

碲锌镉薄膜生长技术的研究进展

于梦诗^{1,2}, 胡思奇², 怀杨杨²

(1. 江西铜业集团有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 碲锌镉薄膜材料凭借其高原子序数特性、可调的光学带隙和卓越的光电转换性能, 在薄膜光伏电池、红外探测成像及高能射线探测等前沿领域展现出巨大应用价值。为实现该材料的产业化应用, 亟需攻克低成本规模化制备与高质量均匀成膜的关键技术。本文系统梳理了碲锌镉薄膜的气相沉积生长技术体系。物理气相传输、真空热蒸发、热壁外延、磁控溅射、近空间升华等技术, 虽然具有设备结构简单、工艺成本较低等优势, 但普遍存在薄膜均匀性欠佳、结晶质量较差等技术瓶颈; 而分子束外延、金属有机化学气相沉积等技术, 虽能实现原子级精度的外延生长和优异的晶格完整性, 却因其设备投入大、工艺复杂度高、生长速率慢等因素, 严重制约了产业化应用前景。在此基础上, 进一步提出提升碲锌镉薄膜质量的三条关键技术路径: 一是通过精确调控生长参数实现工艺优化; 二是引入界面缓冲层以改善异质外延质量; 三是采用退火处理技术消除本征缺陷。最后指出, 平衡薄膜性能与生产成本、突破大面积均匀成膜技术壁垒, 将是碲锌镉薄膜未来发展的关键突破口。

关键词: 碲锌镉薄膜; 气相沉积; 生长参数; 界面缓冲层; 退火处理

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.001

中图分类号: TB383 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0001-18

碲锌镉(cadmium zinc telluride, CZT)是一种新型化合物半导体材料, 可通过Zn掺杂CdTe而成, 其化学通式为 $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 < x < 1$)。如图1所示, CZT晶体属于 $F\bar{4}3m$ 空间群, 具有典型的闪锌矿结构, 可视为由两种亚晶格嵌套构成: Te原子占据面心立方格点的Te亚晶格, Cd和Zn原子随机占据面心立方格点的Cd/Zn亚晶格, 两者沿体对角线方向相对位移 $1/4$ 晶格长度。通过调控Zn元素的掺杂浓度(x 值), 可实现禁带宽度、载流子迁移率等性质的连续调控。这种优异的可调特性使CZT材料在以下三大前沿领域得到重要应用: 作为薄膜光伏电池中光吸收层材料^[1-3]、红外探测器的外延衬底材料^[4-6]以及高能射线探测材料^[7-10]。

在薄膜光伏电池领域中, 目前以CdTe多晶薄膜为核心的光伏技术已在产业化层面验证了其经济性与可靠性。1.45 eV的准直接带隙使其与太阳光谱高度匹配, 结合超过 10^5 cm^{-1} 的光吸收系数, 其单结器件的光电转换理论极限效率达32%, 显著优于传统硅基技术^[2]。产业化进程方面, 从首个CdTe光伏器件诞生至今, 实验室单片效率已突破22%里程碑, 量产组件效率稳定在18%~20%区间, 占据全球

薄膜光伏市场主导地位。CZT作为CdTe经Zn元素掺杂调控的性能升级材料, 可为构建高效叠层电池提供理想解决方案。CZT薄膜与窄带隙钙钛矿或晶硅形成异质结时, 有望突破单结电池的转换效率极限, 理论模型显示其转换效率可突破45%阈值^[3]。

在红外探测成像领域, CZT材料展现出独特的工程应用价值。以碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面探测器为例, 其核心性能瓶颈在于异质外延过程中衬底与功能层的晶格适配性。CZT材料具有组分可调性优势, 通过调节Zn/Cd比例, 可实现与HgCdTe外延层的完美晶格匹配(失配度 $<0.3\%$)^[4]。此外, CZT衬底的宽带隙特性可有效抑制载流子隧穿效应, 其高介电常数($\epsilon \approx 9.6$)可降低器件暗电流, 同时CZT在长波红外波段展现出超过90%的透光率, 这些特性使其成为HgCdTe薄膜外延生长的理想衬底材料^[5]。当前行业主流采用 $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$ 衬底, 其与中波红外HgCdTe探测器的晶格失配度控制在 10^{-3} 量级。基于该技术路线制备的 1280×1024 规模红外焦平面阵列, 已实现 $17 \mu\text{m}$ 像元间距下的噪声等效温差小于20 mK, 在战略武器系统、空间遥感载荷及民用热成像设备中已实现规模化应用^[6]。值

收稿日期: 2025-06-19; 修订日期: 2025-10-17

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2025M771084)资助

作者简介: 于梦诗(1997—), 女, 江西抚州人, 博士, 研究方向: 半导体材料制备及器件应用, E-mail: yums-cnc@pku.edu.cn; 通信作者: 怀杨杨, 高级工程师, E-mail: yyhuai1987@gmail.com

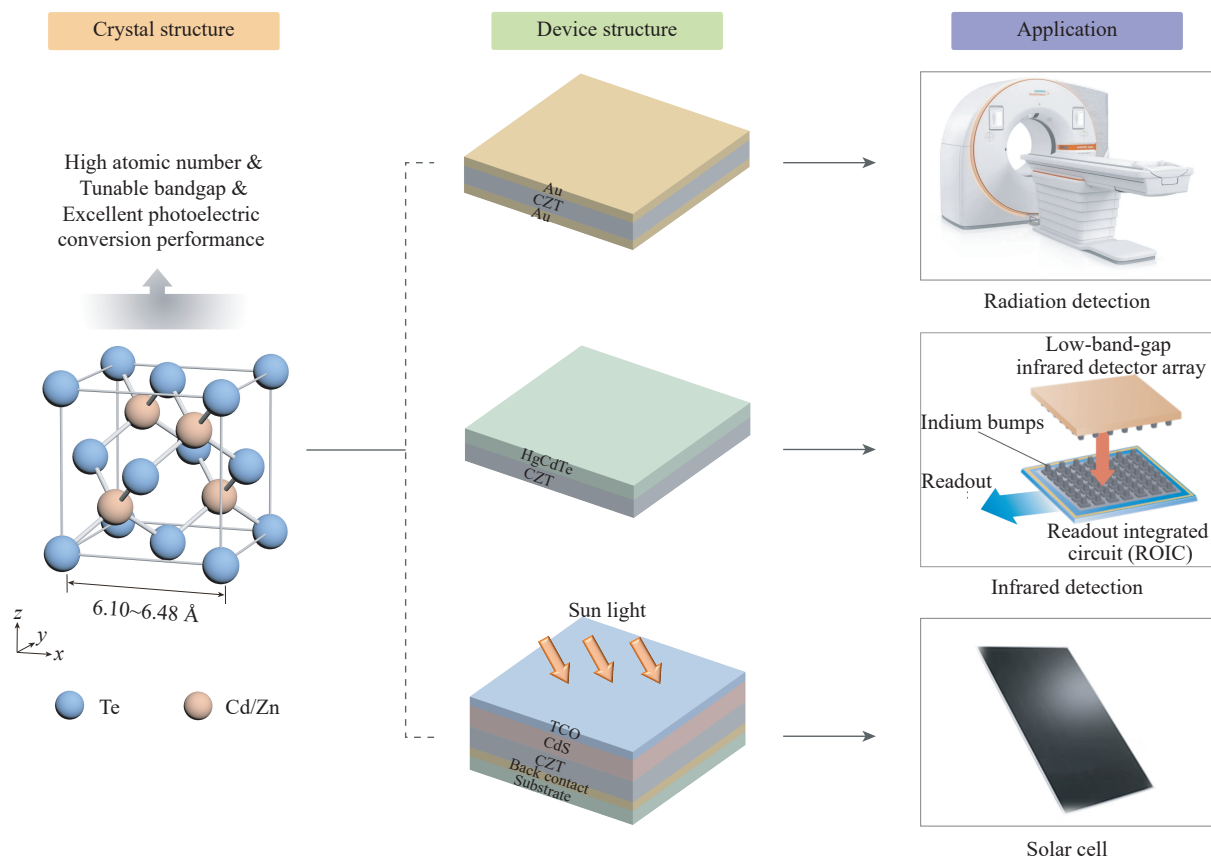


图1 碲锌镉的晶体结构与应用领域

Fig. 1 Crystal structure and applications of CZT

得关注的是,通过优化CZT衬底的位错密度和电阻率,可显著提升HgCdTe外延层的少数寿命,对于实现新一代高温工作型红外探测器具有决定性意义。

在 高 能 射 线 探 测 材 料 领 域, CZT 因 其 独 特 的 物 理 特 性 成 为 革 命 性 探 测 介 质。该 材 料 具 备 三 大 核 心 优 势: 其 一, 高 原 子 序 数 赋 予 其 强 辐 射 阻 挡 能 力, 对 60~140 keV 能 段 X 射 线 的 线 性 衰 减 系 数 达 $10\sim 30\text{ cm}^{-1}$, 较 硅 基 探 测 器 提 升 两 个 数 量 级; 其 二, 宽 带 隙 特 性 有 效 抑 制 热 激 发 噪 声, 其 室 温 电 阻 率 可 达 $10^{11}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 量 级, 比 传 统 锗 探 测 器 高 5 个 数 量 级; 其 三, 超 高 载 流 子 迁 移 率 寿 命 积 $>1\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{V}$, 尤 其 是 电 子 迁 移 率 寿 命 积 可 达 $(2\sim 5)\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{V}$, 显 著 优 于 CdTe 材 料^[8]。这 些 特 性 使 CZT 探 测 器 突 破 了 传 统 硅 / 锗 探 测 器 需 液 氮 冷 却 的 技 术 局 限, 在 室 温 下 即 可 实 现 5%@122 keV 的 优 异 能 量 分 辨 率。在 空 间 分 辨 率 方 面, CZT 像 素 阵 列 可 达 到 50 μm 级 探 测 精 度, 较 NaI/PMT 闪 烁 体 探 测 器 提 升 10 倍 以 上。以 $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Te}$ 为 代 表 的 优 化 组 分 材 料, Zn 掺 杂 使 其 位 错 密 度 降 至 $<5\times 10^4\text{ cm}^{-2}$, 漏 电 流 密 度 低 于

$1\text{ nA}/\text{mm}^2$, 在 ^{241}Am (59.5 keV) 辐 射 源 测 试 中 表 现 出 99.7% 的 电 荷 收 集 效 率^[10]。当 前, 基 于 CZT 体 单 晶 的 高 能 射 线 探 测 器 已 实 现 多 领 域 突 破 性 应 用: 在 医 疗 CT 领 域, 256 通 道 CZT 模 块 使 低 剂 量 扫 描 的 密 度 分 辨 率 达 0.3%; 在 核 安 全 监 测 中, CZT 谱 仪 对 ^{137}Cs (662 keV) 的 能 量 分 辨 率 突 破 1.3%, 探 测 效 率 较 HPGc 提 升 40%; 在 天 文 观 测 方 面, NuSTAR 卫 星 搭 载 的 CZT 成 像 阵 列 实 现 角 分 辨 率 $<1'$ 的 突 破 性 观 测 能 力。

在 推 进 CZT 材 料 规 模 化 应 用 的 进 程 中, 开 发 经 济 高 效 的 大 尺 寸 CZT 生 长 技 术 是 核 心 突 破 口。传 统 熔 体 法 (如 布 里 奇 曼 法) 制 备 的 CZT 体 单 晶 凭 借 位 错 密 度 低 ($<10^4\text{ cm}^{-2}$)、电 阻 率 高 ($>10^{10}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$) 等 优 势, 已 实 现 辐 射 探 测 器 等 高 端 器 件 的 商 业 化 应 用。然 而, 该 工 艺 存 在 显 著 局 限 性: 晶 体 生 长 受 限 于 每 小 时 毫 米 级 的 缓 慢 速 度, 多 工 序 流 程 涉 及 籽 晶 定 向、坩 埚 封 装 及 应 力 退 火 等 复 杂 操 作, 加 之 晶 锭 切 割 研 磨 带 来 的 材 料 损 耗, 导 致 整 体 生 产 成 本 高 昂, 制 约 了 市 场 渗 透 率 的 提 升。

