

〈材料与器件〉

碲锌镉衬底表面处理研究

江先燕, 丛树仁, 宁 卓, 起文斌, 刘 燕, 宋林伟, 孔金丞
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 主要从碲锌镉表面处理工艺及表面位错缺陷揭示两个方面对碲锌镉衬底的表面处理研究进行了详细介绍。从表面处理机理和工艺参数对衬底表面的影响两个方面介绍了机械研磨、机械抛光、化学机械抛光以及化学抛光4种表面处理工艺。同时, 介绍了能揭示碲锌镉不同晶向表面的位错缺陷的Everson、Nakagawa及E_{Ag}三种化学腐蚀液。

关键词: 碲锌镉(CZT); 表面处理; 位错揭示

中图分类号: TN213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2023)11-1242-14

Surface Processing of Cadmium Zinc Telluride Substrates

JIANG Xianyan, CONG Shuren, NING Zhuo, QI Wenbin, LIU Yan, SONG Linwei, KONG Jincheng
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In this study, the surface processing of cadmium zinc telluride (CZT) substrates was studied, which revealed surface dislocation defects. The surface processing mechanism and influence of the process parameters on the surface of the CZT substrates, including mechanical grinding, mechanical polishing, chemical mechanical polishing, and chemical polishing, are presented. Moreover, three types of chemical etchants, Everson, Nakagawa, and E_{Ag}, which reveal dislocation defects on the surface of CdZnTe with different crystal orientations, were also investigated.

Key words: cadmium zinc telluride (CZT), surface processing, dislocation revealing

0 引言

碲锌镉(CZT)单晶材料作为碲镉汞(MCT)红外焦平面探测器的首选衬底材料, 其表面质量的优劣将直接影响碲镉汞薄膜材料的晶体质量以及成品率, 故生产出外延级别的碲锌镉衬底表面是极其重要的。众所周知, 单晶硅(Si)是半导体行业的鼻祖, 其大尺寸、高单晶率生长技术以及晶片表面处理技术都已相当的成熟^[1-7], 半导体行业中的很多半导体单晶材料生长技术及晶片表面处理技术都借鉴于单晶硅, 碲锌镉单晶的生长及表面处理也不例外^[8-13]。表1为碲锌镉(Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te)与单晶硅的基本物理性质对比, 如表所示, 与单晶硅相比, 碲锌镉材料是三元化合物且热导率低于单晶硅, 这意味着相比于只由一种元素组成的单晶硅的生长, 大尺寸、高单晶率的碲锌镉单晶的生长会更加困难, 如目前已生产的单晶硅直径可达

到18 in (450 mm)^[3], 而国内外已报道的碲锌镉单晶尺寸仅为5 in, 6 in 单晶生长技术还处于突破阶段^[14-16]。另外, 从表中可以看到, 碲锌镉的弹性模量及泊松比都低于单晶硅, 说明碲锌镉单晶很脆, 在加工过程中易出现裂片、崩边、磨料嵌入等问题, 故其表面加工难度会比单晶硅的表面加工更加困难。因此, 如何通过优化现有工艺进一步获得一个无损伤、表面粗糙度低以及洁净、光亮的碲锌镉衬底表面一直是碲锌镉表面处理技术主要的发展方向。

目前, 碲锌镉单晶片的主要表面加工处理技术包含机械研磨、机械抛光、化学机械抛光、化学抛光以及表面清洗。其中, 机械研磨、机械抛光以及化学机械抛光工艺都会存在磨料残留、磨料嵌入、表面划痕较多、粗糙度较高等一系列问题^[17], 要解决这些问题需要对相应的表面处理技术进行了解和掌握, 包括表面处理技术的基本原理以及影响因素。本文将从碲锌

收稿日期: 2022-10-24; 修订日期: 2023-02-21.

作者简介: 江先燕(1993-), 女, 博士, 主要从事红外材料与器件方面的研究, E-mail: jxy0709_kmwlyjs@163.cm.

通信作者: 丛树仁(1978-), 男, 博士, 主要从事红外材料与器件方面的研究, E-mail: congshuren@126.com.

镉表面处理工艺和揭示碲锌镉表面位错的腐蚀液种类两个方面对碲锌镉表面处理技术进行简要介绍。

1 表面处理工艺

碲锌镉单晶作为生长外延碲镉汞薄膜材料的首选衬底材料, 要求其表面不能存在机械损伤及缺陷密度大于 10^5 cm^{-2} 的微观缺陷, 如线缺陷、体缺陷等。衬底表面的机械损伤可通过后期的表面处理工艺进行去除^[18], 而微观缺陷只能通过提高原材料的纯度以及合

理调控晶体的生长过程方能得到有效改善。经垂直梯度凝固法或布里奇曼法生长出的低缺陷密度的碲锌镉体会先被切割成具有固定方向(如(111)方向)和厚度的碲锌镉晶片, 然后再经过一系列的表面处理工艺才能用于碲镉汞薄膜的生长。通常情况下, 碲锌镉晶片会经历机械研磨、机械抛光、机械化学抛光及化学抛光等表面处理工艺, 通过这些工艺处理后的晶片才能达到外延级水平, 因此本部分主要详细介绍上述4种表面处理工艺。

表1 碲锌镉(Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te)与单晶硅(Si)的基本物理性质对比

Table 1 Comparison of physical properties between cadmium zinc telluride (Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te) and monocrystalline silicon (Si)

Parameters	CdZnTe	Si
Lattice constants $a/(\text{\AA})$	6.485(300 K)	5.43(300 K)
Equilibrium segregation coefficient	1.35	-
Expansion coefficient $\beta/(\text{K}^{-1})$	4.96×10^{-6} (300 K)	2.6×10^{-6} (300 K)
Elastic modulus $E/(\text{MPa})$	7.17×10^4	1.31×10^5
Thermal conductivity $\kappa/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.01(300 K)	1.5(300 K)
Thermal diffusivity $D_0/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	6.0×10^{-7} (300 K)	90.0
Poisson's ratio	0.16	0.28
Density $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	5.68	2.33

1.1 机械研磨

机械研磨工艺的研磨机理为: 加工工件与研磨盘上的磨料或研磨剂接触时, 工件表面因受到形状不规则磨料的挤压而产生破裂或裂纹, 在加工工件与研磨盘的相互运动下, 这些破裂的碎块会随着不规则磨料的滚动而被带离晶片表面, 如此反复, 从而达到减薄晶片厚度及获得低损伤表面的加工目的, 机械研磨装置及磨削原理示意图如图1所示。

碲锌镉体晶切割成一定厚度的晶片后首先经历的表面处理工艺是机械研磨工艺。机械研磨的主要目的是去除机械切割对晶片表面造成的损伤层, 从而获得一个较低损伤的晶片表面。表面处理工艺中, 机械研磨还可细分为机械粗磨和机械细磨, 两者的主要区别在于所使用的磨料粒径不一样, 粗磨的磨料粒径大于细磨的磨料粒径。机械细磨的主要目的是去除机械粗

磨产生的损伤层^[18], 同时减少抛光时间, 提高工艺效率。研究报道, 机械研磨产生的损伤层厚度通常是磨料粒径的3倍左右^[19-20]。

影响机械研磨工艺对加工工件研磨效果的因素有磨料种类、磨料粒径及形状、研磨盘类型、磨料与溶剂的配比、磨料滴速、研磨盘转速、工件夹具转速以及施加在加工工件上的压力等。磨料种类一般根据加工工件的物理及化学性质(如强度、硬度、化学成分等)进行合理选择^[21]。常用于机械磨抛的磨抛料有MgO、Al₂O₃^[22-24]、SiC及金刚石^[25]等, 其中, 为了避免在碲锌镉衬底上引入其他金属杂质, MgO和Al₂O₃这两种研磨剂很少在碲锌镉表面处理工艺上进行使用, 使用最多的是SiC和金刚石两类磨料。李岩等人采用莫氏硬度不同的金刚石(C)、SiC及Al₂O₃三种磨料对CZT进行机械研磨, 以此研究磨料种类对晶片

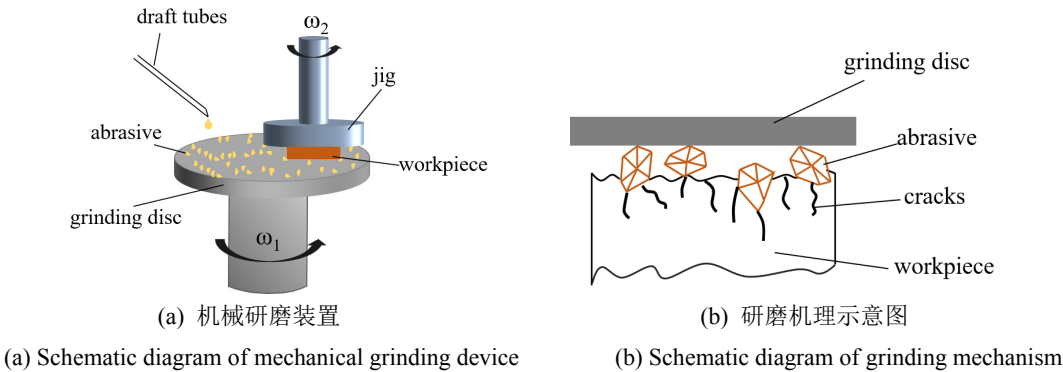


图1 机械研磨装置及研磨机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of mechanical grinding device and grinding mechanism

表面质量和材料去除速率的关系，同时作者还选择了粒径分别为 10 μm 、5 μm 和 2.5 μm 的同种磨料来研究磨料粒径对晶片去除速率和表面质量的影响^[8]。结果表明，金刚石磨料具有最快的材料去除速率，但表面粗糙度大，表面损伤最严重，这是因为金刚石最硬； Al_2O_3 磨料产生最小的表面粗糙度，损伤最小，但材料去除速率最慢，如图 2(a)~(b)所示；粒径为 10 μm 的磨料具有最快的材料去除速率，但对晶片表面造成的机械损伤最大；粒径为 2.5 μm 的磨料对晶片表面产生最小的损伤，表面粗糙度最低，但材料去除速率最慢，如图 2(c)~(d)所示。因此，磨料硬度越大、粒径

