

文章编号: 1672-8785(2020)04-0014-06

## 基于钽酸锂晶片的太赫兹热释电探测器

董航荣 曹乾涛 张鹏 路波

(中电科仪器仪表有限公司, 山东青岛 266555)

**摘要:** 针对自由空间和波导传输太赫兹辐射功率兼容测试的需求, 开展了光敏面直径为 10 mm 的多功能太赫兹热释电探测器的相关研究。通过有限元分析及热电耦合仿真设计, 建立了敏感元件由 100  $\mu\text{m}$  厚的钽酸锂( $\text{LiTaO}_3$ )晶片和碳纳米管吸收层组成的太赫兹热释电探测器模型; 采用优化的精确减薄抛光和剥离等关键工艺, 重点攻克了采用大晶片多阵列方式制作  $\text{LiTaO}_3$  基太赫兹热释电探测器敏感元件的工艺难题, 并完成了太赫兹热释电探测器的研制。在设定条件下, 该探测器的响应度为 371.8 V/W, 噪声等效功率为 0.34 nW/Hz<sup>1/2</sup>。实验结果表明, 设计并制作的太赫兹热释电探测器的集成度高、响应度良好、噪声等效功率低, 能够有效解决大光斑太赫兹光束功率测试问题。

**关键词:** 钽酸锂; 太赫兹探测器; 大晶片多阵列; 精确减薄

中图分类号: TN744.41 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.04.003

## Terahertz Pyroelectric Detector Based on $\text{LiTaO}_3$ Wafer

DONG Hang-rong, CAO Qian-tao, ZHANG Peng, LU Bo

(China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of terahertz radiation power compatibility test for free space and waveguide transmission, a multi-function terahertz pyroelectric detector with a photosensitive surface diameter of 10 mm is studied. By means of the finite element analysis and the thermoelectric coupling simulation design, the model of terahertz pyroelectric detector, whose sensitive element is composed of the  $\text{LiTaO}_3$  wafer with the thickness of 100  $\mu\text{m}$  and the carbon nanotubes absorption layer, is established; the process problem of using the large wafer and multi-array method to manufacture the sensitive components of  $\text{LiTaO}_3$ -based terahertz pyroelectric detector is solved, and the development of terahertz pyroelectric detector is completed by using key processes such as optimized precise thinning, polishing and Lift-Off. Under the setting conditions, the responsivity of the terahertz pyroelectric detector is 371.8 V/W, and the noise equivalent power is 0.34 nW/Hz<sup>1/2</sup>. The experimental results show that the designed and manufactured terahertz pyroelectric detector has high integration, good responsivity and low noise equivalent power, which can effectively solve the power test problem of terahertz beams with large light spots.

**Key words:**  $\text{LiTaO}_3$ ; terahertz detector; large wafer and multi-array; precise thinning

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(6142001190308)

作者简介: 董航荣(1990-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事太赫兹测试技术工艺研究。E-mail: HenryDom@163.com

## 0 引言

太赫兹源是太赫兹技术研究的基础仪器, 它可产生太赫兹连续或脉冲辐射。其中, 太赫兹脉冲辐射的功率测试仪器通常采用太赫兹热释电探测器。该探测器属于热电型探测器, 能够在常温下工作, 且具有探测率高、光谱响应宽、响应速度快和工作频率宽等优点。它主要由热释电材料、吸收材料和阻抗匹配电路构成。热释电材料和吸收材料组成的敏感元件是探测器的核心器件, 其设计及制作是太赫兹热释电探测器研制的难点和关键点。

LiTaO<sub>3</sub> 晶体具有热释电系数大、介电常数小、介电损耗低等优点, 可获得较高的探测率。而且其居里温度高、化学稳定性好, 并具有耐高温、耐腐蚀、易加工等特点, 因此是制作高性能热释电探测器的较佳选择<sup>[1]</sup>。吸收材料需要在工作频率范围内具备高吸收率、高热导率等特性, 进而获得较高的响应率和响应速度。常用的吸收材料有金黑<sup>[2-3]</sup>、炭黑、石墨<sup>[4]</sup>和碳纳米管<sup>[5-6]</sup>等。基于 LiTaO<sub>3</sub> 晶片的热释电探测器制作的研究重点主要包括 LiTaO<sub>3</sub> 晶片的减薄和吸收层的制备。许多研究人员开展了相关工作: Lehman J H 等人使用 LiTaO<sub>3</sub> 晶体作为太赫兹热释电探测器的热电转换芯片, 并采用垂直阵列碳纳米管作为吸收材料, 制作了高吸收率热电型太赫兹探测器<sup>[7]</sup>; 中北大学通过减薄、键合、抛光等技术制备出约 10 μm 厚的超薄 LiTaO<sub>3</sub> 晶片, 然后通过蒸金、黑化等处理技术将其制备成红外敏感元件<sup>[8]</sup>; 中国科学院电子学研究所采用预置沟槽方法制备出约 20 μm 厚的超薄 LiTaO<sub>3</sub> 晶片(该方法既能控制晶片厚度又能实现自动解片), 并采用电喷雾方法制备出炭黑红外吸收层<sup>[9]</sup>; 电子科技大学采用化学机械抛光法制备出外形尺寸为 2 mm×6 mm、厚度为 40 μm 的 LiTaO<sub>3</sub> 晶片, 并采用旋涂法制备出碳纳米管吸收层<sup>[10]</sup>。

在采用传统的 LiTaO<sub>3</sub> 基太赫兹热释电探测器敏感元件制备工艺制作上电极和吸收层时, 晶片尺寸普遍为敏感元件尺寸(非标且尺

寸较小)。因此在它上面实现高质量复杂图形化的难度较大, 同时也存在制作效率低下等问题。本文提出采用基于减薄抛光工艺的大晶片多阵列方式来制作 LiTaO<sub>3</sub> 基太赫兹热释电探测器敏感元件, 以突破晶片减薄抛光、吸收材料与多层薄膜结构图形化、超薄晶片精确切割以及芯片无损剥离等关键技术, 从而形成太赫兹热释电探测器敏感元件制作工艺的优化方法。

## 1 设计

本文设计的探测器主要应用于自由空间和波导传输太赫兹辐射功率兼容测试, 其实现方式是在探测器结构的入射端分别设计可拆卸的套筒和波导适配器<sup>[11]</sup>。

为匹配太赫兹激光器输出的大尺寸太赫兹光斑, 将探测器的光敏面直径设计为 10 mm。在此基础上进行有限元分析及热电耦合仿真设计, 建立图 1 所示的结构模型。热电耦合仿真设计主要用于确定 LiTaO<sub>3</sub> 晶体的厚度。设置输入热流密度的重复频率为 10 Hz, 并将其持续加载到探测器敏感元件上。仿真结果显示, 晶体温度及温度变化率均随加载时间的延长而增大, 这有利于产生有效的极化电流。当晶片厚度为 100 μm 左右时, LiTaO<sub>3</sub> 晶体呈现出良好的热释电效应并能兼顾工程化应用需求。因此, 本文设计的 LiTaO<sub>3</sub> 晶体厚度为 100 μm。

图 2 为探测器敏感元件的结构示意图。它为多层结构, 主要由碳纳米管吸收层、TiW/Ni 层上电极、LiTaO<sub>3</sub> 晶片、TiW/Au 层下电极以及电镀 Au 层键合点组成。

## 2 制作工艺

制作太赫兹热释电探测器敏感元件时, 选用厚度为 0.5 mm 的 φ2" 光学级 LiTaO<sub>3</sub> 晶片。制作过程主要包括 LiTaO<sub>3</sub> 晶片的减薄与抛光、上下电极的制备、吸收层的制备、超薄晶片外形的精确切割以及元件无损剥离等。在得到敏感元件成品后, 需将它集成到管壳中, 并采用金丝键合工艺将其电极与引脚互联, 接着再通过把它接入 I-V 转换电路来将太赫兹热释电探