与熔体法相比，基于气相沉积法的CZT薄膜制备技术，因具备原料利用率高(>80%)、基底兼容性强及大面积沉积可控等特点，在平板型辐射传感器、X射线成像阵列等新兴领域展现出显著成本优势。本文系统梳理了CZT薄膜的主流气相沉积方法，重点评述了提升CZT薄膜质量的策略，以期为推动CZT薄膜器件的工程化应用提供理论支撑。

1 CZT薄膜的气相沉积生长

CZT薄膜的气相生长方法包括物理气相传输^[11-12]、真空热蒸发^[13-15]、热壁外延^[16-18]、磁控溅射^[19-22]、近空间升华^[23-25]、分子束外延^[26-29]以及金属有机化学气相沉积^[30-33]等。近年来，近空间升华法因其独特的工艺优势成为CZT薄膜制备领域的研究热点，本文以该方法为重点进行详细介绍。相比之下，其他技术由于各自存在明显的应用局限性，相关研究报道相对较少。表1总结了各生长方法的优缺点。

表1 CZT薄膜生长方法及其特点
Table 1 Growth methods of CZT thin film and their characteristics

生长方法	优点	缺点
物理气相传输 PVT	设备结构简单，成本低	易组分偏析，成膜不均匀，结晶质量低
真空热蒸发VTE	系统结构简单，成本低，适用性高	蒸发不均匀，晶界多，结晶性差
热壁外延HWE	沉积速率适中，组分控制较好	对温控敏感，晶格缺陷多
磁控溅射MS	膜厚均匀性好，适合低温沉积，大面积兼容性强	薄膜沉积速率低，缺陷多，设备成本高
近空间升华CSS	沉积速率快，薄膜质量高，适合放大	组分均匀性较低
分子束外延 MBE	控制精度高，薄膜缺陷少，可制备量子结构	设备昂贵，薄膜生长速率低
金属有机化学气相沉积 MOCVD	生长速率高，薄膜质量优异，工业化成熟	前驱体昂贵且有毒，安全要求高

1.1 物理气相传输法

物理气相传输法(physical vapor transport, PVT)是一种基于气相传输原理的薄膜生长技术。该方法通过高温加热使原材料升华或蒸发形成气态组分，随后在系统温度梯度驱动下，气相物质由高温源区向低温衬底区定向输运，如图2(a)所示。气相组分

在衬底表面达到过饱和状态后，经表面吸附、迁移与重结晶等过程，有序排列形成薄膜。PVT法的核心特征在于其依赖温度梯度驱动的质量传输机制。

2004年，Mochizuki团队^[34]采用PVT法在ITO玻璃上制备了厚度不超过300 μm的Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te多晶薄膜，并评估了其应用于辐射探测的潜力。为了提高薄膜的电阻率并降低器件的漏电流，该团队在生长管一端设计了CdCl₂粉末的贮存室。薄膜的生长速率与源的温度呈指数关系，而几乎不受CdCl₂贮存室温度的影响。CdCl₂的引入使薄膜表面没有明显的晶界，但依然粗糙，电阻率提升2个数量级，达到10¹⁰ Ω·cm，薄膜虽然对662 keV的γ射线有响应，但并未出现相应的峰。随后，Mochizuki团队^[12]结合热壁法与PVT法在ITO玻璃上制备了不同Zn含量的择优取向为(111)面的CZT多晶薄膜。研究表明，与x=0.04和x=0.50的CZT薄膜相比，x=0.20的CZT薄膜具有最佳的X射线响应特性，证实了该组分CZT薄膜作为X射线传感器的应用潜力。2017年，Gao等^[11]以Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te粉末为源，利用PVT法在石英衬底上成功制备了厚度超过600 μm的鳞片状CZT多晶薄膜。由于CZT与衬底热膨胀系数存在较大差异，二者之间的应力失配显著，使得CZT薄膜可从衬底上轻松剥离[图2(a~c)]。基于剥离后的多晶薄膜，Gao等^[11]分别构筑了水平结构和垂直结构两种电极模式的探测器件，测试结果显示，垂直结构的探测器具有更高的暗电阻和更优异的光电特性，这主要是由于载流子在平面内传输时容易受到晶界的散射，导致其收集效率更低。

PVT技术的优势在于设备结构相对简单，仅需能精确控温的管式炉和真空系统即可实现，因此设备投资和运行成本较低，适合实验室研究和小规模CZT多晶薄膜生产。然而，PVT由于在气相传输过程中各元素(Cd, Zn, Te)的饱和蒸汽压差异较大，导致薄膜的化学计量比难以精确控制，容易出现组分偏析。此外，受温度场分布、气压控制等因素影响，薄膜的均匀性和结晶质量难以保证，这直接制约了其在高性能探测器中的应用。

1.2 真空热蒸发法

真空热蒸发法(vacuum thermal evaporation, VTE)是一种典型的物理气相沉积技术，其原理是通

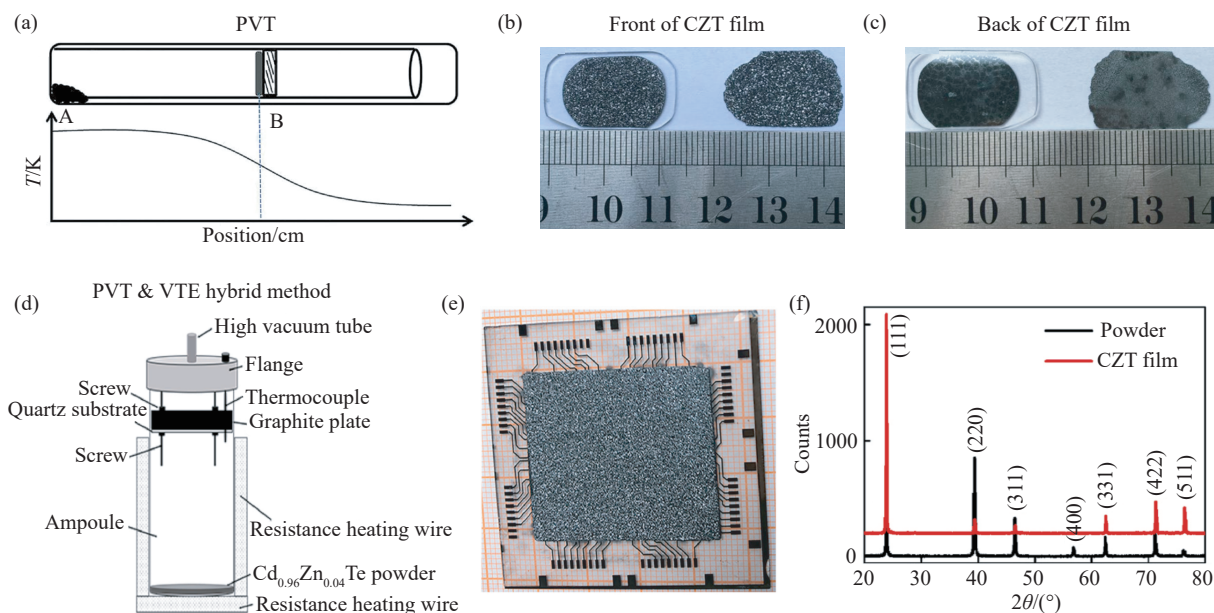


图2 PVT法与VTE法制备的CZT薄膜: (a)PVT法制备CZT薄膜示意图; (b)CZT薄膜正面图像, 左边为黏附在衬底上的薄膜, 右边为剥离的薄膜; (c)CZT薄膜背面图像, 左边为黏附在衬底上的薄膜, 右边为剥离的薄膜; (d)PVT-VTE法制备CZT薄膜示意图; (e)沉积在带有Mo阵列电极的石英衬底上的CZT薄膜图像; (f)图(e)中CZT薄膜的X射线衍射图谱

Fig. 2 Preparation of CZT thin film by PVT method and VTE method: (a) Schematic diagram of the preparation of CZT thin film by PVT method^[11]; (b) Front image of CZT thin film (left side is the film adhered to the substrate, and the right side is the peeled film); (c) Back image of CZT thin film (left side is the film adhered to the substrate, and the right side is the peeled film)^[11]; (d) Schematic diagram of preparation of CZT thin film by PVT-VTE method^[14]; (e) CZT thin film deposited on a quartz substrate with Mo array electrodes^[14]; (f) X-ray diffraction pattern of CZT thin film in (e)^[14]

过加热源材料使其蒸发, 并在衬底表面沉积形成薄膜。在VTE过程中, 蒸发源受热后形成气相原子或分子束, 这些气相粒子在真空环境下沿直线运动, 直接撞击衬底表面, 经历吸附、表面迁移及成核生长过程, 最终形成连续薄膜。通常情况下, 衬底维持在室温条件下沉积, 所得薄膜多呈多晶结构。

Zha等^[15]采用VTE法在Si衬底上制备了具有(111)面择优取向的 $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ 纳米晶薄膜, 晶粒尺寸约为15 nm。高分辨透射电子显微镜表征结果显示, 在薄膜与衬底界面处存在约3 nm的无定型Te层, 这一现象归因于Cd与Te之间平衡蒸汽压的差异。研究表明, 该无定型界面层的存在是形成纳米晶结构的关键因素。随后, Chander等^[13]利用类似的电子束真空蒸发技术, 在玻璃、ITO、FTO和硅片等衬底上制备了厚度约为300 nm的CZT多晶薄膜。实验结果表明, 不同衬底上沉积的CZT薄膜性能存在显著差异, 其中FTO衬底上生长的薄膜结晶性最优、电导率最高, 带隙为1.71 eV, 在太阳能电池吸收层应用中展现出最佳潜力。Moger等^[35]以CdTe和

ZnTe为蒸发源, 采用VTE法在玻璃衬底上制备了不同组成的 $\text{ZnTe}/\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ ($0.2 \leq x \leq 1.0$) 异质结。其中, $\text{ZnTe}/\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Te}$ 异质结在可见光照射下具有较高的响应度 ($0.05 \sim 0.24 \text{ A/W}$) 和探测率 (10^{10} Jones), 揭示了该结构在光电探测器中的应用潜力。

值得注意的是, VTE法不仅适用于平面衬底, 也同样适用于表面具有起伏结构的衬底。2021年, Gao等^[14]结合PVT和VTE技术, 在预先沉积Mo阵列电极 (8×8) 的石英衬底上制备了面积达 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 、结晶度高的CZT多晶薄膜, 该薄膜以(111)为优势取向[图2(d~f)]。基于该薄膜构筑的阵列探测器展现出优异的性能, 包括超快的光谱响应、高电阻率 ($10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$) 以及较高的载流子迁移率寿命积 ($7.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$), 揭示了CZT薄膜在室温X射线探测与成像领域的应用潜力。

VTE法具有显著的设备优势, 系统结构简单, 操作便捷且成本低廉, 适合大面积CZT薄膜的高效制备。该方法通过气相粒子直接撞击衬底实现沉积, 对衬底材料没有晶格匹配要求, 具有广泛的适用