越大，材料去除速率越快，但表面质量最差，反之，材料去除速率越慢，表面质量越好。

磨料的形状可分为规则（如球状、棒状、长方体等）和不规则（如多面体形状）两类，如图 3 所示。通常情况下，磨料形状越不规则，材料去除速率越快，同时造成的表面损伤也大，反之，磨料越规则，去除速率越慢，但造成的表面损伤也越小。毛晓辰等人研究了不规则状 Al_2O_3 （Logitech）、光滑板片状 Al_2O_3 （国产）和棱角度较高的板片状 Al_2O_3 （国产）这 3 种不同形状磨料对碲锌镉衬底机械研磨的影响^[23]。研究发现，在这 3 种磨料中，材料的去除速率为棱角度较

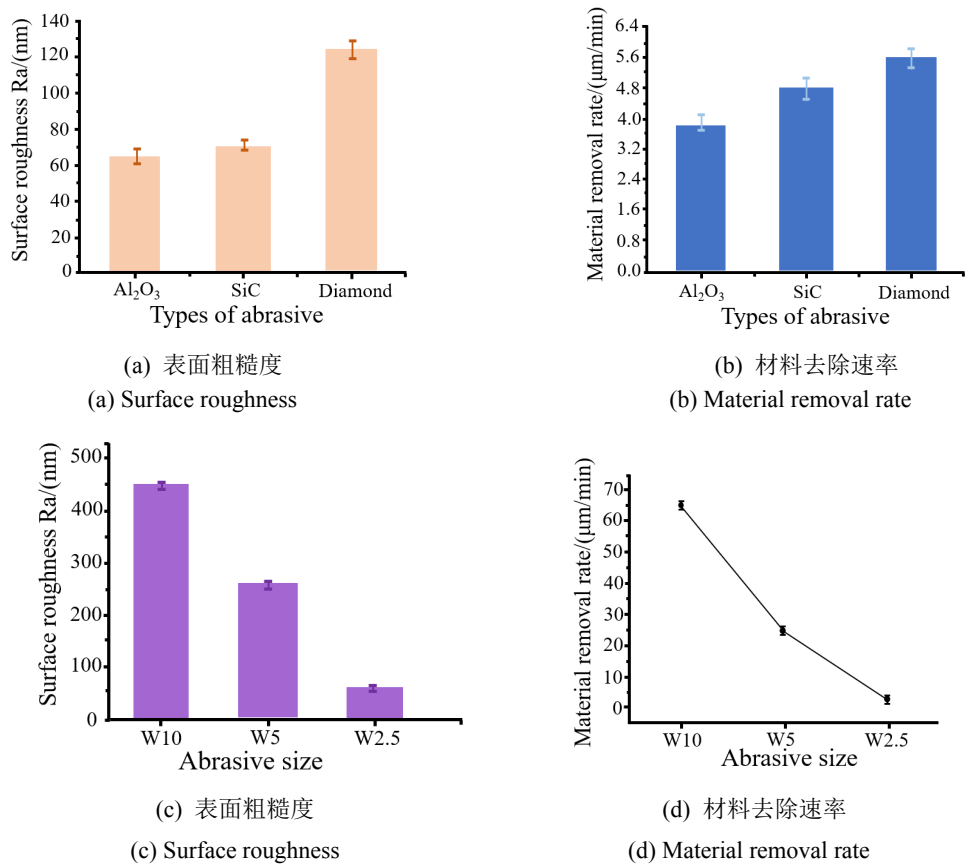


图 2 磨料种类及磨料粒径与表面粗糙度和材料去除速率的关系^[8]
Fig.2 The relationship between abrasive type, size and surface roughness and material removal rate ^[8]

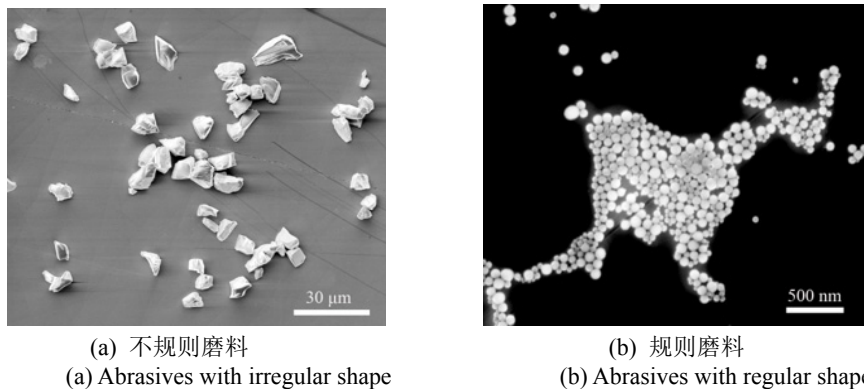


图 3 不规则磨料及规则磨料的扫描电镜图
Fig.3 Scanning electron microscopy images of abrasives with irregular and regular shape

高的板片状 Al_2O_3 > 不规则状 Al_2O_3 > 光滑板片状 Al_2O_3 , 表面质量为光滑板片状 Al_2O_3 > 棱角度较高的板片状 Al_2O_3 > 不规则状 Al_2O_3 。毛晓辰等人认为, 当磨粒形状为板片状时, 材料的去除模型将不再遵从李岩等人提出的“不规则磨料研磨去除模型”, 即三体磨粒去除模型, 如图 4(a)所示^[8], 而是会发生变化。基于此, 毛晓辰等人提出了如下的去除模型, 即: 当磨粒为板片状时, 磨粒以一定的倾斜角度平躺于磨盘表面, 如图 4(b)所示, 当加工工件(晶片)与磨盘发生相互运动时, 磨粒被短暂的固定在磨盘表面, 形成二

体磨粒, 板片状磨粒便以其片状边缘对加工工件表面进行磨削, 最终实现去除材料的目的。

常见的研磨盘类型可简单分为开槽和不开槽两类, 如图 5 所示, 开槽和不开槽研磨盘对晶片研磨效果的影响如表 2 所示。在相同的加工条件下, 当晶片尺寸为 3 英寸及以上尺寸时, 开槽研磨盘较不开槽研磨盘具有更高的材料去除速率。研磨盘转速、工件夹具转速以及施加在工件上的压力也是影响材料去除速率快慢和表面质量优劣的主要因素^[8], 转速和压力对去除速率的影响呈抛物线趋势, 即随着转速和压力的

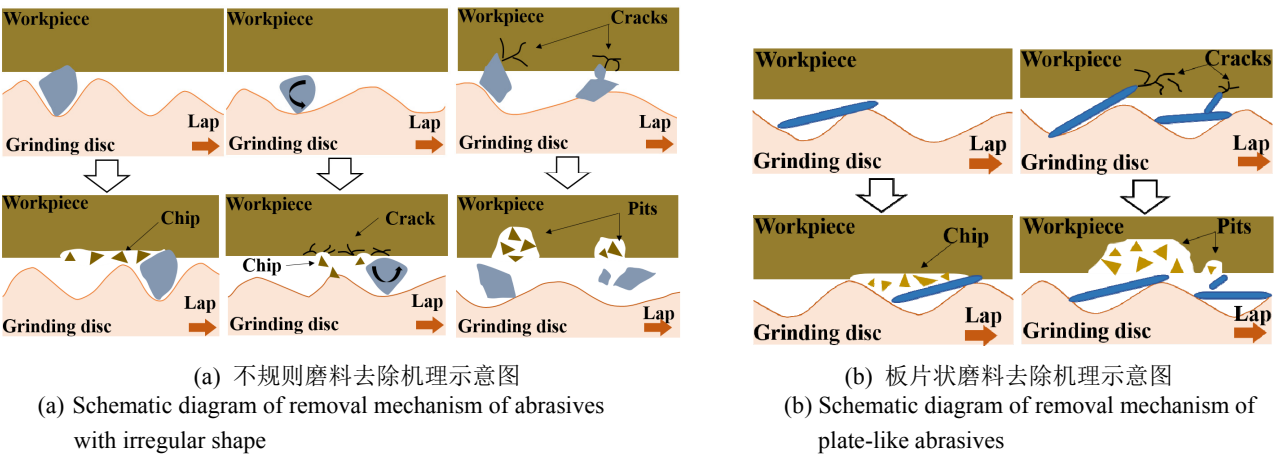


图 4 不规则磨料及板片状磨料去除机理示意图^[23]

Fig.4 Schematic diagram of removal mechanism of abrasives with irregular shape and plate-like abrasives

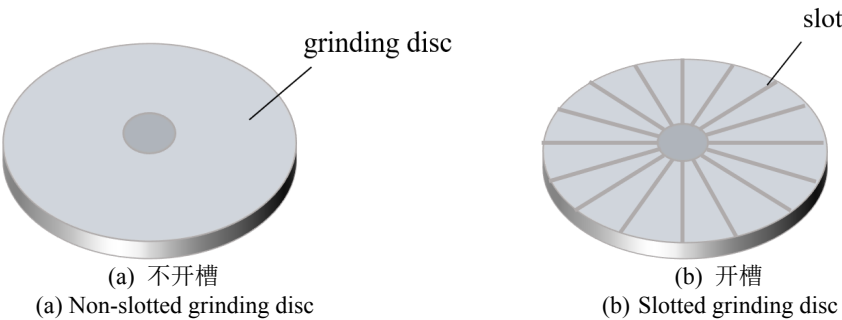


图 5 磨盘示意图

Fig.5 Schematic diagram of grinding disc

表 2 开槽和不开槽研磨盘对晶片研磨效果的影响

Table 2 Influence of slotted and non-slotted grinding discs on wafer grinding efficiency

Factors	Slotted	non-slotted
*Material removal rate/($\mu\text{m}/\text{min}$)	3-4(<3 in) 3-4(≥ 3 in)	5-8(<3 in) 1-2(≥ 3 in)
Total thickness variation	similar	similar
Number of surface scratches	high	low
Processable wafer size	≥ 3 in	<3 in

注: *表示该数据是本单位实际测试数据。
Note: *The data tested in this work.