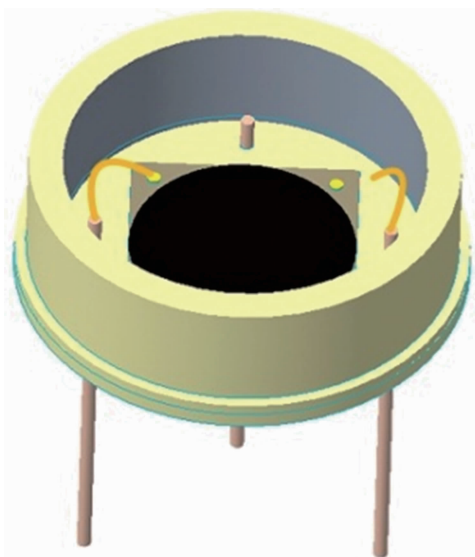


图 1 太赫兹热释电探测器的结构模型

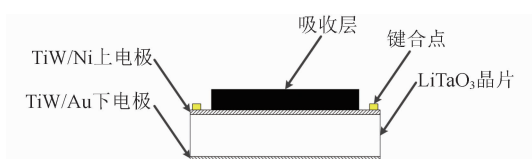


图 2 太赫兹热释电探测器敏感元件的结构示意图

探测器输出的电流信号转换为电压信号。其中，太赫兹热释电探测器敏感元件是核心(制作工艺流程见图 3)。

采用大晶片多阵列方式制作  $\text{LiTaO}_3$  基太赫兹热释电探测器敏感元件，其核心优势如下：(1)原始晶片为标准  $\phi 2''$  圆片，与制作工艺涉及的各个工序匹配度高，可操作性强。(2)由于吸收材料与多层薄膜结构图形化等过程中涉及多道套刻工序，在大片上较易制作对准标记，保证了套刻的精确度。(3)此种方法“先制作、后划切”，其划切过程可实现上下电极阻断，且阻断处理简单快速实用。此外，一次工艺流程可制作多个敏感元件，制作效率高。

### 3 关键工艺技术分析

#### 3.1 用精确减薄抛光技术制备超薄 $\text{LiTaO}_3$ 晶片

采用 UNIPOL-1202 型精密研磨抛光机减薄  $\text{LiTaO}_3$  晶片的厚度，并将一定厚度的 AZ-4620 型正性光刻胶与  $\text{LiTaO}_3$  晶片组成临时键合体。AZ 胶固化后兼具刚性及塑性。其中，

刚性保证了这个临时键合体对力的良好承接，塑性保证了 AZ 胶对热或力均有一定的缓冲作用。

晶片厚度减薄涉及研磨和抛光两道工序。研磨粉依次选用粒度为 W14 和 W7 的刚玉粉，抛光粉选用粒径为  $0.75 \mu\text{m}$  的氧化铈粉。它们均配成 20wt% 的料液来使用。对不同减薄厚度的精确控制主要通过 GPC-80A 型精确磨抛控制仪的实时测量以及 SKCH-1(A) 精密测厚仪的精确测量来实现。平面内的厚度公差可控制在  $\pm 5 \mu\text{m}$  以内，表面粗糙度可控制在  $50 \text{ nm}$  以内。

本文采用图 4(a) 所示的选点法分别对研磨和抛光后的  $\text{LiTaO}_3$  晶片厚度进行了测量统计(结果见图 4(b))。经分析可得，研磨后的晶片厚度公差可控制在  $\pm 3 \mu\text{m}$  以内，抛光后的晶片厚度公差会进一步减小。这表明采用此种精确减薄抛光工艺时，减薄抛光的进程会对晶片的厚度均匀性具有修正的效果。

#### 3.2 用剥离工艺涂覆碳纳米管吸收层

在涂覆碳纳米管吸收层之前，通过平面集成电路微纳米加工技术(包括薄膜沉积、图形成像和图形转移技术)制作上下电极。先采用直流磁控溅射技术分别在晶片的正反面上溅射 TiW/Ni/Au 薄膜和 TiW/Au 薄膜。TiW、Ni、Au 的厚度分别为  $30 \text{ nm}$ 、 $50 \text{ nm}$  和  $200 \text{ nm}$ 。将 TiW 层作为粘附层。然后基于正性光刻胶工艺，通过使用先进的匀胶系统以及接触/接近式曝光得到了精确的电路图形。在图形转移方面，采用湿法刻蚀和电镀技术相结合的方法。其中，湿法刻蚀的选择性保证了对特定元素的腐蚀，电镀技术主要保证了电镀厚度的精确性及均匀性。本文中电镀 Au 层的厚度为  $3 \mu\text{m}$ 。

为使太赫兹能量均匀、快速地传递到  $\text{LiTaO}_3$  晶体，作为吸收层的碳纳米管必须涂覆均匀且要实现区域选择性涂覆。基于剥离工艺实现吸收层图形化的步骤如下：首先，采用匀胶机在衬底上旋涂一层光刻胶并使其图形化

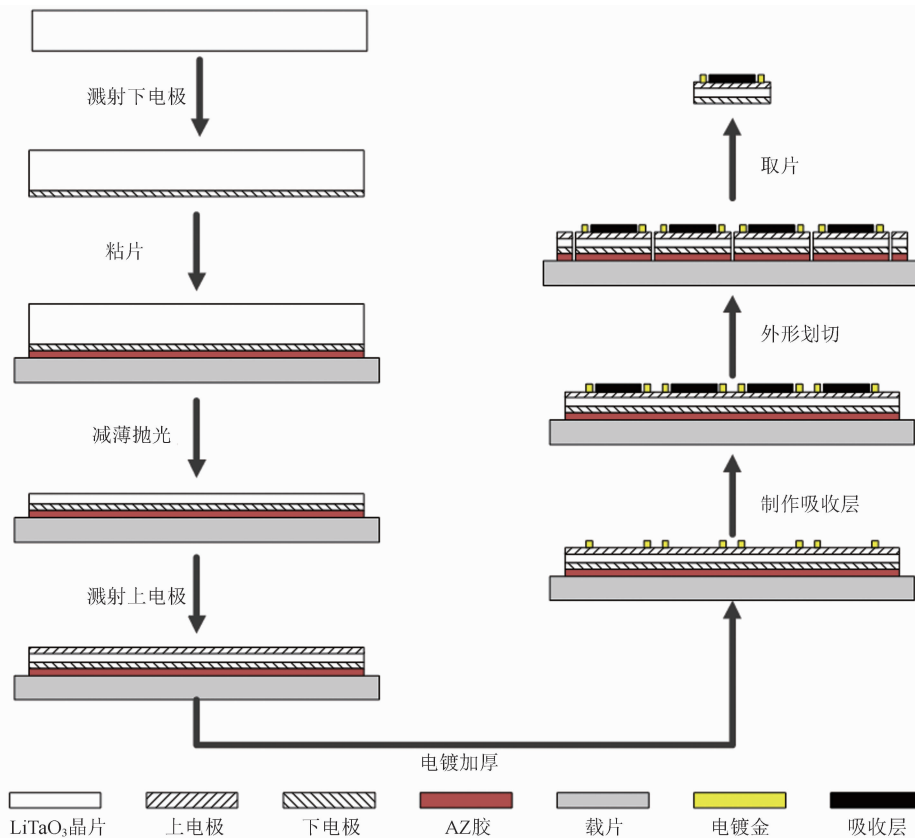


图 3 太赫兹热释电探测器敏感元件的制作工艺流程图

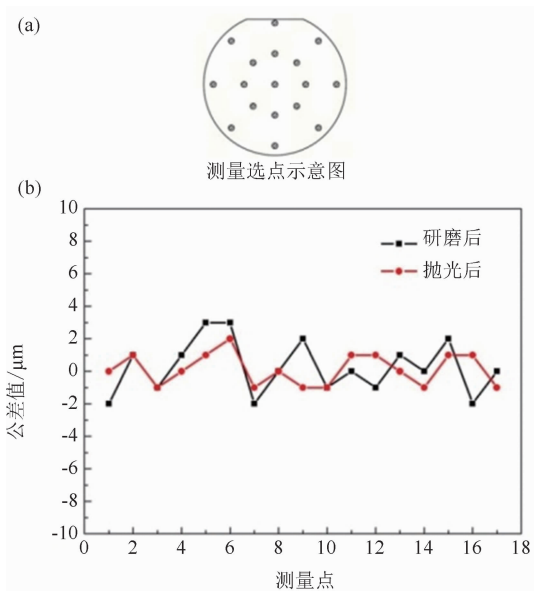


图 4 不同减薄抛光厚度的 LiTaO<sub>3</sub> 晶片片内厚度统计图

(该图形区域与涂覆吸收层的区域形成互补图形)；然后在其上旋涂沉积吸收层，此时非光刻胶区域的吸收层就会淀积到 LiTaO<sub>3</sub> 基底上；最后去除光刻胶，旋涂在光刻胶上的碳纳米管

