

ACRT 技术对大尺寸 ZnTe 晶体溶液法制备及其性能影响

孙 晗¹, 李文俊¹, 贾子璇¹, 张 岩², 殷利迎³, 介万奇¹, 徐亚东¹

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 辐射探测材料与器件工信部重点实验室, 西安 710072; 2. 首都师范大学 超材料与器件北京市重点实验室, 北京 100048; 3. 中国电子科技集团公司 第四十六研究所, 天津 300220)

摘 要: 太赫兹(Terahertz, THz)技术在工业无损检测、科学研究和军事领域发挥着越来越重要的作用。作为太赫兹产生和探测最常用的电光晶体材料, ZnTe 晶体在生长中依然面临众多挑战。为了制备大尺寸、均匀性好、高性能的 ZnTe 单晶, 本研究在温度梯度溶液法生长 ZnTe 晶体过程中引入坩埚旋转加速技术, 制备具有高结晶质量的 ZnTe 晶体。模拟计算得到不同坩埚旋转速度下生长界面处对流场和溶质分布, 研究了坩埚旋转对晶体生长过程中的固液界面稳定性和晶体内 Te 夹杂分布的影响规律, 证明坩埚旋转加速技术可以有效地促进熔体流动, 改善溶质传质能力, 稳定溶液法晶体生长的固液界面, 不仅避免出现尾部混合相区, 也减少了 ZnTe 晶体内 Te 夹杂相的数量并减小其尺寸。通过进一步优化坩埚旋转参数, 制备出具有较高结晶质量的大尺寸 ZnTe 晶体($\phi 60$ mm)。同时, 得益于晶体良好的均匀性, 晶体对太赫兹的高响应区域超过 90%, 边缘效应小, 满足太赫兹成像要求。研究表明, 引入坩埚旋转加速技术为制备大尺寸 ZnTe 基电光晶体提供了新的思路。

关 键 词: ZnTe; 坩埚旋转加速技术; 固液界面; 太赫兹探测

中图分类号: TN304 文献标志码: A

Effect of ACRT Technology on the Large Size ZnTe Crystals Grown by Solution Method and Corresponding Terahertz Properties

SUN Han¹, LI Wenjun¹, JIA Zixuan¹, ZHANG Yan², YIN Liying³, JIE Wanqi¹, XU Yadong¹

(1. Key Laboratory of Radiation Detection Materials and Devices (MIIT), State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Beijing Key Lab for Metamaterials and Devices, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. No.46 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China)

Abstract: Terahertz (THz) technology has immersing potential applications in industrial non-destructive testing, scientific research and military engineering. However, as the most commonly used THz emission and detection electro-optical material, the ZnTe single crystal growth still faces great challenges. In order to achieve ZnTe single crystals with large size, good homogeneity and high performance, an accelerated crucible rotation technique (ACRT) was introduced in growing ZnTe crystals by temperature gradient solution growth method (TGSG). Intrinsic ZnTe single crystals with high crystalline quality were successfully prepared. Through the simulation of flow field and solute

收稿日期: 2022-10-25; 收到修改稿日期: 2022-12-05; 网络出版日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(U2032170, 51872228); 陕西省自然科学基金(2020JC-12); 特色学科基础研究项目(G2022WD) National Natural Science Foundation of China (U2032170, 51872228); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JC-12); ND Basic Research Funds (G2022WD)

作者简介: 孙 晗(1996-), 男, 博士研究生. E-mail: sunh@mail.nwpu.edu.cn

SUN Han (1996-), male, PhD candidate. E-mail: sunh@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 徐亚东, 教授. E-mail: xyd220@nwpu.edu.cn

XU Yadong, professor. E-mail: xyd220@nwpu.edu.cn

distribution at different rotation speeds, the influence of ACRT technology on the stability of solid-liquid interface and Te inclusions distribution in crystal growth were investigated. During the crystal growth, the ACRT technology can effectively promote the melt flow, improve the solute mass transfer ability and stabilize the solid-liquid interface, which not only avoids the appearance of mixed phase zone at the crystal tail, but also reduces the number and size of Te inclusions in the crystal. With the further optimizing parameters, a large size ZnTe single crystal with a diameter of 60 mm was prepared. Meanwhile, the high response area of terahertz exceeding 90% faces due to the great uniformity of ZnTe crystal, which meant the edge effect being significantly limited and the ZnTe crystal meeting the commercial imaging requirements. Therefore, introduction of ACRT technology can provide a new strategy for preparation of ZnTe based electro-optical crystals.