增加, 去除速率先增加后降低。这主要是因为随着转速和压力都增加到一定程度后, 进入工件与研磨盘之间的磨料进给量降低, 减弱了工件表面与磨料的相互作用导致的。另外, 高梅等人从力学角度出发理论上研究了研磨压力与加工工件表面粗糙度的关系, 理论分析表明, 研磨压力增加到一定程度后, 工件表面的粗糙度几乎不随压力的增大而发生变化^[26]。磨料与溶剂的配比以及磨料滴速对材料去除速率的影响较小, 从经济效益和加工质量效果两方面出发, 选择合适的配比和滴速即可。综上所述, 影响研磨效果的因素很多, 实际工艺过程中需要根据实际情况进行调控。

1.2 机械抛光

机械抛光工艺的抛光机理为：加工工件与柔性抛光垫上的抛光粉或抛光颗粒接触后，工件表面将受到形状不规则的抛光颗粒的挤压而产生破裂或裂纹，在加工工件与抛光盘的相互运动下，这些破裂的碎块会随着不规则抛光颗粒的滚动而被带离晶片表面，反复如此，从而达到降低加工工件表面粗糙度和获得光亮、平整表面的目的。抛光粉是一种形状不规则且粒径很小的微纳米级颗粒，故而对加工工件造成的表面损伤较小且加工后的工件表面像镜面一样光亮。抛光垫的柔韧性削弱了抛光颗粒与加工工件表面的相互磨削作用，从而进一步降低了抛光颗粒对工件表面的损伤。机械抛光装置及抛光原理示意图如图6所示。

机械抛光的主要目的是去除机械研磨工艺对晶片表面造成的损伤层，同时降低晶片表面粗糙度和减少表面划痕，获得光亮、平整的表面。影响机械抛光工艺对加工工件表面抛光效果的因素有抛光粉种类或者抛光液种类、抛光粉粒径大小及形状、抛光垫种类、抛光盘转速、工件夹具转速、施加在工件上的压力、抛光液滴速以及抛光时间等。抛光粉通过与溶剂以及

有关添加剂（如表面活性剂、分散剂等）相互混合组成抛光液。即使是同种成分的抛光粉制备出的抛光液，在相同的机械抛光条件下，不同生产厂家生产出的抛光液的使用效果却相差很大，这主要与参与抛光液配置的溶剂和添加剂种类等有关。图7所示为碲锌镉晶片经不同厂家生产的同种抛光液机械抛光后的表面形貌图，如图所示，在相同的抛光条件下，不同厂家生产的抛光液的抛光效果差别较大。因此，机械抛光工艺中对抛光液的合理选择是极其重要的。

抛光粉的粒径大小和形状主要影响加工工件的表面质量和材料去除速率，通常，粒径越大以及形状越不规则，则材料的去除速率越快，表面质量也越差，如表面粗糙度大、划痕多等；反之，则去除速率慢，表面质量好。Brovko A.等人研究了CZT晶片表面经不同粒径大小的 Al_2O_3 抛光液抛光后对CZT电性能的影响^[27]，作者指出，随着 Al_2O_3 抛料粒径的降低，晶片表面的粗糙度逐渐降低，如图8所示，且材料去除速率也随着抛料粒径的降低而降低， $0.3\ \mu m$ 和 $5\ \mu m$ 抛光液的去除速率分别为 $2\ \mu m/min$ 和 $18\ \mu m/min$ 。

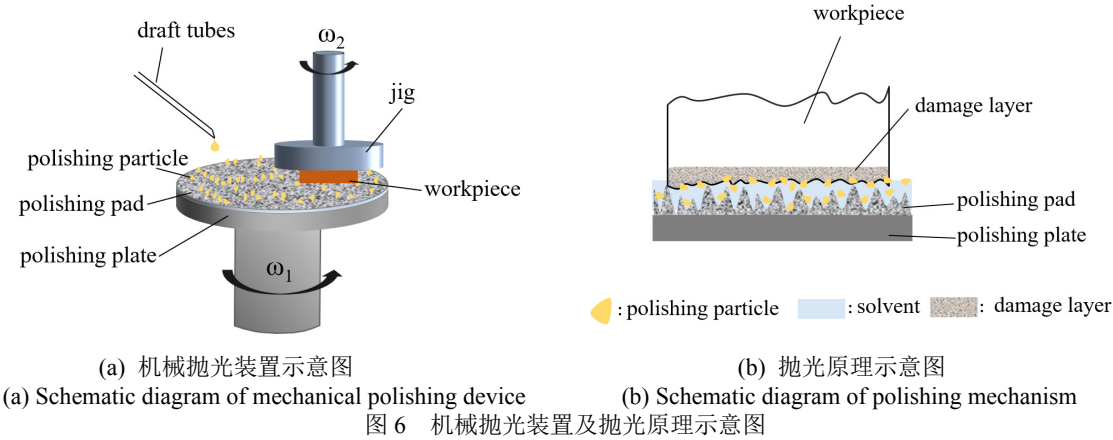


Fig.6 Schematic diagram of mechanical polishing device and polishing mechanism

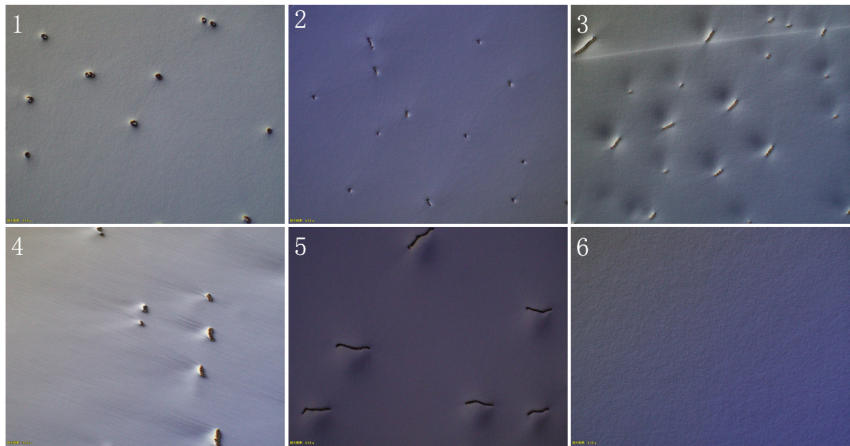


图7 不同厂家生产的同种抛光液的机械抛光表面

Fig.7 Surface states after mechanical polishing with the same polishing slurry produced by different manufacturers

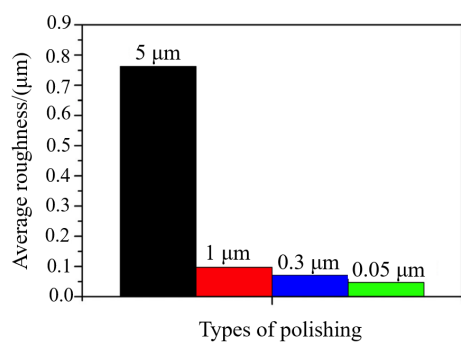


图8 不同粒径的抛料抛光后的CZT平均表面粗糙度^[27]

Fig.8 Average surface roughness of CZT crystal after different types of polishing^[27]

抛光垫具有贮存抛光液及去除抛光过程产生的残留杂质等作用,抛光垫的种类(或材质)也是影响工件抛光效果的主要因素之一^[9]。市场或工业上常见的抛光垫有聚氨酯抛光垫、阻尼布抛光垫、人造植绒抛光垫、无纺布抛光垫及聚四氟乙烯抛光垫等。其中,无纺布抛光垫及聚四氟乙烯抛光垫材质较硬,具有较快的材料去除速率,但加工后会在表面引入较多的划痕,晶片表面质量差;聚氨酯抛光垫和阻尼布抛光垫材质较软,相对于无纺布等硬质抛光垫,其材料去除速率较慢,但加工后的晶片表面质量较好,是目前碲锌镉衬底表面处理工艺中最常用的抛光垫;人造植绒抛光垫材质较聚氨酯等抛光垫硬,手感粗糙,加工后

的晶片表面出现较多划痕。

魏昕等人对抛光垫的材料种类、抛光垫表面结构以及抛光垫硬度、弹性模量、剪切模量、可压缩性等物理性能对抛光效果的影响等进行了介绍^[28],作者总结到,通过增大抛光垫的可压缩性、对抛光垫进行合理开槽以及修正抛光垫提高其表面粗糙度等手段都可以有效提高抛光垫的去除速率,使晶片表面的不均匀性得到改善。另外,曹威等人对近年来研究者们对抛光垫基体、抛光垫结构及抛光垫表面纹理的研究进行了总结^[29]。图9为目前一些常见抛光垫的表面纹理及根据仿生学理论研究设计的抛光垫表面纹理图,主要包括放射状纹理、栅格状纹理、同心圆状纹理、放射同心圆复合状纹理、螺旋状纹理及葵花籽状纹理。其中,抛光液在螺旋状抛光垫和特定角度的葵花籽状抛光垫上分布更均匀,流动性也更好,加工的晶片表面粗糙度也更低;其次是放射同心圆复合状抛光垫,最后依次是放射状、同心圆状和栅格状抛光垫。在材料去除速率上,另有研究表明,抛光液在抛光垫上的流动性好会限制化学反应,从而会降低材料的去除速率^[29],故螺旋状等抛光垫的材料去除速率会低于放射状等抛光垫的去除速率。曹威等人还介绍了抛光过程及修正过程对抛光垫的影响、抛光垫修整器结构及抛光垫自修整技术的研究进展等。

