合工艺把太赫兹热释电探测器芯片的电极与管壳的引脚互联, 最后把引脚接入电流放大电路中, 实现了太赫兹热释电探测器输出电流信号与电压信号之间的转换, 实物如图 5 所示。



图 4 太赫兹热释电探测器芯片

Fig.4 Chip of THz pyroelectric detector



图 5 太赫兹热释电探测器实物

Fig.5 THz pyroelectric detector

现有的太赫兹探测器主要用于测试自由空间或波导传输太赫兹辐射功率, 难以实现两种传输方式太赫兹辐射功率的准确重复测试, 为了解决两种传输方式太赫兹辐射功率的兼容测试, 文中设计了一种探测器结构, 把太赫兹热释电探测器和电流放大电路放入探测器结构内部, 并在探测器结构入射端设计可拆卸的套筒和波导适配器, 实现自由空间和波导传输太赫兹辐射功率兼容测试, 文中设计的探测器结构如图 6 所示。套筒设计为空心圆柱结构, 用于减小外界杂散光对测试结果的影响。波导适配器输入端是 WR10 波导, 输出端是圆锥结构, 圆锥端面的直径略小于太赫兹热释电探测器芯片的直径。图 6(a) 是装配套筒的探测器结构, 用于自由空间传输太赫兹辐射功率测试; 图 6(b) 是装配波导适配器的探测器结构, 用于波导传输太赫兹辐射功率测试。

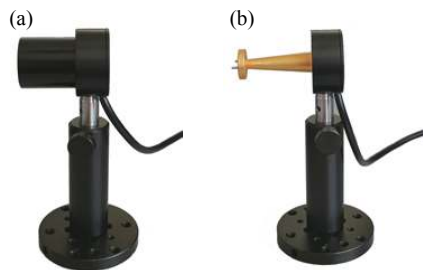


图 6 两种装配方式的探测器结构

Fig.6 Two assembly modes of detector structure

2 性能测试

为了测试文中设计的太赫兹热释电探测器的性能,并验证太赫兹热释电探测器对自由空间与波导传输太赫兹辐射功率测试的兼容性,文中分别使用太赫兹激光器和太赫兹信号发生器对含有放大电路的太赫兹热释电探测器进行测试。

为了验证文中设计的太赫兹热释电探测器对自由空间传输太赫兹辐射功率的测试性能,文中使用太赫兹激光器测试太赫兹热释电探测器性能的实验装置如图 7 所示。实验使用的太赫兹激光器是 FIRL 100 激光器,它包含 CO₂ 泵浦激光器和结构紧凑的 FIR 激光室,通过改变选定气体分子的发射谱线,以及使用 CO₂ 泵浦激光激励气体分子,可以使太赫兹激光器发射的激光在 0.25 ~ 7.5 THz 范围内可调。FIRL 100 激光器发出的太赫兹激光为连续激光,经太赫兹半透射反射镜之后分成两束,一束太赫兹激光进入功率控制系统,控制输出的太赫兹激光功率的稳定;另一束太赫兹激光经过斩波之后,入射到太赫兹辐射计或待测太赫兹热释电探测器。文中使用的太赫兹辐射计已经在中国计量科学研究院进行了校准,在 0.3 ~ 10 THz 的测量不确定度是 5%(k=2)。

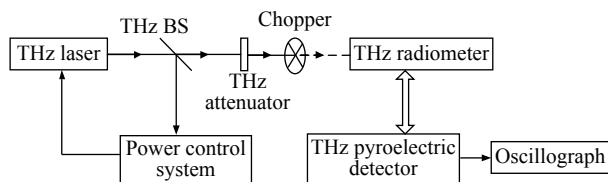


图 7 自由空间传输太赫兹辐射功率测试装置

Fig.7 Free space transmission THz radiation power test device

在实验过程中,设定 FIRL 100 激光器的参数,使其输出波长是 2.52 THz 的激光。首先使用太赫兹辐

射计测试太赫兹激光的平均功率;其次把待测太赫兹热释电探测器移入光路,使太赫兹探热释电探测器的光敏面与太赫兹辐射计的光敏面位置相同;最后记录示波器测试的太赫兹热释电探测器的输出电压。本次实验在 10 Hz 斩波频率时,太赫兹辐射计测试的太赫兹激光平均功率是 3.90 mW,示波器测试的太赫兹热释电探测器输出电压如图 8 所示,上升时间(10%~90%)为 30 ms,电压峰-峰值为 1.30 V,则太赫兹热释电探测器的响应度是 333.3 V/W。

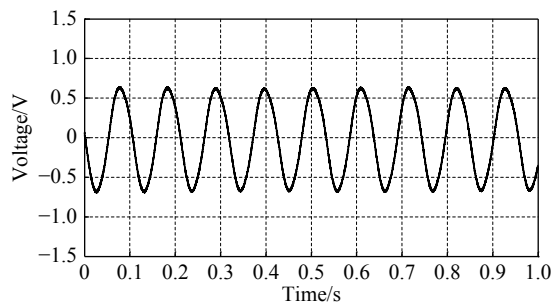


图 8 太赫兹热释电探测器输出电压

Fig.8 Output voltage of THz pyroelectric detector

为了进一步表征太赫兹热释电探测器的性能,文中开展了太赫兹热释电探测器的噪声等效功率测试。文中建立的太赫兹热释电探测器噪声电压测试装置如图 9 所示,前置放大器的放大倍数设置为 1 000,频谱分析仪的中心频率、带宽均设置为 10 Hz,太赫兹热释电探测器的噪声电压测试结果是 156.2 $\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,主要表现为热噪声,则太赫兹热释电探测器的噪声等效功率是 0.47 nW/Hz^{1/2}。

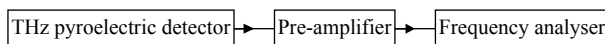


图 9 噪声电压测试装置

Fig.9 Test device of noise voltage

为了验证文中设计的太赫兹热释电探测器对波导传输太赫兹辐射功率的测试性能,文中使用太赫兹信号发生器测试太赫兹热释电探测器性能的实验装置如图 10 所示。太赫兹信号发生器由 1461 微波合成信号发生器和 82406A 太赫兹倍频模块组成,82406A 太赫兹倍频模块输出端口为 WR10 波导;太赫兹功率计由 2434 微波功率计和 W8486A 波导功率传感器组成,太赫兹功率计在 75 ~ 110 GHz 的测量不确定度是 3.5%(k=2)。在实验过程中,设置太赫兹信

号发生器的输出频率是 0.1 THz、重复频率是 10 Hz，太赫兹功率计测试的平均功率是 12.38 mW，示波器测试的太赫兹热释电探测器输出电压如图 11 所示，上升时间 (10%~90%) 为 30 ms，电压峰-峰值为 720 mV，则太赫兹热释电探测器的响应度是 58.2 V/W。

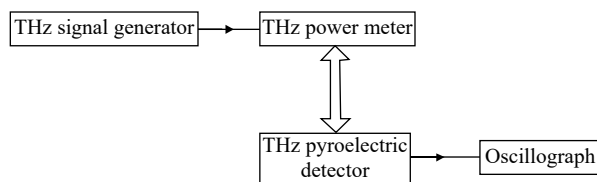


图 10 波导传输太赫兹辐射功率测试装置

Fig.10 Waveguide transmission THz radiation power test device

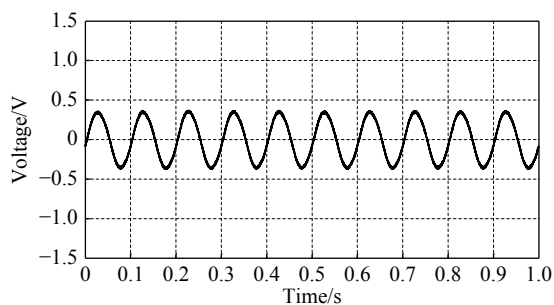


图 11 太赫兹热释电探测器输出电压

Fig.11 Output voltage of THz pyroelectric detector

在波导传输太赫兹辐射功率测试实验中，太赫兹信号发生器的输出端口是 WR10 波导，太赫兹功率计的输入端口也是 WR10 端口，它们之间可以通过波导组成闭环连接，损耗小。然而，使用文中设计的太赫兹热释电探测器测试太赫兹信号发生器的输出功率时，太赫兹热释电探测器与太赫兹信号发生器之间增加了一个波导适配器，并且为了避免太赫兹热释电探测器与波导适配器之间发生机械磨损，太赫兹热释电探测器与波导适配器输出端口之间存在一定的空隙，对太赫兹辐射的传输损耗较大。因此，文中设计的太赫兹热释电探测器在 0.1 THz 的响应度比 2.52 THz 的响应度小，不能准确反映太赫兹热释电探测器响应度的性能。

