

# 钽酸锂晶圆减薄技术及其热释电红外探测器应用进展

胡钰晴<sup>1,2</sup>, 朱一新<sup>1,2</sup>, 乐先浩<sup>1</sup>, 万 青<sup>1</sup>

(1. 甬江实验室, 宁波 315201; 2. 中国科学技术大学 微电子学院, 合肥 230026)

**摘 要:** 钽酸锂(LiTaO<sub>3</sub>, LT)作为一种重要的多功能铁电材料, 以其优异的热释电系数、稳定的物理化学特性及宽波段光谱响应, 在红外探测器、热成像传感器等领域发挥着关键作用。近年来, 随着微电子机械系统(MEMS)与集成光子学技术的迅速发展, 传感器与探测系统正朝着小型化、集成化与高性能化的方向不断演进。在此背景下, 作为热释电器件核心敏感单元材料, 传统块体晶体逐步转向高质量 LT 单晶薄膜, 以实现更优的热学管理与电学性能。本文系统综述了 LT 单晶的关键减薄技术发展脉络, 涵盖从传统的机械研磨减薄、化学机械抛光(CMP), 到新兴的离子切片与智能剥离(Smart-Cut)等先进工艺, 重点分析了各技术路径的原理、可实现的薄膜厚度、晶体质量及其优缺点。在此基础上, 本文进一步探讨了减薄后的 LT 薄膜在热释电探测器中的应用优势与性能表现。最后, 梳理了当前 LT 单晶薄膜制备与集成所面临的技术挑战, 并展望了未来技术的发展方向, 旨在为新一代高性能、微型化热释电器件的研发提供参考。

**关 键 词:** 钽酸锂单晶; 机械减薄; 智能剥离; 热释电探测器; 综述

中图分类号: TN304 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)06-0764-11

## Lithium Tantalate Wafer: Advances in Thinning Technology and Application in Pyroelectric Infrared Detectors

HU Yuqing<sup>1,2</sup>, ZHU Yixin<sup>1,2</sup>, LE Xianhao<sup>1</sup>, WAN Qing<sup>1</sup>

(1. Yongjiang Laboratory, Ningbo 315201, China; 2. School of Microelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Lithium tantalate (LiTaO<sub>3</sub>, LT) stands as a significant multifunctional ferroelectric material, playing a critical role in infrared detectors and thermal imaging sensors, owing to its outstanding pyroelectric coefficient, stable physicochemical properties, and broad-band spectral response. In recent years, rapid advancements in micro-electromechanical systems (MEMS) and integrated photonics have driven the evolution of sensor and detection systems toward miniaturization, integration, and high performance. Consequently, the core sensing material of pyroelectric devices has progressively shifted from traditional bulk crystals to high-quality LT

收稿日期: 2025-09-28; 收到修改稿日期: 2025-11-20; 网络出版日期: 2025-12-11

基金项目: 浙江省重点研发计划(2024SSYS0042, 2024SSYS0043); 浙江省自然科学基金(LQN26F040003); 浙江省引进和培育创新创业领军团队(2023R01011)

Key R&D Program of Zhejiang (2024SSYS0042, 2024SSYS0043); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LQN26F040003); Zhejiang Province Introduces and Cultivates Leading Innovation and Entrepreneurship Teams (2023R01011)

作者简介: 胡钰晴(1995-), 女, 博士. E-mail: yuqing-hu@ylab.ac.cn

HU Yuqing (1995-), female, PhD. E-mail: yuqing-hu@ylab.ac.cn

通信作者: 万 青, 研究员. E-mail: qing-wan@ylab.ac.cn

WAN Qing, professor. E-mail: qing-wan@ylab.ac.cn

single-crystal films, aiming to achieve superior thermal management and electrical performance. This article systematically reviews the development of key thinning technologies for LT single crystals, covering a range of processes from conventional mechanical grinding and chemical mechanical polishing (CMP) to emerging advanced techniques such as crystal ion slicing and the Smart-Cut process. It includes a focused analysis of principles underlying each technical route, achievable film thickness, crystal quality, and their respective advantages and limitations. Building on this foundation, the paper further discusses the application advantages and performance of thinned LT films in pyroelectric detectors. Finally, the review outlines the current technical challenges associated with the fabrication and integration of ultra-thin LT single crystals and offers perspectives on future development directions. This review provides a valuable reference for the development of next-generation, high-performance, and miniaturized pyroelectric devices.

**Key words:** lithium tantalate single crystal; mechanical thinning; Smart-Cut; pyroelectric detector; review

钽酸锂(LiTaO<sub>3</sub>, LT)单晶以其优异的热释电系数( $p$ , 约 230  $\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )以及电压响应优值( $F_v$ , 约 0.170  $\text{m}^2\cdot\text{C}^{-1}$ ), 在红外探测领域展现出显著的应用前景<sup>[1-2]</sup>。同时, LT 还具有优异的温度稳定性(居里温度  $T_c$ , 约 630  $^{\circ}\text{C}$ )以及环境友好的材料特性(无铅), 在高温和绿色电子器件领域更具应用价值<sup>[3]</sup>。LT 优异的综合性能使其在众多热释电材料中脱颖而出, 成为制造非制冷型红外探测器和热成像系统的理想材料, 如表 1 所示<sup>[1-2, 4-5]</sup>。然而, 基于块体 LT 的热释电探测器热容较高导致器件热响应时间较长, 难以实现快速温度监测<sup>[6]</sup>。此外, 微电子机械系统 (MEMS) 的进步对器件集成度提出了更高要求, 块体材料难以与半导体读出电路实现高效集成, 这已成为制约器件小型化和阵列化发展的主要瓶颈。因此, 基于块体的探测器无法满足现代红外成像系统在高分辨率和高帧频方面的需求。为克服这些技术瓶颈, 近年来研究者将研究聚焦于 LT 单晶薄膜的制备与集成技术<sup>[7-8]</sup>。LT 薄膜的制备主要分为“直接生长”与“物理转移”两类技术路径。尽管脉冲激光沉积和溶胶凝胶等直接生长技术能够制备薄膜, 但其产物

多为多晶结构, 晶体质量与电光性能难以媲美单晶材料, 限制了其在高端器件中的应用<sup>[9-11]</sup>。为解决此瓶颈, 物理转移法应运而生, 该技术通过精密减薄将块体 LT 单晶加工为微米甚至纳米级薄膜<sup>[12-14]</sup>。获得的单晶薄膜不仅保留了优异的本征特性, 还可与硅基电路实现异质集成, 为打造高性能、低成本和大规模的热释电传感器阵列奠定了材料基础<sup>[15]</sup>。在物理转移技术路线中, 研究人员发展了机械减薄、化学机械抛光 (Chemical mechanical polishing, CMP) 以及智能剥离 (Smart-Cut) 等关键技术, 为制备高性能热释电器件及其阵列提供了重要工艺基础, 进而推动了 LT 单晶在高性能热释电探测器及其他功能器件领域的广泛应用<sup>[16-17]</sup>。

本文旨在系统梳理 LT 单晶的减薄技术及其在热释电探测器中的应用。首先, 系统概述 LT 单晶的主要减薄方法, 包括机械减薄和智能剥离的原理、工艺特点与发展现状, 并分析加工过程对 LT 单晶性能的影响。然后, 探讨不同厚度 LT 单晶在热释电探测器中的具体应用, 并综述该类探测器在多个领域中的实际应用情况。最后, 展望 LT 单晶减薄技