Key words: ZnTe; accelerated crucible rotation technique; solid-liquid interface; terahertz detection

近年来,太赫兹(THz, 0.1~10 THz)技术作为一种有力的探测手段被广泛地应用于光谱分析^[1-2]、材料研究^[3-5]、医学成像^[6-7]、无损检测^[8-9]等领域。ZnTe 作为典型的 II-VI 族化合物半导体,具有较高的非线性光学系数,能够与 800 nm 附近的飞秒激光产生良好的相位匹配。因此 ZnTe 单晶体可以在 0.1~3 THz 的宽波段范围辐射和探测太赫兹脉冲,在商业太赫兹系统、强场太赫兹产生^[10-11]、太赫兹成像技术^[7]和单脉冲太赫兹探测^[12]等方面有着广泛的应用前景。ZnTe 晶体质量直接决定了其太赫兹性能,随着太赫兹无损检测和成像技术的发展,亟需获得尺寸大、均匀性好、性能好的 ZnTe 单晶体^[11,13]。

相较于气相法和熔体法,溶液法生长 ZnTe 晶体具有生长速度快、温度较低,得到的 ZnTe 晶体结晶质量更高的优势,其中,温度梯度溶液法(Temperature gradient solution growth method, TGSG)是目前生长 ZnTe 单晶最常用的方法^[14-16]。Uen 等^[17]采用 TGSG 法成功生长了 $\phi 15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的 ZnTe 晶体。Yang 等^[18]在 Zn:Te 摩尔比为 3:7 的条件下,生长出 $\phi 30 \text{ mm}$ 的 ZnTe 单晶体。Jin 等^[19-20]采用 Te 通量法,改变原料 Zn 和 Te 的摩尔比,先后生长出 $\phi 50 \text{ mm}$ 和 $\phi 25 \text{ mm}$ 的 ZnTe 晶体。然而在溶液法生长过程中,生长界面的稳定性较差,导致晶体内部易形成 Te 夹杂相等缺陷。Te 夹杂相会破坏 ZnTe 晶体成分结构的均匀性并引起应力集中,导致位错、孪晶等诱导缺陷的增殖^[13]。尽管 Wang 等^[21]发现微重力环境下生长 ZnTe 可以在一定程度上减少 Te 夹杂含量,但微重力环境下晶体结晶区域小,内部 Te 偏析仍然十分严重。

引入坩埚旋转加速技术(Accelerated crucible rotation technique, ACRT)可以在晶体生长过程中产生强制对流,搅拌液相减小溶质边界层厚度,从而

有效减少成分过冷,获得平直的生长界面^[22-23]。Kusunoki 等^[24]发现在 SiC 单晶的溶液法生长过程中引入 ACRT 技术,可以增强生长界面的碳传输,同时生长表面的优异均质性也抑制了溶液中掺入夹杂物。Zhou 等^[25]通过对 ACRT 技术生长的碲锌镉晶体进行淬火,固化晶体生长过程中的固液界面,发现在较高的旋转速度下,易于获得微观平面界面,生长的晶体 Te 夹杂含量显著降低。Divecha 等^[22]分别采用模拟和实验的方法证明在碲锌镉晶体生长过程中引入 ACRT 技术可以减少夹杂相,提高晶体轴向和径向均匀性。因此,在 TGSG 法生长 ZnTe 单晶体的过程中引入 ACRT 技术,并研究 ACRT 技术对单晶体的生长界面和内部缺陷的影响具有重要意义。

另一方面,目前传统方法生长的 ZnTe 晶体尺寸依然较小,不能满足实际商业需求。ZnTe 晶体生长时的径向温度梯度导致生长界面下凹,容易产生侧壁形核并长大,最终形成多晶,因此,大尺寸 ZnTe 晶体生长依旧困难^[26-27]。在 ZnTe 晶体生长过程中引入 ACRT 技术,使坩埚旋转产生的对流冲刷坩埚内壁,可以在很大程度上减少甚至消除侧壁形核,有助于大尺寸单晶的生长。

本研究在温度梯度溶液法的基础上引入 ACRT 技术生长 ZnTe 单晶。通过对比不同条件下生长的晶体,以及不同坩埚旋转速度下晶体生长过程中熔体内对流场和溶质场的分布,研究 ACRT 技术对 ZnTe 晶体生长界面和内部 Te 夹杂相的影响规律。同时根据实际长晶过程,优化坩埚旋转程序参数,制备高质量、性能优异的大尺寸 ZnTe 晶体。

