

多元 HgCdTe 线列探测器的 同步辐射形貌术分析*

蔡毅^{1,2)} 郑国珍¹⁾ 朱惜辰²⁾ 蒋建华³⁾ 汤定元¹⁾

¹⁾ 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海, 200083;

²⁾ 昆明物理研究所, 云南, 昆明, 650223;

³⁾ 中国科学院高能物理研究所北京正负电子对撞机国家实验室, 北京, 100039)

摘要 利用同步辐射拍摄了长波光导多元 HgCdTe 探测器芯片的高分辨率的白光形貌相, 观察到多元线列器件探测元中明显存在晶格应变区、亚晶界、滑移面等缺陷. 实验结果表明: 多元线列器件探测元的性能与其光敏区 HgCdTe 材料中的晶体缺陷密切相关, 器件工艺对 HgCdTe 晶片的应力状态有极大的影响, 器件工艺对材料的应力作用可从多元器件探测元晶格的完整性反映出来.

关键词 HgCdTe, 多元线列探测器, 晶体缺陷, 同步辐射形貌术.

引言

同步辐射 (SR) 是电子在储存环中运动时辐射出的宽频段电磁波. 由于 SR 光源优越的物理性质, 使其成为一种研究晶体缺陷的有力手段. 自 1970 年以来, SR 已广泛用于单晶材料的缺陷研究, 近来也用于 HgCdTe 材料和 HgCdTe 焦平面列阵探测器中晶体缺陷的研究^[1,2]. 已观察到 HgCdTe 晶体中存在大量的晶体缺陷, 如高密度的位错网络、沉淀物、孪晶、镶嵌晶粒、亚晶块和强应变区等, 并发现 HgCdTe (MCT) 焦平面列阵探测元的探测率及其分布与 HgCdTe 材料中的亚晶界有关, 在低温下亚晶界对器件性能的影响更为明显.

长波光导多元线列探测器 (MCMTDA) 是目前广泛用于热成像制导和前视红外系统的红外探测器. 研究这类探测器中晶体缺陷与器件性能和器件制备工艺的关系, 对筛选材料、提高 MCMTDA 的性能和成品率有十分重要的意义. 在本工作中, 用同步辐射白光形貌术拍摄了 MCMTDA 芯片高分辨率的形貌相, 据此观察了 MCMTDA 芯片中的缺陷, 结合 MCMTDA 的 D^* 测量, 研究了探测器中缺陷与其性能的关系.

* 中国科学院北京正负电子对撞机国家实验室资助项目

本文 1993 年 9 月 13 日收到, 修改稿 1994 年 3 月 22 日收到

1 原理和实验

当一束白色的 X 射线投射到一单晶样品上, 样品的各组晶面从连续谱中按劳厄衍射条件选择合适的波长进行衍射, 用胶片记录得到典型的劳厄花样. 由于 SR X 射线高度的准直性, 以其拍摄的劳厄花样中每个劳厄斑都是一张高分辨率 (约 $1\ \mu\text{m}$ 的数量级) 形貌相, 故可用于研究 MCMTDA 芯片小到 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 光敏区中的缺陷.

在北京正负电子对撞机国家实验室 4W1A 形貌站, 用共储存环产生的 SR X 射线拍摄了 7 个光导 MCMTDA 芯片高分率的劳厄花样. 实验中, 样品到 X 射线源焦点的距离约为 45 m, 样品到 X 光底片的距离约为 45 mm, 储存环的电子束流能量约为 2.6 GeV, 束流强度为 44 mA, 曝光时间为数秒到数十秒, 使用进口微粒 X 光胶片和英国 ILFORD L-4 核乳胶干板所得劳厄斑的最高分辨率接近 $1\ \mu\text{m}$.

样品是用 Te 溶剂和再结晶法生长的、组分为 0.20 的 n 型 HgCdTe 材料制备的多元线列探测器. 材料的组分均匀性均优于 ± 0.005 , 在液氮温度下, 载流子浓度为 $(4\sim 8)\times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$, 迁移率大于 $1\times 10^5\ \text{cm}^2/\text{Vs}$. 探测元的曲型尺寸约为 $500\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$, 光敏区尺寸约为 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$, 芯片厚度小于 $10\ \mu\text{m}$, 探测元之间的间隔 $12\ \mu\text{m}$. 为把问题限定在缺陷对 MCMTDA 芯片性能影响的范围内, 特意挑选性能不均匀的样品. 在这些样品中, 除低性能或无性能的探测元外, 部分探测元具有高达 $1\times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 以上的黑体探测率.