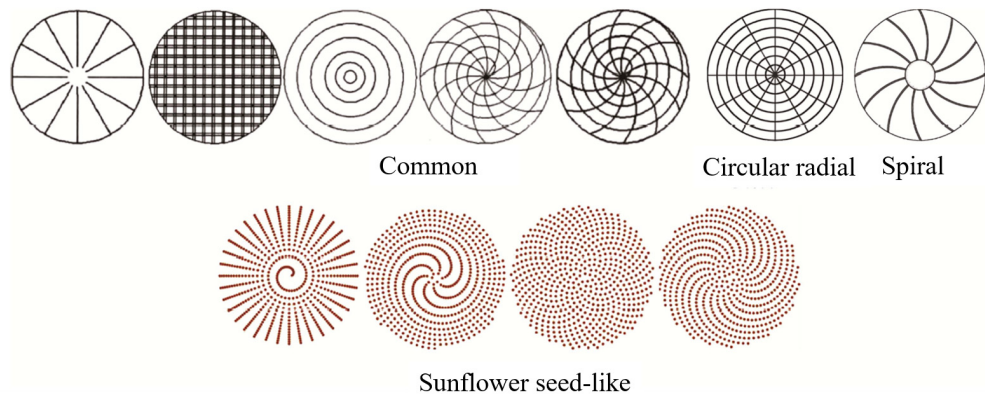


图9 抛光垫表面纹理图^[29]

Fig.9 Polishing pad surface texture^[29]

抛光盘转速、工件夹具转速以及施加在工件上的压力大小等因素都对工件的表面去除速率和质量产生很大的影响^[11],随着转速或压力的增大,材料的去除速率增加,这是因为工件与抛光颗粒的相互磨削作用增强,但随着转速或压力的进一步增大后,材料的去除速率反而降低,这是因为在较大的转速或压力下,进入到工件与抛光盘之间的抛光液减少,削弱了工件与抛光颗粒之间的作用力。抛光时间的长短主要影响研磨损伤层是否完全去除,抛光时间短,则损伤层的

去除不完全,反之,则可以完全去除研磨损伤层。

1.3 化学机械抛光

化学机械抛光工艺的抛光机理为:加工工件表面与抛光垫上的抛光液接触后,将同时受到来自抛光液中的不规则抛光颗粒的挤压作用和强氧化剂的腐蚀作用,即工件表面同时受到机械作用和化学作用。强氧化剂将加工工件的表面氧化成一层极薄的疏松多孔的软化层,不规则抛光颗粒则对这层软化层进行挤压,致使其破裂或产生微小裂痕,当工件与抛光盘相互运

动后，这些破裂的碎片将随着抛光颗粒的滚动而被带离工件表面^[30]。反复如此，从而达到磨削工件表面，获得光亮、低损、平整表面的目的。化学机械抛光中，抛光颗粒的粒径大小通常在纳米量级，远小于机械研磨和机械抛光中所用磨料颗粒的粒径大小，故对工件表面造成的损伤也很小，再结合化学腐蚀的作用，整个化学机械抛光工艺对工件表面造成的损伤就更小了，因此获得的表面也会更加平整和光亮。化学机械抛光的装置以及抛光原理与机械抛光的类似，如图 6 所示，两者主要的区别是前者所用的抛光液中含有强氧化剂，而后者则没有。

化学机械抛光的主要目的包括去除工件表面损伤层、降低表面粗糙度、消除或减少表面划痕以及工件表面平坦化等。通常情况下，化学机械抛光所使用抛料粒径范围在 1 μm 以下，故而工件表面经过化学机械抛光后，其表面粗糙度一般小于 1 nm^[31]，如图 10 所示。

影响化学机械抛光工艺对加工工件表面抛光效果的因素有机械作用和化学作用的协同情况、抛光粉种类、抛光粉粒径大小及形状、氧化剂种类及浓度、抛光垫种类、抛光盘转速、工件夹具转速、施加在工件上的压力、抛光液滴速以及抛光时间等。

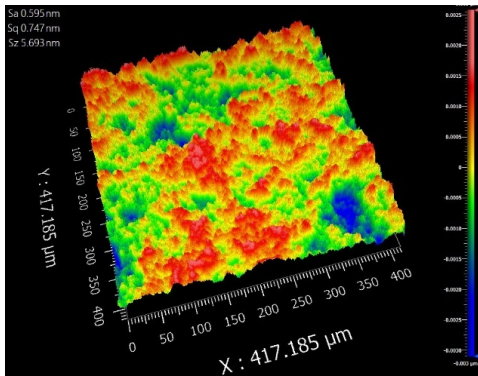


图 10 化学机械抛光工艺后碲锌镉晶片的表面粗糙度

Fig.10 Surface roughness of CZT after chemical mechanical polishing process

机械作用和化学作用的协同情况会对工件的表面质量产生较大影响，若机械作用大于化学作用，则工件表面会出现较多的浅划痕；反之，若化学作用大于机械作用，则工件表面会出现严重的橘皮现象。简言之，这两者不论谁占优势，都会造成工件表面的粗糙度增加。敖孟寒等人以 SiO₂ 为抛料、NaClO 为氧化剂对碲锌镉衬底进行化学机械抛光，研究了 NaClO 浓度对衬底表面去除速率和粗糙度的影响^[32]。研究表明，在其他工艺参数相同的条件下，晶片表面粗糙度 Ra（Roughness arithmetic average）和表面 PV（Peak-to-Valley）值随着 NaClO 浓度的增加呈现出先

降低后升高的趋势，如图 11 所示。作者指出，出现这种趋势的原因是当 NaClO 浓度较低时，抛光过程中的机械作用大于化学作用，从而获得的表面较粗糙且容易产生划伤，随着 NaClO 浓度的增加，抛光过程中的化学作用与机械作用逐渐接近平衡，从而获得最好的抛光表面，而当 NaClO 浓度较大时，抛光过程中的化学作用大于机械作用，衬底表面出现橘皮现象，表面粗糙增大。因此，如何有效、合理地协调机械作用和化学作用这两者之间的关系是至关重要的。

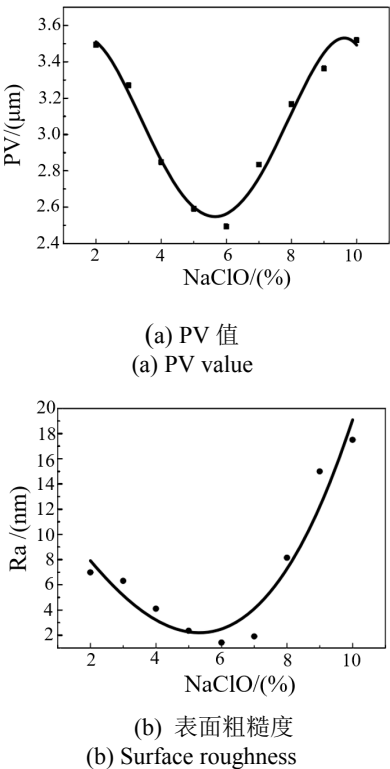


图 11 CZT 衬底表面 PV 值和表面粗糙度随 NaClO 浓度的变化关系^[32]

Fig.11 Surface PV value and surface roughness of CZT substrates as a function of NaClO concentration^[32]

工业上常用的抛光粉有类多晶金刚石（C）、碳化硅（SiC）、二氧化硅（SiO₂）^[33]及 Al₂O₃^[34]等，对于碲锌镉衬底而言，Al₂O₃ 抛光粉含有金属元素，故工艺上不建议采用。抛光粉通过与溶剂以及有关添加剂（如表面活性剂、分散剂等）相互混合组成抛光液。常用于碲锌镉衬底化学机械抛光工艺的强氧化剂主要有过氧化氢（H₂O₂）^[35]、次氯酸钠（NaClO）^[36]以及液溴（Br₂）等。其中，NaClO 中的 Na 元素在碲锌镉材料中具有很高的扩散能力，容易污染衬底；Br₂ 毒性较大且挥发性强，对环境对人体都会产生较大的伤害；H₂O₂ 是一种环境友好型氧化剂，它分解后的产物是水和氧气，对环境对人体没有伤害，故而在化学机械抛光工艺中是使用最多的氧化剂。

Zhang 等人用硅溶胶 (SiO_2) 作为抛光颗粒、过氧化氢 (H_2O_2) 作为氧化剂和柠檬酸作为 pH 调节剂共同组成了一种抛光液, 并用其对碲锌镉晶片进行了化学机械抛光处理^[35]。碲锌镉晶片经该抛光液抛光处理后, 其表面粗糙度 Ra、RMS (root-mean-square) 以及 PV (peak-to-valley) 值分别为 0.498 nm、0.626 nm 和 4.707 nm (测试面积为 $70.6\text{ }\mu\text{m}\times 53\text{ }\mu\text{m}$), 如图 12 所示。这说明使用过氧化氢 (H_2O_2) 作为氧化剂可以获得一个更好的晶片表面状态, 远优于溴基等氧化剂^[37]。

抛光粉的粒径大小及形状、抛光垫的种类 (或材质)^[31]、抛光垫的使用时长、抛光盘转速、工件夹具转速、施加在工件上的压力大小以及抛光时间等因素对工件抛光效果的影响原理与机械抛光工艺中所述影

响原理类似。

1.4 化学抛光

化学抛光工艺的抛光机理为: 当加工工件与抛光垫上的化抛液接触后, 化抛液中的氧化剂将对工件表面进行腐蚀, 在抛光垫与工件表面的相互运动作用下, 工件表面上的损伤层以及浅划痕等都会被去除, 得到光亮、平整且无任何划痕及损伤的外延级衬底表面。化学抛光工艺中使用的抛光液只包含氧化剂和溶剂, 没有磨料颗粒或抛光颗粒。同时, 对工件进行化学抛光时, 没有对工件施加额外的压力, 只有抛光夹具的自身重力。因此, 化学抛光工艺中几乎不涉及到机械作用, 只有纯化学腐蚀作用。化学抛光工艺的装置及抛光原理如图 13 所示。