1 实验方法

本研究选用的生长原料为高纯 Te 单质(99.99999%)和 Zn 单质(99.99999%)。

1.1 晶体生长

为避免晶体和石英坩埚出现粘连, 导致晶体开裂, 需要预先在坩埚内壁镀上均匀致密的碳膜。同时考虑到石英坩埚最大耐受温度, 将初始原料单质 Te 和单质 Zn 按照 $n_{\text{Te}} : n_{\text{Zn}} = 7 : 3$ 的比例装入坩埚中, 根据 Zn-Te 相图, 粉料的固相熔化温度约为 1065 °C。然后将坩埚抽真空至低于 6.5×10^{-5} Pa 后用氢氧焰将封口处熔封。将密封后的坩埚放入摇摆炉中, 在 1080 °C 下摇摆 24 h, 合成 ZnTe 多晶料。随后将坩埚放入自行搭建的五段式晶体生长炉进行晶体生长。在晶体生长过程中, 首先将坩埚移动至炉体上部 1080 °C 的过热区保温 24 h, 使多晶料充分熔化以消除异质形核; 然后坩埚以低于 1 mm/h 的速度下降, 进行晶体生长, 设置坩埚旋转速度为 30 r/min, 具体参数如图 1 所示。炉内的温度梯度为 7~10 °C/cm, 生长结束后所有炉段同时降温, 降温速率为 5 °C/h, 当温度降到 400 °C 时断电进行炉冷。

1.2 晶体处理

取出生长完成的 ZnTe 晶锭, 使用 Siber Hegner 公司的 TS-23 型内圆切割机将晶锭定向切割成为厚度 2 mm、表面为(110)晶面的晶圆。为了进一步性能表征, 将晶圆切割成尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm 的晶片, 并利用机械和化学抛光去除切割造成的损伤层, 随后放置于真空干燥箱中备用。

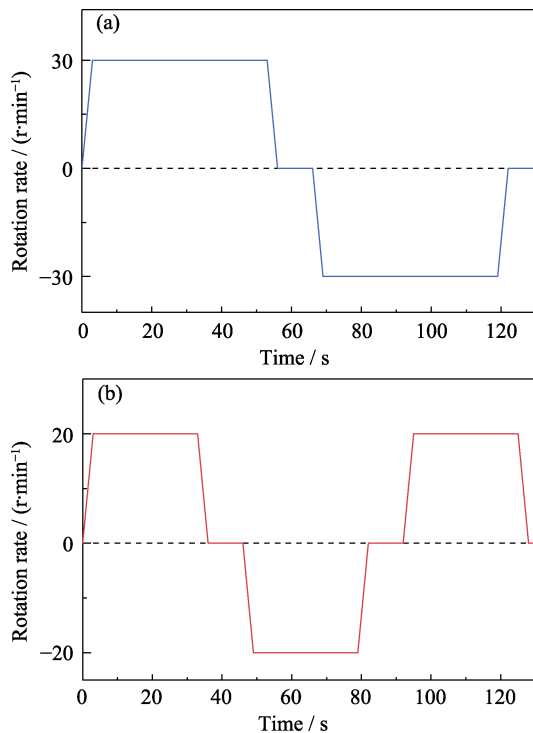


图 1 晶体生长采用的 ACRT 参数
Fig. 1 ACRT parameters of ZnTe crystal growth
(a) $\phi 30$ mm; (b) $\phi 60$ mm

1.3 性能测试

采用自行搭建的红外透过显微镜 (Infrared transmission microscope, IRTM) 观察晶体中的 Te 夹杂相尺寸与分布, 分辨率可达 1 μm ; 将整个系统等价为 ZnTe-Te 溶液体系, 通过 CATS2D 模拟软件对 1334 K 下晶体生长过程中固液界面附近的熔体流场和溶剂分布进行模拟计算。其中, 设置坩埚内温度梯度为 10 K, 坩埚旋转速度分别设置为 0、15 和 30 r/min; 采用太赫兹时域光谱 (Terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 系统测试 ZnTe 晶片的太赫兹探测光谱, 结合扫描近场探测技术的太赫兹焦平面成像系统测试晶体的太赫兹成像能力。

2 结果与讨论

2.1 ACRT 对晶体生长界面的影响

图 2 对比了采用 ACRT 技术前后生长的两根 $\phi 30$ mm 的本征 ZnTe 晶锭, 其中图 2(a, b) 所示的晶体在生长过程中坩埚未进行旋转, 图 2(c, d) 所示的晶体生长时坩埚按照设定的程序进行双向旋转。可以看到, 未旋转的晶体尾部的界面产生了明显的凹陷, 晶体内部出现明显的黑色混合相, 同时晶体表面出现了大量的裂纹; 对坩埚进行双向旋转后, 晶锭的单晶区和富 Te 相之间存在一条清晰、平直的生长界面, 单晶内部并未出现深色的混合相, 晶锭无宏观裂纹。这表明 ACRT 技术可以有效维持平稳的 ZnTe 单晶生长界面。