表 1 LiTaO<sub>3</sub> 与常见热释电材料性能对比<sup>[1-2, 4-5]</sup>  
Table 1 Comparison of performance between LiTaO<sub>3</sub> and common pyroelectric materials<sup>[1-2, 4-5]</sup>

| Type           | Material                                                                                                                                                                               | $p/(\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ | $T_c/^{\circ}\text{C}$ | $F_v/(\text{m}^2\cdot\text{C}^{-1})$ |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Single crystal | LiTaO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                     | 230                                                   | 630                    | 0.170                                |
|                | LiNbO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                     | 83                                                    | 1210                   | 0.103                                |
|                | Triglycine sulfate (TGS)                                                                                                                                                               | 550                                                   | 50                     | 0.43                                 |
|                | Deuterated triglycine sulfate (DTGS)                                                                                                                                                   | 264                                                   | 61                     | 0.48                                 |
|                | Pb(Zr <sub>0.55</sub> Ti <sub>0.45</sub> )O <sub>3</sub>                                                                                                                               | 330                                                   | 340                    | 0.02                                 |
| Ceramic        | 0.41Pb(In <sub>1/2</sub> Nb <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub> -0.17Pb[(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> ) <sub>x</sub> Ti <sub>1-x</sub> ]O <sub>3</sub> -0.42PbTiO <sub>3</sub> (001) | 570                                                   | 253                    | 0.05                                 |
|                | 0.75Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> -0.25PbTiO <sub>3</sub>                                                                                                     | 746                                                   | 130                    | 0.016                                |
|                | BaTiO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                     | 200                                                   | 120                    | 0.005                                |
|                | Sr <sub>0.5</sub> Ba <sub>0.5</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>                                                                                                                     | 205                                                   | 90                     | 0.018                                |
|                | 0.8(Bi <sub>0.5</sub> Na <sub>0.5</sub> )TiO <sub>3</sub> -0.2BaTiO <sub>3</sub>                                                                                                       | 242                                                   | 209                    | 0.027                                |

术的发展策略及其热释电探测器在红外成像、安防监控、医疗诊断等领域的应用前景,以期为基于 LT 单晶薄膜的高性能热释电器件的制造提供参考价值。

1 钽酸锂单晶减薄技术

单晶减薄技术是将 LT 从块体形式转化为高性能集成化器件的关键步骤。通过将单晶减薄至微米甚至纳米尺度,不仅能显著提升热释电器件的综合性能,还能有效突破块体材料的高热容及与半导体工艺集成等固有限制。减薄后的单晶薄膜可通过键合技术实现与硅光芯片及二维材料等的异质集成,从而推动多功能片上系统和新型光电器件(如光学-热电复合传感器和频率梳源)的开发,极大拓展器件的功能维度<sup>[18-19]</sup>。此技术进展使得 LT 单晶能够全面兼容现代半导体微加工流程,推动其在红外成像、激光雷达、高速光通信和量子技术等领域向大规模、低成本、高性能应用转型<sup>[20]</sup>。

作为热释电器件的核心功能材料,LT 单晶的减薄质量直接影响器件的热学与电学性能。目前,LT 单晶减薄技术已发展出机械减薄(“减法”工艺)和智能剥离(“加法”工艺)等主流方法。这两种方法在制备 LT 薄膜方面形成显著的互补与协同关系,其具体对比如表 2 所示<sup>[21-23]</sup>。智能剥离技术能够实现亚微米甚至纳米级的单晶薄膜转移,显著降低晶体缺陷,使用该方法制备 4/6 英寸(1 英寸=2.54 cm)LT 单晶薄膜已较为成熟,并向 8 英寸迈进,以满足光通信芯片的大规模制造需求<sup>[18, 24]</sup>。然而,该方案的制备工艺复杂度与成本较高,涉及离子注入、键合与抛光等多道工序,单片周期长达数天。相比之下,机械减薄具有成本低、效率高的优势,适用于 4~12 英寸的多种晶圆尺寸,可快速制备数十至数百微米厚的 LT 薄膜。但其在减薄过程中容易引入应力与损伤,导致边缘破裂和厚度不均,因此主要适用于对厚度要求宽松的体声波滤波器或部分传感

器领域<sup>[25]</sup>。基于此,本节将系统探讨机械减薄与智能剥离技术的基本原理与工艺特征,并分析制备工艺对 LT 单晶薄膜质量的影响。

1.1 机械减薄技术

1.1.1 机械研磨与化学机械抛光

机械减薄本质上是一个通过物理磨削与抛光逐步、可控地去除材料的过程。其标准工艺流程遵循“粗减薄-精减薄-抛光”的递进式原则<sup>[26-28]</sup>。当目标晶圆厚度低于 100  $\mu\text{m}$  时,通常需要对晶圆进行键合,以提供刚性支撑,确保后续研磨、抛光工艺带来热机械稳定性。此外,载体晶圆的热膨胀系数也需与目标晶圆匹配,以减小热应力引起的形变或破裂。粗减薄阶段采用粒度较粗、刚性强的金刚石砂轮高效去除材料,快速将晶片厚度降至目标范围左右,但此过程会引入显著的表面划痕和亚表面损伤。精减薄阶段则使用粒度更细(如微米级)的砂轮,以较低的进给速率去除粗磨留下的表面损伤,改善总厚度变化(Total thickness variation, TTV)与表面粗糙度。最后,借助 CMP,通过研磨料机械作用与抛光液化学腐蚀作用的协同效应,可将晶圆进一步减薄至 10  $\mu\text{m}$  甚至更低量级。同时,该过程能够有效消除精减薄后晶体表面的微观缺陷和应力,从而获得纳米级光滑无损伤的表面。图 1 展示了机械减薄工艺的流程示意图。

1.1.2 机械减薄技术研究现状

基于 200~500  $\mu\text{m}$  厚度的 LT 单晶在热释电探测器领域得到了广泛应用,国内外多家企业均已实现商业化供应<sup>[29]</sup>。然而,随着应用场景向高性能、小型化、微型化方向的不断扩展,对 LT 单晶的减薄工艺提出了更高要求。当 LT 单晶厚度降至数百微米以下时,在机械减薄过程中,由于机械应力的存在,容易诱发微裂纹、崩边甚至整体碎裂或翘曲。因此,实现大尺寸 LT 单晶的高质量减薄至关重要。

针对上述技术挑战,近年来研究人员通过工艺优化和技术创新等方式,有效优化了机械减薄技术

表 2 机械减薄与智能剥离技术对比<sup>[21-23]</sup>  
Table 2 Comparison between mechanical thinning and Smart-Cut techniques<sup>[21-23]</sup>

| Technology          | Process principle                                                                            | Technical feature                                                                            | Mainstream wafer size                      | Achievable thickness              |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Mechanical thinning | Material removal from a bulk substrate via grinding and polishing                            | Low cost, high efficiency, and straightforward process                                       | 4–12 inch                                  | Tens to hundreds of micrometers   |
| Smart-Cut           | Transfer of a single-crystal layer via steps like ion implantation, bonding, and exfoliation | Enabling ultra-thin single-crystal transfer with low crystal defect density and high quality | 4/6 inch (mature), advancing toward 8 inch | Sub-micrometer to nanometer scale |

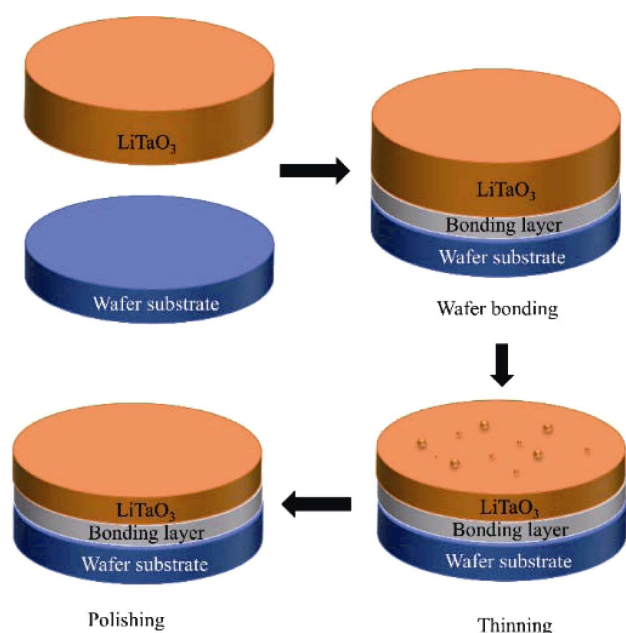


图 1 机械减薄工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical thinning process steps