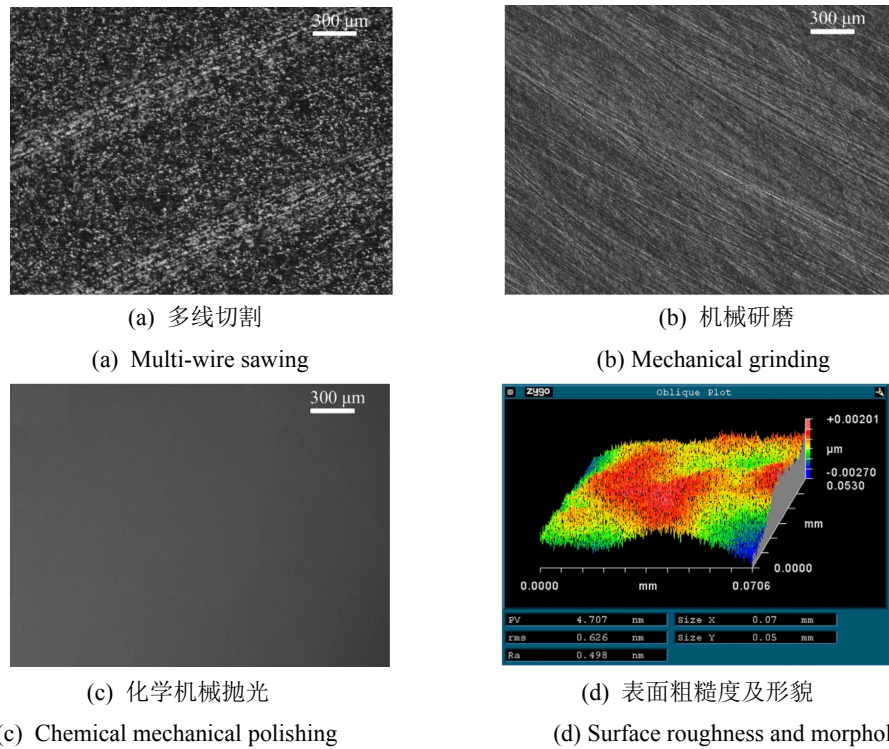


图 12 CZT 经多线切割、机械研磨及化学机械抛光后的表面光学图和化学机械抛光后的表面粗糙度及形貌图^[35]
Fig.12 Optical images of CZT after multi-wire sawing, mechanical grinding and chemical mechanical polishing, and surface roughness and morphology after chemical mechanical polishing^[35]

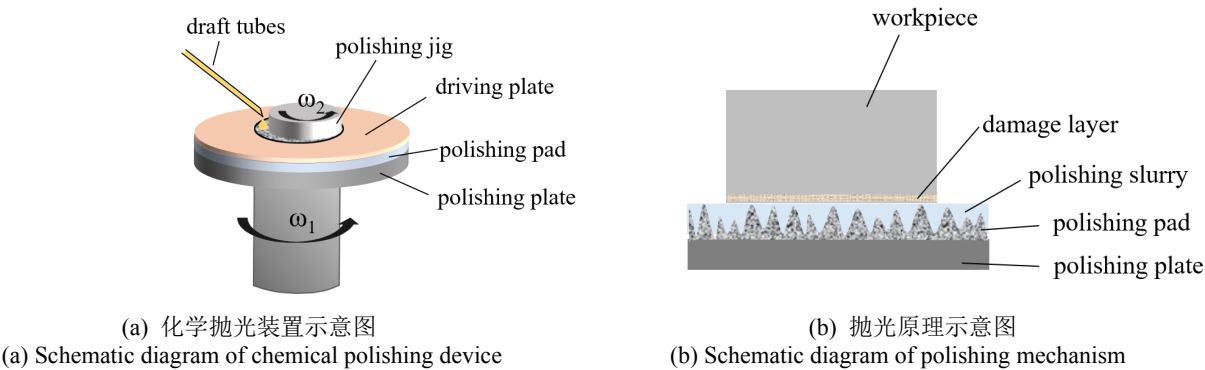


图 13 化学抛光装置及抛光原理示意图

Fig.13 Schematic diagram of chemical polishing device and polishing mechanism

化学抛光的主要目的是去除化学机械抛光或机械抛光工艺对晶片表面造成的损伤层，并同时为生长碲镉汞薄膜提供新鲜、洁净、无损的外延级表面。影响化学抛光工艺对加工工件表面抛光效果的因素有氧化剂种类及浓度、抛光垫种类、抛光盘转速、抛光夹具自重、化抛液滴速以及抛光时间等。常用于碲镉汞衬底化学抛光的氧化剂是溴（Br₂），对应的溶剂是甲醇或甲醇与乙二醇的混合溶剂^[38-40]。Moravec P等人以溴+甲醇+乙二醇组成的溶液为抛光液对碲镉汞衬底表面进行了化学抛光，研究了不同溴浓度下材料的去除量与表面粗糙度的关系，如图14所示^[40]。从图14中可以看到，溴的浓度越高，材料去除量越大，但得到的表面粗糙度也越大。此外，在同样的溴浓度下，随着材料去除量的增加，衬底表面的粗糙度也在增加。这是由于Br₂的强氧化性会将表面的负二价Te氧化成不溶于溶液的Te单质，并沉积在衬底表面，Cd²⁺和Zn²⁺与Br⁻结合成可溶于溶液的CdBr₂和ZnBr₂^[41]而离开表面，如公式(1)所示，从而在表面形成富Te层。随着抛光时间的增加，在强化学作用和外加轻微机械力（化抛夹具自重、抛光垫、旋转等外力）的作用下，这种现象会被加强，从而造成晶片表面粗糙度

增大。

$$\text{CdZnTe} + 2\text{Br}_2 = \text{CdBr}_2 + \text{ZnBr}_2 + \text{Te} \quad (1)$$

Ivanits'ka V. G等人用碘（I₂）作氧化剂、甲醇作溶剂组成的溶液为抛光液对碲化镉和碲锌镉衬底进行化学抛光，研究了不同碘浓度下材料的去除速率及腐蚀后衬底表面退火后的情况，如图15所示^[42]。从图15中可知，材料的去除速率随着碘浓度的增加而增加，碲锌镉经I₂-甲醇化抛液（浓度为10 wt%）化学抛光后的表面粗糙度为1.56 nm。此外，从表3中可以得知，碲锌镉衬底经Br₂-甲醇和I₂-甲醇化抛液化学抛光后，其表面都是富Te态。但碲锌镉衬底经I₂-甲醇化抛液化抛后的表面具有更低的Te/(Cd+Zn)原子比，即表面原子比更接近于化学计量比，且经过高温退火后，原子比几乎为1.0，达到化学计量比水平，这表明相比于Br₂-甲醇化抛液，I₂-甲醇化抛液可以获得一个更佳的衬底表面。因此，化学抛光中，氧化剂及溶剂的选择是至关重要的，选择化抛液的标准之一是希望该化抛液能对工件表面进行均匀腐蚀，而非择优或选择性腐蚀，否则会造成工件表面的粗糙度增加且表面元素的化学计量比不平衡^[43]。

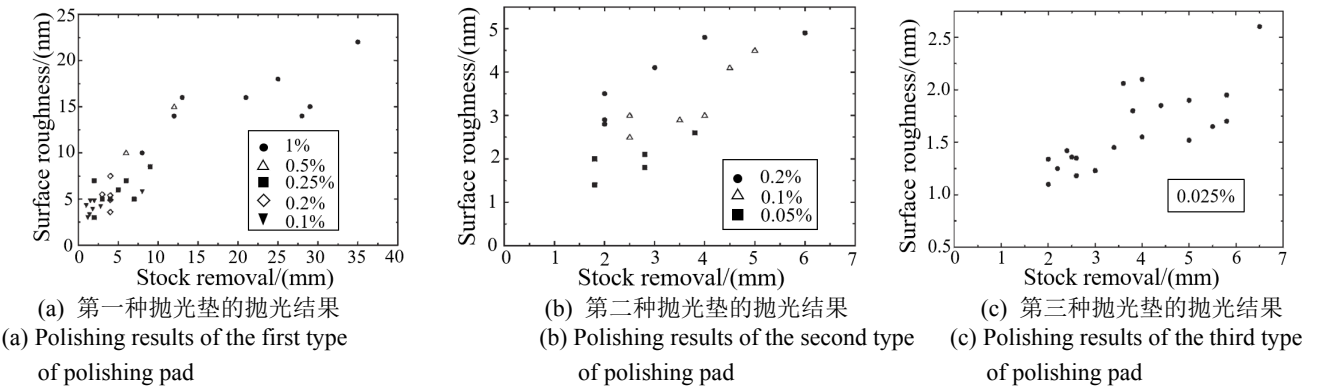
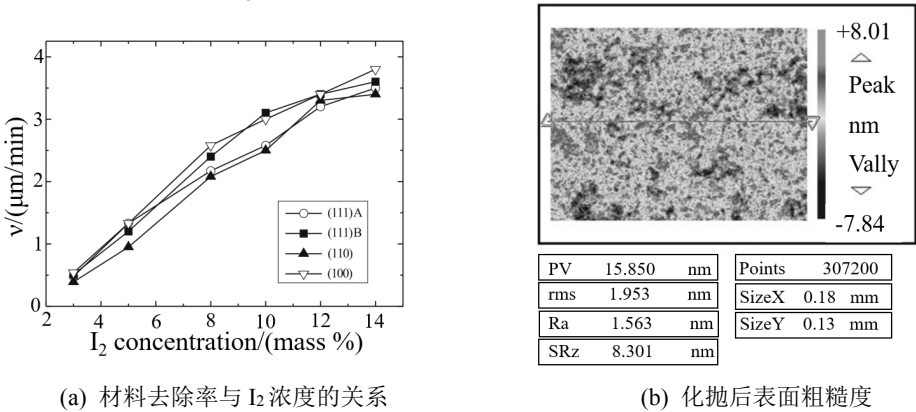


图14 不同溴浓度下碲锌镉衬底去除量与表面粗糙度的关系^[40]