进一步通过红外透过成像对两种典型晶体中的

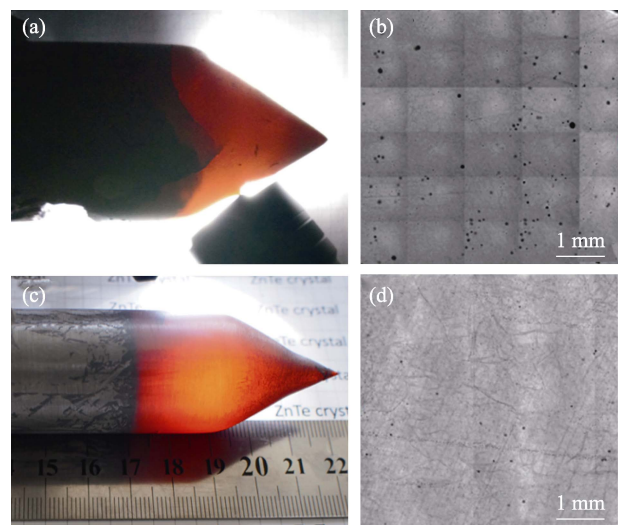


图 2 生长出的 ZnTe 晶锭的照片和晶片红外透过成像照片
Fig. 2 As-grown ingots and its infrared transmission imaging
(a, b) Without rotation; (c, d) Bidirectional rotation

Te 夹杂相的形貌和分布进行分析, 结果如图 2(b, d) 所示。结合统计数据发现, 采用 ACRT 技术生长的 ZnTe 单晶中的 Te 夹杂相尺寸较小, 面密度为 $2.59 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$, 相较于未旋转的 ZnTe 晶锭 ($2.71 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$), 面密度降低了一个数量级, 表明 ACRT 技术有效减少了 Te 夹杂相的形成。

晶体生长过程中, 石英坩埚的传热能力更强, 晶锭中心的结晶潜热相较于边缘部位更难散失, 最终形成凹陷的固液界面^[28-29]。图 3 展示了晶体生长过程中不同的坩埚旋转速度下溶液内部流场和浓度场的分布示意图。从图 3(a) 可以看到未采用坩埚旋转时, 虽然固液界面上方存在较强的 Ekman 流, 然而熔体对流主要集中在生长界面边缘, 坩埚中心部分传质依然以扩散为主。因此随着晶体生长, 溶质逐渐被消耗但是得不到有效补充, 由于分凝作用排出的 Te 在生长界面前不断积累, 形成明显的浓度梯度, 如图 4(a) 所示。这导致在实际生长过程中, 溶液温度偏低, 实际温度分布如图 4(b) 中的曲线 B 所示。此时, 生长界面前出现了实际温度低于溶液饱和温

度的情况, 即发生了组分过冷, 这与理论模型计算得到结果一致^[29-30]。这时, 生长界面非常不稳定, 可能会出现胞状界面或枝晶界面, 因此在生长的过程中不仅会在晶体内裹入大量的 Te 夹杂, 还会导致晶体内部出现严重的成分不均匀。

采用 ACRT 技术后, 如图 3(b) 所示, 在旋转速度为 15 r/min 时, 固液界面附近出现了顺时针旋转的新 Ekman 流, 同时原 Ekman 流上移。新 Ekman 流更靠近界面中心, 一定程度改善了溶质富集的情况, 但是由于对流较弱, 对溶液的混合作用有限。进一步增加坩埚旋转速度至 30 r/min, 熔体内流场如图 3(c) 所示, 新产生的 Ekman 流旋转方向不变, 强度提升, 不仅扩展至整个固液界面, 还在熔体中部与上方的螺旋剪切流发生混合。原 Ekman 流进一步上移, 提高了熔体整体的对流。熔体内产生的强制对流有效促进了溶液内传质, Te 浓度梯度减小, 溶液结晶温度提高, 溶液实际温度分布如图 4(b) 中曲线 A 所示, 即在生长界面前溶液的温度始终高于其饱和温度, 避免产生组分过冷, 生长界面始终