与可靠性。例如, 通过选用低固化收缩率的键合材料、严格控制固化温度或者引入紫外固化等新型固化方式来降低热效应对晶圆翘曲的影响<sup>[30]</sup>。在磨具改进方面, 研究人员引入空间占位法成功制备出一种内部大小气孔交互均匀分布的超细金刚石陶瓷砂轮<sup>[31]</sup>。该结构能够显著提升砂轮的容屑能力和自锐性, 在实现高效磨削的同时获得了表面粗糙度小于 10 nm 的超平整表面。在技术集成层面, 将机械减薄与干法刻蚀、飞秒激光等技术深度结合, 可提高减薄后单晶的表面质量。Liang 等<sup>[32]</sup>采用 CMP 技术对 200  $\mu\text{m}$  厚的 LT 单晶进行减薄, 制备出 10  $\mu\text{m}$  LT 薄膜, 并基于该薄膜制备了热释电红外探测器原型器件。Schossig 等<sup>[33]</sup>提出了一种分步减薄策略, 先通过研磨与抛光将 LT 晶圆减薄至 20  $\mu\text{m}$ , 再借助离子束铣削技术将晶片中心区域进一步减薄至 0.4  $\mu\text{m}$ , 以最大限度降低晶体损伤。此外, 针对键合片的 TTV 控制也取得了系列突破。Zhang<sup>[34]</sup>提出了一种结合玻璃载体与新型临时键合材料的解决方案, 显著降低 TTV, 为实现低应力、高均匀性的晶圆减薄提供了新途径。通过优化的晶圆研磨工艺, 成功将 6 英寸的 LT 单晶晶圆减薄至 5  $\mu\text{m}$ , 同时保持良好的结构完整性与较低的 TTV(约 0.2  $\mu\text{m}$ )。近年来, 甬江实验室万青团队开发出一种低成本的室温超平整临时键合技术<sup>[35]</sup>, 有效避免了高温引入的热应力, 显著抑制了晶圆翘曲, 为后续精密减薄工艺奠定了关键基础。基于该键合技术, 团队利用国产设备实现了 8 英寸 LT 晶圆与硅晶圆、玻璃片等

体系的异质键合, 并将 LT 减薄至 8~10  $\mu\text{m}$ , 展现出良好的产业化前景。此项突破为我国大尺寸晶圆的超薄加工提供了自主可控的解决方案, 将有助于提升热释电传感器等器件的性能与可靠性。

机械减薄技术作为 LT 单晶加工的主流方法, 具备工艺成熟、成本较低和加工效率高等核心优势, 尤其适用于大批量晶圆的初步减薄。尽管该技术固有的物理接触式加工特性也导致晶圆减薄过程中存在翘曲、微裂纹以及 TTV 控制等问题, 但目前研究人员已经通过系列方法有效优化了这些问题, 因此机械减薄在产业化应用中仍具有不可替代的地位。在实际应用中, 该技术通常需要与 CMP 或干法刻蚀等非接触式精加工技术结合, 旨在保证效率的同时满足高性能器件对材料完整性及表面质量的苛刻要求。

## 1.2 智能剥离技术

智能剥离技术亦被称为晶体离子注入剥离(Crystal ion-slicing, CIS)技术, 1955 年由 Bruel 提出<sup>[36]</sup>。该工艺最初设计用于制备绝缘体上硅(Silicon-on-insulator, SOI)结构, 旨在优化高性能硅基器件的衬底<sup>[37-38]</sup>。2001 年, Wan 等<sup>[39]</sup>通过智能剥离技术实现了 LT 单晶薄膜的分离和转移, 将 CIS 技术成功拓展至功能单晶薄膜制备领域, 并逐渐发展成为制备 LT 单晶薄膜的主流方法之一。其核心原理基于高能离子注入诱导的层裂, 从而实现纳米级精度的可控单晶薄膜转移。该技术能够同时兼顾晶体质量、厚度均匀性和异质集成兼容性, 已成为当前制备高质量、低损伤纳米级 LT 单晶薄膜的关键工艺路线。

### 1.2.1 智能剥离技术原理

CIS 采用“离子注入+薄膜转移”的增材制造原理, 其工艺流程主要包括离子注入、键合与层裂以及表面处理三个阶段, 具体流程示意图如图 2 所示。首先, 在电场加速下将高能轻离子(如  $\text{H}^+$ 、 $\text{He}^+$ , 能量通常为数十万电子伏特)注入晶圆的特定深度, 离子轰击扰乱晶格周期性, 形成一定厚度的晶格损伤层(亦称缺陷密集区)<sup>[40]</sup>。该层在后续处理中作为剥离界面, 将晶圆分成上下两部分。随后, 通过键合工艺实现注入离子后晶圆与支撑衬底(通常是带有氧化层的硅基,  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ )的异质集成。在后续热处理过程中, 注入的离子变得可移动并聚集成纳米尺度的气泡, 引起损伤层界面处的机械应力, 从而诱发微腔扩展和横向裂解。通过继续退火或机械辅助, 最终可将注入层以上的薄层单晶薄膜从供体晶圆剥

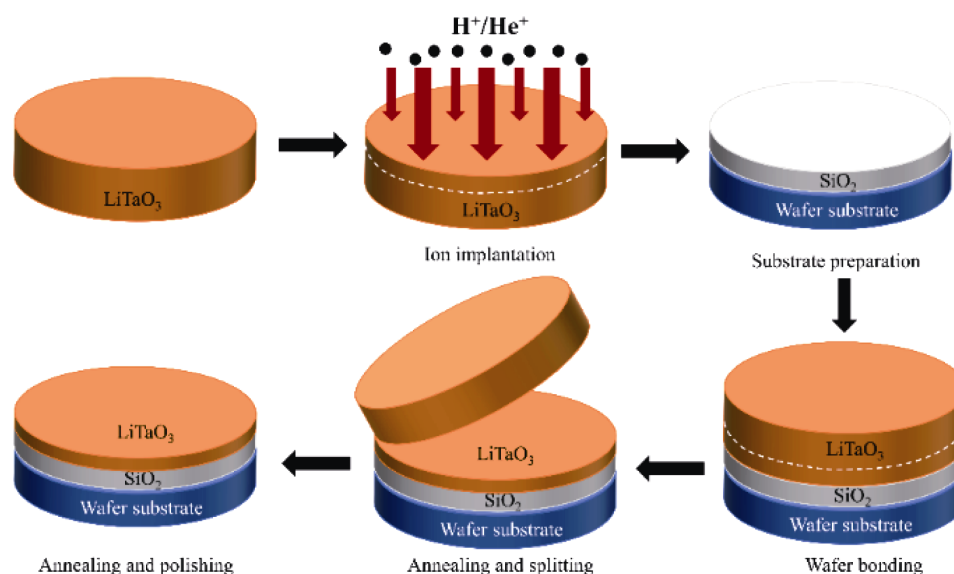


图 2 智能剥离技术流程示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of Smart-Cut process steps

离并转移至支撑衬底上。剥离后的薄膜表面可能存在纳米级损伤与起伏, 可通过 CMP 或热退火对晶圆进行后处理, 以获得原子级平整、低缺陷的高质量单晶 LT 薄膜。

### 1.2.2 LT 单晶的智能剥离研究现状

CIS 制备的薄膜在化学组成与晶体结构方面与原始晶圆高度一致, 因而能够有效保持其本征物理特性, 这一优势使其成为制备高质量 LT 单晶薄膜的重要工艺<sup>[41-42]</sup>。研究表明, 诸如注入离子种类、能量、剂量以及热退火温度等关键工艺参数对最终薄膜的质量具有决定性影响。此外, 不同材料体系中裂解区的形成机制以及注入离子与基体原子间的相互作用行为存在显著差异, 这些物理过程的差异进一步影响了工艺参数的优化路径与薄膜的最终性能<sup>[43-44]</sup>。

快速热退火(Rapid thermal annealing, RTA)是影响 LT 薄膜结构与性能的关键因素之一。Zhang 等<sup>[45]</sup>研究发现 RTA 处理可有效释放因离子注入引入的晶格应变, 经 600 °C 退火后, 晶圆的面内应变从原始的 0.83%降低至 0.39%。然而, 过高的退火温度或过长的退火时间会诱发表面异常再结晶, 进而引发晶粒非均匀长大, 同时表面粗糙度从 0.51 nm 增至 3.70 nm。这可能导致 LT 单晶的介电常数上升、介电损耗剧增, 从而恶化单晶电学性能。因此, 选取合适的 RTA 参数也是优化 LT 单晶应变状态和介电性能的有效手段。注入离子的能量对 LT 单晶的结构与性能也具有显著影响<sup>[46]</sup>。研究表明, 注入不同能量的  $\text{He}^+$  会诱发不同程度的晶格损伤、应变积累和