Fig.14 Correlation between the surface roughness and stock removal of CdZnTe substrates for several concentrations of bromine^[40]



(a) 材料去除率与 I₂ 浓度的关系
(a) Correlation between material removal rate and I₂ concentration

(b) 化抛后表面粗糙度
(b) Surface roughness after chemical polishing

图15 材料去除速率与 I₂ 浓度的关系及化抛后样品表面粗糙度（10wt% I₂）^[42]

Fig.15 Correlation between material removal rate and I₂ concentration, and surface roughness of samples after chemical polishing

表3 不同表面处理后的(211)B CdZnTe 样品的 XPS 测试结果^[42]

Table 3 Results of XPS evaluation for (211)B CdZnTe samples for different surface treatments^[42]

Surface treatment	Te overall/ (Cd + Zn) atomic ratio	Te oxide/ Te elemental atomic ratio
I ₂ -methanol	1.8	1.4
Annealed 330℃/1 min	1.0	0.7
Annealed 330℃/10 min	1.0	0.6
Annealed 350℃/10 min	1.0	0.5
Br ₂ -methanol	2.2	2.1
Annealed 330℃/1 min	1.6	1.3

抛光垫的选择也是至关重要的,不同材质制成的抛光垫的柔韧性不同,对工件表面造成的影响也不一样,对于纯化学作用的抛光工艺而言,工件表面是很疏松的,柔韧性稍差的抛光垫可能会在工件表面产生细划痕或抛光效果不理想。另外,化学抛光工艺存在的一个主要问题是塌边现象(即边缘去除速率大于中心去除速率),这种现象在转盘速度较大、化抛时间较长以及氧化剂浓度较大等条件下会更加明显。抛光时间是影响工件抛光效果的重要因素之一,抛光时间短,不足以去除化学机械抛光工艺带来的损伤层;反之,抛光时间长,晶片表面粗糙度越大,同时加重塌边现象^[40]。相对其他影响因素,化抛液的滴速对抛光效果的影响较小。

2 表面位错揭示

与硅等几乎无缺陷的单晶材料相比,碲锌镉单晶材料具有较高的位错密度($10^4\sim10^5/\text{cm}^{-2}$)。目前,观察位错的主要手段是化学腐蚀法,虽然透射电子显微镜法(Transmission electron microscopy, TEM)也能对材料的位错进行检测^[44-46],但因其具有设备成本太高、制样非常困难、视场太小等原因而无法作为常规的位错检测手段。化学腐蚀法因具有成本低、制样简单、操作简单且所观察的视场较大等优势而成为了目前主要的表面位错检测手段。

碲锌镉薄膜主要是通过碲锌镉衬底的(111)面和(211)面上外延得到,因此,要求碲锌镉衬底表面不能存在损伤及大量的微观缺陷。衬底表面的损伤主要来自于表面处理工艺,而微观缺陷如沉淀物、位错、空位等则是在晶体生长过程中产生的。事实上,表面损伤对应的是晶格的周期性被破坏,即晶体表面形成大量的位错^[47]。所以,对于外延衬底而言,不管是损伤还是微观缺陷,只要超过一定的数量都会直接影响

碲锌镉外延薄膜的质量,故而对碲锌镉衬底表面的缺陷(包括损伤和微观缺陷)进行检测,从而筛选出优质的外延级衬底。如上所述,化学腐蚀法是目前最常用的位错检测手段,因此本部分主要介绍用于揭示碲锌镉表面位错缺陷的腐蚀液。

2.1 (111) A 面位错揭示腐蚀液

1979年,K. Nakagawa 等人报道了一种可用来揭示碲化镉(111)A面位错缺陷的化学腐蚀液^[48],其组分为20 mL H₂O:20 mL H₂O₂:30 mL HF。为了证实这种腐蚀液所腐蚀出的腐蚀坑确实对应材料的位错缺陷,文献^[48]对发生形变后的晶体材料进行反复的抛光和腐蚀试验,并记录每次腐蚀后的腐蚀坑变化情况,如图16所示。从图中可以明显观察到,腐蚀坑与位错线具有一一对应的关系。

为了更进一步的证实腐蚀坑与位错具有一一对应关系,文献^[48]采用阴极发光方法对形变样品的(111)A面进行了测试。接着,对测试结束后的该样品进行化学腐蚀并进行二次电子显微测试。两者的测试结果显示,阴极发光图中的黑点(对应位错缺陷)与二次电子显微图中看到的腐蚀坑具有非常好的对应性,即所有沿滑移面轨迹排列的黑点与位错腐蚀坑一一对应,其他黑点也是如此。故这种腐蚀液可以很好的揭示碲化镉(111)A面的位错缺陷。所以,研究者们以Nakagawa命名这种腐蚀液并将其一直用作揭示碲锌镉(111)A面位错的腐蚀液。

2.2 (111) 和 (211) B 面位错揭示腐蚀液

1995年,W. J. Everson 等人报道了一种可用于揭示碲锌镉(111)和(211)B面位错缺陷的化学腐蚀液^[49],其组分为6 mL HF:24 mL HNO₃:150 mL C₃H₆O₃(乳酸),即体积比为1:4:25。由于这种化学腐蚀液是W. J. Everson首次提出并验证其有效性的,所以作者将这种腐蚀液命名为“Everson 腐蚀液”。

为了验证 Everson 腐蚀液确实可以揭示碲锌镉(111)B和(211)B面位错缺陷,作者首先采用透射电子显微镜法(TEM)对被 Everson 腐蚀液腐蚀并减薄处理后的高位错缺陷密度样品进行观察,结果如图17(a)所示,图中红色箭头指向的是腐蚀坑,绿色箭头指向的是位错线。从图中可以清楚地观察到,每一个腐蚀坑的一端都有一条清晰可见的位错线,因此可以确定,由 Everson 腐蚀液产生的腐蚀坑确实对应材料的位错缺陷。然后,作者将 Everson 腐蚀液产生的腐蚀坑与 Nakagawa 腐蚀液产生的腐蚀坑进行数量以及结构上的对比,结果如图17(b)和表4所示。从图17(b)和表4中可以得知,Everson 腐蚀液产生的腐蚀坑数量与 Nakagawa 腐蚀液产生的腐蚀坑数量相当。综上

所述，Everson 腐蚀液是一种可以准确揭示碲锌镉 (111) B 和 (211) B 面位错缺陷的化学腐蚀液。因此，自 Everson 腐蚀液被报道以来，它受到了广泛的关注并一直用来揭示碲锌镉 (111) B 和 (211) B 面的位错缺陷^[50-51]。

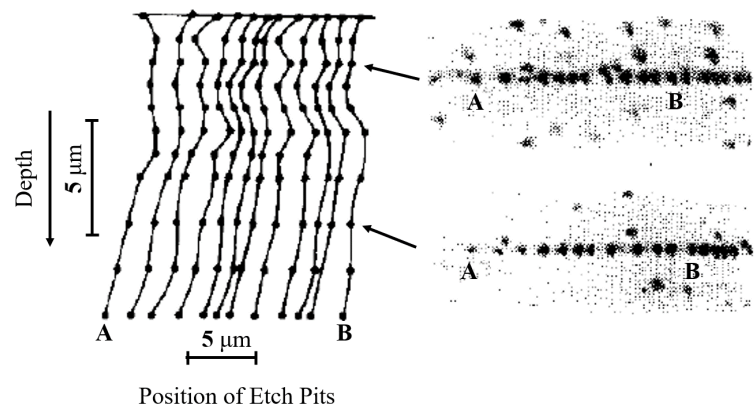
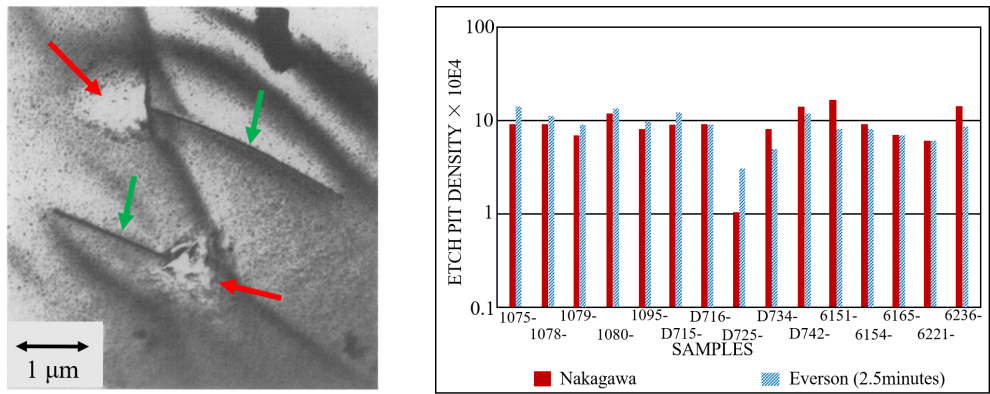


图 16 样品反复抛光和腐蚀后得到腐蚀坑轨迹示意图及两个腐蚀阶段的腐蚀坑光学图^[48]

Fig.16 Traces of etch pits down from a specimen surface in a successive polishing and etching experiment, and optical micrographs of an etch-pit array observed in two etching stages are shown on the right



(a) 腐蚀坑的 TEM 图
(a) TEM image of pits formed on dislocations
(b) (111)A 面和 B 面的腐蚀坑密度 (EPDs) 对比
(b) Bar graph comparing EPDs on A and B faces of (111)
图 17 腐蚀坑 TEM 图和(111)A 面与 B 面的腐蚀坑密度对比^[49]

Fig.17 TEM image of pits and bar graph comparing EPDs on A and B faces of (111)

表 4 两种腐蚀液得到的 CdTe 单晶 EPDs 对比^[49]
Table 4 Comparison of EPDs tested by two corrosion solutions^[49]

	Nakagawa	Everson
(111)A	$44 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$	N/A
(111)B	N/A	$35 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$
(211)A	N/A	N/A
(211)B	N/A	$20 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$