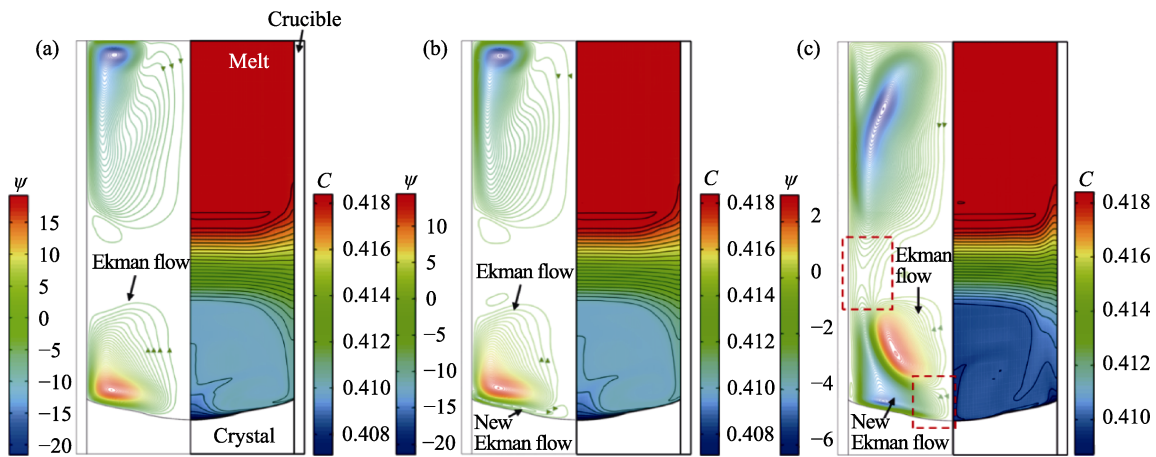


图 3 不同坩埚旋转速度下溶液内部流场和浓度场分布

Fig. 3 Distributions of flow and concentration fields at different rotational speeds of crucibles
(a) Without rotation; (b) Rotation at speed of 15 r/min; (c) Rotation at speed of 30 r/min
Colorful figure is available on website

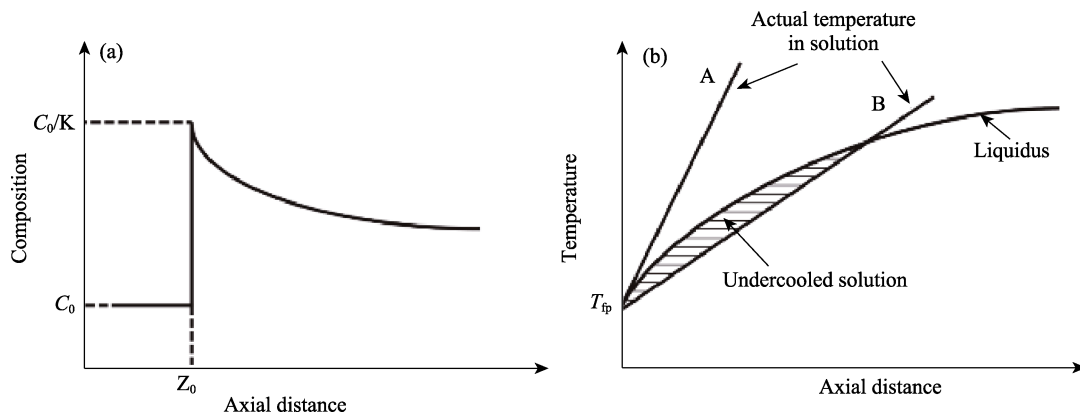


图 4 TGSG 法生长 ZnTe 晶体时坩埚中心线上的传输现象^[30]

Fig. 4 Transport phenomena along the crucible centerline during the growth of ZnTe crystal by TGSG^[30]
(a) Distribution of Te; (b) Distribution of the saturation and actual temperatures of the solution

处于稳定状态。较为稳定平直的生长界面大大减少了 Te 夹杂的形成, 最终获得高质量的 ZnTe 单晶体。

2.2 ACRT 技术生长大尺寸 ZnTe 晶体探索

大尺寸 ZnTe 晶体在生长过程中, 溶液内溶质的传输更加困难, Te 的累积现象严重, 生长界面更加难以控制, 最终导致生长的晶体单晶率低、质量差, 需要在长晶过程中进一步提高溶质的传输能力。然而实际生长过程中, $\phi 60$ mm 的坩埚装料后质量较大, 在较高的旋转速度下会产生较大的离心力, 使坩埚与炉膛内壁发生碰撞, 最终导致晶体生长无法进行。针对这个问题, 结合实际晶体生长情况, 对 ACRT 技术的参数进行了优化: 一方面将坩埚旋转速度从 30 r/min 降低到了 20 r/min 以减少坩埚旋转时的倾斜程度; 另一方面, Yin 等^[29]发现坩埚双向旋转的过程中, 生长界面前会交替出现顺时针和逆时针的对流, 促进溶液混合与溶质传输。因此, 通过缩短每次单向旋转的保持时间, 提高坩埚转向的频率, 可以进一步促进溶液中溶质的传输, 减少 Te 的累积, 具体旋转参数如图 1(b)所示。