性。然而, VTE技术也存在明显不足。其一, 由于Cd, Zn, Te三种元素的蒸发速率差异较大, 导致实际沉积过程中易出现化学计量偏离; 其二, 蒸发粒子能量较低, 易导致薄膜结构疏松、孔隙率高, 从而影响薄膜的致密性与结晶质量。此外, VTE法通常形成多晶薄膜, 晶粒尺寸较小, 晶界密度大, 不利于载流子的长距离输运。因此, VTE法更适用于对薄膜结晶质量要求不高的低成本器件制备场景。

1.3 热壁外延法

热壁外延法(hot wall epitaxy, HWE)可视为物理气相传输的改进技术, 其特点在于通过热壁设计实现更均匀的温度场和气相反应环境。生长腔体壁被独立加热至与源区接近的温度, 以消除冷壁效应, 减少气相组分在输运过程中的冷凝损失。Cd, Zn, Te蒸汽在热壁环境中充分混合并部分化合(如形成CdTe, ZnTe气相分子), 再输运至衬底形成CZT薄膜。HWE法常被用于制备 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 薄膜。2003年, Kim等^[16]采用HWE技术在GaAs衬底上生长了 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 薄膜, 并系统研究了薄膜厚度对其质量的影响。通过高分辨电子显微镜, 直接观察到由晶格常数差异引起的界面位错。应变随外延层厚度的演变规律表明: 当CZT薄膜厚度增至5 μm 时, 外延层中的扩展缺陷密度迅速降低; 当厚度达到20 μm 时, 应变几乎完全消失, 表明增加薄膜厚度有助于获得接近块体单晶质量的外延层。随后, Tang等^[17]在2007年以 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 和Zn为双蒸发源, 基于自制的HWE法设备, 在经过特殊处理后的Si衬底上制备了高质量CZT(100)薄膜。与PVT和VTE方法所得到的表面粗糙的多晶薄膜相比, 该薄膜展现出镜面般平整的表面形貌。用扫描电子显微镜进一步证实了薄膜呈现单一取向的柱状生长模式, 标志着热壁外延技术在CZT薄膜制备领域取得重要突破。然而, 此后十余年内, 关于HWE法制备CZT薄膜的研究相对较少。直到2021年, Vuichyk等^[18]才报道了基于HWE法在较低衬底温度(约100 $^{\circ}\text{C}$)制备的30~810 nm厚CZT薄膜, 但所得薄膜由众多百纳米级晶粒拼接而成, 表面仍较为粗糙, 表明在低温条件下制备高质量薄膜仍具挑战性。

HWE法具有成膜速率适中、组分控制较好、结晶质量相对优越的优点。该方法可在较低真空度和

较低温度下进行, 有利于节能降耗, 并可在一定程度上减少组分偏析现象。然而, HWE也存在一些局限性: 首先, 其设备结构较常规PVT或VTE更为复杂, 增加了工艺难度; 其次, 对温度梯度控制要求较高, 容易出现晶格缺陷和应力堆积, 沉积的CZT薄膜中常伴随微裂纹, 仍需通过优化生长参数提升薄膜的均匀性和单晶化程度; 最后, 虽然HWE的薄膜质量优于PVT和VTE, 但仍难以达到分子束外延(MBE)或金属有机化学气相沉积(MOCVD)的原子级平整度。因此, 该方法更适用于制备中等性能要求的红外探测器和光伏器件。

1.4 磁控溅射法

磁控溅射法是一种广泛应用于薄膜制备的物理气相沉积技术。其基本原理是在真空环境下, 利用磁场和电场的协同作用, 使惰性气体(如氩气)电离形成等离子体。等离子体中的离子在电场加速下轰击靶材表面, 使靶材原子或分子被溅射并沉积在衬底上形成薄膜[图3(a)]。磁控溅射法的核心在于磁场的设计, 该设计可束缚电子运动轨迹, 增加其与气体分子的碰撞概率, 从而提高等离子体密度和溅射效率。磁控溅射法可通过调节工艺参数, 精确控制薄膜的厚度、成分和结构, 以满足不同应用需求。

Malkas等^[19]以直径10.16 cm(4英寸) $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ 为靶材, 利用磁控溅射法在玻璃衬底上制备了厚度为200 nm的CZT薄膜。研究表明, 衬底温度对薄膜的结构和形貌具有显著影响。通过比较200, 300和400 $^{\circ}\text{C}$ 三种不同衬底温度下制备的薄膜形貌发现, 随着衬底温度的升高, 原子在衬底表面的迁移和扩散速率增加, 薄膜中的晶粒尺寸逐渐增大, 且薄膜表面平整度显著提升[图3(b~d)]。Gao等^[20]采用磁控溅射法在ITO衬底上制备了多层CZT薄膜, 随着重复沉积次数的增加, 薄膜厚度从1360 nm增至9230 nm[图3(e)]。此外, 重复沉积可有效消除薄膜与衬底之间的热应力失配, 从而提高薄膜的附着力和结晶质量, 增大晶粒尺寸[图3(f)]。Zeng等^[36]以高纯Al和 $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ 为靶, 采用磁控溅射法制备了Al掺杂的CZT薄膜。掺Al的CZT薄膜在化学组成上更接近靶材的原始配比, 电阻率显著提高至 $8.5 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 较未掺杂的CZT薄膜电阻率($5.6 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$)提升了近2个数量级, 这可能是因

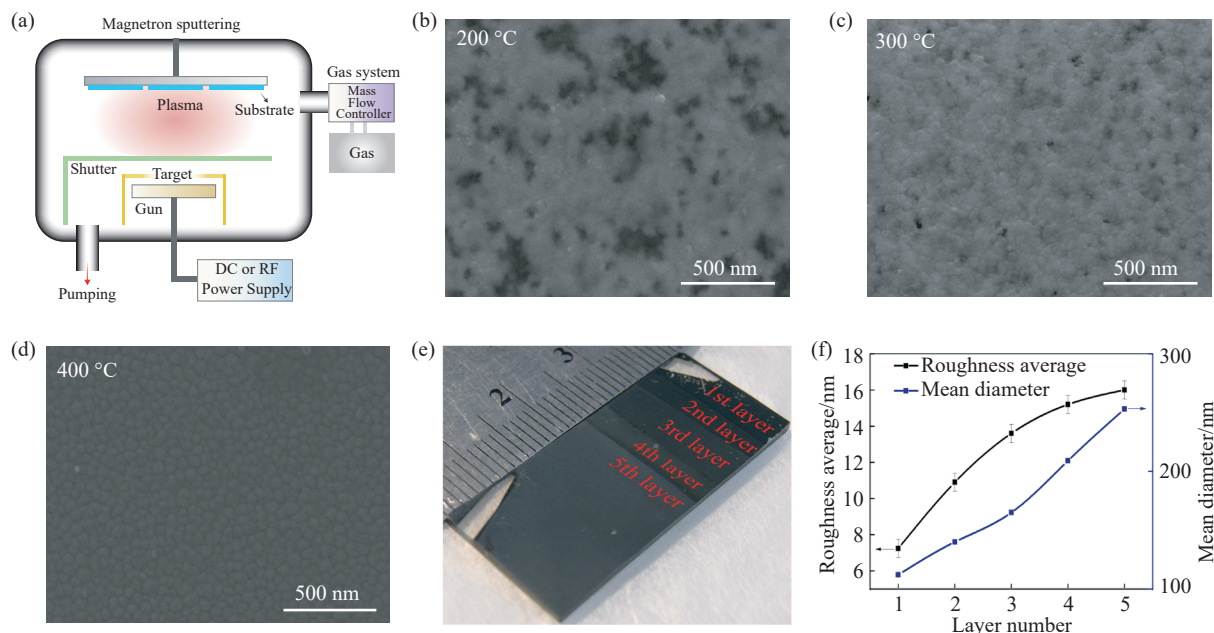


图3 磁控溅射法制备的CZT薄膜: (a)磁控溅射原理图; 衬底温度为(b)200 °C、(c)300 °C和(d)400 °C下制备的CZT薄膜形貌; (e)磁控溅射制备的多层CZT薄膜; (f)不同层数CZT薄膜的表面粗糙度统计

Fig. 3 Preparation of CZT thin films by magnetron sputtering: (a) Schematic diagram of magnetron sputtering; Morphology of CZT thin films prepared at substrate temperatures of (b) 200 °C, (c) 300 °C and (d) 400 °C^[19]; (e) Multilayer CZT thin films prepared by magnetron sputtering^[20]; (f) Surface roughness statistics of CZT thin films with different numbers of layers^[20]

为Al原子作为施主杂质可有效补偿薄膜中的Cd空位缺陷。

磁控溅射技术的核心优势在于薄膜的均匀性和大面积沉积能力上; 同时, 通过使用复合靶或共溅射技术, 可较为精确地调控CZT的化学计量比。然而, 该技术也存在固有缺陷: 高能粒子轰击可能导致薄膜内部产生晶格损伤或应力, 增加缺陷密度, 且沉积速率慢; 溅射过程通常在高真空环境下进行, 设备成本和维护费用较高。此外, 磁控溅射生长的CZT薄膜多为多晶结构, 难以实现单晶外延, 结晶质量有待提升。

1.5 近空间升华法

近空间升华法(close spaced sublimation, CSS)是外延单晶薄膜研究中应用最广泛的方法之一, 其本质是一个相变的过程。原材料受热由固态升华为气态, 形成过饱和蒸汽, 当衬底温度低于蒸发源温度时, 蒸汽会在衬底上沉积形成固态薄膜。整个过程经历从固相到气相, 再到吸附相, 最后沉积为固相的相变过程[图4(a, b)]。在CSS设备中, 蒸发源和衬底的间距非常近, 当该间距小于二者边长的1/10时, 其物理、化学传输条件几乎不受系统其他

部分影响, 因此蒸发源和衬底的间距通常需要保持在1 cm以内。同时, CSS法的设备结构简单、操作工艺便捷、生产成本低且原料利用率高, 适合快速制备CZT薄膜。

衬底材料会显著影响CZT薄膜的生长行为。不同衬底上, CSS法制备的CZT薄膜可分为多晶和单晶两种形态。研究表明, 在Si, FTO玻璃等衬底上沉积的CZT薄膜通常呈现多晶结构, 并表现出(111)晶面择优取向生长特性[图4(c~f)]^[38, 41-46]。苏虹等^[38]于2012年采用CSS法在FTO玻璃上制备了厚度为40~90 μm的CZT多晶薄膜, 该薄膜虽然均匀致密, 但由多取向晶粒拼接而成, 表面较为粗糙[图4(c)], 且薄膜中晶粒的尺寸随着生长时间的延长而逐渐增大。2019年, Huang等^[43]研究发现, 相较于Si和FTO玻璃衬底, 在抛光的CZT衬底上生长的薄膜具有更大的晶粒尺寸、更优的结晶质量以及更好的结构完整性。此外, 该衬底上薄膜的生长速率可达3.45 μm/min, 且Zn含量更高, 表现出更低的漏电流特性, 更适合用于高能粒子探测。随后该团队发现, 在石英衬底上引入单层石墨烯后, CZT薄膜由平面生长模式转变为垂直柱状生长, 形成直