将随着光刻胶的溶解而从 LiTaO<sub>3</sub> 基片上脱离，直接淀积涂覆在 LiTaO<sub>3</sub> 基片上的吸收层将被保留。

本文对碳纳米管吸收层制作的工艺参数进行了研究。结果表明，当吸收层的涂覆厚度在 2 μm 左右时，吸收层的附着效果及吸收率较佳，固化后的涂覆层厚度均匀，如图 5 所示。

通过一系列关键工艺技术的实施及控制，可得到产品级的太赫兹热释电探测器敏感元件。图 6 为其集成部分的实物图。

#### 4 性能测试

对于波导传输太赫兹辐射功率测试来说，太赫兹热释电探测器与太赫兹信号发生器之间需增加一个波导适配器，导致测试结果不能准确反映太赫兹热释电探测器的响应度性能。因此，本文只对自由空间太赫兹辐射功率测试进行表征，并测试了太赫兹热释电探测器的响应度和噪声等效功率等核心指标。

本文通过搭建图 7 所示的测试装置进行了

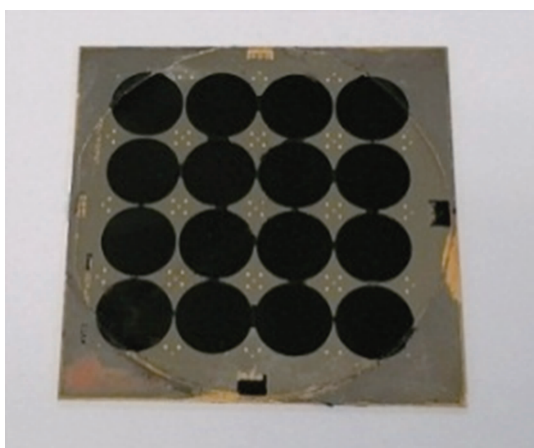


图 5 用剥离工艺制作的碳纳米管吸收层

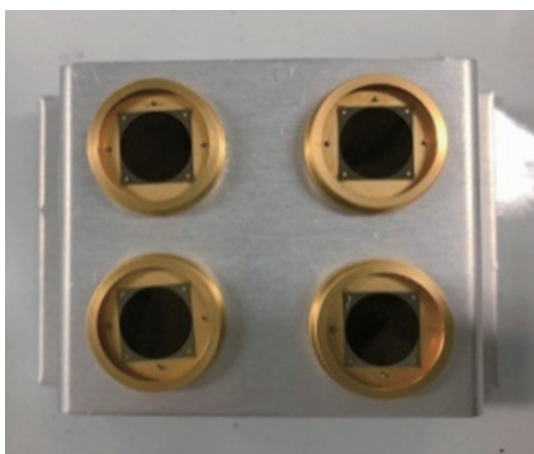


图 6 太赫兹热释电探测器敏感元件集成部分的实物图

自由空间传输太赫兹辐射功率测试<sup>[11]</sup>。其中，太赫兹激光器选用 FIRL100 型；太赫兹辐射计已进行专业校准，在 0.3~10 THz 时的测量不确定度为 5% ( $k=2$ )。

设定 FIRL100 激光器的激光输出频率为 2.52 THz，斩波频率为 10 Hz。通过太赫兹辐射计获取待入射到探测器的激光功率值。经测

试可知，太赫兹激光的平均功率为 3.90 mW；通过示波器获取移入光路的探测器的输出电压（测试数据见图 8），其中电压峰-峰值为 1.45 V。综上可得，太赫兹热释电探测器的响应度为 371.8 V/W。

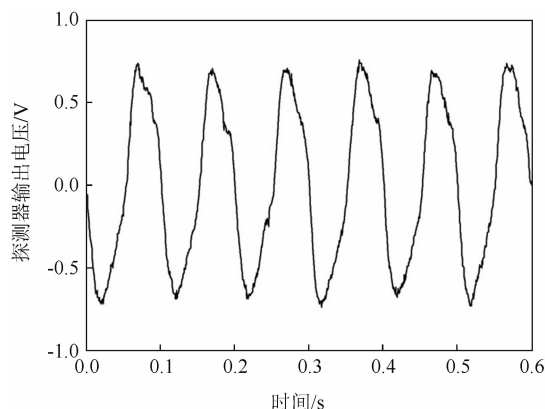


图 8 太赫兹热释电探测器的输出电压

为了测试噪声等效功率，搭建了一个由前置放大器和频谱分析仪组成的测试系统<sup>[11]</sup>。设置前置放大器的放大倍数为 1000，频谱分析仪的中心频率及带宽均为 10 Hz。经测试可知，噪声电压为 111.8  $\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。综上可得，太赫兹热释电探测器的噪声等效功率为 0.34  $\text{nW}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

### 5 结论

本文选用 LiTaO<sub>3</sub> 晶片和碳纳米管吸收层组成太赫兹热释电探测器敏感元件，采用了优化的减薄抛光和剥离等关键工艺，解决了通过大晶片多阵列方式制作 LiTaO<sub>3</sub> 基太赫兹热释电探测器敏感元件的工艺难题，成功研制了晶片厚度为 100  $\mu\text{m}$ 、光敏面直径为 10 mm 的太赫兹热释电探测器。在设定条件下，该探测器

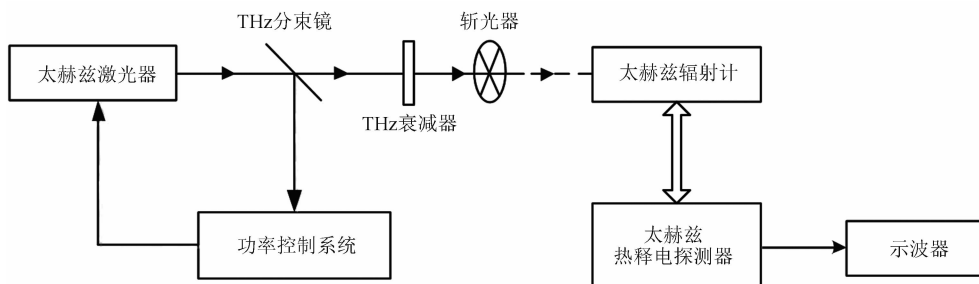


图 7 自由空间传输太赫兹辐射功率测试的示意图

的响应度为 371.8 V/W, 噪声等效功率为 0.34 nW/Hz<sup>1/2</sup>。测试结果表明, 本文设计并制作的太赫兹热释电探测器的响应度良好、噪声等效功率低。

我们下一步将重点解决更薄的 LiTaO<sub>3</sub> 基敏感元件在工程化应用中的可集成性及稳定性等问题, 提升高重复频率的太赫兹脉冲功率测试仪器的测试能力, 并尝试开展太赫兹热释电探测器在太赫兹傅里叶变换光谱仪中的测试应用。

### 参考文献

- [1] Muralt P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2001, **64**(10): 1339–1388.
- [2] Advena D J, Bly V T, Cox J T. Deposition and characterization of far-infrared absorbing gold black films [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(7): 1136–1144.
- [3] Nelms N, Dowson J. Goldblack coating for thermal infrared detectors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **120**(2): 403–407.
- [4] Mellouki I, Touayar O, Ktan T, et al. Deposition and characterization of graphite-black coating for absolute pyroelectric detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, **45**(4): 273–279.
- [5] Lehman J H, Engtrakul C, Gennett T, et al. Single-wall carbon nanotube coating on a pyroelectric detector [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(4): 483–488.
- [6] Lehman J H, Sanders A. Very black infrared detector from vertically aligned carbon nanotubes and electric-field poling of lithium tantalite [J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(9): 3261–3266.
- [7] Lehman J H, Lee B, Grossman E N. Far infrared thermal detectors for laser radiometry using a carbon nanotube array [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(21): 4099–4104.
- [8] 谭秋林, 张文栋, 刘俊, 等. 基于钽酸锂晶体薄片的红外探测器设计及应用 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, **9**(1): 73–77.
- [9] 赵玲, 赵燕, 何秀丽, 等. 基于超薄钽酸锂晶片及炭黑红外吸收层的热释电探测器 [J]. *纳米技术与工程*, 2014, **12**(1): 44–50.
- [10] Wang J, Gou J, Li W Z. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film [J]. *AIP Advances*, 2014, **4**(2): 027106.
- [11] 张鹏, 曹乾涛, 董航荣, 等. 大面元太赫兹热释电探测器 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(5): 20190338.