图 18 是 Everson 腐蚀液在碲锌镉(111)B 和(211) B 面产生的腐蚀坑形貌，在 (111) B 产生的腐蚀坑为等边三角形形貌，而在 (211) B 面产生的腐蚀坑为钝角三角形。

2.3 其他晶面位错揭示腐蚀液

1962 年，M. Inoue 等人报道了一种可揭示碲化镉 (CdTe) 不同晶面上位错缺陷的 E_{Ag} 腐蚀液^[52]， E_{Ag} 腐蚀液的组成为 10 mL HNO_3 : 20 mL H_2O : 4 g $K_2Cr_2O_7$:

$x \text{ g } AgNO_3$ 。另外， E_{Ag} 腐蚀液可分为 E_{Ag-1} 腐蚀液和 E_{Ag-2} 腐蚀液，两者的区别在于溶液中 $AgNO_3$ 的浓度不一样。图 19(a)~(d)为 CdTe 不同晶面经 E_{Ag-1} 腐蚀液腐蚀后产生的腐蚀坑形貌图。从图中可以看到， E_{Ag-1} 腐蚀液在 (100) 晶面上产生的腐蚀坑形貌为矩形形状，在 (110) 晶面上产生的腐蚀坑形貌为等腰三角形形状，在 (111) 和 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 晶面上产生的腐蚀坑形貌分别为锥形形状(或圆锥形形状)和平底三角形形状。图 19(e) 为 E_{Ag-2} 腐蚀液在 (111) 晶面上产生的腐蚀坑形貌图，结合图 19(c)、图 19(d)和图 19(e)可知，在相同晶面上， E_{Ag-1} 和 E_{Ag-2} 腐蚀液产生的腐蚀坑形貌不一致，即不是同一种腐蚀坑，作者认为出现这种结果的原因是两种腐蚀液所揭示的位错缺陷不是同一种类型的缺陷所致。故 E_{Ag} 腐蚀液并不能将 CdTe 晶体的位错缺陷进行全部揭示。

此外,随着 Everson 和 Nakagawa 腐蚀液的出现,研究发现, E_{Ag} 腐蚀液所揭示的腐蚀坑密度远低于 Everson 腐蚀液和 Nakagawa 腐蚀液产生的腐蚀坑密度,这再次证实了 E_{Ag} 腐蚀液不能准确真实地反映碲

化镉家族的位错密度,不过 E_{Ag} 腐蚀液却可以用来揭示碲锌镉其他晶面的位错缺陷,故而 E_{Ag} 腐蚀液在碲锌镉的损伤层厚度检测中起着极其重要的作用^[53]。

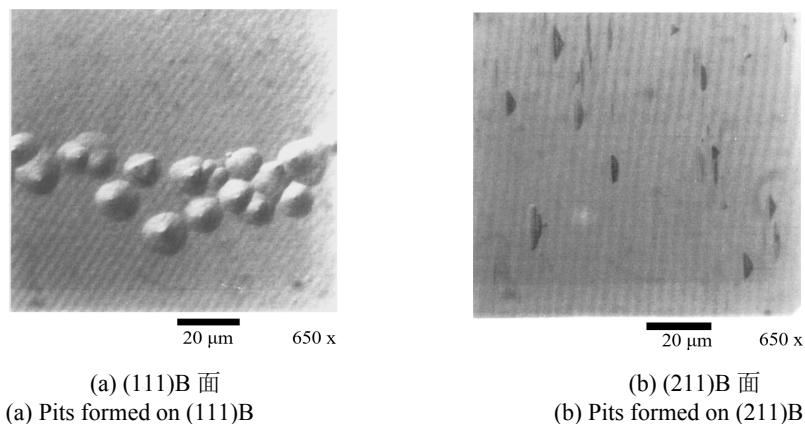


图 18 腐蚀坑形貌图^[49]

Fig.18 Morphology of pits formed on (111)B and (211)B

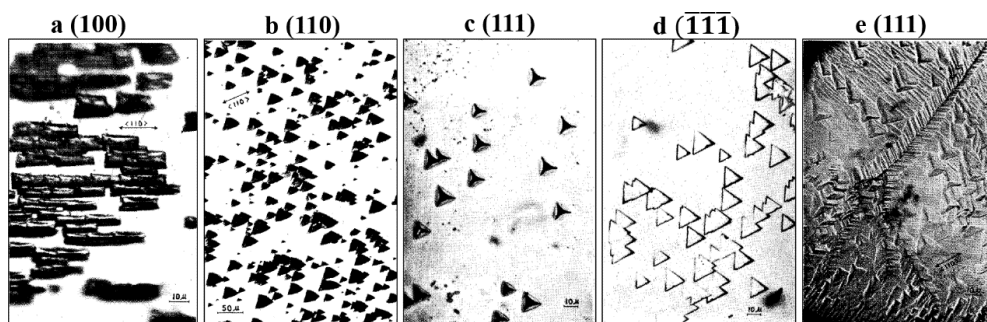


图 19 CdTe 不同晶面腐蚀坑形貌图: (a) (100)晶面- E_{Ag-1} ; (b) (110)晶面- E_{Ag-1} ; (c) (111)晶面- E_{Ag-1} ; (d) $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 晶面- E_{Ag-1} ; (e) (111)晶面- E_{Ag-2} ^[52]

Fig.19 Morphology of pits formed on different CdTe planes, (a) (100)- E_{Ag-1} , (b) (110)- E_{Ag-1} , (c) (111)- E_{Ag-1} , (d) $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ - E_{Ag-1} and (e) (111)- E_{Ag-2} ^[52]

3 总结与展望

本文主要从碲锌镉表面处理工艺及表面位错揭示两个方面对碲锌镉衬底的表面处理工艺研究进行了详细介绍。表面处理工艺主要包括机械研磨、机械抛光、化学机械抛光以及化学抛光,研磨或抛光工艺中的参数选择直接影响最终的衬底表面质量。碲锌镉衬底的表面位错缺陷主要通过 Everson 或 Nakagawa 两种化学腐蚀液进行揭示, Everson 腐蚀液主要揭示碲锌镉 (111) B 面的位错缺陷, Nakagawa 腐蚀液主要揭示 (111) A 面的位错缺陷。

另外,随着碲锌汞红外焦平面探测器技术的发展,碲锌镉衬底的尺寸逐渐增大,这意味着获得外延级碲锌镉衬底表面将会更加困难,这对晶片表面平整度、晶片面型控制及表面清洗等都提出了更高的技术要求。因此,如何在现有的基础上探索出适用于大尺寸碲锌镉衬底的表面处理技术是至关重要的,这也是我

们接下来亟待解决的技术问题和努力的方向。

参考文献:

- [1] 陈家骏, 邹凯, 徐由兵, 等. 直拉单晶硅生长过程中的控氧技术研究及标准[J]. 中国标准化, 2017(4): 242-243.
CHEN Jiajun, ZOU Kai, XU Youbing, et al. Research and standards on oxygen control technology during the growth process of Czochralski monocrystalline silicon[J]. China Standardization, 2017(4): 242-243.
- [2] 程愉梓. 单晶硅生长技术的发展分析[J]. 科技创新与应用, 2015(31): 47.
CHENG Yuxing. Development analysis of single crystal silicon growth technology[J]. Technology Innovation and Application, 2015(31): 47.
- [3] 郭亚藏. 大尺寸区熔单晶硅生长过程的数值模拟[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2021.
GUO Yawei. Numerical Simulation of the Growth Process of Large Diameter Silicon Single Crystal by The Floating Zone Melting Method[D]. Beijing: General Research Institute for nonferrous Metals, 2021.
- [4] 年夫雪. 单晶硅直拉法生长工艺的数值模拟[D]. 上海: 上海大学, 2017.
NIAN Fuxue. Numerical Simulation of Czochralski Single Silicon Crystal Growth Process[D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.