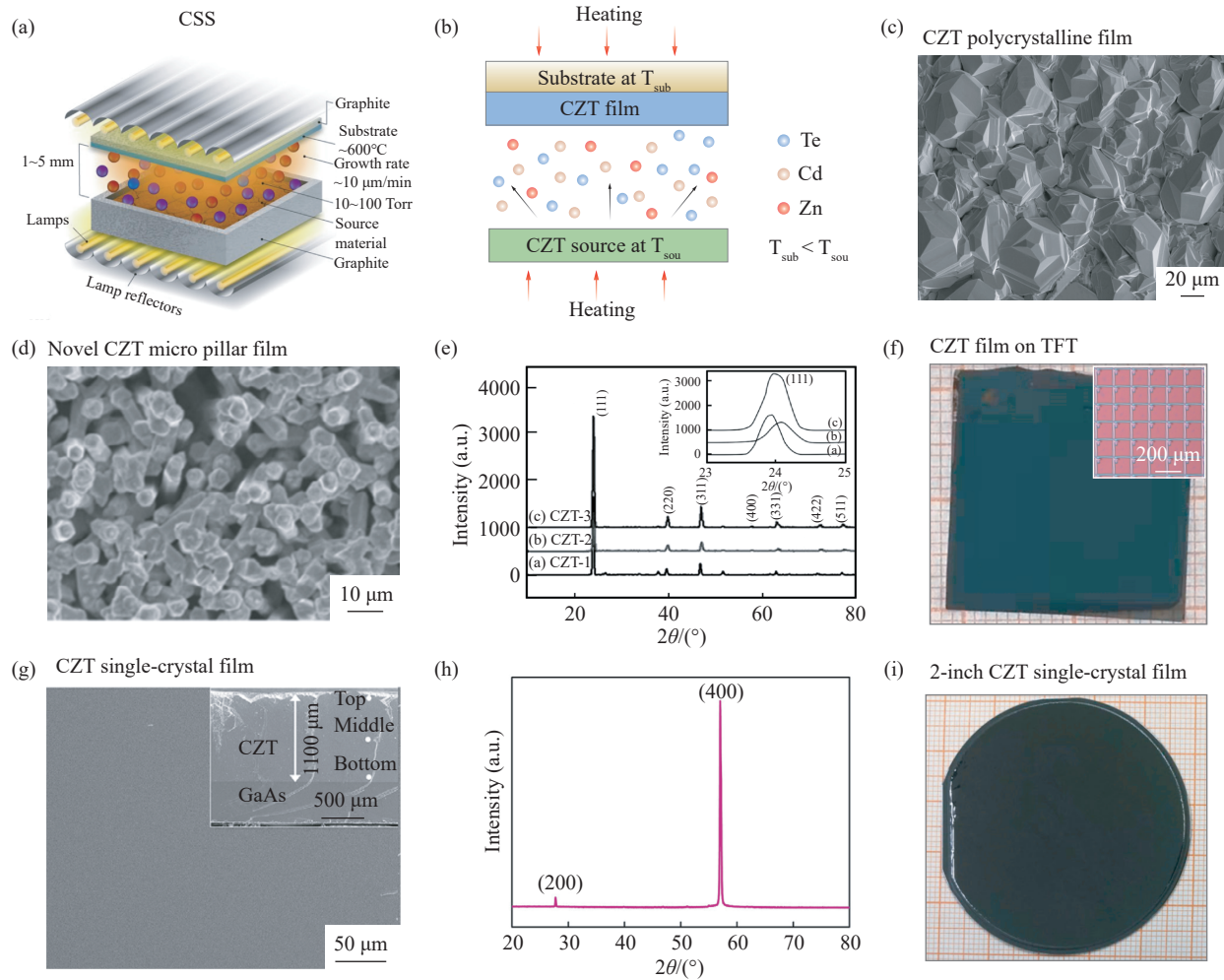


图4 CSS法制备的CZT薄膜: (a)CSS系统示意图; (b)CSS法制备CZT薄膜过程示意图; CSS法制备的(c)CZT多晶薄膜形貌和(d)柱状结构CZT薄膜形貌; (e)CSS法制备的CZT多晶薄膜的XRD图谱; (f)沉积在薄膜晶体管上的CZT薄膜图像; (g)CSS法制备的CZT单晶薄膜形貌; (h)CSS法制备的CZT单晶薄膜的XRD图谱; (i)CSS法制备的5.08 cm(2英寸)CZT薄膜

Fig. 4 CZT thin film prepared by CSS method: (a) Schematic diagram of the CSS system^[37]; (b) Schematic illustration of the CZT thin film preparation process by CSS; (c) Morphology of polycrystalline CZT thin films^[38] and (d) CZT micro pillar film prepared by CSS^[39]; (e) XRD pattern of polycrystalline CZT thin film prepared by CSS^[38]; (f) CZT thin film deposited on a thin-film transistor^[40];

(g) Morphology of single-crystal CZT thin film prepared by CSS^[23]; (h) XRD pattern of single-crystal CZT thin film prepared by CSS^[23]; (i) CZT thin film of 5.08 cm (2 inch) prepared by CSS^[24]

径约5 μm、长度达57 μm的微柱结构[图4(d)]^[39]。基于该结构薄膜制备的Au/BGZO/CZT/石墨烯/石英器件表现出优异的可见光响应特性,展现了其在光电子器件中的应用潜力。Wang等^[45]在2025年的最新研究探索了在成本更低的蓝宝石衬底上制备CZT薄膜。研究发现,薄膜最佳生长条件为蒸发源675℃,衬底450℃,优化后薄膜载流子迁移率寿命积可达 $6.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$,接近单晶薄膜。基于蓝宝石衬底制备的CZT薄膜构建的探测器在检测59.54 keV γ射线时展现出接近18.9%的能量分辨率,

较其他报道有显著提升^[24]。

需要特别指出的是,采用CSS技术可直接在薄膜晶体管(TFT)基板上制备CZT多晶薄膜[图4(f)]^[40],这一突破性进展为CZT薄膜在光电探测器等领域的直接应用提供了重要技术路径。目前,沉积过程中衬底温度过高会导致TFT电路板上的CZT薄膜发生破裂:高温会释放Al膜与ITO膜之间的界面应力并诱发形成微小凸起,致使ITO/CZT界面的结合强度超过ITO/Mo/Al/Mo界面,最终引发CZT薄膜的剥离失效。通过优化CSS设备的温控系统,将沉积温度

稳定控制在 150~300 °C 范围内,有望实现 TFT 基板上 CZT 薄膜的低温可靠生长。

当生长衬底与外延材料晶格匹配时,外延层可能呈现单一取向。CdTe 的晶格常数为 6.481 Å, ZnTe 的晶格常数为 6.103 Å,依据 Vegard 定律可计算出,当 CdTe 与 ZnTe 的摩尔比为 9:1 时, $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ 的晶格常数为 6.443 Å。GaAs, GaSb 衬底均具有与 CZT 相同的闪锌矿结构,且已被证实可用于外延生长 CZT 单晶薄膜^[23-25, 47-49]。其中, GaAs(001) 衬底的晶格常数为 5.653 Å, $\text{Cd}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{Te}$ 薄膜在其上外延晶格失配为 13.9%。2012 年, Gao 等^[48] 利用 CSS 法在 GaAs(001) 衬底上生长了 CZT(001) 单晶薄膜。研究表明:生长初期,薄膜由不同取向的小晶粒组成,呈多晶态;随着时间的延长,晶粒可通过自组装与横向拼接实现多晶薄膜向单晶薄膜的转变。2019 年, Wu 等^[23] 采用 CSS 在 GaAs(001) 衬底上制备出厚度达 1.1 mm、幅面尺寸为 12 mm × 12 mm 的 CZT 单晶薄膜[图 4(g, h)]。该薄膜 X 射线摇摆曲线半峰宽约 166", 位错密度为 $1.05 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$, 载流子迁移率寿命积为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$, 电子迁移率达到 $750 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。2023 年, Wan 等^[24] 在 GaAs(001) 衬底上外延生长了厚度超过 1 mm、尺寸达 5.08 cm (2 英寸) 的 CZT 单晶薄膜[图 4(i)], 进一步提升了薄膜的制备规模。然而,薄膜并不完全均匀,中心区域薄膜质量优于边缘区域,表现为更低的位错密度、更高的电阻率、更大的载流子迁移率寿命积以及更高的 X 射线探测灵敏度。这表明,大尺寸 CZT 单晶薄膜在均匀性方面仍有待进一步提升。

GaSb(001) 衬底的晶格常数为 6.096 Å, $\text{Cd}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{Te}$ 薄膜在其上外延晶格失配率仅为 5.7%, 低于 GaAs(001) 衬底,理论上 GaSb 衬底上的薄膜具有更高的质量。Li 等^[25] 采用 CSS 法在 GaSb(001) 衬底上成功外延生长了厚度约 88 μm 的 CZT 单晶薄膜。该薄膜表面平整, X 射线摇摆曲线半峰宽约 173", 电阻率达 $9.09 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子迁移率寿命积为 $3.55 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$ 。基于该薄膜构筑的探测器对 $^{241}\text{Am}@59.54 \text{ keV}$ γ 射线能谱分辨率达到 17%, 展现了 CZT 薄膜在低成本 X 射线探测与成像中的应用潜力。为进一步提升薄膜质量,李阳等^[50] 研究了热处理 GaSb 衬底对外延 CZT 薄膜质量的影响。结果

表明,将 GaSb 衬底经 600 °C 处理 180 s 后,可去除衬底表面大部分氧化物并保持衬底相对平整,该衬底上外延的 CZT 薄膜质量显著提升, X 射线摇摆曲线半峰宽约 94", 接近已报道的块状 CZT 单晶的结晶质量^[51]。

CSS 技术适用于 CZT 薄膜的快速生长,其生长速率可达每小时数十微米,显著高于其他生长技术,因而在产业化方面具有明显优势。此外, CSS 生长的薄膜通常具有较好的结晶性,在晶格匹配的衬底上可呈现单晶形态,晶界较少,有利于载流子的输运。然而, CSS 技术面临的主要挑战在于组分均匀性的控制,由于 Cd, Zn 和 Te 的升华速率存在差异,薄膜中心与边缘区域的组分可能差异明显。此外,现有常用衬底普遍存在晶格失配大或成本高的问题,限制了高质量 CZT 单晶薄膜的低成本制备。尽管如此,凭借高效率 and 相对较低的制备成本, CSS 仍被认为是当前最具产业化前景的 CZT 薄膜制备技术之一。

1.6 分子束外延法

分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE) 是一种在超高真空环境下制备单晶薄膜的方法。超高真空环境不仅可减少杂质干扰,还能延长原子在衬底表面的迁移时间,促进薄膜的有序生长。MBE 通过将高纯度原子或分子束低速沉积到加热的单晶衬底表面,使原子在衬底表面逐层排列,从而形成高质量单晶薄膜[图 5(a)]。其核心特点是对生长过程实现原子级控制。

2000 年, Kozlovsky 等^[26] 以高纯 Te, Zn, Cd 为源, 在 ZnTe 衬底上生长了 $\text{Cd}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{Te}$ 薄膜,形成了高质量的量子阱结构。2018 年, Lei 等^[27] 利用 MBE 在 GaSb (211)B 衬底上成功制备了 CdTe 薄膜[图 5(b, c)]。研究表明,在衬底上预先引入 150~200 nm 厚的缓冲层后,外延生长的 CdTe 薄膜位错密度从 10^6 cm^{-2} 降低至 10^5 cm^{-2} 。该缓冲层由交替排列的 ZnTe/CdTe 组成,不仅有效减少了 CdTe 薄膜中的失配位错,同时作为缺陷和杂质的吸收层,显著提升了外延薄膜的晶体质量。此外,近年来,研究者们尝试采用 MBE 技术在 GaAs(211)B 衬底上外延生长 CdTe(133)B 薄膜作为缓冲层,用于 HgCdTe 薄膜的外延生长^[28-29]。为进一步优化 CdTe 缓冲层质量,研究者在缓冲层与