光学性能变化<sup>[47]</sup>。低能注入(100 keV)主要在小范围内产生高幅值应变, 但对光学吸收的影响较弱。中能注入(250 keV)则在 LT 中诱导最显著的光学吸收和强烈的局域应变, 该应变区域与  $\text{He}^+$  在畴界处的聚集及微裂纹形成密切相关。尽管高能注入(500 keV)会造成较大范围的损伤, 但由于应变分布分散, 光学吸收反而较弱。此外, 中能注入在较高剂量(如  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ )下易出现表面条纹、裂纹甚至区域剥离, 但其诱导的光学吸收和应变行为会随时间恢复至初始状态。研究表明, 注入能量通过调控损伤区域大小、应变分布及缺陷态密度, 直接影响 LT 的光学响应与结构稳定性。随后, Ma 等<sup>[48]</sup>进一步研究了注入离子的种类和共注顺序对 LT 单晶层裂以及晶格损伤的影响。研究表明, 单一  $\text{H}^+$  注入导致晶格中出现梯度分布的应变和点缺陷簇, 但难以有效引发层裂。而单一  $\text{He}^+$  注入容易形成纳米气泡, 造成高度局域化的应变集中, 虽有利于层裂, 但易引发表面微裂纹, 从而限制其实际应用。在共注实验中, 注入顺序显著影响晶圆的损伤机制。若先注入  $\text{He}^+$ , 其形成的 He 气泡可作为高效陷阱捕获后续注入的  $\text{H}^+$ , 产生的协同效应可显著增强局域应变并促进微裂纹形成, 从而在较低剂量(如  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ )下即可实现剥离。反之, 若先注入  $\text{H}^+$ , 则后续注入  $\text{He}^+$  引起的热效应会促使缺陷重新分布和 H 扩散, 导致应变释放与缺陷重组, 抑制层裂。研究表明, 通过调控注入离子种类、顺序及剂量, 可有效控制 LT 晶格的应变与损伤行为, 为优化 CIS 技术提供了重要依据。

作为制备 LT 单晶薄膜的核心工艺, CIS 凭借其

卓越的异质集成能力和优异的膜厚控制精度, 为高性能光子芯片和微系统提供了理想的材料平台<sup>[16]</sup>。该技术能够高效集成 LT 薄膜(厚度可达 0.2~1  $\mu\text{m}$ )与硅基衬底, 形成“硅/二氧化硅/钽酸锂”异质结构, 不仅保持单晶质量和极低表面损伤, 还实现了与半导体工艺的兼容性<sup>[49-51]</sup>。尽管 CIS 技术在加工精度和器件性能方面取得了显著成就, 但由于存在离子注入损伤难以完全修复、对键合界面质量要求高以及设备成本较高等局限, 目前该技术仍主要处于实验室研究阶段。

## 2 钽酸锂单晶薄膜在热释电探测器中的应用

热释电效应是指某些极性电介质晶体在外界温度发生变化时, 自发极化强度改变, 进而在材料表面产生瞬时电荷的物理现象, 其工作原理如图 3 所示<sup>[52-54]</sup>。热释电材料本身具有自发极化, 内部电偶极子在居里温度以下沿极轴自发有序排列。将电极制备在热释电材料两侧以构成电容器结构时, 由于静电感应, 两侧电极会产生等量且极性相反的电荷。当温度上升时( $dT/dt > 0$ , 其中  $T$  和  $t$  分别代表温度和时间), 热释电材料自发极化强度减弱, 感生电荷减少, 进而引发外电路中电子迁移并形成电流。当温度稳定时( $dT/dt = 0$ ), 自发极化引起的内部电场与外界感应电场达到平衡, 此时外电路无电流。当温度下降时( $dT/dt < 0$ ), 材料自发极化强度增强, 感生电荷增加, 再次打破静电平衡, 形成反向电流<sup>[4, 52]</sup>。该电流与温度变化率( $dT/dt$ )成正比, 而非与绝对

温度成正比。因此, 热释电器件对变化的热辐射特别敏感, 适用于探测动态热信号。

在热释电红外探测器中, 敏感单元中热释电材料的厚度是影响探测器性能的关键因素。理论研究表明, 探测器的电压响应率( $R_V$ )和比探测率( $D^*$ )均与热释电材料的厚度成反比<sup>[55]</sup>。此外, 热释电材料厚度还影响探测器的信噪比, 因此采用特定厚度的薄热释电材料可以实现器件的高信噪比<sup>[56]</sup>。传统块体热释电材料虽灵敏度较高, 但由于其热容较大和热响应速率缓慢, 且与现代微电子工艺兼容性差, 严重限制了其在快速响应与集成系统中的应用。近年来, 通过机械减薄和 CIS 制备的 LT 单晶薄膜, 在保持高热电系数的同时展现出优异的热学性能与集成特性, 为研制大规模、高性能热释电探测器阵列提供了关键材料基础<sup>[13, 57]</sup>。

### 2.1 钽酸锂单晶减薄对探测器性能的影响

LT 单晶的厚度是调控探测器性能的关键参数, 研究表明, 随着 LT 单晶厚度的减小, 器件的  $D^*$  与响应速度普遍提升。Kane 等<sup>[29]</sup>基于 500  $\mu\text{m}$  LT 单晶制备的热释电探测器, 在 17.3 keV 的 X 射线辐射及 10 Hz 的调制频率下, 表现出优异的探测特性:  $R_V = 1.80 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ , 噪声等效功率(Noise equivalence power, NEP) =  $5.02 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,  $D^* = 9.97 \times 10^6 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。该探测器性能与常规闪烁体探测器相当, 并展现出良好的响应线性度和频率稳定性, 适用于强辐射环境下的高效 X 射线探测。Zhang 等<sup>[58]</sup>基于 75  $\mu\text{m}$  LT 单晶制备的超材料吸收体集成探测器, 在 5.3 Hz 下最大  $R_V$  为  $2.2 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ , 显著优于基于 500  $\mu\text{m}$  LT 单晶制备的探测器。随后, Zeng 等<sup>[59]</sup>通过表面活化键合和机械旋转研磨工艺, 成功实现 4 英寸 Z 切 LT 单晶与硅基衬底键合, 并将 LT 进一步减薄至 12  $\mu\text{m}$ 。基于该结构的探测器在 12.3 Hz 下的  $R_V$  高达  $1.54 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ , 在 53.8 Hz 下的  $D^*$  可达  $8.34 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。采用离子切片等先进工艺可将 LT 单晶加工至亚微米级别, 这对减小线性传感器阵列中相邻敏感元件的间距, 提升红外探测器的响应性能具有重要意义。Stenger 等<sup>[15]</sup>利用 CIS 制备了 9  $\mu\text{m}$  LT 薄膜, 并将其封装于标准晶体管外形(TO)管壳中, 制成中心孔径为 5 mm 的热释电探测器, 其在室温下的  $R_V$  和  $D^*$  分别是基于 50  $\mu\text{m}$  LT 薄膜器件的 6 倍和 3 倍。Luo 等<sup>[41]</sup>通过  $\text{H}^+$  注入与  $\text{SiO}_2$  亲水键合相结合的 CIS 技术, 成功制备出 770 nm 的 LT 单晶薄膜, 其  $p$  高达  $2 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。基于该薄膜的探测器在 300 Hz 调制频率下  $D^*$  最高达到  $2.49 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ,

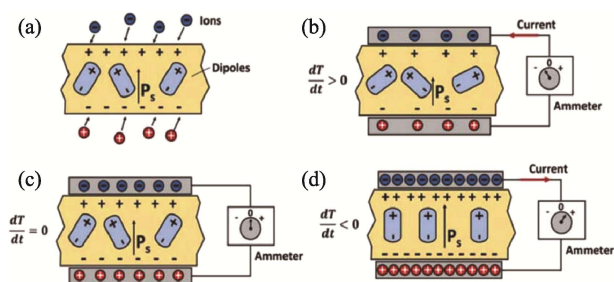


图 3 热释电效应的工作机理图<sup>[52]</sup>

Fig. 3 Working mechanism diagrams of pyroelectric effect<sup>[52]</sup>  
(a) Spontaneous polarization of pyroelectric materials induced by internal electric dipoles; (b) Decreased spontaneous polarization with  $dT/dt > 0$  which drives the migration of electrons in the external circuit; (c) Internal electric field with  $dT/dt = 0$  caused by spontaneous polarization in pyroelectric material and the induced external electric field in two electrodes, reaching equilibrium; (d)  $dT/dt < 0$ , enhancing the spontaneous polarization and breaking the electrical balance again, and then causing reverse electrons migration