- [5] 杨翠. 直拉单晶硅生长过程中固液界面形状研究[J]. 内蒙古石油化工, 2017, **43**(10): 10-14.
YANG Cui. Study on the shape between solid-liquid boundary surface in growth process of Czochralski monocrystalline silicon[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2017, **43**(10): 10-14.
- [6] 张怡. 直拉单晶硅生长和工艺研究[J]. 企业导报, 2015(22): 2.
ZHANG Yi. Research on growth and process of Czochralski single crystal silicon[J]. *Guide to Business*, 2015(22): 2.
- [7] 侯保江, 安亚青, 水涌涛, 等. 单晶硅晶片化学机械抛光基本特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, **40**(6): 163-166.
HOU Baojiang, AN Yaqing, SHUI Yongtao, et al. Research on the basic characteristics of chemical mechanical polishing of single crystal silicon wafers[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, **40**(6): 163-166.
- [8] 李岩. 碲锌镉晶体研磨与磨削的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
LI Yan. Experimental Studies on Lapping and Grinding of CdZnTe Crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [9] 孟耀武. 软脆晶体碲锌镉超精密磨抛的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
MENG Yaowu. Experimental Investigations of Ultra-Precision Grinding and Polishing of Soft-Brittle Cadmium Zinc Telluride Single Crystals[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [10] 孙士文. 碲锌镉单晶生长与晶体质量研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014.
SUN Shiwen. Growth and Characterization of CdZnTe Single Crystals[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science (Shanghai Institute of Technical Physics), 2014.
- [11] 王可. 碲锌镉晶体基片抛光工艺的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
WANG Ke. An Experimental Study of the Polishing Process for CZT Crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [12] 徐超. 碲锌镉晶体缺陷的物理性能和抑制技术的研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
XU Chao. Study on Physical Properties and Suppression Techniques of CdZnTe Defects[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science (Shanghai Institute of Technical Physics), 2018.
- [13] 周昌鹤. 碲锌镉材料缺陷评价技术及VGF生长技术的研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
ZHOU Changhe. Study on Defect Evaluation and VGF Growth Technique of CdZnTe Materials[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science (Shanghai Institute of Technical Physics), 2021.
- [14] Capper P. Bulk crystal growth of electronic, optical and optoelectronic materials[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [15] 孙士文, 周昌鹤, 徐超, 等. 碲锌镉衬底研究进展[C]//2015年红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛论文集, 2015: 82-90.
SUN Shiwen, ZHOU Changhe, XU Chao, et al. Research progress in tellurium zinc cadmium substrate[C]//*Proceedings of the 2015 Symposium on Infrared and Remote Sensing Technology and Applications*, 2015: 82-90.
- [16] Capper P, Garland J. *Mercury Cadmium Telluride* (growth, properties and applications)[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [17] Benson J D, Bubulac L O, Jaime Vasquez M, et al. Impact of CdZnTe substrates on MBE HgCdTe deposition[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, **46**(9): 5418-5423.
- [18] Asici B, Eroglu H C, Ergunt Y, et al. CdZnTe substrate surface preparation technology at ASELSAN, Inc. for molecular beam epitaxy growth of high quality HgCdTe epilayers[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, **47**(10): 5735-5741.
- [19] Singh R, Velicu S, Crocco J, et al. Molecular beam epitaxy growth of high-quality HgCdTe LWIR layers on polished and repolished CdZnTe substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(6): 885-890.
- [20] 程雨, 李春领, 肖钰. 碲锌镉晶体表面磨抛方法研究[J]. 红外, 2018, **39**(11): 11-16.
CHENG Yu, LI Chunling, XIAO Yu. Study of surface lapping and polishing methods of cadmium zinc telluride[J]. *Infrared*, 2018, **39**(11): 11-16.
- [21] 邵培丽. 新型磨粒的制备及其在CZT晶体CMP加工中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
GAO Peili. Preparation of Novel Abrasives and Their Applications in Chemical Mechanical Polishing for Cadmium Zinc Telluride Substrates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [22] 彭兰, 王林军, 闵嘉华, 等. 碲锌镉晶片机械研磨和机械抛光工艺研究[J]. 功能材料, 2011, **42**(5): 880-887.
PENG Lan, WANG Linjun, MIN Jiahua, et al. Investigation on the mechanical lapping and polishing of CdZnTe wafers[J]. *Journal of Functional Materials*, 2011, **42**(5): 880-887.
- [23] 毛晓辰, 朱丽慧, 虞慧娴, 等. 板片状 Al₂O₃ 磨料对碲锌镉晶体机械研磨的影响[J]. 人工晶体学报, 2018, **47**(2): 261-266.
MAO Xiaochen, ZHU Lihui, YU Huixian, et al. Effect of plate-like Al₂O₃ abrasives on mechanical lapping of CdZnTe crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, **47**(2): 261-266.
- [24] Crocco J, ZHENG Q, Bensalah H, et al. Detector surface preparation of Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te for electrode patterning[J]. *Applied Surface Science*, 2012, **258**(7): 2948-2952.
- [25] 苑泽伟. 利用化学和机械协同作用的CVD金刚石抛光机理与技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
YUAN Zewei. Mechanism and Technology for Polishing CVD Diamond with Chemical and Mechanical Synergistic Effects[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [26] 高梅. 超精密平面研磨加工压力对精度的影响[J]. 机床与液压, 2008, **36**(3): 18-20.
GAO Mei. Effect of process pressure on accuracy in ultra-precision plane grinding[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, **36**(3): 18-20.
- [27] Brovko A, Adelberg A, Chernyak L, et al. Impact of polishing on crystallinity and static performance of Cd_{1-x}Zn_xTe[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, **984**: 164568.
- [28] 魏昕, 熊伟, 黄蕊慰, 等. 化学机械抛光中抛光垫的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004(5): 40-43.
WEI Xin, XIONG Wei, HUANG Ruiwei, et al. Study on the performance of polishing pad in chemical-mechanical polishing[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2004(5): 40-43.
- [29] 曹威, 邓朝晖, 李重阳, 等. 化学机械抛光垫的研究进展[J]. 表面技术, 2022, **51**(7): 27-41.
CAO Wei, DENG Zhaohui, LI Chongyang, et al. Polishing pad in chemical mechanical polishing[J]. *Surface Technology*, 2022, **51**(7): 27-41.

- [30] Pelenc D, Merlin J, Etcheberry A, et al. Development of a method for chemical-mechanical preparation of the surface of CdZnTe substrates for HgCdTe-based infrared focal-plane arrays[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(8): 3004-3011.
- [31] 李岩, 康仁科, 高航, 等. 碲锌镉晶体高效低损伤 CMP 工艺研究[J]. *人工晶体学报*, 2009, **38**(2): 416-421.
- LI Yan, KANG Renke, GAO Hang, et al. High-efficiency and low-damage chemical mechanical polishing process of CdZnTe crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2009, **38**(2): 416-421.
- [32] 敖孟寒, 朱丽慧, 孙士文. 碲锌镉晶体化学机械抛光液的研究[J]. *红外技术*, 2017, **39**(1): 22-26.
- AO Menghan, ZHU Lihui, SUN Shiwen. Research on chemical-mechanical polishing slurry for CdZnTe crystal[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(1): 22-26.
- [33] 刘瑞鸿. 二氧化硅介质层 CMP 抛光液研制及其性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- LIU Ruihong. Development of SiO₂ ILD chemical mechanical polishing slurry and its performance analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [34] 张振宇, 郭东明, 康仁科, 等. 软脆功能晶体碲锌镉化学机械抛光[J]. *机械工程学报*, 2008, **44**(12): 215-220.
- ZHANG Zhenyu, GUO Dongming, KANG Renke, et al. Chemical mechanical polishing research of CdZnTe functional crystalline with soft brittle nature[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **44**(12): 215-220.
- [35] ZHANG Z, WANG B, ZHOU P, et al. A novel approach of chemical mechanical polishing for cadmium zinc telluride wafers[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 26891.
- [36] 敖孟寒, 朱丽慧, 孙士文, 等. CZT 晶体用化学机械抛光液的制备及其性能研究[J]. *红外*, 2015, **36**(5): 8-20.
- AO Menghan, ZHU Lihui, SUN Shiwen, et al. Research on chemical-mechanical planarization slurry of CdZnTe[J]. *Infrared*, 2015, **36**(5): 8-20.
- [37] Hossain A, Bolotnikov A E, Camarda G S, et al. Novel approach to surface processing for improving the efficiency of CdZnTe detectors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **43**(8): 2771-2777.
- [38] James Ralph B, Gnatyuk V A, Vlasenko O I, et al. Surface processing of CdZnTe crystals[C]//*Proceeding of SPIE*, 2012, **8507**: 85071S.
- [39] ZHENG Q, Dierre F, Crocco J, et al. Influence of surface preparation on CdZnTe nuclear radiation detectors[J]. *Applied Surface Science*, 2011, **257**(20): 8742-8746.
- [40] Moravec P, Höschl P, Franc J, et al. Chemical polishing of CdZnTe substrates fabricated from crystals grown by the vertical-gradient freezing method[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**: 1206-1213.
- [41] WANG Xiaoqin, JIE Wanqi, LI Qiang, et al. Surface passivation of CdZnTe wafers[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2005, **8**(6): 615-621.
- [42] Ivanits'ka V G, Moravec P, Franc J, et al. Chemical polishing of CdTe and CdZnTe in iodine-methanol etching solutions[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1802-1808.
- [43] 侯晓敏, 张瑛侠, 巩锋. 软脆碲锌镉衬底的新型化学抛光技术研究[J]. *激光与红外*, 2018, **48**(10): 1264-1267.
- HOU Xiaomin, ZHANG Yingxia, GONG Feng. Study of new chemical polishing technology for soft-brittle CdZnTe substrates[J]. *Laser & Infrared*, 2018, **48**(10): 1264-1267.
- [44] 张银霞, 郇伟, 康仁科, 等. 单晶硅片磨削损伤的透射电子显微分析[J]. *半导体学报*, 2008, **29**(8): 1552-1556.
- ZHANG Yinxia, GAO Wei, KANG Renke, et al. TEM observation on the ground damage of monocrystalline silicon wafers[J]. *Journal of Semiconductors*, 2008, **29**(8): 1552-1556.
- [45] Puttick K E, Whitmore L C, CHAO C L, et al. Transmission electron microscopy of nanomachined silicon crystals[J]. *Philosophical Magazine*, 1994, **69**(1): 91-103.
- [46] Shibata Takayuki, Ono Atsushi. Cross-section transmission electron microscope observations of diamond-turned single-crystal Si[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **65**(20): 2553-2553.
- [47] LI Yan, KANG Renke, GAO Hang, et al. Damage mechanisms during lapping and mechanical polishing CdZnTe wafers[J]. *Rare Metals*, 2010, **29**(3): 276-279.
- [48] Nakagawa K, Maeda K, Takeuchi S. Observation of dislocations in cadmium telluride by cathodoluminescence microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 1979, **34**(9): 574-575.
- [49] Everson W J, Ard C K, Sepich J L, et al. Etch pit characterization of CdTe and CdZnTe substrates for use in mercury cadmium telluride epitaxy[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(5): 505-510.
- [50] Teague Lucile C, Duff Martine C, Cadieux James R, et al. Characterization of etch pit formation via the everson-etching method on CdZnTe crystal surfaces from the bulk to the nanoscale[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, **652**(1): 178-182.
- [51] 周昌鹤, 杨建荣, 周梅华, 等. (112)B 碲锌镉衬底表面 Everson 腐蚀坑与材料缺陷的关系[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, **40**(4): 432-438.
- ZHOU Changhe, YANG Jiangrong, ZHOU Meihua, et al. Correlation between everson etch pits and material defects of (112)B CdZnTe substrates[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, **40**(4): 432-438.
- [52] Inoue Morio, Teramoto Iwao, Takayanagi Shigetoshi. Etch pits and polarity in CdTe crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, **33**(8): 2578-2582.
- [53] 郎艳菊. CZT 晶体加工表面/亚表面损伤研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- LANG Yanju. Surface/subsurface Damage of the Machined CZT Crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.