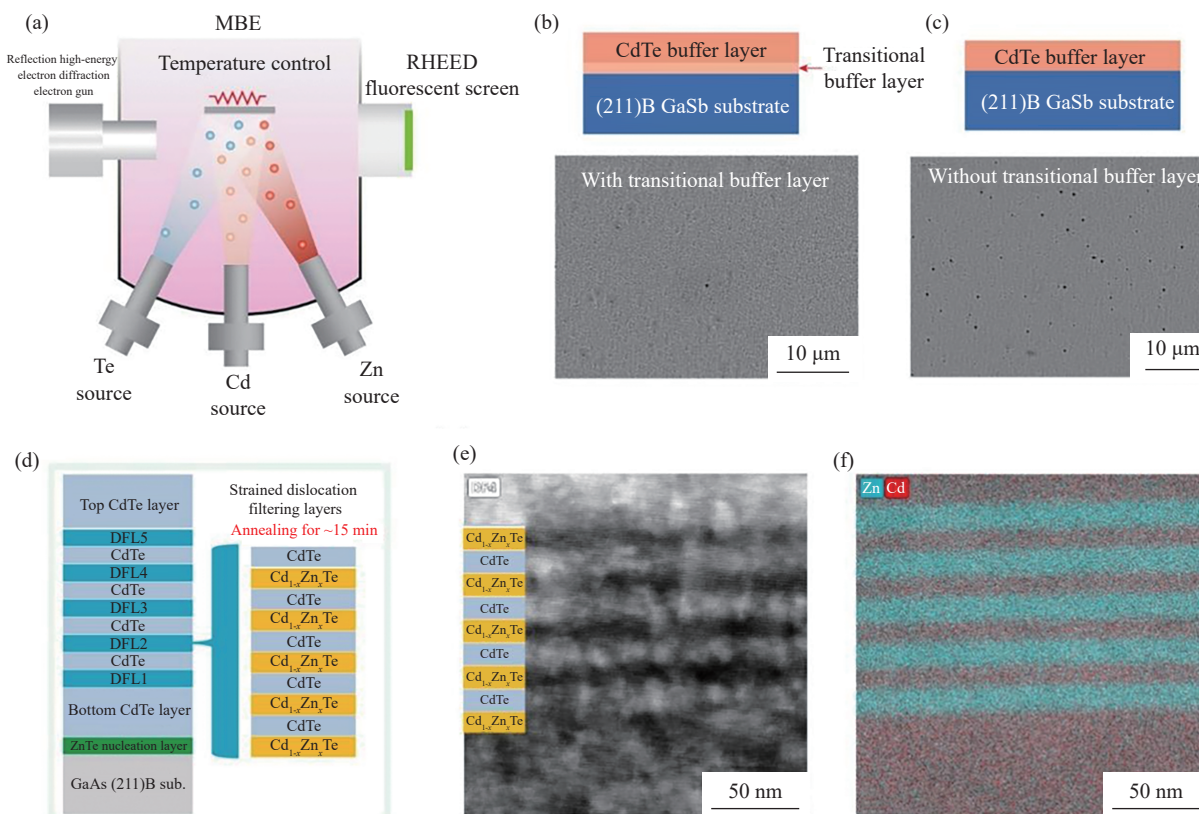


图5 MBE法制备CZT薄膜与CZT/CdTe超晶格: (a)MBE设备结构示意图; (b, c)MBE法制备的CdTe薄膜表面形貌, 其中(b)采用交替排列的ZnTe/CdTe作为过渡层; (d)GaAs(211)B衬底上生长的ZnTe(133)薄膜结构示意图, 采用CZT/CdTe超晶格作为位错过滤层; (e)图(d)中CZT/CdTe超晶格的截面TEM图像; (f)图(d)中CZT/CdTe超晶格的截面EDS面扫描图像

Fig. 5 CZT thin films and CZT/CdTe superlattice prepared by MBE method: (a) Schematic diagram of MBE system structure; (b, c) Surface morphology of CdTe thin films prepared by MBE, where (b) uses alternately stacked ZnTe/CdTe as a transition layer^[27]; (d) Schematic diagram of ZnTe(133) thin film grown on a GaAs(211)B substrate, employing a CZT/CdTe superlattice as a dislocation filtering layer^[28]; (e) Cross-sectional TEM image and (f) cross-sectional EDS elemental mapping image of CZT/CdTe superlattice in (d)^[29]

衬底之间引入了CZT/CdTe超晶格作为位错过滤层[图5(d~f)]。实验结果表明, 该位错过滤层能显著降低CdTe缓冲层的表面粗糙度, 并将位错腐蚀坑密度降至 10^5 cm^{-2} 量级。

MBE的核心优势在于其卓越的薄膜质量: 通过精确控制分子束流强度和衬底温度, 有望生长出缺陷密度极低的外延层, 且组分和掺杂浓度可精确到原子级别, 只是目前研究还没有做到。此外, MBE的低温生长特性有助于减少互扩散和热缺陷, 非常适合制备超晶格、量子阱等低维结构。然而, MBE的设备极其昂贵, 且需要超高真空环境, 维护成本极高, 并且生长速率极慢, 难以满足规模化生产需求。此外, MBE对衬底质量和表面处理要求极为苛刻, 任何污染或晶格失配都会严重影响薄膜质量。

因此, MBE目前仅适合在科研中制备高性能CZT单晶以及新型结构。

1.7 金属有机化学气相沉积法

金属有机化学气相沉积法(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)是一种可控性强的薄膜沉积方法。MOCVD法通常以金属有机前驱体和氢化物气体为反应源, 两种前驱体在相对较低的温度下发生化学反应, 进而在衬底表面沉积目标材料薄膜。Cohen等^[31]以二乙基锌、二甲基镉和二乙基碲作为金属有机前驱体, 以氢气为载气, 在CdTe(100)衬底上沉积了有序的CZT外延层[图6(a)]。CZT薄膜中Zn组分的含量由生长温度与反应腔中的气体组分共同决定, 成分控制过程简单。类似地, Devyatikh等^[32]采用MOCVD方法分别在GaAs(111)

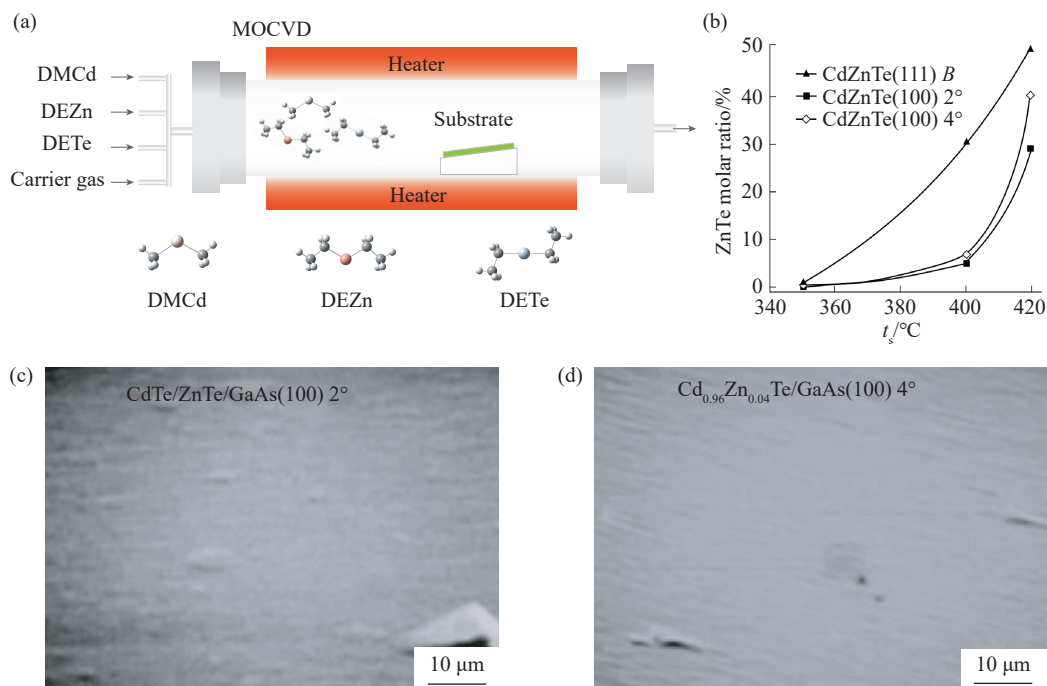


图6 MOCVD法制备的CdTe/ZnTe异质结与CZT薄膜: (a)MOCVD法制备CZT薄膜的过程示意图; (b)CZT薄膜中ZnTe摩尔比与生长温度的关系曲线; (c)MOCVD法制备的CdTe/ZnTe异质结表面形貌图; (d)MOCVD法制备的CZT薄膜表面形貌图

Fig. 6 Preparation of CdTe/ZnTe heterostructure and CZT thin films by MOCVD: (a) Schematic illustration of MOCVD process for CZT thin film deposition; (b) Variation curve of ZnTe molar ratio in CZT thin films as a function of growth temperature^[32]; (c) Surface morphology of CdTe/ZnTe heterostructure prepared by MOCVD^[32]; (d) Surface morphology of CZT thin film prepared by MOCVD^[32]

B和GaAs(100)衬底上外延生长了CdTe/ZnTe异质结和CZT薄膜[图6(b~d)], 所得薄膜表面平整。X射线衍射摇摆曲线测试结果显示, CZT薄膜的半峰宽为 $5' \sim 8'$, 表明其结晶质量较高。研究发现, 沉积温度对薄膜的生长速率、成分以及结构完整性均有显著影响, 通常温度越高, 薄膜中的Zn含量越高。然而, 影响薄膜结构质量的关键因素仍是衬底取向: 在GaAs(100)衬底上外延的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}(100)$ 薄膜, 其结构完整性优于在GaAs(111)B衬底上生长的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}(111)$ 薄膜。

MOCVD的优势在于兼顾了生长速率和薄膜质量, 通过调控有机前驱体的流量比, 可在较高速率下生长出高质量单晶薄膜, 同时具备优异的大面积均匀性和批次重复性, 适合10.16~15.24 cm (4~6英寸)衬底的大规模生产。然而, MOCVD也面临工艺复杂且成本高的挑战: 高纯度有机金属源价格昂贵且具有毒性, 增加了安全和环保压力; 反应温度和气相动力学对薄膜质量影响极大, 需精确优化数十项参数。尽管基于平衡薄膜性能与制备成本MOCVD被视为优选方案, 但目前以该方法制备的

CZT薄膜在尺寸和质量方面尚未展现出优势。

2 CZT薄膜的质量提升技术

薄膜的质量直接决定其实际应用潜力。目前, 直接生长的CZT薄膜在质量上与块状晶体仍存在一定差距。为提升CZT薄膜的性能, 研究者们从多方面展开深入研究, 包括优化生长参数、引入缓冲层以及采用后退火处理等, 以改善薄膜结晶质量、减少缺陷并提升光电性能。

2.1 生长参数优化

CZT薄膜生长参数是决定薄膜质量的关键因素, 其中温度是核心工艺参数之一, 对薄膜的沉积动力学过程和微观结构具有决定性影响。具体而言, 温度不仅能直接调控薄膜的沉积速率, 还会显著影响薄膜的晶粒尺寸、结晶质量等。通过精确控制生长温度, 可实现对薄膜微观结构和性能的有效调控。Huang等^[52]系统研究了沉积参数对CSS法制备CZT薄膜生长速率的影响。结果表明: 衬底温度在450 °C以下时, 生长速率保持恒定, 仅取决于蒸发源温度; 当衬底温度高于450 °C时, 生长速率下降;