图 5 是采用温度梯度溶液法结合 ACRT 技术生长的 $\phi 60$ mm ZnTe 晶锭的照片。图 5(a)显示晶体生长界面较为稳定平直, 晶体和尾部富 Te 相未发生明显混合。晶体表面并未出现宏观的裂纹和晶界, 晶体单晶率高。同时切割后的晶片透过性良好, 无明显

Te 夹杂, 晶体质量良好(图 5(b))。晶体的红外透射照片显示, 晶体内微观 Te 夹杂相的尺寸较小、数目较少, 分布均匀(图 5(c))。生长出的大尺寸 ZnTe 单晶具有较高的质量和均匀性。

图 6 为采用 ACRT 技术生长出的不同尺寸 ZnTe 晶体的太赫兹探测性能。图 6(a, b)分别是所制备的 ZnTe 晶体探测到的太赫兹时域信号和频域信

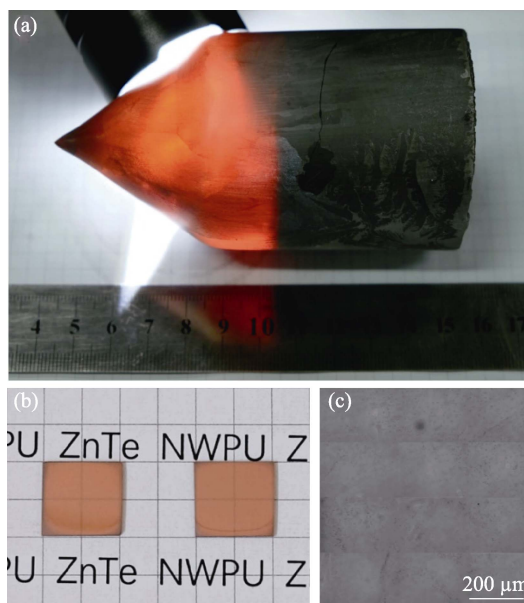


图 5 生长的大尺寸 ZnTe 晶锭照片
Fig. 5 Pictures of as-grown large size ZnTe crystal
(a) Ingots; (b) Wafers after cutting; (c) Infrared transmission imaging

