

基于 MBE 替代硅衬底的材料综述

李 震,王亚妮,王 丛,高 达,周 朋,刘 铭
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要:主要介绍了几种用 MBE 技术生长 HgCdTe/CdTe 的 Si 衬底的替代性衬底材料的基本参数,以及不同材料的最新生长过程及结果,和对它们的生长结果的比较分析,以此来选择较为适合替代 Si 衬底来生长 HgCdTe/CdTe 的衬底。本文通过一系列的对比,得出目前最有发展前景的替代衬底是 GaSb 衬底,是未来发展的方向。

关键词:MBE;衬底;CdZnTe;HgCdTe;CdTe

中图分类号:TN213 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.06.001

Summary of materials based on MBE substituting silicon substrate

LI Zhen, WANG Ya-ni, WANG Cong, GAO Da, ZHOU Peng, LIU Ming
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: This paper mainly introduces the basic parameters of several alternative substrate materials for growing HgCdTe/CdTe Si substrates by MBE technology, as well as the latest growth processes and results of different materials, and comparative analysis of their growth results. A substrate, which is more suitable for replacing the Si substrate to grow HgCdTe/CdTe is selected. Through a series of comparisons, it is concluded that the most promising alternative substrate is GaSb substrate, which is the direction of future development.

Keywords: MBE; substrate; CdZnTe; HgCdTe; CdTe

1 引 言

对于未来更先进红外焦平面探测器来说,探测器的规模变得越来越大,高性能双多色探测器的发展也逐渐呈上升趋势,使得对 HgCdTe 材料有着更高的要求。所以大面积、组分和厚度均匀以及高晶体质量的 HgCdTe 外延薄膜材料成为了 HgCdTe 红外焦平面器件技术研究的重点。因为在 CdZnTe 衬底上外延 HgCdTe 可以达到质量最佳的材料,不过 CdZnTe 衬底较为昂贵,而且到目前为止其衬底尺寸依然不能扩大。因此,人们在近几十年中研究出了

若干种如 Si、Ge、InSb、GaSb 以及 GaAs 衬底等替代性衬底来取代 CdZnTe 衬底^[1-3]。表 1 为部分薄膜材料的基本参数,这些衬底都具有高晶体质量、大面积、低成本以及取用方便等优点,使得它们在 HgCdTe 红外焦平面器件的发展中占据着重要位置。然而,可以从图 1 中看出,这些衬底与 HgCdTe 的晶格和热膨胀系数都有很大的失配问题,如 Si 与 CdTe 之间高达 19.3 % 的大晶格失配所导致的多晶、孪晶抑制问题以及外延层晶体质量问题,因此其应用只能局限在中短波范围,长波范围的应用进展

并不理想^[1-2,4-5]。

因为需要生长具有闪锌矿结构的 HgCdTe 层,所以衬底也最好是闪锌矿结构的材料。具有如此结构的材料有 HgTe、CdTe、ZnTe、 $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ (z 为 Zn 的材料组分)等(HgTe、CdTe、ZnTe 等也可能是闪锌矿结构,也可能是纤锌矿结构),另外 GaAs、GaSb 也是闪锌矿型结构^[1]。Si 和 Ge 是金刚石结构^[5],并且金刚石结构类似闪锌矿结构。 Al_2O_3 是六方体结构,加工处理技术要求极高,只有高精密的加工才能获得大面积、低损伤的衬底材料。此外,它只能透过中短波红外,只有减薄除衬才可应用于长波波段^[5]。HgCdTe 晶体生长对于选取的不同衬底晶面有着很大的关系。例如,(111)面虽然台阶较多,但容易出现微孪晶;而在适当条件下,(211)B 面不但具有较高的台阶密度,生长速率更快,能减少孪晶和微缺陷等现象的发生,是分子束外延(MBE)HgCdTe 最为理想的晶面取向^[1,6]。

表1 HgCdTe 外延衬底薄膜材料性能

Tab. 1 HgCdTe epitaxial substrate film material properties

	CdTe	Ge	Al_2O_3	GaAs	Si	GaSb	InSb
熔点/℃	1092	937	—	1237	1412	712	525
结构	闪锌	金刚石	六方	闪锌	金刚石	闪锌	闪锌
腐蚀坑密度/ cm^{-2}	10^5	10^2	4×10^2	10^3	0	—	10^2
晶格常数/ $\text{\AA}$	6.482	5.675	—	5.6532	5.4307	6.0959	6.4796
热膨胀系数/ $(\times 10^{-6} \text{K}^{-1})$	5.31	6.1	5.0	6.7	2.6	6.7	5.04