当生长源温度为650 °C时,薄膜沉积速率最大可超过5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。Jiang等^[53]进一步探究了在不同衬底温度下沉积的CZT薄膜质量变化。研究表明,随着衬底温度的升高,CZT薄膜表面出现逆升华现象并形成凹坑,凹坑尺寸和深度随温度的升高而增大。这一现象可归因于Zn-Te键与Cd-Te键的键能差异:在高温条件下,键能较低的Cd-Te键优先断裂,导致Zn元素在薄膜表面富集,形成富Zn表层;Zn含量的增加使薄膜带隙增大,进而导致漏电流降低,电阻率增大,其中在500 °C下制备的CZT薄膜电阻率高达 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。基于优化衬底温度下制备的CZT薄膜构筑的探测器,展现出优异的光电性能,其响应时间在上升阶段和下降阶段分别为2 ms和4 ms。值得注意的是,该探测器在X射线照射下可清楚地区分空气、塑料和金属,展现出在下一代高灵敏度X射线探测系统中的巨大应用潜力。

由于GaAs衬底与CZT薄膜之间存在较大的晶格失配,外延过程中呈现典型的岛状生长模式(Volmer-Weber),失配晶畴在拼接融合时易产生穿透位错,最终在薄膜表面形成生长坑^[54-57]。当衬底温度较低时,孪晶与薄膜表面的交界处还可能产生针状缺陷^[58]。通过提高生长温度、降低初始成核速率以及改善成核层质量,有望有效降低针状缺陷的密度。

除了直接调控生长温度外,研究者们开发了两步生长法,该方法通过在薄膜生长的不同阶段设置差异化温度条件实现优化。具体而言,两步生长法主要包含两种工艺路径:低温成核-高温生长法与高温成核-低温生长法。

Guo等^[59]在蓝宝石衬底上外延生长ZnTe薄膜时,采用了低温成核(320 °C)-高温生长(440 °C)的两步生长法,结果表明该方法可以显著提高ZnTe薄膜的表面平整性、结晶质量及光学性质,且低温层的厚度是影响ZnTe薄膜质量的关键因素。当低温层厚度为21 nm时,外延生长的ZnTe薄膜质量最高。产生这一结果的原因,可能是低温层可减小并释放蓝宝石衬底和ZnTe薄膜之间由于晶格常数差异产生的应力,从而在低温层上生长出高质量的ZnTe薄膜。受此启发,Cao等^[60]开发了一种基于CSS的两步法工艺,在GaAs(001)衬底上成功实现了高质

量CZT薄膜的外延生长。第一步的低温预生长阶段(350 °C)可形成更为致密的成核层,这有效促进了后续晶粒融合和缺陷的湮灭过程。通过X射线摇摆曲线分析和光致发光光谱表征,证实了采用第一步350 °C低温生长与第二步430 °C高温生长相结合的策略,可获得具有最优晶体质量的CZT薄膜。值得注意的是,当第二步生长温度从430 °C提升至530 °C和600 °C时,受热应力增大和Zn含量增加的双重影响,薄膜的晶体质量呈现下降趋势。进一步的电流-电压特性测试和 α 粒子响应实验结果表明,CZT薄膜的电学性能与其结晶质量呈现正相关关系:结晶质量越优异,薄膜的电阻率越高,同时载流子输运性能也越突出。

高温成核-低温生长法多用于快速生长高质量CZT薄膜。Li等^[25]采用该两步法策略,分别在GaAs和GaSb衬底上实现了CZT单晶薄膜的外延生长。在GaAs衬底上生长时,第一步衬底温度设定为560 °C,该温度有助于在界面处形成高质量的成核层,因为较高的衬底温度能够促进晶粒的取向一致,增大畴区尺寸,减少畴界面和位错。然而,过高的温度可能导致薄膜发生逆升华。第二步中,衬底温度降低至450 °C,此时蒸发源与衬底之间的温差增大,从而可提高薄膜生长速率,实现CZT单晶薄膜的快速生长。对于GaSb衬底,由于其熔点较低(710 °C),因此两步法通过调控生长源的温度实现高质量薄膜制备。第一步,将源温度保持在600 °C,以便在较低的源温度下形成致密的薄膜;第二步,将源温度升高至710 °C,以更快的速度形成较厚的薄膜。在此过程中,GaSb的衬底温度始终保持在180 °C。这种高温成核-低温生长的两步法工艺,可在较短时间内制备出厚度达数百微米的高质量CZT薄膜。

2.2 缓冲层技术

GaAs是目前最常用的CZT单晶薄膜外延衬底,但由于GaAs与CZT的晶格失配较大,外延界面容易形成较多失配位错。为了延缓界面应力的释放,研究者们通常在薄膜与衬底间插入晶格常数与衬底差异更小的缓冲层[图7(a)],从而减少穿透位错的产生。

Leo等^[61]研究了在GaAs(100)衬底上外延CdTe

薄膜时,不同厚度 ZnTe 缓冲层对外延层的影响。研究发现:当 ZnTe 缓冲层厚度在 0~10 nm 范围内时,随着外延界面失配位错的减少以及 ZnTe 中缺陷密度的快速降低, CdTe 薄膜的结晶质量显著提升;当 ZnTe 缓冲层厚度增加至 300~500 nm 时, CdTe 薄膜的结晶质量达到最佳。这种缓冲层厚度对薄膜形貌和质量的影响,可能与 ZnTe 缓冲层的缺陷分布和表面粗糙度有关。具体而言:当 ZnTe 缓冲层厚度为 300 nm 时, CdTe 薄膜的表面粗糙度最低;而当 ZnTe 缓冲层厚度超过 500 nm 时, CdTe 薄膜的粗糙度迅速增大。类似地, Liu 等^[62]通过在 GaAs(211) 衬底上引入 ZnTe 缓冲层,成功制备了高质量的 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ (133) 薄膜[图 7(b)],该方法有望应用于外延 HgCdTe。ZnTe 缓冲层的引入,显著提升了 CZT 薄膜的晶体质量,使腐蚀坑密度从 $3.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 降低至 $2.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ [图 7(c, d)], X 射线摇摆曲线半峰宽从 $57''$ 减小到 $34''$,表面粗糙度从 9.88 nm 降至 3.69 nm。此外, ZnTe 缓冲层的引入促进了 CZT 薄膜与 ZnTe 界面处 CuPt 型有序 CZT 区的形成,从而有效地释放了 GaAs 与 ZnTe 界面处的失配应变。

在 GaSb 衬底上引入 ZnTe 缓冲层,同样有助于提高外延 CZT 薄膜的结晶质量[图 7(e~g)]。Li 等^[63]的研究表明,在 GaSb 衬底上直接沉积 CZT 薄膜,可能导致高密度的晶格失配孪晶和亚晶畴区的形成[图 7(f)]。然而,若在 GaSb 衬底上先沉积约 3 μm 的 ZnTe 缓冲层,再以其作为外延生长 CZT 薄膜的衬底,则可有效抑制外延层中晶格失配孪晶和亚晶畴区的产生[图 7(g)]。当沉积温度为 495 K 时,可获得表面光滑且结晶质量优异的 ZnTe 缓冲层,进而制备出高质量的 CZT 外延层。此时, CZT 薄膜的(004) 峰 X 射线摇摆曲线半峰宽仅为 $85''$ 。

2.3 退火处理技术

退火处理是改善 CZT 薄膜质量的有效方法之一。根据退火氛围的不同,主要可分为两类:一类是在大气氛围或真空中进行的常规退火,另一类是引入蒸发源的辅助退火[图 8(a)]。

Chander 等^[64]采用电子束真空镀膜技术,在玻璃和 ITO 衬底上沉积了厚度为 400 nm 的 CZT 薄膜,并系统研究了 150, 300 和 400 $^{\circ}\text{C}$ 三个退火温度对 CZT 薄膜结构与性质的影响。研究结果表明,随着

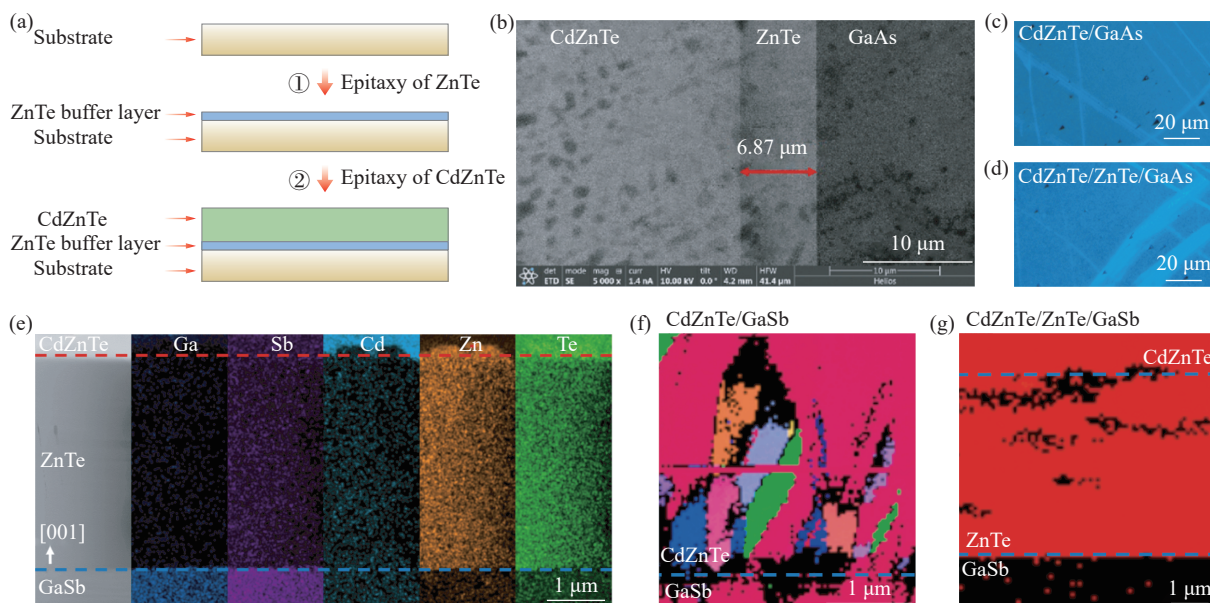


图 7 (a) 含有缓冲层的 CZT 薄膜生长过程示意图; (b) CdZnTe/ZnTe/GaAs 薄膜的截面 SEM 图像; (c) GaAs 和 (d) ZnTe/GaAs 衬底上生长 CZT 薄膜经腐蚀后的表面形貌; (e) CdZnTe/ZnTe/GaSb 薄膜的截面 TEM 图像与 EDS 面扫描图像; (f) GaSb 和 (g) ZnTe/GaSb 衬底上制备的 CZT 薄膜截面 EBSD 图像

Fig. 7 (a) Schematic diagram of the growth process of CZT thin film with a buffer layer; (b) Cross-sectional SEM image of the CdZnTe/ZnTe/GaAs thin film^[62]; Surface morphology of CZT thin film grown on (c) GaAs and (d) ZnTe/GaAs substrates after etching^[62]; (e) Cross-sectional TEM image and EDS elemental mapping of CdZnTe/ZnTe/GaSb thin film^[63]; (f) Cross-sectional EBSD image of CZT thin film grown on GaSb and (g) ZnTe/GaSb substrate^[63]