表 3 基于不同厚度  $\text{LiTaO}_3$  单晶的探测器性能<sup>[15, 29, 41, 58-59]</sup>

Table 3 Performance of detectors based on  $\text{LiTaO}_3$  single crystals with different thicknesses<sup>[15, 29, 41, 58-59]</sup>

| Thickness/ $\mu\text{m}$ | $R_V/(\text{V}\cdot\text{W}^{-1})$ | $D^*/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$ | $\text{NEP}/(\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1/2})$ | Operating frequency/Hz | Ref. |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|------|
| 500                      | $1.80\times 10^3$                  | $9.97\times 10^6$                                       | $5.02\times 10^{-8}$                         | 10                     | [29] |
|                          | $3.33\times 10^2$                  | $9.92\times 10^6$                                       | $5.01\times 10^{-8}$                         | 70                     |      |
| 75                       | $2.2\times 10^3$                   | $2.3\times 10^7$                                        | /                                            | 5.3                    | [58] |
|                          | $1.12\times 10^3$                  | $3.2\times 10^7$                                        | /                                            | 26.3                   |      |
| 12                       | $1.54\times 10^4$                  | $3.8\times 10^7$                                        | /                                            | 12.3                   | [59] |
|                          | $1.02\times 10^4$                  | $8.34\times 10^7$                                       | /                                            | 53.8                   |      |
| 9                        | $8\times 10^5$                     | $2\times 10^9$                                          | /                                            | /                      | [15] |
| 0.770                    | $2.9\times 10^3$                   | $2.8\times 10^7$                                        | /                                            | 10                     | [41] |
|                          | $6.3\times 10^3$                   | $2.49\times 10^8$                                       | /                                            | 200                    |      |

在高于 100 Hz 的频率范围内  $R_V$  可达  $6000\text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$ , 表明  $\text{SiO}_2$  热隔离层可有效增强器件的高频响应与综合热释电性能。表 3 对比了基于不同厚度 LT 单晶制备的探测器的性能参数<sup>[15, 29, 41, 58-59]</sup>。如表 3 所示, 随着单晶厚度的减小, 器件的  $R_V$  与  $D^*$  先显著提升而后下降。初期性能改善主要源于减薄工艺有效降低了热敏元的热容与导热性, 从而优化了器件的热学时间常数。这表明减小单晶厚度是提升 LT 热释电器件综合性能的有效途径。然而, 对于厚度为  $0.770\text{ }\mu\text{m}$  的单晶器件, 其性能出现下降, 可能与减薄过程中引入的晶格损伤有关。

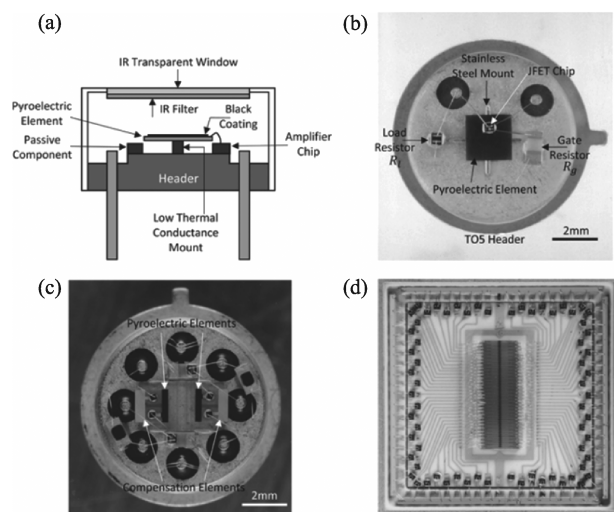
减薄作为降低 LT 厚度的主要途径, 其中材料处理工艺极为重要, 直接影响热释电器件的最终性能。若工艺控制不当, 可能引入晶格损伤与表面缺陷, 导致介电损耗和噪声增加, 从而制约探测率的提升。Liang 等<sup>[55]</sup>研究发现, 对 CMP 减薄后的  $50\text{ }\mu\text{m}$  LT 单晶进行表面抛光处理, 能够有效优化其表面缺陷, 使  $p$  从  $187\text{ }\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  显著提升至  $203\text{ }\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , 这表明表面平滑处理是改善晶体质量与提升热电响应性能的有效途径。在更薄尺度的器件制备中, 异质集成材料间的热失配成为关键挑战, 其引发的晶格畸变与热应力累积, 不仅会显著降低信号读出效率, 更可能导致晶圆开裂, 直接影响器件的良率与可靠性。Zeng 等<sup>[59]</sup>采用表面活化键合技术, 成功解决了热失配问题, 为实现硅基读出电路的单片集成开辟了途径。然而, 当厚度下降到亚微米尺度时, 加工引入的缺陷问题更为突出。Schossig 等<sup>[33]</sup>采用离子束铣削与 CMP 工艺制备了最小厚度为  $400\text{ nm}$  的自支撑 LT 薄膜, 虽然获得了  $17.9\text{ nC}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  的  $p$ , 但表面缺陷导致薄膜的介电损耗随厚度减小而显著增加, 从而使探测优值逐渐下降。

总体而言, 通过适当的材料处理与晶圆减薄工艺, 能够有效提升 LT 单晶热释电器件的热学与电学性能。尽管面临晶圆薄化导致介电损耗增加等挑战, 但通过精确的结构控制与界面工程, 可以精准调控 LT 单晶厚度与应力状态, 从而优化器件的响应速度、探测率与稳定性。这也使得 LT 单晶薄膜在高频响应与小型化集成方面展现出接近理论极限的性能潜力, 为制备下一代高性能热释电器件奠定了坚实基础。

2.2 基于钽酸锂单晶的热释电探测器结构

热释电探测器作为一种高效的红外传感装置, 其系统架构通常由滤光片、热释电敏感单元与处理电路三大核心部分组成<sup>[60-61]</sup>。滤光片多采用玻璃、塑料或硅片等材料, 能够选择性透过特定波段红外辐射, 从而提取目标信号特征, 并显著增强器件的抗干扰能力。热释电敏感单元作为探测核心, 主要由多层复合结构构成, 主要包括红外吸收层、热释电功能材料层与衬底。处理电路则负责对敏感单元输出的微弱电信号进行放大与降噪处理, 以提升系统信噪比与信号质量。根据结构形态, 热释电探测器主要可分为单晶探测器、线性阵列与二维阵列等类型<sup>[1]</sup>。在单晶探测器中, 热释电芯片与前置放大器固定于印刷线路板或厚膜基板上, 并封装于配备红外窗口的管壳内, 如图 4(a~c)所示<sup>[1]</sup>。窗口材料根据应用需求可选用窄带滤光片(用于气体分析)、带通滤光片(如  $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$  波段)或宽带窗口(适用于光谱测量与高温探测)<sup>[62-63]</sup>。尽管此类结构简单可靠, 但其性能通常受限于单晶块体材料较大的热容与较长的热传导路径。

为突破单晶探测器的性能瓶颈, 基于 LT 单晶薄膜的阵列化器件结构应运而生。该类器件通过离子切片、智能剥离等先进工艺, 将减薄后的 LT 单晶

图 4 不同类型的热释电探测器结构<sup>[1]</sup>Fig. 4 Different types of pyroelectric detector structures<sup>[1]</sup>

(a) Schematic diagram of a single-element pyroelectric detector; (b) Image of a pyroelectric detector using a 2 mm×2 mm LT element; (c) Pyroelectric detector consisting of two compensated active elements and sensitive element; (d) Linear array using LT element and compensation element

键合至硅或蓝宝石等衬底上, 形成“LT 单晶薄膜/功能键合层/载体衬底”多层异质结构。该结构有效提升了器件的热学性能, 薄膜结构显著降低了热容, 配合衬底与键合层的热隔离设计, 使器件响应速度提升至毫秒乃至亚毫秒级, 同时探测率大幅提高。此外, 这种集成能力的突破为与硅基读出电路的单片集成及焦平面阵列化奠定了基础。对于空间分辨率要求较低的应用场景, 目前已开发出基于读出电路的二维阵列探测器(图 4(d))<sup>[1, 56]</sup>。线性阵列作为混合集成组件, 通过倒装焊或凸点键合将 LT 热释电芯片与硅基读出电路互连, 规模可达 128×128 像元<sup>[64]</sup>。像元间刻蚀的热隔离沟槽能有效抑制热串扰, 使器件在热成像与光谱分析中具备高空间分辨率、低噪声和优异的响应均匀性。二维阵列则进一步发展了混合集成与微加工技术, 为智能红外系统等应用提供高空间分辨率与系统级集成能力<sup>[65]</sup>。

综上所述, 从传统块体单晶探测器转向基于 LT 薄膜的二维阵列, 是热释电器件从传统、分立、通用型向高性能、集成化、专用型发展的必然路径。薄膜结构通过减薄敏感层并引入异质衬底, 从根本上优化了器件性能, 从而大幅提升了响应速度和探测率, 为下一代高性能红外成像以及太赫兹探测等前沿领域奠定了坚实基础。

### 2.3 基于钽酸锂单晶薄膜的热释电探测器应用

在热释电探测器的应用中, LT 单晶的厚度是调

控其性能的关键参数之一, 厚度的选择高度依赖于具体应用场景的性能需求与工艺可行性<sup>[66]</sup>。随着薄膜厚度的减小, 器件响应速度显著提升, 使得基于 LT 单晶的探测器不再局限于人体感应、火焰探测等对响应速度要求较低的传统场景, 而是进一步拓展至太赫兹探测等对响应速度与灵敏度要求更高的前沿应用。

Wang 等<sup>[67]</sup>基于厚度为 2 μm 的 LT 薄膜制备了用于太赫兹探测的热释电探测器, 较薄的 LT 有效提升了器件的响应时间, 所制备的探测器在 30 Hz 的工作频率下可实现  $6.8 \times 10^{-9}$  W 的低噪声等效功率, 如图 5(a~f)所示。随后, Sharma 等<sup>[68]</sup>将 LT 单晶减薄至 6 μm, 也成功制备了可实现太赫兹探测的热释电探测器。用于表征探测器响应的实验装置由太赫兹源、控制脉冲能量的线栅偏振器、抛物面镜、非平衡干涉仪、聚焦镜和探测器组成(图 5(g))。如图 5(h)所示, 该探测器在 1 μJ 脉冲能量(25 μJ/cm<sup>2</sup> 能量通量)范围内的响应呈现出良好的线性度, 为其在太赫兹应用中的可靠性奠定了基础。在气体检测领域, 例如 Mitmit 等<sup>[69]</sup>采用约 60 μm 的传统厚度 LT 晶片, 在保证足够机械强度与易于加工的同时, 获得稳定的热释电响应, 实现与光学滤波器的有效集成,  $D^*$  可达  $4.7 \times 10^5$  cm·Hz<sup>1/2</sup>·W<sup>-1</sup>, 足以满足对  $1700 \times 10^{-6}$  乙醇蒸气的室温检测需求。Fan 等<sup>[70]</sup>通过离子切片等技术将 LT 减薄至 35 μm, 不仅大幅降低了热容和提升了响应速度, 更使其能够作为超材料结构的介质层实现单片集成, 进而在 W 波段(75~110 GHz)实现 75%以上的吸收率与  $3.90$  V·W<sup>-1</sup> 的电压响应度, 在高频、小型化探测器方面展现出独特优势。因此, LT 单晶的厚度优化是实现其从传统气体传感向高频、高灵敏度探测及集成化系统拓展的重要材料基础。

综上所述, LT 单晶的减薄工艺是实现器件性能跨越式提升的核心技术路径。通过精确控制晶体厚度, 可以显著改善传统热释电器件的响应速度与灵敏度, 同时推动其应用边界从常规气体检测向太赫兹波、毫米波等高频探测领域拓展。减薄带来的热容降低与热响应加速是提升器件综合性能的根本原因, 而 LT 薄膜与超材料结构的成功集成, 则为其在高性能、小型化探测系统中的广泛应用奠定了坚实基础。因此, 厚度优化不仅是材料工程的关键环节, 更是连接基础材料特性与高端器件功能的重要桥梁。

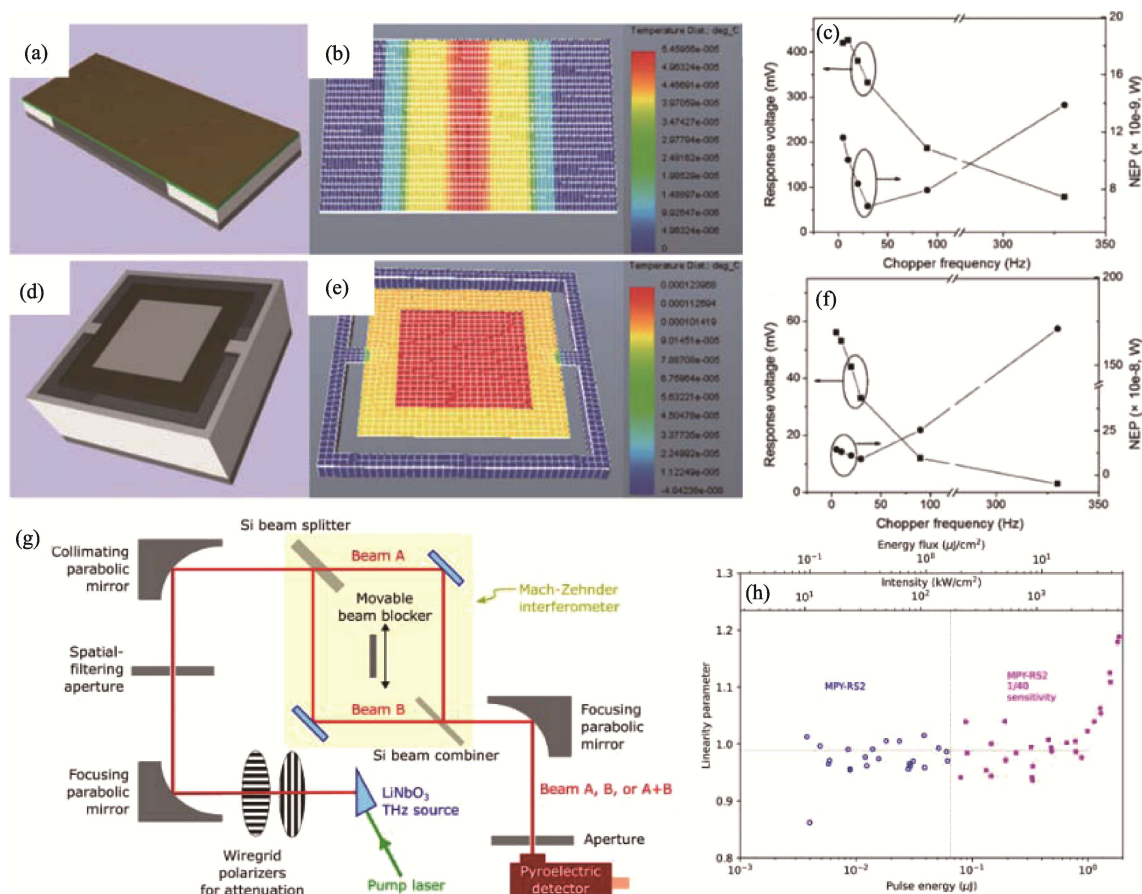


图 5 基于 LT 单晶的热释电探测器应用<sup>[67-68]</sup>

Fig. 5 Application of pyroelectric detector based on LT single crystal<sup>[67-68]</sup>

(a-c) Device based on LT crystal slice<sup>[67]</sup>: (a) three dimension device structures, (b) simulation result of the temperature changing, and (c) response voltage and NEP parameters at different chopper frequencies; (d-f) Device based on LT thin film<sup>[67]</sup>: (d) three dimension device structures, (e) simulation result of the temperature changing, and (f) response voltage and NEP parameters at different chopper frequencies; (g) Schematic of the experimental setup<sup>[68]</sup>; (h) Linear response of detector under terahertz high-energy pulses (the empty blue circle and red square represent the test results of standard detector and sensitivity-reduced detector, respectively)<sup>[68]</sup>

### 3 结论与展望

LT 单晶因其优异的热释电系数、高居里温度、卓越的机械与化学稳定性及成熟的晶圆制备工艺, 已成为高性能热释电红外探测器的核心材料, 在工业测温、气体检测及安防传感等领域占据主导地位, 尤其是在宽光谱响应与高可靠性方面表现突出。目前, 基于 LT 的热释电探测器单元与线列探测器技术已趋于成熟, 其优异性能和长期稳定性也获得了广泛验证。然而, 为满足更高性能的应用需求, 现有器件仍需在大规模减薄(提升响应度)、抑制热扩散(降低串扰)以及大规模阵列集成等方面取得突破。

未来 LT 热释电探测器的发展可聚焦于材料、工艺与集成三方面的协同创新, 核心在于对 LT 单晶材料性能的深度挖掘与功能拓展。首先, 应着力于 LT 单晶的本征性能优化, 通过精确的组分设计、

掺杂以及生长工艺革新, 进一步平衡并提升热释电系数、降低介电常数与损耗, 从源头实现更高的探测优值。在工艺层面, 开发低损伤、高精度的晶圆减薄技术, 结合 MEMS 加工工艺, 实现超薄自支撑敏感元结构的大规模阵列化集成, 从而提升器件的比探测率、响应速度与空间分辨率。其次, 推动 LT 单晶薄膜与硅基 MEMS 平台的异质集成, 是实现高分辨率、低噪声红外焦平面阵列的核心方向, 有望克服块体材料在响应速度、集成密度与阵列规模化方面的限制, 为发展高性能、低成本非制冷红外成像与传感技术奠定基础。此外, 面向光谱选择性探测需求, 可在 MEMS 阵列单元上集成超表面、等离子激元结构等新型吸收层, 突破传统黑体吸收的效率限制, 实现探测器的高精度探测。同时, 积极探索 LT 与二维材料、相变材料等新兴功能材料的异质融合, 构建具备热释电-压电耦合、非线性光学-热释电等多功能特性的集成系统, 推动其在人工智能能传

感、量子传感等前沿领域的应用。通过 MEMS 技术与多学科工艺的交叉融合, LT 基热释电器件有望在下一代智能微阵列探测、高分辨率光谱成像和太空探测等新一代系统中发挥关键作用。

## 参考文献:

- [1] WHATMORE R W, WARD S J. Pyroelectric infrared detectors and materials—a critical perspective. *Journal of Applied Physics*, 2023, **133**(8): 080902.
- [2] SI J S, XIAO X F, ZHANG Y, *et al.* Pyroelectric properties and applications of lithium tantalate crystals. *Crystals*, 2024, **14**(7): 579.
- [3] XIAO X F, XU Q Y, LIANG S J, *et al.* Preparation and defect structure analysis of near-stoichiometric lithium tantalate wafers. *RSC Advances*, 2022, **12**(30): 19091.
- [4] MONDAL R, HASAN M A M, BAIK J M, *et al.* Advanced pyroelectric materials for energy harvesting and sensing applications. *Materials Today*, 2023, **66**: 273.
- [5] LIU Z, LU T, DONG X L, *et al.* Ferroelectric ceramics for pyroelectric detection applications: a review. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, **68**(2): 242.
- [6] ROUNDY C B, BYER R L. Sensitive LiTaO<sub>3</sub> pyroelectric detector. *Journal of Applied Physics*, 1973, **44**(2): 929.
- [7] ZHU Y X, WAN Q. Lithium niobate/lithium tantalate single-crystal thin films for post-Moore era chip applications. *Moore and More*, 2024, **1**(1): 6.
- [8] XIAO X F, LIANG S J, SI J S, *et al.* Performance of LiTaO<sub>3</sub> crystals and thin films and their application. *Crystals*, 2023, **13**(8): 1233.
- [9] PARK S H, PARK C S, KANG K M, *et al.* Highly stable all-sputtered solid-state electrochromic devices with co-sputtered LiTaO<sub>3</sub> electrolyte films for smart windows. *Advanced Materials Technologies*, 2025, **10**(20): e00286.
- [10] ZHANG R T, JIN Y H, LI Y M, *et al.* Bi<sup>3+</sup>/Sm<sup>3+</sup> co-doped LiTaO<sub>3</sub> photochromic perovskites: an ultrafast erasable optical information storage medium. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2023, **10**(16): 4869.
- [11] 张德银, 黄大贵, 李金华, 等. ITO 衬底上 LiTaO<sub>3</sub> 薄膜的制备与介电特性. 红外与毫米波学报, 2007, **26**(3): 170.
- [12] FAN W, SHUAI Y, PAN X Q, *et al.* Influence of annealing ambience on structural and piezoelectric properties of single crystal LiTaO<sub>3</sub> thin film. *Materials Express*, 2023, **13**(2): 345.
- [13] SHEN J Y, YAO W F, WORKIE T B, *et al.* Suppressed transverse mode generation in TF-SAW resonators based on LiTaO<sub>3</sub>/sapphire. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, **45**(11): 2241.
- [14] LOUISET A, SCHAMM-CHARDON S, KONONCHUK O, *et al.* Reconstruction of depth resolved strain tensor in off-axis single crystals: application to H<sup>+</sup> ions implanted LiTaO<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 2021, **118**(8): 082903.
- [15] STENGER V, SHNIDER M, SRIRAM S, *et al.* Thin film lithium tantalate (TFLT) pyroelectric detectors. *Terahertz Technology and Applications V*, San Francisco, 2012: 174–182.
- [16] YU J Y, RUAN Z L, XUE Y, *et al.* Tunable and stable micro-ring resonator based on thin-film lithium tantalate. *APL Photonics*, 2024, **9**(3): 036115.
- [17] XIAO X F, SI J S, LIANG S J, *et al.* Preparation, properties, and applications of near stoichiometric lithium tantalate crystals. *Crystals*, 2023, **13**(7): 1031.
- [18] WANG C L, LI Z H, RIEMENSBERGER J, *et al.* Lithium tantalate photonic integrated circuits for volume manufacturing. *Nature*, 2024, **629**(8013): 784.
- [19] HE Y W, WONG Y P, LIANG Q, *et al.* Double busbar structure for transverse energy leakage and resonance suppression in surface acoustic wave resonators using 42°YX-lithium tantalate thin plate. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, **69**(3): 1112.
- [20] WANG C L, FANG D Y, ZHANG J Y, *et al.* Ultrabroadband thin-film lithium tantalate modulator for high-speed communications. *Optica*, 2024, **11**(12): 1614.
- [21] GORISSE M, DROUIN A, SINQUIN Y, *et al.* Oriented single-crystal LiTaO<sub>3</sub> thin film on silicon for high performances SAW components. 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 2018: 1–4.
- [22] JIA Y C, WANG L, CHEN F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: recent advances and perspectives. *Applied Physics Reviews*, 2021, **8**: 011307.
- [23] WU Z L, WU S X, QIAN H Y, *et al.* Comparative study of SH-mode surface acoustic wave resonators on lithium tantalate with silicon and silicon carbide substrates. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, **71**(11): 7022.
- [24] WANG H H, CUI A, CHEN B, *et al.* Thin-film lithium tantalate modulator operating at high optical power. *ACS Photonics*, 2025, **12**(10): 5345.
- [25] FANG M H, XIE Y N, XUE F Q, *et al.* Optical colorimetric LiTaO<sub>3</sub> wafers for high-precision lithography on frequency control of SAW devices. *Photonics Research*, 2024, **12**(2): 341.
- [26] HANG W, WEI L Q, DEBELA T T, *et al.* Crystallographic orientation effect on the polishing behavior of LiTaO<sub>3</sub> single crystal and its correlation with strain rate sensitivity. *Ceramics International*, 2022, **48**(6): 7766.
- [27] WANG M, WU R B, LIN J T, *et al.* Chemo-mechanical polish lithography: a pathway to low loss large-scale photonic integration on lithium niobate on insulator. *Quantum Engineering*, 2019, **1**(1): e9.
- [28] GENG W P, YANG X Y, XUE G, *et al.* Integration technology for wafer-level LiNbO<sub>3</sub> single-crystal thin film on silicon by polyimide adhesive bonding and chemical mechanical polishing. *Nanomaterials*, 2021, **11**(10): 2554.
- [29] KANE S R, WHATMORE R W, SINGH M N, *et al.* Characterizing pyroelectric detectors for quantitative synchrotron radiation measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, **387**: 116406.
- [30] PRAFUL P, BAILEY C. Warpage in wafer-level packaging: a review of causes, modelling, and mitigation strategies. *Frontiers in Electronics*, 2025, **5**: 1515860.
- [31] 刘宾, 苗卫朋, 杨威, 等. 钽酸锂晶圆减薄用超细金刚石陶瓷砂轮的制备与表征. 超硬材料工程, 2025, **37**(2): 1.
- [32] LIANG Z Q, LI S B, LIU Z J, *et al.* High responsivity of pyroelectric infrared detector based on ultra-thin (10 μm) LiTaO<sub>3</sub>. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, **26**: 5400.
- [33] SCHOSSIG M, NORKUS V, GERLACH G. Dielectric and pyroelectric properties of ultrathin, monocrystalline lithium tantalate. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **63**: 35.
- [34] ZHANG J. High precision wafer thinning using ultra-low-TTV glass carrier and novel temporary bonding. 2023 IEEE 25th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2023: 580–583.
- [35] ZHU Y X, YU Z K, WAN Q. Large-size functional wafer temporary bonding and thinning. *Journal of Inorganic Materials*, 2025, **40**(12): 1443.
- [36] BRUEL M. Silicon on insulator material technology. *Electronics*

- Letters*, 1995, **31**(14): 1201.
- [37] BRUEL M. Application of hydrogen ion beams to silicon on insulator material technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1996, **108**(3): 313.
- [38] BRUEL M. The history, physics, and applications of the Smart-Cut® process. *MRS Bulletin*, 1998, **23**(12): 35.
- [39] WAN Q, WANG L W, LIU W L, *et al.* Investigation of H<sup>+</sup> and B<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> implantation in LiTaO<sub>3</sub> single-crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2001, **184**(4): 531.
- [40] MORICEAU H, MAZEN F, BRALEY C, *et al.* Smart Cut™: review on an attractive process for innovative substrate elaboration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2012, **277**: 84.
- [41] LUO J R, LUO W B, ZHANG K S, *et al.* High specific detectivity infrared detector using crystal ion slicing transferred LiTaO<sub>3</sub> single-crystal thin films. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, **300**: 111650.
- [42] TAUZIN A, DECHAMP J, MADEIRA F, *et al.* 3-inch single-crystal LiTaO<sub>3</sub> films onto metallic electrode using Smart Cut™ technology. *Electronics Letters*, 2008, **44**(13): 822.
- [43] LIU W L, ZHAN D, MA X B, *et al.* Fabrication of single-crystalline LiTaO<sub>3</sub> film on silicon substrate using thin film transfer technology. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2008, **26**(1): 206.
- [44] WAN L M, WU C Y, YUAN Y, *et al.* Enhanced surface blistering efficiency of H<sup>+</sup> implanted lithium tantalate by chemical reduction modification. *Applied Surface Science*, 2023, **622**: 156978.
- [45] ZHANG K S, LUO W B, HUANG S T, *et al.* Effects of rapid thermal annealing parameters on crystal ion slicing-fabricated LiTaO<sub>3</sub> thin film. *Applied Physics A*, 2021, **127**(6): 468.
- [46] PANG L L, WANG Z G, SUN J R, *et al.* Evolution of optical absorption and strain in LiTaO<sub>3</sub> crystal implanted by energetic He-ion. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, **354**: 301.
- [47] PANG L L, WANG Z G, JIN Y F, *et al.* The modification of LiTaO<sub>3</sub> crystal by low-energy He-ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2012, **290**: 54.
- [48] MA C D, LU F, XU B, *et al.* Visualized strain profile in the process of crystal ion slicing of LiTaO<sub>3</sub>. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, **49**(20): 205301.
- [49] 陈哲明, 丁雨瞳, 邹少红, 等. 硅基钽酸锂异质晶圆键合工艺研究. *人工晶体学报*, 2024, **53**(4): 634.
- [50] YAN Y Q, HUANG K, ZHOU H Y, *et al.* Wafer-scale fabrication of 42° rotated Y-cut LiTaO<sub>3</sub>-on-insulator (LTOI) substrate for a SAW resonator. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, **1**(8): 1660.
- [51] LI M, XIA X, LI K P, *et al.* High performance SAW resonators using LiTaO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC multilayer substrate. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, **43**(10): 1772.
- [52] ZHANG D, WU H T, BOWEN C R, *et al.* Recent advances in pyroelectric materials and applications. *Small*, 2021, **17**(51): 2103960.
- [53] WHATMORE R W. Pyroelectric devices and materials. *Reports on Progress in Physics*, 1986, **49**(12): 1335.
- [54] LI X Y, LU S G, CHEN X Z, *et al.* Pyroelectric and electrocaloric materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, **1**(1): 23.
- [55] LIANG T, LIN S J, LI Y, *et al.* Research on the effect of mechanical processing on lithium tantalate crystal pyroelectric coefficient. *Advanced Materials Research*, 2013, **834/835/836**: 880.
- [56] NORKUS V. Pyroelectric infrared detectors based on lithium tantalate: state of art and prospects. *Detectors and Associated Signal Processing*, 2004, **5251**: 121.
- [57] SOKOLL T, NORKUS V, GERLACH G. Ion beam etching of lithium tantalate and its application for pyroelectric linear arrays. *Surface and Coatings Technology*, 1997, **97**(1/2/3): 469.
- [58] ZHANG K S, LUO W B, HUANG S T, *et al.* Wavelength-selective infrared detector fabricated by integrating LiTaO<sub>3</sub> with a metamaterial perfect absorber. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, **313**: 112186.
- [59] ZENG X H, LUO W B, ZHANG K S, *et al.* Wafer-scale fabrication of silicon-based LiTaO<sub>3</sub> pyroelectric infrared detectors by bonding and thinning technology. *IEEE Sensors Journal*, 2022, **22**(18): 17721.
- [60] ALEKSANDROVA M, JAGTAP C, KADAM V, *et al.* An overview of microelectronic infrared pyroelectric detector. *Engineered Science*, 2021, **16**: 82.
- [61] TIAN J L. An overview of pyroelectric photodetector: photoresponse mechanisms and applications. *AIP Advances*, 2023, **13**(5): 050701.
- [62] NORKUS V, CHVEDOV D, GERLACH G, *et al.* Performance improvements for pyroelectric infrared detectors. *Infrared Technology and Applications XXXII*, Orlando, 2006, **6206**: 974–984.
- [63] ZHANG W D, TAN Q L, LIU J, *et al.* Two-channel IR gas sensor with two detectors based on LiTaO<sub>3</sub> single-crystal wafer. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(8): 1223.
- [64] NORKUS V, GERLACH G, HOFMANN G. High-resolution pyroelectric linear arrays based on LiTaO<sub>3</sub>. *Infrared Technology and Applications XXVII*, Orlando, 2001, **4369**: 322–331.
- [65] NORKUS V, HOFMANN G, MOEHLING S, *et al.* Pyroelectric IR single-element detectors and arrays based on LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays II*, Orlando, 1992, **1685**: 155–163.
- [66] HOLDEN A J. Applications of pyroelectric materials in array-based detectors. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, **58**(9): 1981.
- [67] WANG J, GOU J, LI W Z. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film. *AIP Advances*, 2014, **4**(2): 027106.
- [68] SHARMA A, GUPTA V, SON J G, *et al.* Linearity of fast and highly sensitive LiTaO<sub>3</sub> pyroelectric detectors in the terahertz range. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2024, **14**(6): 823.
- [69] MITMIT C, GOLDENBERG E, TAN E M M. Infrared wavelength-specific gas sensing with pyroelectricity at room temperature. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, **351**: 114164.
- [70] FAN K B, STENGER V, PADILLA W J. Pyroelectric metamaterial millimeter-wave detector. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(2): 021701.