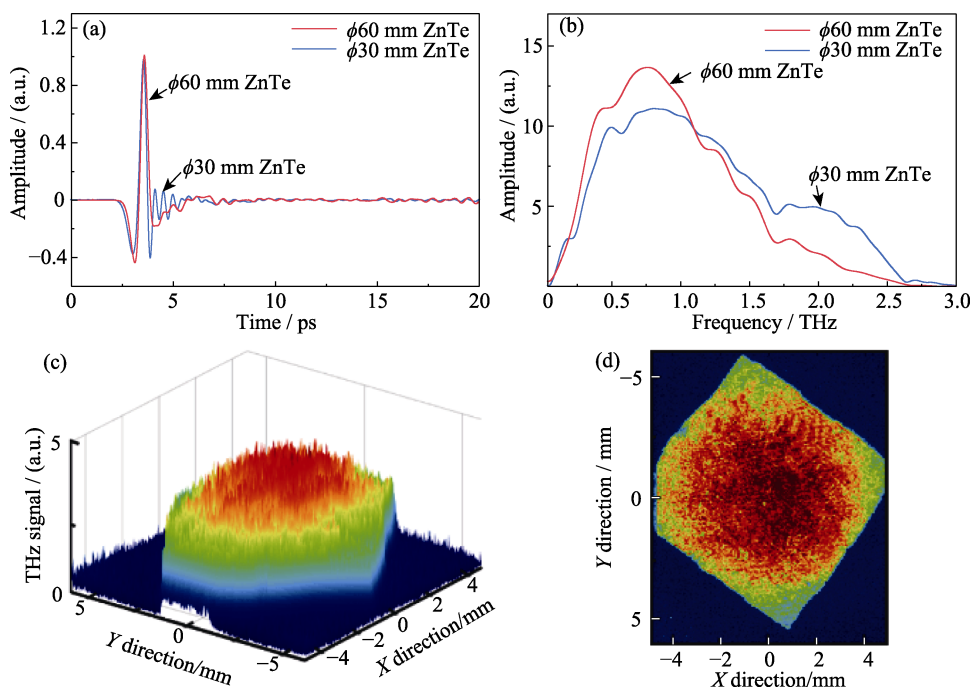


图 6 ZnTe 晶体的 THz 探测性能

Fig. 6 THz detection performance of ZnTe crystals

(a) Detection time domain spectra; (b) Detection frequency domain spectra; (c) 3D schematic diagram of signal intensity at 0.7 THz detection from $\phi 60$ mm ZnTe crystal; (d) 2D schematic diagram of signal intensity at 0.7 THz detection from $\phi 60$ mm ZnTe crystal

Colorful figure is available on website

号, 可以看到从 $\phi 30$ mm 和 $\phi 60$ mm 晶锭切割得到的 ZnTe 晶体对 0.1~2.7 THz 范围的太赫兹信号均具有良好的探测能力, 探测到的信号信噪比高于 1000, 探测灵敏度高。其中大尺寸晶体对 1.5~2.5 THz 波段的太赫兹信号响应略低于 $\phi 30$ mm 的 ZnTe 晶体, 但在 0.7 THz 附近探测的太赫兹信号峰更强。两种不同尺寸的晶体探测到的太赫兹时域半峰宽均较窄, 低于 2 ps, 可以实现超快条件下的探测需求。进一步对 $\phi 60$ mm 晶锭切割的 ZnTe 晶体的太赫兹成像能力进行测试, 图 6(c, d) 显示了整个晶体在 0.7 THz 探测到的太赫兹信号强度的三维和二维图像, 可以看到整个晶体 90% 以上的区域对于太赫兹信号值有强烈的响应, 边缘效应小, 晶体整体的太赫兹探测性能均匀。总体而言, 采用优化后的 ACRT 技术生长出的大尺寸 ZnTe 晶体, 具有高的晶体质量和太赫兹性能, 满足作为太赫兹成像系统内探测晶体的要求。

3 结论

通过应用并优化坩埚旋转加速技术, 成功地生长出了高质量, 高性能的 ZnTe 晶体。实验和模拟计算证明了 ACRT 技术可以有效地促进长晶过程中的溶质传输, 获得更加平稳的生长界面, 大大减少晶体内部的 Te 夹杂数量并减小其尺寸, 同时也避免了晶体尾部混合相的形成, 提高晶体质量。需要注意的是, 在大尺寸 ZnTe 晶体的生长过程中, 通过提高坩埚旋转频率可以在降低旋转速度的同时保证生长界面处溶质传输良好, 最终成功制备出 $\phi 60$ mm 的 ZnTe 晶体, 并验证其具有均匀的太赫兹响应能力。将 ACRT 技术引入单晶制备过程, 不仅为制备大尺寸、高性能 ZnTe 晶体打下基础, 也对高熔点半导体晶体生长提供新的思路。

参考文献:

- [1] NEU J, SCHMUTTENMAER C A. Tutorial: an introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS). *Journal of Applied Physics*, 2018, **124**(23): 1101.
- [2] WU X J, REN Z J, KONG D Y, et al. Lithium niobate strong-field terahertz source and its applications. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, **49**(1): 1.
- [3] BURON J D, PETERSEN D H, BOGGILD P, et al. Graphene conductance uniformity mapping. *Nano Letters*, 2012, **12**(10): 5074.
- [4] SUN H J, WANG M H, BIAN J M, et al. Terahertz and metal-insulator transition properties of VO₂ film grown on sapphire substrate with MBE. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, **32**(4): 437.
- [5] PERETTI R, MITRYUKOVSKIY S, FROBERGER K, et al. THz-TDS time-trace analysis for the extraction of material and metamaterial parameters. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, **9**(2): 136.
- [6] MURATE K, KAWASE K. Perspective: terahertz wave parametric generator and its applications. *Journal of Applied Physics*, 2018, **124**(16): 160901.
- [7] USHAKOV A, CHIZHOV P, BUKIN V, et al. Broadband in-line terahertz 2D imaging: comparative study with time-of-flight, cross-correlation, and Fourier transform data processing. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, **35**(5): 1159.
- [8] LI C Y, ZHANG H F, QU L, et al. Application of terahertz time-of-flight imaging to lacquer box. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2021, **58**(6): 0604001.
- [9] IM K H, KIM S K, CHO Y T, et al. THz-TDS techniques of thickness measurements in thin shim stock films and composite materials. *Applied Sciences*, 2021, **11**(19): 8889.
- [10] FÜLÖP J A, POLÓNYI G, MONOSZLAI B, et al. Highly efficient scalable monolithic semiconductor terahertz pulse source. *Optica*, 2016, **3**(10): 1075.
- [11] FÜLÖP J A, TZORTZAKIS S, KAMPFRATH T. Laser driven strong field terahertz sources. *Advanced Optical Materials*, 2019, **8**(3): 1900681.
- [12] NOE G T, KATAYAMA I, KATSUTANI F, et al. Single-shot terahertz time-domain spectroscopy in pulsed high magnetic fields. *Optics Express*, 2016, **24**(26): 30328.
- [13] WEI Z, XU Y, XIAO B, et al. Homogenization of Te-rich grown ZnTe bulk crystals by annealing under Zn vapor. *CrystEngComm*, 2019, **21**(2): 283.
- [14] MYCIELSKI A, SZADKOWSKI A, LUSAKOWSKA E, et al. Parameters of substrates-single crystals of ZnTe and Cd_{1-x}Zn_xTe (x<0.25), obtained by physical vapor transport technique (PVT). *Journal of Crystal Growth*, 1999, **197**(3): 423.
- [15] SEKI Y, SATO K, ODA O. Solution growth of ZnTe single crystals by the vertical Bridgman method using a hetero-seeding technique. *Journal of Crystal Growth*, 1997, **171**(1/2): 32.
- [16] YANG R, JIE W Q, SUN X Y, et al. Characterization of Cr-doped ZnTe crystals grown by temperature gradient solution growth (TGSG). *Journal of Inorganic Materials*, 2015, **30**(4): 401.
- [17] UEN W Y, CHOU S Y, SHIN H Y, et al. Characterizations of ZnTe bulks grown by temperature gradient solution growth. *Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology*, 2004, **106**(1): 27.
- [18] YANG R, JIE W Q, LIU H. Characterization and chemical surface texturization of bulk ZnTe crystals grown by temperature gradient solution growth. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2015, **22**(7): 755.
- [19] JIN M, HE F, ZHENG S, et al. Growth of ZnTe semiconductor crystal via a Te flux zone melting method and characterization of its properties. *Crystal Research and Technology*, 2022, **57**(10): 2100279.
- [20] JIN M, BAI X, YANG W, et al. Growth of ZnTe crystal via directional solidification method and study of its mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 2021, **56**(10): 6306.
- [21] WANG R, LU Y, JIAO C L, et al. Energy spectrum analysis and growth of ZnTe: Cu under Microgravity on TG-2 spacecraft. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(3): 281.
- [22] DIVECHA M S, MCCOY J J, DERBY J J. Optimizing ACRT to reduce inclusion formation during the VGF growth of cadmium zinc telluride: II. Application to experiments. *Journal of Crystal Growth*, 2021, **576**: 126385.
- [23] SEKHON M, LENT B, DOST S. Numerical study of liquid phase diffusion growth of SiGe subjected to accelerated crucible rotation. *Journal of Crystal Growth*, 2016, **438**: 90.
- [24] KUSUNOKI K, KAMEI K, OKADA N, et al. Solution growth of SiC crystal with high growth rate using accelerated crucible rotation technique. Pittsburgh: International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, 2005: 119-122.
- [25] ZHOU B, JIE W, WANG T, et al. Modification of growth interface of CdZnTe crystals in THM process by ACRT. *Journal of Crystal Growth*, 2018, **483**: 281.
- [26] ASAH I T, YABE T, SATO K, et al. Growth of large diameter ZnTe single crystals by the LEK method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, **371**(1/2): 2.
- [27] LEI H, LIU C Y, XIE P F, et al. Growth of large-size high-quality ZnTe bulk crystals by traveling solvent melting zone method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **779**: 706.
- [28] JASINSKI T, ROHSENOW W M, WITT A F. Heat-transfer analysis of the Bridgman-stockbarger configuration for crystal-growth. *Journal of Crystal Growth*, 1983, **61**(2): 339.
- [29] YIN L Y, JIE W Q, WANG T, et al. The transport phenomena during the growth of ZnTe crystal by the temperature gradient solution growth technique. *Journal of Crystal Growth*, 2017, **461**: 16.
- [30] DERBY J J. *Crystal Growth, Bulk: Theory and Models*. Oxford: Elsevier, 2005: 274.