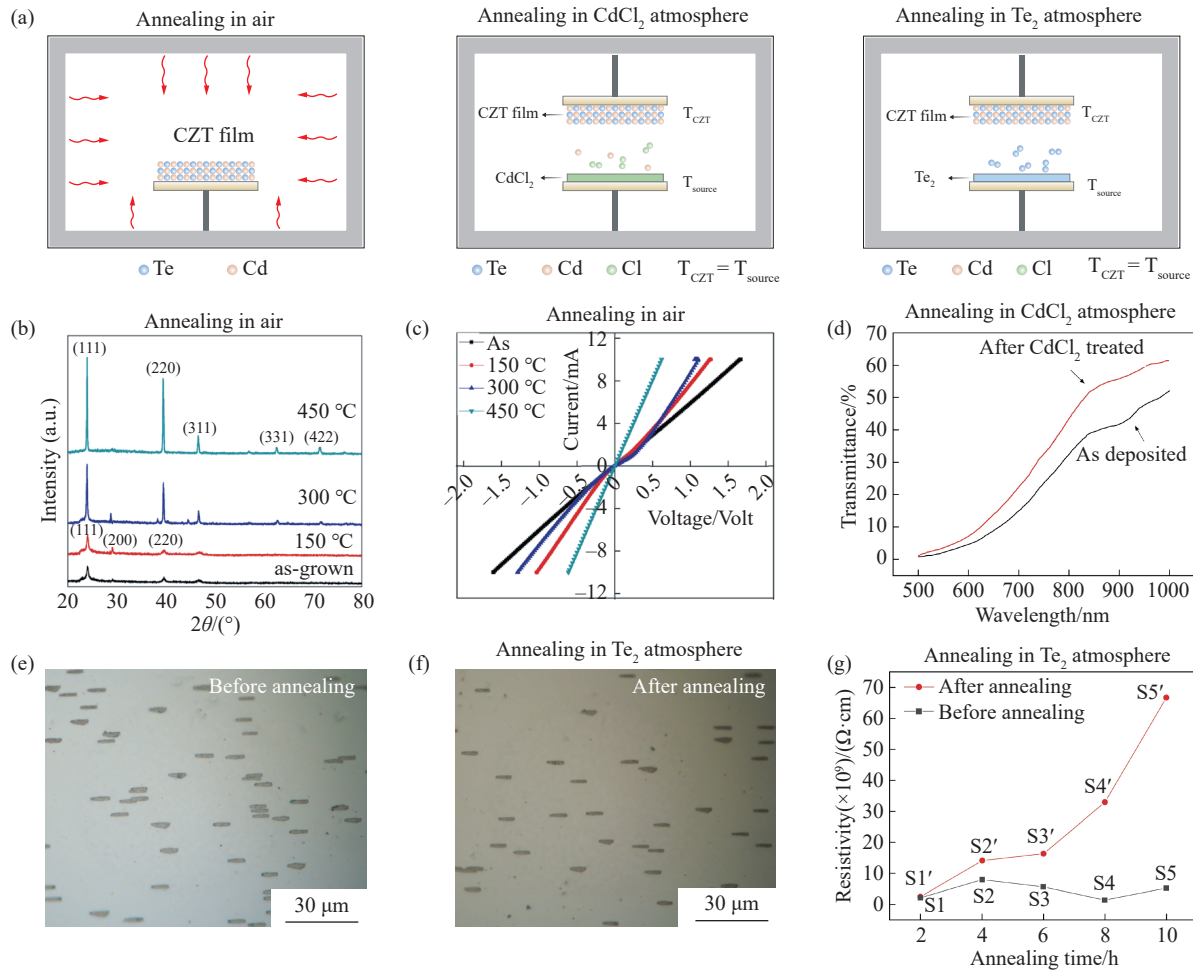


图8 (a)CZT薄膜在不同氛围中退火的示意图;(b)大气氛围中不同温度下退火的CZT薄膜XRD与(c)电学测试结果;
(d)CdCl₂氛围退火前后的透射光谱;(e, f)Te₂氛围退火前后CZT薄膜表面的位错腐蚀坑密度变化;
(g)Te₂氛围中CZT薄膜经历不同退火时间前后的电阻率变化

Fig. 8 (a) Schematic diagram of CZT thin films annealed in different atmospheres; (b) XRD patterns and (c) electrical test results of CZT thin films annealed at different temperatures in air atmosphere^[64]; (d) Transmission spectra before and after annealing in CdCl₂ atmosphere^[52]; (e, f) Changes in dislocation etch pit density on surface of CZT thin films before and after annealing in Te₂ atmosphere^[65]; (g) Changes in resistivity of CZT thin films before and after different annealing durations in Te₂ atmosphere^[65]

退火温度的升高, 薄膜结晶性提高, 晶粒取向发生变化, 同时光透过率增大, 光学带隙减小, 电导率增大。

在辅助退火方面, Huang等^[52]在退火过程中引入CdCl₂蒸汽, 利用Cl作为类氢施主杂质的特性, 有效促进了晶粒生长、钝化晶界并补偿Cd空位, 从而显著提升了薄膜结晶质量, 使薄膜带隙从1.56 eV降低至1.53 eV。Sharma等^[66]对比研究了大气环境、CdCl₂和MgCl₂三种不同氛围下, 退火温度对CZT薄膜的影响。结果表明, 在300 °C下退火的CZT薄膜比较适合用于太阳能电池的吸收层。其中, 空气和

CdCl₂处理的薄膜表现出了欧姆特性, 且电导率有随退火温度升高而减弱的趋势, 而MgCl₂处理的薄膜电学性能变化则无明显规律。形貌表征显示, 未经处理的薄膜晶粒呈砾状, 经300 °C空气退火后晶粒尺寸增大, 而CdCl₂和MgCl₂处理的薄膜则分别形成了细长的鹅卵石状和多面体鹅卵石状晶粒结构。

Te氛围退火是改善CZT薄膜缺陷和载流子输运特性的常用方法。Li等^[67]将CZT薄膜置于Te氛围中, 在350 °C下退火10 h, 使薄膜的位错腐蚀坑密度从 $2.29 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 降低至 $1.56 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$, 电阻率从 $1.64 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 提升至 $4.16 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 漏电流从

3×10^{-8} A降低至 9×10^{-9} A, 载流子迁移率寿命积从 $5.15 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$ 提升至 $8.11 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$ 。Wan等^[65]将Te氛围退火温度提高至400 °C, 经过2~4 h退火处理后, CZT薄膜性能也得到了显著提升。薄膜的电阻率从 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 提升至 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子迁移率寿命积从 $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$ 增大至 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$, 位错密度从 $3.28 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 降低至 $2.52 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 。

3 结束语

近年来, CZT薄膜因其优异的光电性能, 在薄膜光伏电池、红外探测成像以及X射线探测等领域的应用潜力日益凸显, 其制备技术也取得了显著进展。本文综述了CZT薄膜的气相沉积方法, 其中: 物理气相传输、热壁外延、真空热蒸发、磁控溅射、近空间升华等方法, 具有设备简单、成本低廉的优势, 但在薄膜均匀性和结晶质量方面仍面临一定挑战; 分子束外延与金属有机化学气相沉积能实现更高的薄膜质量和更精确的成分控制, 但其设备复杂、成本较高, 主要用于实验室研究或高端器件。众多制备方法中, 近空间升华法因其具备较高的薄膜结晶质量和可扩展性, 被认为是有望应用于大面积CZT薄膜制备的技术。此外, 本文总结了提升CZT薄膜质量的三种主要策略: 一是生长参数优化, 通过精确控制生长温度、压力、气氛等参数, 可有效改善薄膜的结晶性和表面形貌; 二是引入缓冲层, 可以缓解衬底与薄膜之间的晶格失配, 减少缺陷密度, 从而提高薄膜质量; 三是退火处理, 能够消除薄膜中的残余应力, 补偿缺陷, 进一步优化薄膜的电学性能。

尽管实验室级CZT薄膜的制备已取得显著进展, 但其质量仍低于熔体法制备的CZT块状晶体。要实现CZT薄膜的实际应用, 仍面临诸多挑战。首先, 需要进一步优化现有的制备方法或开发效率更高、成本更低、环境更友好的制备技术, 以满足大规模应用的需求。其次, 深入研究薄膜生长机理和缺陷形成机制, 可为制备高质量CZT薄膜提供理论指导。此外, 探索新型低成本且工艺成熟的衬底材料、开发多缓冲层的异质结构、研究新型退火氛围与工艺等, 将为CZT薄膜的性能提升和应用拓展带来新机遇。最后, 当前所有CZT薄膜均是沉积在衬

底上的, 若要应用于X射线探测等领域, 如何无损去除衬底或尽量减少衬底带来的干扰仍是亟待解决的问题。相信通过科研工作者的不懈努力, CZT薄膜的制备和应用将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] CHANDER S, DE A K, DHAKA M S. Towards CdZnTe solar cells: an evolution to post-treatment annealing atmosphere [J]. *Solar Energy*, 2018, 174: 757-761.
- [2] BASHIR K, MEHBOOB N, ALI A, et al. Fabrication and characterization of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ thin films for photovoltaic applications [J]. *Materials Letters*, 2021, 304: 130737.
- [3] SHARMA R, CHUHADIYA S, KAMLESH, et al. CdZnTe thin films as proficient absorber layer candidates in solar cell devices: a review [J]. *Energy Advances*, 2023, 2(12): 1980-2005.
- [4] REDDY M, PETERSON J M, LOFGREEN D D, et al. MBE growth of HgCdTe on large-area Si and CdZnTe wafers for SWIR, MWIR and LWIR detection [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9): 1274-1282.
- [5] REDDY M, PETERSON J M, VANG T, et al. Molecular beam epitaxy growth of HgCdTe on large-area Si and CdZnTe substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, 40(8): 1706-1716.
- [6] TSYBRII Z, BEZSMOLNYY Y, SVEZHENTSOVA K, et al. HgCdTe/CdZnTe LPE epitaxial layers: from material growth to applications in devices [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 529: 125295.
- [7] NAN R H, WANG P F, JIAN Z Y, et al. Investigation on electrical transport properties of CdZnTe pixel detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(20): 206101.
- [8] ABBENE L, PRINCIPATO F, GERARDI G, et al. Room-temperature X-ray response of cadmium-zinc-telluride pixel detectors grown by the vertical bridgman technique [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, 27(2): 319-328.
- [9] MCCOY J J, KAKKIRENI S, GILVEY Z H, et al. Overcoming mobility lifetime product limitations in vertical bridgman production of cadmium zinc telluride detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(7): 4226-4234.
- [10] LI Z W, CHENG J X, LIU F, et al. Research on the