为了进一步验证太赫兹热释电探测器的重复测试性能，文中使用太赫兹信号发生器对太赫兹热释电探测器的重复性进行测试，太赫兹热释电探测器测试的一组数据如表 1 所示，则太赫兹热释电探测器测试功率的重复性是 0.12%。测试结果表明，文中设计的

太赫兹热释电探测器能够实现太赫兹辐射功率的重复测试。

表 1 重复性测试数据

Tab.1 Repeatability test data

Num	Voltage/mV	Power/mW	Num	Voltage/mV	Power/mW
1	720.2	12.37	6	720.2	12.37
2	718.6	12.35	7	720.0	12.37
3	720.2	12.37	8	720.4	12.38
4	718.8	12.35	9	718.6	12.35
5	718.4	12.34	10	718.2	12.34

3 结 论

针对大光斑太赫兹光束功率测试需求，文中使用有限元分析软件，通过热电耦合仿真，设计了光敏面直径为 10 mm 的太赫兹热释电探测器，通过减薄与抛光工艺、平面集成电路微纳米加工工艺、匀胶与剥离工艺、金丝键合工艺等技术完成了太赫兹热释电探测器的制作。针对太赫兹光束传输途径不同，文中提出在探测器结构上设计可拆卸的套筒和波导适配器，分别用于接收自由空间、波导传输的太赫兹辐射，解决了两种传输方式太赫兹辐射功率兼容测试问题，拓展了太赫兹热释电探测器的应用途径。

文中使用太赫兹源、频谱分析仪等测试仪器对太赫兹热释电探测器的性能进行了测试，测试结果表明，太赫兹热释电探测器的噪声等效功率优于 1 nW/Hz^{1/2}、重复性优于 0.5%，具有噪声等效功率低、重复性高等特点。

参考文献：

[1] Xie Taoran, Wang Zhaoying, Yuan Quan, et al. Generation of THz signal based on recirculating frequency shifting loop with tunable frequency multiplication factor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S125001. (in Chinese)
解陶然, 王肇颖, 袁泉, 等. 利用循环移频环路产生的倍频因子可调谐太赫兹信号 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S1): S125001.

[2] Wu Junzheng, Ni Weiping, Yan Weidong, et al. Target scene simulation of terahertz interferometric imaging with circular array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0125004. (in Chinese)
吴俊政, 倪维平, 严卫东, 等. 圆周阵列太赫兹干涉成像中目标

- 场景仿真[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0125004.
- [3] Pan Wu, Zeng Wei, Zhang Jun, et al. Design of multilayer stacked terahertz communication lens antenna [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 65–72. (in Chinese)
潘武, 曾威, 张俊, 等. 堆叠型太赫兹通信透镜天线设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 65–72.
- [4] Zhang Peng, Dong Jie, Han Shunli, et al. Research advance of terahertz power incoherent measurement technology [J]. *Journal of Microwaves*, 2015, 31: 80–83. (in Chinese)
张鹏, 董杰, 韩顺利, 等. 太赫兹功率非相干测试技术研究进展[J]. *微波学报*, 2015, 31: 80–83.
- [5] Liang Zhiqing, Liu Ziji, Jiang Yadong, et al. High responsivity of terahertz based on ultra thin LiTaO₃ crystal material [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(5): 520–524. (in Chinese)
梁志清, 刘子骥, 蒋亚东, 等. 基于超薄钽酸锂晶体材料高响应太赫兹探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(5): 520–524.
- [6] Jun Yang, Xiaojing Gong, Yandong Zhang, et al. Research of an infrared pyroelectric sensor based THz detector and its application in CW THz imaging[C]/International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. SPIE, 2009, 7385:738521-1-738521-6.
- [7] Ralf Muller, Berndt Gutschwager, Jorg Hollandt, et al. Characterization of a large area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2015, 36: 654–661.
- [8] H Bagherzadeh, E R Brown, W Zhang. Accurate MM-Wave-to-THz power measurements with large area pyroelectric detectors[C]/National Aerospace and Electronics Conference (NAECON) and Ohio Innovation Summit (OIS), IEEE, 2016: 437-440.
- [9] Christopher W Berry, Nezh T Yardimci, Mona Jarrahi. Responsivity calibration of pyroelectric terahertz detectors [J]. *Physics*, 2014: 1–4.
- [10] Cheng Jinbao. Research on sensitive element for pyroelectric detector based on lithium tantalite wafer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 51-52.(in Chinese)
程金宝. 基于钽酸锂晶片的热释电探测器敏感元研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 51-52.