2 实验结果和讨论

可以认为杂质在 MCMTDA 芯片上的分布是均匀的. 部分探测元具有的高性能说明: 材料中杂质已低到不会明显影响器件性能的水平, 故影响器件性能的因素应从缺陷方面来考虑. 实验表明: MCMTDA 芯片中缺陷成像机构是晶格畸变产生的直接像和晶面取向不同产生的取向衬度.

光敏区的 HgCdTe 晶体直接产生探测信号, 是器件的关键部分, 对形貌相的分析应从此入手. 光敏区两端扩展电极上覆盖着金薄膜, 金对 X 射线的吸收作用使扩展电极部分的 HgCdTe 材料的形貌相衬度与光敏区的有所不同, 而且, 多晶结构的金电极也不会影响 HgCdTe 材料的形貌相. 由于芯片受到较强应力作用, 一张形貌相不能反映其缺陷的全貌. 利用衍衬像的消光效应, 用不同晶面的衍衬像就可较全面地反映样品的缺陷.

一个 33 元探测器芯片的典型同步辐射形貌相如图 1 所示, 第 1~33 探测元的形貌相在图中从左至右顺序排列, 该探测器的探测率呈鞍形分布. 图 2 是其探测率分布的直方图. 表 1 列出该器件性能的实测参数.

因晶格形变较大, 在图 1(a) 中只看见第 1 探测元上端的 HgCdTe 扩展电极, 在图 1(b) 中可看到其扩展电极和光敏区. 探测元上方的扩展电极和光敏区之间已分裂开, 说明是由晶面取向差产生的取向衬度所致, 但第 1 探测元光敏区的形貌相仍较完整. 光敏区和扩展电极之间存在取向差的还有第 25~33 探测元, 经测定其取向差最大可达 $15'$, 这

表 1 探测率呈鞍形分布的 33 元探测器实测性能 ($I_b = 3 \text{ mA}$, $T_{\text{Black}} = 500 \text{ K}$, $\text{FOV} = 180^\circ$)
 Table 1 Measured specifications of the 33-element detector array with a saddle-shaped detectivity distribution

No.	$R_{77\text{K}} (\Omega)$	$V_s (\mu\text{V})$	$V_n (\mu\text{V})$	$R_V (\text{V/W})$	$D^* (\text{cmHz}^{1/2}/\text{W})$
1	48	6.10	0.210	3.72×10^3	1.63×10^{10}
2	45	7.10	0.230	3.17×10^3	1.73×10^{10}
3	43	3.50	0.150	1.56×10^3	1.31×10^{10}
4	41	2.40	0.120	1.07×10^3	1.12×10^{10}
5	38	1.40	0.092	0.62×10^3	0.85×10^{10}
6	35	0.98	0.088	0.44×10^3	0.62×10^{10}
7	35	0.50	0.072	0.22×10^3	0.39×10^{10}
8	33	0.23	0.080	0.10×10^3	0.16×10^{10}
9	32	0.10	0.080	0.04×10^3	0.07×10^{10}
10	33	0.08	0.057	0.04×10^3	0.08×10^{10}
11	41	0.00	0.130	0	0
12	34	0.00	0.120	0	0
13	33	0.00	0.100	0	0
14	34	0.00	0.100	0	0
15	32	0.00	0.100	0	0
16	46	6.40	0.220	2.86×10^3	1.63×10^{10}
17	46	6.50	0.210	2.90×10^3	1.73×10^{10}
18	48	5.40	0.190	2.41×10^3	1.59×10^{10}
19	49	5.70	0.200	2.54×10^3	1.59×10^{10}
20	48	5.60	0.200	2.50×10^3	1.57×10^{10}
21	48	6.10	0.210	2.72×10^3	1.63×10^{10}
22	63	6.30	0.220	2.81×10^3	1.60×10^{10}
23	51	6.80	0.230	3.04×10^3	1.65×10^{10}
24	52	6.40	0.220	2.86×10^3	1.63×10^{10}
25	50	7.20	0.240	3.21×10^3	1.68×10^{10}
26	55	6.10	0.210	2.72×10^3	1.63×10^{10}
27	54	7.60	0.250	3.39×10^3	1.70×10^{10}
28	52	5.40	0.200	2.41×10^3	1.51×10^{10}
29	62	7.30	0.260	2.26×10^3	1.57×10^{10}
30	60	5.20	0.210	2.32×10^3	1.39×10^{10}
31	46	1.80	0.110	0.80×10^3	1.92×10^{10}
32	75	8.40	0.370	3.75×10^3	1.27×10^{10}
33	86	7.40	0.320	3.30×10^3	1.29×10^{10}

是一个亚晶界典型值. 由于亚晶界都出现在光敏区和扩展电极之间, 故认为是器件工艺应力所致.

在图 1(a) 中, 第 2~4 元有可分辨的光敏区和扩展电极; 光敏区第 5~9 探测元的直接像弥散, 使得较难分辨探测元之间的沟道; 第 10~15 探测元光敏区表现出取向衬度, 测出两侧的晶面约有 10° 的取向差; 第 31 探测元光敏区也较为模糊; 第 16~30、32~33 探测元光敏区的形貌相则比较完整和清晰, 可分辨出探测元之间的沟道, 显示出该区域的 HgCdTe 材料有较好的晶格结构.

总体上看, 图 1(a) 中所有尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的光敏面沿探测元的长度方向被拉长了, 说明探测元在该方向都受到拉力的作用. 这可能是在镀金电极工艺中, 金原子从气态到固态相变时产生的应力所致. 根据形貌相估算, 光敏区 HgCdTe 材料在长度方向的相对

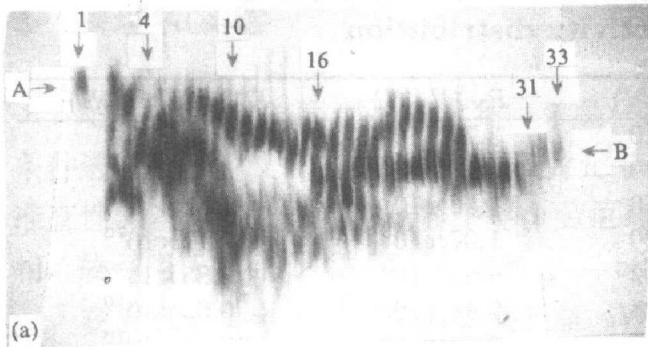


图 1(a) 多元 HgCdTe 线列探测器芯片的形貌相之一 (35X) (图中数字为探测元序号, A 为电极区, B 为光敏区)

Fig. 1(a) The first topograph of the multi-element HgCdTe detector array (35X) (A: electrode area, B: active area)

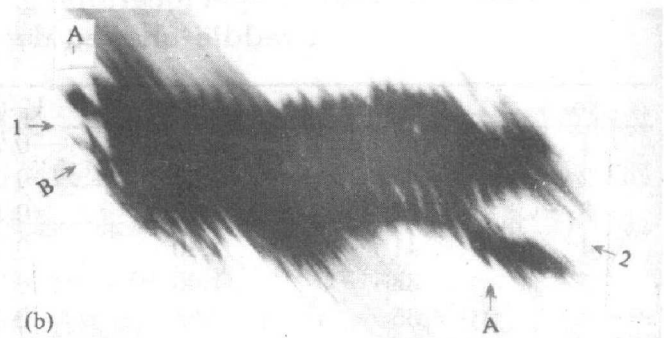


图 1(b) 多元 HgCdTe 线列探测器芯片的形貌相之二 (1 为第 1 探测元上方的电极和光敏面之间有取向衬度, 2 为第 25~33 探测元下方的电极和光敏面有取向衬度, A 为电极区, B 为光敏区)

Fig. 1(b) The second topograph of the multi-element HgCdTe detector array (35X) (A: electrode area, B: active area)

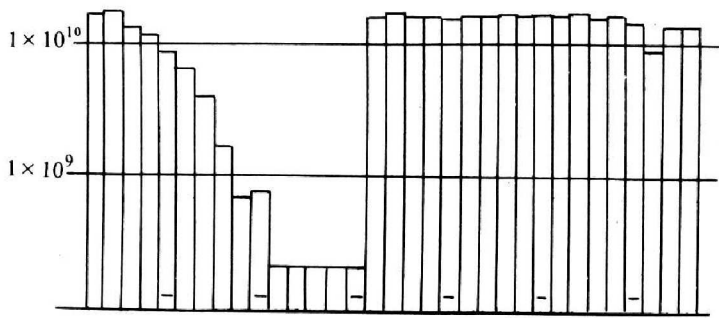


图 2 多元 HgCdTe 线列探测器探测率的分布
Fig. 2 The detectivity distribution of the 33-element HgCdTe linear array

变化量约为 100%，该变化量明显超过了 HgCdTe 材料晶格参数贡献的变化量. 使该区域形貌相明显变长的原因是 HgCdTe 晶片在应力作用下晶面发生了弯曲, 除此之外, 晶片产生的晶面滑移也会使形貌相形变. 由于生长方法的限制, HgCdTe 体晶中常存在相当大的残留应力, 其值可高达 $10 \sim 10^2 \text{ N/cm}^2$ 的数量级^[3], 这已接近其 $(1.1 \sim 4.4) \times 10^3 \text{ N/cm}^2$ 塑性形变阈值^[4]. 当应力超过该临界值后, 样品便在应力集中区发生范性形变 (如滑移), 进而造成晶格损伤和产生缺陷. 图 1(b) 形貌相中直接像的大片衬度也表明整个器件受到较强的应力作用, 这与上述分析一致. 因消光效应, 从图 1(b) 基本上不能分辨出探测元之间的沟道. 实际上, MCMTDA 形貌相与其精致外形的对应关系综合反映了 MCT 材料和器件工艺的应力控制水平.

从表 1 和图 2 可知, 33 个探测元都有液氮温度电阻和噪声电压, 说明探测元无宏观断裂. 光敏区形貌弥散的第 5~9 探测元呈现低性能, 光敏区形貌模糊的第 31 探测元性能稍差, 光敏区形貌相表现出取向衬度, 即白色衬度的第 10~15 探测元无信号响应, 光敏区形貌相比较完整的第 1~4、16~30 和 32~33 探测元则有高性能. 换言之, MCMTDA 探测元性能的高低和有无与探测元光敏区 HgCdTe 材料形貌相的好坏有对应关系.

探测元光敏区形貌相的弥散、模糊和存在取向衬度都是该区域 HgCdTe 材料的晶格不完整性的表现, 并与 HgCdTe 材料在生长和器件加工过程受到的应力作用有关. 取向

变化量约为 100%，该变化量明显超过了 HgCdTe 材料晶格参数贡献的变化量. 使该区域形貌相明显变长的原因是 HgCdTe 晶片在应力作用下晶面发生了弯曲, 除此之外, 晶片产生的晶面滑移也会使形貌相形变. 由于生长方法的限制, HgCdTe 体晶中常存在相当大的残留应力, 其值可高达 $10 \sim 10^2 \text{ N/cm}^2$ 的数量级^[3], 这已接近其 $(1.1 \sim 4.4) \times 10^3 \text{ N/cm}^2$ 塑性形变

衬度是滑移面两侧的晶面存在取向差所致, 弥散、模糊和形貌相是无规则晶格畸变区 (即缺陷区) 产生的直接像所致. 用图 3 所示滑移面模型可以初步解释探测元性能和存在取向衬度的光敏区形貌相的关系. 当滑移面只在光敏区时, 信号电流要完全穿过滑移产生的缺陷区, 光生载流子将被大部或全部复合. 当滑移面延伸至金电极下的 HgCdTe 材料时, 信号电流可近平行的流向电极区, 滑移面附近的缺陷不会明显影响光生载流子的复合. 同样, 信号电流在通过无规则晶格畸变区时, 光生载流子也将被复合, 复合速率的大小取决于晶格畸变区的大小和分布. 由于响应率和探测率都正比于光生载流子的有效寿命, 光敏区的复合速率大, 显然光生载流子的有效寿命短, 故探测元的性能低甚至无性能, 反之则探测元有高性能.

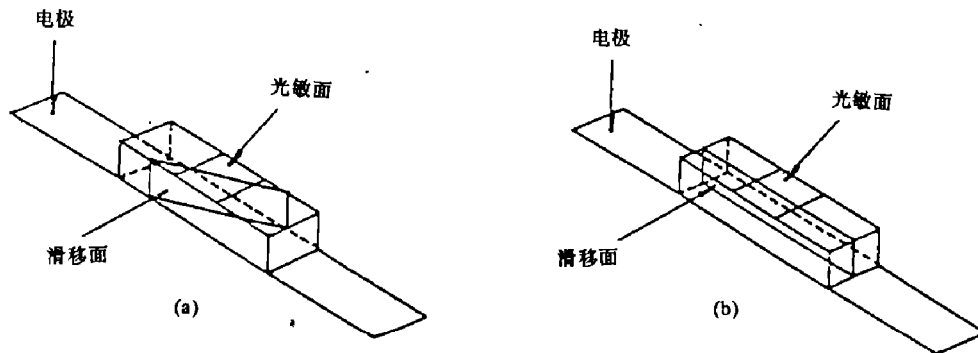


图 3 滑移面在探测元光敏区位置的示意图

(a) 滑移面截于探测元光敏区; (b) 滑移面延伸进入探测元电极区

Fig. 3 A slip plane location in the active area of a detecting element

(a) A slip plane intersecting the active area of a detecting element;

(b) A slip plane extending into the electrode area of a detecting element

由前面列举的 HgCdTe 材料应力数据不难理解, 器件工艺很容易在接近塑性形变的 HgCdTe 晶体中引入缺陷, 当晶片被减薄至数十微米时尤其如此, 故光敏区 HgCdTe 材料形貌相中大的缺陷很可能都是应力造成的. 要提高 MCMTDA 的性能和成品率, 需认真研究和解决低残留应力的 HgCdTe 晶体生长和近无损伤的器件工艺问题.

3 结语

3.1 性能不均匀的 MCMTDA 芯片的同步辐射形貌相已经发生了明显的形变, 说明样品普遍受到较强应力的作用, MCMTDA 形貌相与外观的对应关系综合反映出 HgCdTe 材料和器件工艺的应力控制水平.

3.2 MCMTDA 性能的高低与其光敏区形貌相的好坏有对应关系, 在一定条件下, MCMTDA 的探测率和均匀性首先受其探测元光敏区 HgCdTe 材料中的晶体缺陷控制.

3.3 如在探测元中存在亚晶界或滑移面, 且横截于光敏区, 则即使探测元有正常的偏流、阻抗和噪声电压, 也不会有好的信号响应, 如其延伸进入电极区, 则不会明显影响器件的性能.

致谢 昆明物理所为本工作提供了测试样品和器件性能的测量数据, 在拍摄同步辐射形貌相时, 还得到同步辐射国家实验室形貌站赵际勇、王洲光和南京大学物理系杨平等同志的大力协助, 特在此一并致谢.

参考文献

- 1 Datsenko LI, et al. *Inorg. Mater.*, 1985,20(11):1575~1578
- 2 Dean BE, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991,B9(3):1840~1846
- 3 王跃, 等. *红外技术*, 1990,12(6):1~5
- 4 Epenuma SN, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992,B10(4):1451~1453

SYNCHROTRON RADIATION TOPOGRAPHY ANALYSIS OF MULTI-ELEMENT HgCdTe DETECTOR LINEAR ARRAYS*

Cai Yi^{1,2)} Zheng Guozhen¹⁾ Zhu Xichen²⁾ Jiang Jianhua³⁾ Tang Dingyuan¹⁾

¹⁾ National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²⁾ Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China;

³⁾ Beijing Electron Positron Collider National Laboratory, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract High-resolution topographs of long-wave multi-element HgCdTe PC detector arrays were taken with synchrotron radiation white-beam topography. A number of crystal defects were revealed in the detecting elements of the multi-element detector arrays, such as lattice distortion zones, subgrain boundaries and slip planes. The experimental results show that there is a correlation between the performances of multi-element detector arrays and the defects in their active areas; that the stress state of HgCdTe device chips is greatly affected by device technologies; and that the lattice perfection of the detecting elements of multi-element detector arrays reflects the effect of device technologies on the stress state of HgCdTe device chips.

Key words HgCdTe, multi-element detector arrays, crystal defects, synchrotron radiation topography.

*The project supported by the Beijing Electron Positron Collider National Laboratory, Chinese Academy of Sciences