2 GaAs 衬底

GaAs 材料是一种非常成熟的、仅次于 Si 单晶而广泛应用的半导体材料,可以做到大面积、高的晶体质量,与 Si 相比具有带宽(1.42 eV)、电子迁移率高($8500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)等特性^[7-8]。可以采用液相外延(LPE)、气相外延(VPE)和分子束外延(MBE)等外延技术在 GaAs 衬底上生长 HgCdTe。GaAs 衬底材料也有其不足:GaAs 与 MCT 的晶格失配大(14.6%);Ga 和 As 易透过 CdTe 层扩散进入 HgCdTe,造成污染^[5]。

美国陆军实验室^[9-11]早在 2012 年就应用 VG-80 分子束外延系统在 3 in GaAs(211)衬底上生长出了 CdTe 薄膜。首先是在 580 ℃时使用 As_4 对脱氧后的 GaAs 衬底钝化,并在较低温度下退火,其 CdTe

所以,本次只讨论在 Ge、InSb、GaSb 以及 GaAs 衬底上生长 CdTe 和 HgCdTe。

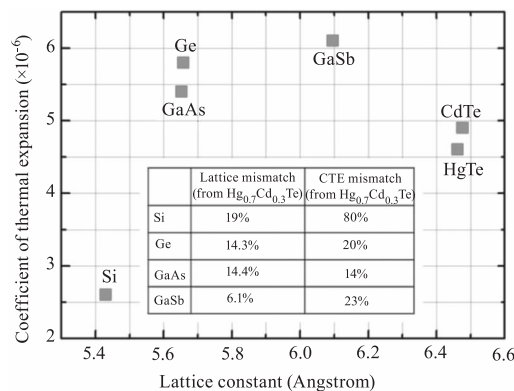


图1 几种 HgCdTe 外延衬底的室温晶格常数和热膨胀系数
表格显示了四种替代衬底与 HgCdTe 之间的晶格常数和热膨胀系数失配情况

Fig. 1 The room temperature lattice constant and thermal expansion coefficient of several substrates for HgCdTe epitaxy. The table shows the lattice constant and thermal expansion coefficient mismatch between the four alternative substrates and HgCdTe

薄膜厚度在 9 ~ 13 μm 。表 2 的 CdTe 膜厚平均为 11.5 μm 左右。之后再在 CdTe 薄膜上生长出 HgCdTe 薄膜,其平均厚度在 9.5 μm 左右。如表 2^[9]所示,连续的 4 片测试参数的半峰宽在 130 ~ 152 arcsec 之间,其半峰宽最优可以达到 52 arcsec,不过通过在(100)和(111)晶向上生长的 HgCdTe 薄膜,其半峰宽最大可以降低 10 arcsec 左右。腐蚀坑密度(Etch Pit Density, EPD)大约为 $2.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。

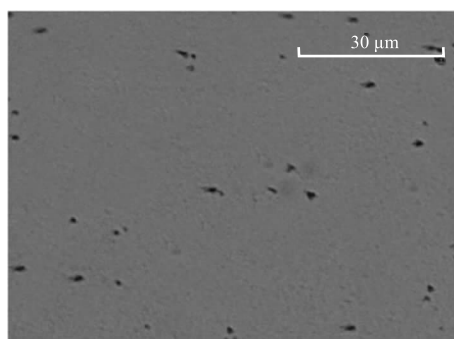
西澳大利亚大学^[12-15]在 2017 年应用 Riber 32P 分子束外延系统在生长了 GaAs 基 HgCdTe 和 CdZnTe 基 HgCdTe。其生长的 CdTe 膜厚为 5.7 ~ 6.7 μm ,生长的短波 HgCdTe 膜厚 5.7 ~ 6.7 μm ,腐蚀坑密度为 $8 \sim 40 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$;半峰宽为 98 ~ 155 arcsec。同时,在 GaAs 衬底上生长过程中,对其中的一

片生长上一层 ZnTe 薄膜,可以有效降低其位错密度。如图 2^[12]所示,腐蚀液采用 Chen's^[2] ($\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7=80\text{ mL}:10\text{ mL}:20\text{ mL}:8\text{ g}$) 腐蚀 3 min,使用 CdZnTe 衬底上生长的 HgCdTe 其腐蚀坑密度相较于在 GaAs 衬底上的低两个数量级。

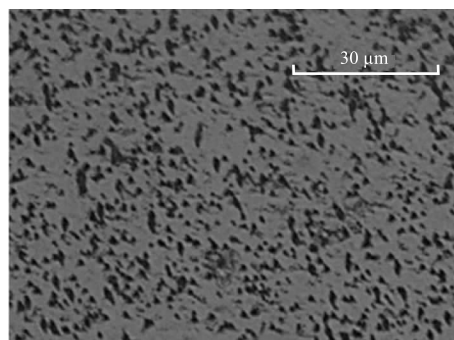
表 2 连续的 4 片 HgCdTe/CdTe/GaAs 的测试参数

Tab. 2 Test parameters of four consecutive HgCdTe/CdTe/GaAs

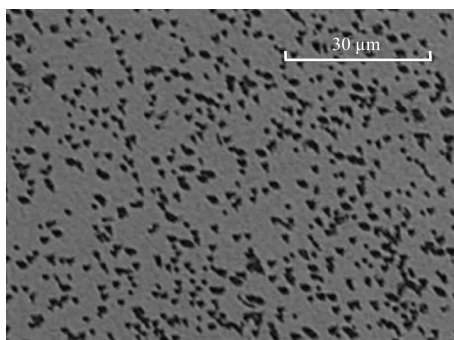
CdTe Thick / μm	HgCdTe Thick / μm	RC-FWHM /arcsec	FTIR x -value	EPD / cm^{-2}
12.3	8.65	—	0.232	2.7×10^6
13.8	9.45	130	0.230	2.3×10^6
10.1	9.6	138	0.230	5.4×10^6
9.8	10.3	152	0.225	7.2×10^6



(a) CdZnTe/HgCdTe, EPD = $2 \times 10^4\text{ cm}^{-2}$



(b) GaAs/HgCdTe with ZnTe, EPD = $2 \times 10^7\text{ cm}^{-2}$



(c) GaAs/HgCdTe with ZnTe, EPD = $6 \times 10^6\text{ cm}^{-2}$

图 2 几种衬底的腐蚀坑密度

Fig. 2 Corrosion pit density of several substrates

国内中科院上海技术物理研究所^[2,16]何力等人报道了 350 ~ 490 °C 的 HgCdTe/GaAs 原位高低温退火,在样品表面沉积了一层 ZnTe 或 ZnSe 用来保护表面形貌和组分。通过退火, HgCdTe 薄膜的 EPD 值从原生片 $9 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7\text{ cm}^{-2}$ 范围下降到了 $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6\text{ cm}^{-2}$ 。中国科学院大学^[17]2017 年在 GaAs(100) 生长 CdTe(100),俄罗斯 Ioffe 学院等^[18-19]在 2018 年在 GaAs(013) 衬底上生长了 HgCdTe,他们也都在采用了 GaAs 衬底生长 HgCdTe。可以看出,越来越多的国家在对 GaAs 的关注度越来越大。

3 GaSb 衬底

GaSb 衬底最近被提议作为一种新的替代衬底从而取代 CdZnTe 成为外延优质 HgCdTe 的生长材料,因为其具有更低的成本和更大的阵列规模。GaSb 衬底材料也有其不足:Ga 和 Sb 易透过 CdTe 层扩散,造成污染^[20-21]。

西澳大利亚大学^[12-15]在 2018 年使用 Riber 32P 分子束外延系统生长 CdTe 薄膜。首先在 580 °C 进行热处理,生长 150 ~ 200 nm 厚的 ZnTe 过度层,之后降温到 280 ~ 300 °C 生长 2 ~ 3 μm 厚的 CdTe 薄膜,其半峰宽最优可以达到 33 arcsec。采用 Everson 腐蚀液腐蚀 15 s 后,其腐蚀坑密度平均值可以达 $1.4 \times 10^5\text{ cm}^{-2}$ 。图 3^[12] CdTe/GaSb(211)B 的 AFM 表面图及高度剖面,图 4^[12] (a) 和 (b) 分别为 CdTe/GaSb(211)B 原生及经腐蚀后的 SEM 表面。

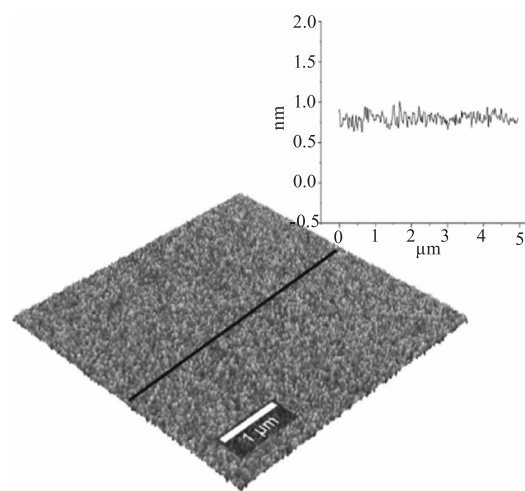
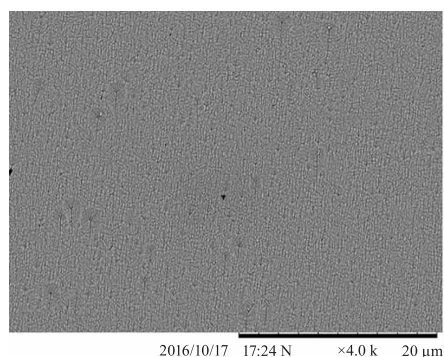


图 3 CdTe/GaSb(211)B 的 AFM 表面图及高度剖面

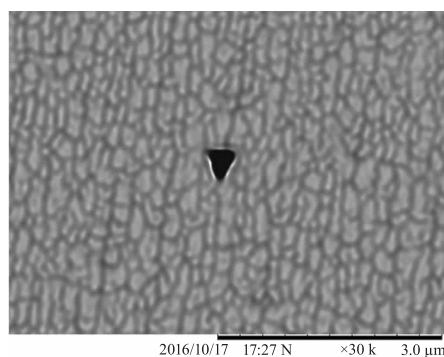
Fig. 3 AFM surface and height profile of CdTe/GaSb(211)B

西澳大利亚大学早在 2015 年就对 GaAs(211)

和 GaSb(211) 衬底生长 HgCdTe 进行了比较,按照如图 5^[14] 所示的生长顺序进行生长,在 GaAs 衬底上多生长了一层 ZnTe 过渡层,之后再依次生长 CdTe 与 HgCdTe 薄膜。图 6^[14] 分别为在 GaAs 和 GaSb 衬底上生长 HgCdTe 后的 X-Ray Diffraction (XRD) 曲线、生长 HgCdTe 时的 RHEED 图像和经腐蚀后的材料表面。



(a) CdTe/GaSb(211)B 原生



(b) 经腐蚀后的 SEM 表面

图 4 CdTe/GaSb(211)B 原生及经腐蚀后的 SEM 表面

Fig. 4 CdTe/GaSb(211) B primary and post-etched SEM surfaces

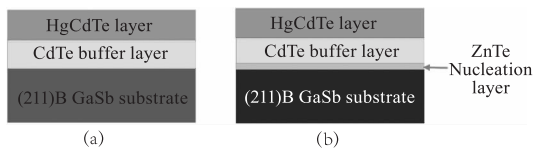
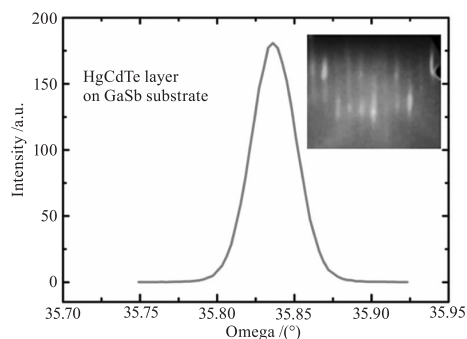
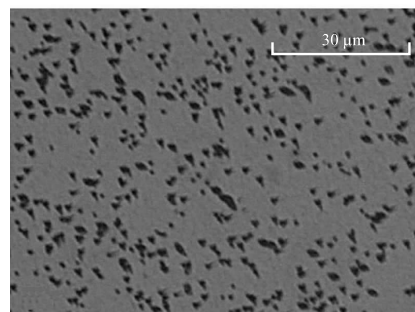


图 5 GaAs(211) 和 GaSb(211) 上生长 HgCdTe 图解

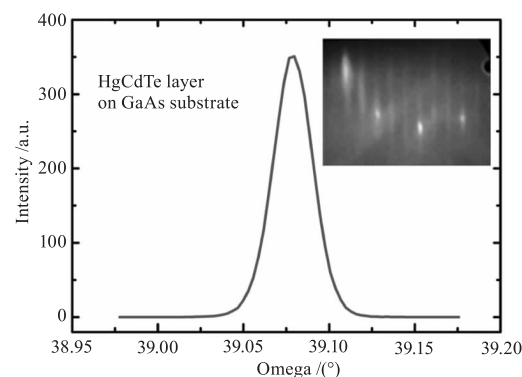
Fig. 5 HgCdTe pattern growth on GaAs(211) and GaSb(211)



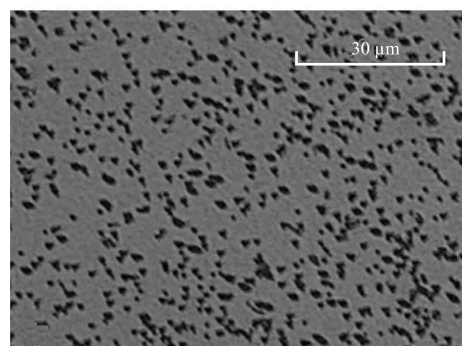
(a) GaSb 衬底上 HgCdTe 的 X-Ray Diffraction 曲线



(b) GaSb 上 HgCdTe RHEED 图像与经腐蚀后的材料表面



(c) GaAs 衬底上 HgCdTe 的 X-Ray Diffraction 曲线



(d) GaAs 上 HgCdTe RHEED 图像与经腐蚀后的表面

图 6 不同衬底上的材料表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of materials on different substrates

表 3 展示了部分测试参数,可以看出在不同衬底上生长出的 HgCdTe 薄膜质量相差不多,但是 GaSb 衬底上的腐蚀坑密度优于 GaAs 衬底。

表 3 GaAs 和 GaSb 衬底上生长 HgCdTe 测试参数

Tab. 3 HgCdTe test parameters for growth on GaAs and GaSb substrates

	x - value of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	HgCdTe thickness / μm	CdTe thickness / μm	FWHM / arcsec	EPD / ($\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$)
GaSb	0.27 ~ 0.32	4.5 ~ 5.3	5.3 ~ 5.7	122 ~ 139	2 ~ 10
GaAs	0.26 ~ 0.32	5.7 ~ 6.7	5.7 ~ 6.7	98 ~ 155	8 ~ 40

4 InSb 衬底

InSb 和 Ge、Si 相比虽是发现较晚的半导体材

料,但是其制备工艺相对简单,且具有很小的禁带宽度很高的电子迁移率,晶圆尺寸可达4 in,可以外延大面积长HgCdTe材料。其缺点是In和Sb元素会在生长CdTe和HgCdTe时扩散进材料,造成污染。

华北光电技术研究所^[22-23]在InSb(100)以及相应的带偏转角的2 in衬底的高温工作类型材料外延中取得了一定的进展,积累了一定的衬底湿化学(改良CP4)处理和外延预处理(热脱附)的经验;建立InSb表面RHEED相图体系;设备源炉配备完全,缓冲层外延技术成熟;外延的CdTe膜层RHEED图像条纹清晰且延长。在1.7 μm 厚度条件下,CdTe膜层的半峰宽约为100 arcsec。图7^[23]为材料表面SEM形貌图($\times 5000$),图8^[23]为InSb基CdTe复合衬底X光形貌图样。

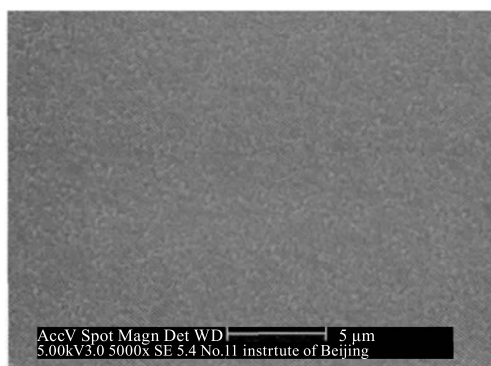


图7 材料表面SEM形貌图($\times 5000$)

Fig. 7 SEM topography of material surface($\times 5000$)

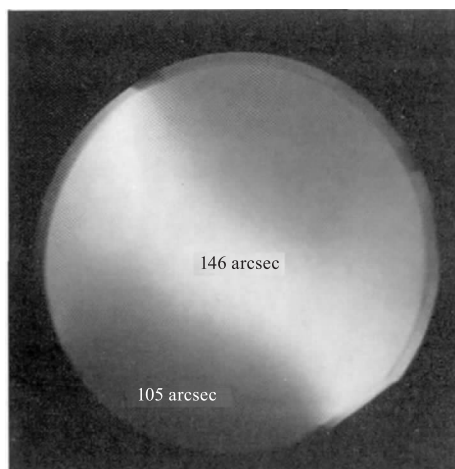


图8 InSb基CdTe复合衬底X光形貌图样

Fig. 8 X-ray topography of InSb-based CdTe composite substrate

在生长工艺方面国外起步早所以成熟晶片尺寸已经发展到6 in,国内在2 in和3 in晶体的材料尺

寸和工艺成熟度等方面与国外尚存有一定差距,未来随着探测器以及InSb材料的发展一定会需要尺寸更大,参数更优的InSb晶体材料。

5 Ge衬底

Ge晶体同样具有高质量、高机械性能,而且Ge能够使用Si的工艺设备进行加工。Ge衬底的缺点是:其是元素半导体,晶格结构是非极性的;Ge与CdTe在晶格方面存在大的热膨胀失配^[5]。

昆明物理研究所^[24]在2014年采用Riber 32P型分子束外延系统在3 in的Ge(211)衬底上生长了中波HgCdTe薄膜材料,组分为0.300和厚度为7.72 μm ;其宏观缺陷密度低于 200 cm^{-2} ,半峰宽优于90 arcsec,经0.5%溴甲醇腐蚀液处理,采用EPD腐蚀溶液进行EPD腐蚀后的腐蚀坑密度低于 $2.9 \times 10^6\text{ cm}^{-2}$;采用标准的二代平面工艺制备了 320×256 锗基中波碲镉汞红外焦平面探测器,其探测率达到 $3.8 \times 10^{11}\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,等效噪音温差优于17.3 mK,非均匀性优于6.5%,有效像元率高于99.7%。

如图9^[24]所示,在3 in Ge(211)上生长的HgCdTe/CdTe(211)B,表面为镜面光亮;在200倍显微镜下观察表面平整,以“十”字形选取9个视场平均得到表面宏观缺陷小于 200 cm^{-2} 。

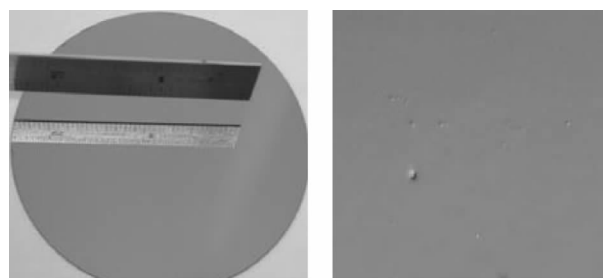


图9 3 in Ge基中波碲镉汞薄膜表面形貌

Fig. 9 The morphology of 3 inch MW HgCdTe/Ge film

如图10^[24]所示,在3 in Ge(211)上生长的HgCdTe/CdTe(211)B,在中心2 in范围内的半峰宽平均值为90.23 arcsec,半峰宽偏差3.03 arcsec,相对偏差为3.3%。

在Ge(211)上生长的HgCdTe/CdTe(211)B,经0.5%溴+甲醇腐蚀液处理,采用 $\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 80\text{ mL}:10\text{ mL}:20\text{ mL}:8\text{ g}$ 溶液进行EPD腐蚀后,在1000倍显微镜下观察,以“十”字形选取9个视场平均得到腐蚀坑密度陷小于

$2.9 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。

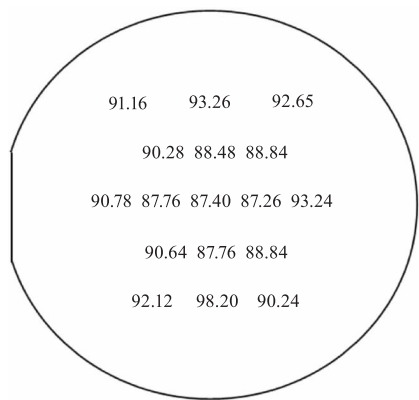


图 10 3 in Ge 基中波碲镉汞薄膜半峰宽均匀性分布

Fig. 11 The uniformity of FWHM on 3 inch MW HgCdTe/Ge film

6 结 论

通过上述介绍得到如下结论：

(1)低成本、大面积、高质量、易加工等原因是研究替代衬底材料的目的,MBE 技术的快速发展,使替代衬底材料的发展前景更大。目前这些衬底几乎都可以生长出 4~6 in 的大面积晶体材料。这其中 Al_2O_3 因为加工和外延生长技术的复杂及红外透过等原因,使得它不会被广泛使用。

(2)GaAs 和 GaSb 与 Ge 和 Si 相比,虽然有着不足(污染、机械性能差等),但是高质量 GaSb 衬底很

容易获得,且由于 GaSb 的晶格和热膨胀系数失配率要小得多,从原理上讲,这是一种较好的材料选择。表 4^[25] 对的 GaAs 和 GaSb 衬底的性质进行了对比,可以看出的是,GaSb 衬底与 GaAs 衬底具有相同的透射性。另外,从 X 射线衍射半峰宽和腐蚀坑方面看,GaSb 衬底的材料质量也是比较好的。虽然其成本比 GaAs 高,但是其较小的晶格失配可以生长出高质量的 HgCdTe,从而降低成本并广泛应用在红外焦平面阵列上。

(3)虽然 Ge 衬底同样可以做到低成本、大面积和高质量,且没有 Si 的先天红外透过问题,但是由于 Ge 与 HgCdTe 之间存在严重的晶格失配,所以其在外延 HgCdTe 的衬底方面的应用前景不大。

(4)表 5^[25] 对材料质量作了总结。对于复合型衬底材料来说,这些衬底已被成功地用在红外焦平面探测器方面。在 77 K 下,这些器件的性能已经比得上使用 CdZnTe 衬底制造的器件。不过,这些替代性衬底上制造的长波红外 HgCdTe 探测器和焦平面阵列的性能依然比不上在 CdZnTe 衬底上的同类器件。这些衬底发展的关键是需要解决晶格和热失配以及缺陷控制问题。

表 4 用于生长 HgCdTe 的 GaAs 和 GaSb 替代性衬底的主要特性

Tab. 4 Main characteristics of GaAs and GaSb alternative substrates for the growth of HgCdTe

原生(211)B 晶体	XRD FWHM/arcsec	EPD/ cm^{-2}	红外透射率/%	最大直径/in	单价/(美元/2 in 晶体)
GaSb	24~30	<5000	48~55	6	约 150
GaSb	20~25	<3000	47~52	4	约 550

表 5 CdZnTe、Si 和 GaAs 衬底上的 CdTe 和 HgCdTe 外延层的半峰宽和腐蚀坑密度值

Tab. 5 Half-width and etch pit density values of CdTe and HgCdTe epitaxial layers on CdZnTe, Si and GaAs substrates

原生(211)B	CdZnTe 衬底	CdZnTe 上的 HgCdTe	Si 上的 CdTe	Si 上的 HgCdTe	CaAs 上的 CdTe	CaAs 上的 HgCdTe
XRD FWHM/arcsec	8	12	50	80	30	80
EPD/ cm^{-2}	5×10^4	3×10^4	25×10^6	4×10^6	2×10^6	2×10^6

本文通过一系列的对比,得出目前最有发展前景的替代衬底是 GaSb 衬底,虽然依旧有高成本

和元素扩散等问题,但是相信这些问题以后都会得到解决,能够制造出最佳的红外探测器和焦平

面阵列。

参考文献:

- [1] Chu Junhao. Narrow band gap semiconductor physics [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
褚君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Chen Lu, Wang Yuanzhang, Wu Yan, et al. Molecular beam epitaxy of CdTe(211)B/Si composite substrate materials [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, (4): 245 – 249. (in Chinese)
陈路, 王元璋, 巫艳, 等. 分子束外延 CdTe(211)B/Si 复合衬底材料 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, (4): 245 – 249.
- [3] Chang Yong, Zhao Jun, Sivananthan S, et al. Performance and reproducibility enhancement of HgCdTe molecular beam epitaxy growth on CZT substrates using interfacial HgTe/CdTe superlattice layers [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(13): 131924 – 1 – 131924 – 3.
- [4] Wijewarnasuriya P S. Dislocation reduction in HgCdTe grown on CdTe/Si [C]//SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2016.
- [5] Zhou Liqing. Present situation and development of substrate materials for mercury cadmium mercury epitaxy [J]. Laser & Infrared, 2005, 45(11): 13 – 16. (in Chinese)
周立庆. 碲镉汞外延用衬底材料的现状和发展 [J]. 激光与红外, 2005, 45(11): 13 – 16.
- [6] K. Jowikowski, Rogalski A. Effect of dislocations on performance of LWIR HgCdTe photodiodes [J]. Journal of Electronic Materials, 2000, 29(6): 736 – 741.
- [7] Zhou Chunfeng, Lan Tianping, Sun Qiang. Technology development and demand of GaAs materials [J]. Tianjin Science and Technology, 2015, 42(3): 11 – 15. (in Chinese)
周春峰, 兰天平, 孙强. 砷化镓材料技术发展及需求 [J]. 天津科技, 2015, 42(3): 11 – 15.
- [8] Vasily S Varavin, V V Vasiliev, Sergey A Dvoretzky, et al. HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices [C]//Saratov Fall Meeting, 2003.
- [9] R N Jacobs, C Nozaki, L A Almeida. Development of MBE II-VI Epilayers on GaAs(211)B [J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41(10): 2707 – 2713.
- [10] R N Jacobs, M Jaime Vasquez, C M Lennon, et al. Dynamic curvature and stress studies for MBE CdTe on Si and GaAs substrates [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(9): 3076 – 3081.
- [11] Lei W, Gu R J, Antoszewski J, et al. GaSb: A new alternative substrate for epitaxial growth of HgCdTe [J]. Journal of Electronic Materials, 2014, 43(8): 2788 – 2794.
- [12] Gu R J, Lei W, Antoszewski J, et al. Strain simulation and MBE growth of CdTe on GaSb substrates [C]//Optoelectronic & Microelectronic Materials & Devices. IEEE, 2015.
- [13] Qiang Zhang, Xinyu Liu, Michael J DiNezza, et al. Influence of Te/Zn flux ratio on aluminium doped ZnTe grown by MBE on GaSb substrates [J]. Physica Status Solidi (c), 2012, 9(8): 1724 – 1727.
- [14] Wen Lei, Renjie Gu, Jark Antoszewski, et al. MBE growth of mid-wave infrared HgCdTe layers on GaSb alternative substrates [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(9): 3180 – 3187.
- [15] Gu R, Antoszewski J, Lei W, et al. MBE growth of HgCdTe on GaSb substrates for application in next generation infrared detectors [J]. Journal of Crystal Growth, 2017: S0022024816308934.
- [16] Zhao Zhendian, Chen Lu, Fu Xiangliang, et al. Arsenic incorporation and activation of cadmium mercury in MBE growth [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, (5): 65 – 70. (in Chinese)
赵真典, 陈路, 傅祥良, 等. MBE 生长碲镉汞的砷掺入与激活 [J]. 红外与毫米波学报, 2017, (5): 65 – 70.
- [17] Yi G, Hui-Jun Z, Xi-Ren C, et al. Influence of surface structures on quality of CdTe(100) thin films grown on GaAs(100) substrates [J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(8): 086801.
- [18] Mynbaev K D, Bazhenov N L, Dvoretzky S A, et al. Photoluminescence of molecular beam epitaxy-grown mercury cadmium telluride: comparison of HgCdTe/GaAs and HgCdTe/Si technologies [J]. Journal of Electronic Materi-

- als, 2018.
- [19] Yakushev M V, Mynbaev K D, Bazhenov N L, et al. Acceptor states in HgCdTe films grown by molecular-beam epitaxy on GaAs and Si substrates[J]. *Physica Status Solidi(c)*, 2016.
- [20] Selin, Koc M M. Spectroscopic and microscopic investigation of MBE-grown CdTe (211) B epitaxial thin films on GaAs (211) B substrates[J]. *Applied Nanoscience*, 2018; 891 – 903.
- [21] 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.
- [22] Liu Ming, Xing Weirong, Shang Lintao, et al. In-situ doping technique of InSb molecular beam epitaxy[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(7); 817 – 820. (in Chinese)
刘铭, 邢伟荣, 尚林涛, 等. InSb 分子束外延原位掺杂技术研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(7): 817 – 820.
- [23] Wang Cong, Liu Ming, Wang Jingwei, et al. Prepare CdTe on InSb substrate by molecular beam epitaxy[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(4); 474 – 478. (in Chinese)
王丛, 刘铭, 王经纬, 等. MBE 外延 InSb 基 CdTe 工艺研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47, (4); 474 – 478.
- [24] Lin Zhanwen, Han Fuzhong, Geng Song, et al. Study on the stress of ZnS passivation film on the surface of 3 inch bismuth-based HgCdTe[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(4); 322 – 326. (in Chinese)
林占文, 韩福忠, 耿松, 等. 3 英寸锗基 HgCdTe 表面 ZnS 钝化膜的应力研究[J]. *红外技术*, 2018, 40(4): 322 – 326.
- [25] Gao Guolong. The latest development of infrared focal plane array detector technology for mercury cadmium mercury[J]. *Infrared*, 2018, 39(2); 44 – 48. (in Chinese)
高国龙. 碲镉汞红外焦平面阵列探测器技术的最新进展(上)[J]. *红外*, 2018, 39(2); 44 – 48.