- technological progress of CZT array detectors [J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 725.
- [11] GAO X Y, ZHU S F, ZHU X H, et al. PVT growth of exfoliated CdZnTe polycrystalline thick films based on stress mismatch mechanism [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(16): 12253-12258.
- [12] MOCHIZUKI K, TAKAHASHI J, NAKAMURA N. Thin film growth of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ and its application to X-ray sensor [J]. *Physica Status Solidi C*, 2015, 12(6): 528-531.
- [13] CHANDER S, DHAKA M S. Enhanced structural, electrical and optical properties of evaporated CdZnTe thin films deposited on different substrates [J]. *Materials Letters*, 2017, 186: 45-48.
- [14] GAO X Y, SUN H, YANG D Y, et al. Large-area CdZnTe thick film based array X-ray detector [J]. *Vacuum*, 2021, 183: 109855.
- [15] ZHA G Q, ZHOU H, GAO J N, et al. The growth and the interfacial layer of CdZnTe nano-crystalline films by vacuum evaporation [J]. *Vacuum*, 2011, 86(3): 242-245.
- [16] KIM B J, WANG J F, LALEV G M, et al. Growth and strain investigation of $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}/\text{GaAs}$ by hot-wall epitaxy [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 80(3): 581-585.
- [17] TANG Y H, YIN Y K, CHEN T J. High quality CdZnTe (100)/Si crystal films grown by HWE [C]// *Proceedings of ISES World Congress*, 2007(Vol.I-Vol.V). Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 1099-1102.
- [18] VUICHYK M, RASHKOVETS'KYI L, LAVORYK S, et al. Forming of CdZnTe thin films grown by hot wall epitaxy and their properties [J]. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2021, 22(4): 638-643.
- [19] MALKAS H, KAYA S, YILMAZ E. Effects of substrate temperature on the microstructure and morphology of CdZnTe thin films [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(11): 4011-4017.
- [20] GAO X Y, ZHU X H, SUN H, et al. Preparation and characterization of CdZnTe multilayer films by repeated RF magnetron sputtering [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(5): 4467-4474.
- [21] WANG T Y, HUANG J, CHEN Z R, et al. The properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ films prepared by RF magnetron sputtering [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(8): 4594-4600.
- [22] ZENG D M, GUO D, REN X. Morphology-property relationships of CdZnTe films prepared via radio frequency magnetron sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2023, 768: 139685.
- [23] WU S H, ZHA G Q, CAO K, et al. The growth of CdZnTe epitaxial thick film by close spaced sublimation for radiation detector [J]. *Vacuum*, 2019, 168: 108852.
- [24] WAN X, CAO K, LI Y, et al. Preparation and characterization of large-sized CdZnTe epitaxial single crystal [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, 1056: 168625.
- [25] LI Y, CAO K, ZHA G Q, et al. An alternative GaSb substrate allowing close-spaced sublimation of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ epitaxial thick film for radiation detectors [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 147: 106688.
- [26] KOZLOVSKY V I, KRYSA A B, KOROSTELIN Y V, et al. MBE growth and characterization of ZnTe epilayers and ZnCdTe/ZnTe structures on GaAs(100) and ZnTe (100) substrates [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 214-215: 35-39.
- [27] LEI W, REN Y L, MADNI I, et al. Low dislocation density MBE process for CdTe-on-GaSb as an alternative substrate for HgCdTe growth [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 96-102.
- [28] PAN W W, GU R J, ZHANG Z K, et al. Defect engineering in MBE-grown CdTe buffer layers on GaAs (211)B substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(9): 4869-4883.
- [29] PAN W W, MA S, SUN X, et al. Structural properties of MBE-grown CdTe (133)B buffer layers on GaAs (211)B substrates with CdZnTe/CdTe superlattice-based dislocation filtering layers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(18): 185301.
- [30] JOHNSON S M, VIGIL J A, JAMES J B, et al. MOCVD grown CdZnTe/GaAs/Si substrates for large-area HgCdTe IRFPAs [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1993, 22: 835-842.
- [31] COHEN K, STOLYAROVA S, AMIR N, et al. MOCVD growth of ordered $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ epilayers [J]. *Journal of*

- Crystal Growth, 1999, 198-199: 1174-1178.
- [32] DEVYATYKH G G, MOISEEV A N, KOTKOV A P, et al. Metalorganic vapor-phase epitaxy of ZnTe and CdZnTe on GaAs [J]. Inorganic Materials, 2002, 38(2): 99-105.
- [33] KARTOPU G, FAN Q, OKLOBIA O, et al. Combinatorial study of the structural, optical, and electrical properties of low temperature deposited $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) thin films by MOCVD [J]. Applied Surface Science, 2021, 540: 148452.
- [34] TAKAHASHI J, MOCHIZUKI K, HITOMI K, et al. PVT growth of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0.04$) films sensitive to radial rays [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 269(2-4): 448-453.
- [35] MOGER S N, MAHESHA M. Investigation on ZnTe/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ heterostructure for photodetector applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 315: 112294.
- [36] ZENG D, MU Y, MENG J, et al. Properties of Al doped CdZnTe film by aluminium induced crystallization [J]. Surface Engineering, 2016, 32(3): 190-193.
- [37] COLEGROVE E, ALBIN D S, MOUTINHO H R, et al. Scalable ultrafast epitaxy of large-grain and single-crystal II - IV semiconductors [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 2426.
- [38] 苏虹, 查钢强, 高俊宁, 等. 近空间升华法制备CdZnTe厚膜及其性能研究 [J]. 功能材料, 2012, 43(23): 3322-3324, 3328.
- [39] HUANG J, CHEN Z R, BIE J Y, et al. Novel CdZnTe micro pillar films deposited by CSS method [J]. Materials Letters, 2020, 263: 127277.
- [40] LI Y W, ZHANG W Y, CAO K, et al. Cracking mechanism of CdZnTe polycrystalline film deposited on TFT circuit board at high temperature by close-spaced sublimation method [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 131: 105821.
- [41] YU B, XU C G, XIE M X, et al. Deposition of CdZnTe films with CSS method on different substrates for nuclear radiation detector applications [J]. Crystals, 2022, 12(2): 187.
- [42] ZHANG Y L, WANG L J, XU R, et al. The microstructure, optical and electrical property of CdZnTe thick films grown from a CSS method [J]. Journal of Crystal Growth, 2015, 431: 10-14.
- [43] HUANG J, GU Q M, YANG F, et al. Growth and properties of CdZnTe films on different substrates [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 364: 444-448.
- [44] WU Y L, XU H T, JI H H, et al. Growth of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ thin films with high Zn content by close-spaced sublimation [J]. Vacuum, 2016, 132: 106-110.
- [45] WANG Q F, HUANG H F, XU K, et al. Enhancement of detection performances of cadmium zinc telluride (CdZnTe) radiation detectors through sapphire substrates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177952.
- [46] TAO J, XU H T, ZHANG Y L, et al. Interface chemistry of CdZnTe films studied by a peel-off approach [J]. Applied Surface Science, 2016, 388: 180-184.
- [47] LIU Y, WU W, ZHANG X L, et al. Investigation of the CdZnTe (211) and (133) films grown on GaAs (211) controlled by temperature: experiment and first-principles calculations [J]. Applied Surface Science, 2024, 649: 159154.
- [48] GAO J N, JIE W Q, YUAN Y Y, et al. One-step fast deposition of thick epitaxial CdZnTe film on (001)GaAs by close-spaced sublimation [J]. CrystEngComm, 2012, 14(5): 1790-1794.
- [49] LIU Y, ZHA G Q, CAO K, et al. Growth of CdZnTe (211) epilayers on GaAs by close spaced sublimation as an alternative substrate for HgCdTe growth [J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 133: 104857.
- [50] 李阳, 曹昆, 介万奇, 等. 热处理GaSb衬底对近距离升华法制备CdZnTe外延膜的影响 [J]. 人工晶体学报, 2024, 53(10): 1705-1711.
- [51] MACKENZIE J, KUMAR F J, CHEN H. Advancements in THM-grown CdZnTe for use as substrates for HgCdTe [J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(11): 3129-3132.
- [52] HUANG J, WANG L J, TANG K, et al. Growth of high quality CdZnTe films by close-spaced sublimation method [J]. Physics Procedia, 2012, 32: 161-164.
- [53] JIANG R, KANG Y, CAO K, et al. Optimized substrate temperature for high-quality CdZnTe epitaxial film in X-ray flat panel detectors [J]. Vacuum, 2024, 230: 113705.
- [54] CAO K, JIE W Q, ZHA G Q, et al. Nucleation and islands growth of CdZnTe(001) epitaxial films on GaAs (001) substrates by close spaced sublimation [J]. Journal

- of Crystal Growth, 2018, 498: 197-201.
- [55] CAO K, JIE W Q, ZHA G Q, et al. Origin and evolution of threading dislocation in CdZnTe(001)/GaAs(001) epilayer grown by close spaced sublimation [J]. Applied Surface Science, 2020, 504: 144431.
- [56] CAO K, JIE W Q, ZHA G Q, et al. Analysis of dislocations in CdZnTe epitaxial film with kelvin probe and conductive atomic force microscopy [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(6): 3907-3912.
- [57] CHENG R Y, ZHA G Q, CAO K, et al. The growth pits filling mechanism of CdZnTe epitaxial film prepared by close-spaced sublimation based on the first-principles calculation [J]. Journal of Crystal Growth, 2023, 618: 127303.
- [58] CHENG R Y, CAO K, ZHA G Q, et al. Formation mechanism and elimination of needle defects on CdZnTe epitaxial films prepared by close-spaced sublimation [J]. Applied Surface Science, 2024, 657: 159813.
- [59] GUO Q X, NADA M, DING Y L, et al. Low-temperature buffer layer effects on the quality of ZnTe epilayers grown on sapphire substrates [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(12): 123525.
- [60] CAO K, JIE W Q, ZHA G Q, et al. Improvement of crystalline quality of CdZnTe epilayers on GaAs(001) substrates with a two-step growth by close spaced sublimation [J]. Vacuum, 2019, 164: 319-324.
- [61] LEO G, LONGO M, LOVERGINE N, et al. Influence of a ZnTe buffer layer on the structural quality of CdTe epilayers grown on (100)GaAs by metalorganic vapor phase epitaxy [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 1996, 14(3): 1739-1744.
- [62] LIU Y, ZHANG X L, GAO Z H, et al. Growth of high quality CdZnTe (133) epilayers on GaAs (211) substrate with $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{ZnTe}$ buffer layer by close spaced sublimation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 977: 173261.
- [63] LI Y, ZHANG X L, WAN X, et al. Improvement of crystallinity of CdZnTe epilayers on GaSb substrates by ZnTe buffer layer [J]. Vacuum, 2023, 217: 112551.
- [64] CHANDER S, DHAKA M S. Optimization of structural, optical and electrical properties of CdZnTe thin films with the application of thermal treatment [J]. Materials Letters, 2016, 182: 98-101.
- [65] WAN X, LI Y, TAN T T, et al. Effects of annealing in Te_2 atmosphere on photoelectric properties and carrier transport properties of CdZnTe films [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2023, 153: 107158.
- [66] SHARMA R, HIMANSHU, PATEL S L, et al. Effect of different annealing conditions on CdZnTe thin films for absorber layer applications [J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 33: 102204.
- [67] LI Y, CAO K, ZHA G Q, et al. Effects of annealing on the properties of CdZnTe epitaxial thick films deposited on p-GaAs using close-spaced sublimation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 1015: 165752.

Recent Progress on Preparation of Cadmium Zinc Telluride Thin Films

YU Mengshi^{1,2}, HU Siqu², HUAI Yangyang²

(1. Jiangxi Copper Corporation Limited, Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: Cadmium zinc telluride (CdZnTe) thin films, characterized by a high atomic number, tunable optical bandgap, and excellent photoelectric conversion performance, hold significant potential in advanced applications such as thin-film photovoltaic cells, infrared imaging, and high-energy radiation detection. However, achieving low-cost fabrication and high-quality film formation remains a critical challenge for their industrial deployment. In this work, we systematically reviewed the vapor deposition techniques for CdZnTe thin films. While methods such as physical vapor transport, vacuum thermal evaporation, hot-wall epitaxy, magnetron sputtering, and close spaced sublimation offer advantages in simplicity and cost-effectiveness, they suffer from issues such as poor film uniformity and high lattice defect density. In contrast, molecular beam epitaxy and metal-organic chemical vapor deposition enable atomic-level precision and superior lattice integrity, but are constrained by high process costs and complex equipment, limiting their scalability. To enhance the quality of CdZnTe thin films, this work highlighted three key optimization strategies: (1) refining growth parameters for precise process control, (2) improving heteroepitaxial quality through interfacial buffer layer design, and (3) mitigating intrinsic defects via annealing treatments. Ultimately, we concluded that balancing film performance with production costs and overcoming the technical challenges of large-area uniform film deposition would be critical for the future advancement of CdZnTe thin films.

Key words: cadmium zinc telluride thin film; vapor deposition; growth parameter; interfacial buffer layer; annealing treatment

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.001

引文格式: 于梦诗, 胡思奇, 怀杨杨. 碲锌镉薄膜生长技术的研究进展[J]. 铜业工程, 2026(1): 1-18.

YU Mengshi, HU Siqu, HUAI Yangyang. Recent progress on preparation of cadmium zinc telluride thin films [J]. Copper Engineering, 2026(1): 1-18.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc