

GaSb 和 GaInSb 晶体制备工艺研究进展

王晋伟, 刘俊成

天津工业大学材料科学与工程学院, 天津 300387

摘要 介绍了 GaSb 单晶的制备方法, 包括提拉(CZ)法、垂直布里奇曼(VB)法、水平布里奇曼(HB)法、垂直定向凝固(VDS)法和垂直梯度冷凝(VGF)法, 总结了它们的优缺点。研究结果表明, VB法、VDS法和VGF法更适合 GaSb 单晶的生长。进一步介绍了三元合金 GaInSb 晶体生长工艺的研究进展, 微重力环境可以有效抑制晶体中 In 元素的成分偏析, 提高晶体的均匀性。简单介绍了 GaSb 单晶材料在器件制作方面的应用, 展望了 GaInSb 晶体材料的发展前景。

关键词 材料; GaSb; GaInSb; 晶体生长; 成分偏析

中图分类号 TN305.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070007

Research Progress on Preparation Technology of GaSb and GaInSb Crystal

Wang Jinwei, Liu Juncheng

School of Material Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

Abstract The preparation methods of GaSb single crystal are introduced, which include the Czochralski (CZ) method, the vertical Bridgman (VB) method, the horizontal Bridgman (HB) method, the vertical directional solidification (VDS) method, and the vertical gradient freeze (VGF) method. Their merits and demerits are also summarized. Research results show that the VB, VDS, and VGF methods are more suitable for the growth of GaSb single crystal. Research progress of the ternary alloy GaInSb crystal growth technology is introduced. The microgravity environment can effectively suppress the component segregation of In in the crystal and improve the uniformity of the crystal. The applications of GaSb single crystal materials in the fabrication of devices are introduced, and the development of GaInSb materials is prospected.

Key words materials; GaSb; GaInSb; crystal growth; component segregation

OCIS codes 160.6000; 160.1890; 140.3390

1 引言

近年来, 光纤通信技术的迅猛发展使其对新器件的需求越来越大^[1-5]。在所有 III-V 族材料中^[6-9], GaSb 材料由于具有特殊的组织与性能, 引起了更多关注^[10-13]。GaSb 材料的晶格常数可以与各种 III-V 族材料的三元、四元固溶体合金相匹配, 而这些材料的光谱恰好处于 0.8~4.0 μm 范围内, 因此, GaSb 材料在光纤通信领域具有不可替代的作用^[14-16]。此外, GaSb 材料在其他领域也有巨大的潜在应用价值, 如红外探测器^[17-19]、太阳能电池^[20]以及传感器^[21]等。但是, GaSb 材料在结构与性能方面尚存在诸多局限性。首先, GaSb 的晶体结构有不相容区域, 存在着浓度较高的残余受主的固有缺陷, 据分析, 该残余受主是由具有双电

收稿日期: 2017-02-15; **收到修改稿日期:** 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(50972085)

作者简介: 王晋伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体材料、光电子器件方面的研究。

E-mail: 1163878467@qq.com

导师简介: 刘俊成(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事功能材料、光电子器件方面的研究。

E-mail: jchliu@tjpu.edu.cn(通信联系人)

离特性的 Ga(V_{Ga})和 Sb 位置上的 Ga(Ga_{Sb})产生的^[22];其次,在一般情况下,不论采用何种制备工艺,未掺杂的 GaSb 都表现为 p 型导电特性,这是限制其器件应用的重要因素^[23-24]。为了改善 GaSb 材料的物理和电学性能,研究者采用 In 元素作为掺杂剂来生长三元合金 $Ga_{1-x}In_xSb$ (x 为 InSb 组分的摩尔分数)晶体,掺入的 In 元素会占据 GaSb 晶格结构中的 Ga 空位(V_{Ga})或取代原先 Ga 的位置,从而减少其固有缺陷(V_{Ga} 和 Ga_{Sb});同时,通过改变 x 的大小,可以对 $Ga_{1-x}In_xSb$ 晶体的带隙进行调控^[25],使其更好地满足器件的要求。为此,研究者对 GaInSb 晶体进行了深入的探索,并取得较大进展。本文详细介绍了 GaSb 和 GaInSb 晶体的制备方法,简单介绍了 GaSb 单晶材料在器件方面的应用,并展望了 GaInSb 晶体材料的发展前景。

2 GaSb 晶体的制备

近几十年来,研究者通过不断探索,总结出多种 GaSb 单晶制备方法:提拉(CZ)法、垂直布里奇曼(VB)法、水平布里奇曼(HB)法、垂直定向凝固(VDS)法和垂直梯度冷凝(VGF)法。

2.1 CZ 法

CZ 法是早期生长 GaSb 晶体最常用的方法,这种方法能提供工艺最好的圆形晶片,但其有一个不足之处,即在熔融 GaSb 的表面有氧化物薄膜,成分主要是 Ga_2O_3 ,这层薄膜使观察变得困难,且可促进孪晶的形成^[26]。为了避免这层薄膜的生成,研究人员使用了很多方法:纯氢气保护下的双坩埚技术、液封直拉(LEC)生长技术和两阶段生长技术,但每种方法都易产生孪晶和高密度位错。为了解决这些问题,国内外研究者进行了大量研究。

程雨等^[27]采用 LEC 工艺,通过调整热场条件,保持纵向温度梯度在 120 K/cm 以下,充分减小了晶体的热应力。另外,采取规范的放肩角度、收尾角度和降温速度等,避免了生长过程中因较大的温度变化而产生的热冲击对晶体的影响,有效地减少了晶体中的团状、线状等高密度位错,最终获得了高质量的直径为 3 inch (7.62 cm)的 GaSb 单晶,如图 1 所示。可见,在 LEC 工艺中,规范各种条件(温度、放肩角度等)可以有效提高晶体质量。邓志杰等^[28]采用磁场液封直拉(MLEC)工艺生长了 GaSb 单晶。分别测试了采用 MLEC 工艺和 LEC 工艺所得样品,结果表明,MLEC 样品的载流子迁移率明显增加,这说明加入磁场可以提高 GaSb 晶体的性能。黎建明等^[29]则采用 LEC 工艺有效地解决了氧化物浮渣问题,提高了 GaSb 单晶的结晶率。通过特殊的过滤措施,剔除了表面氧化物浮渣,拉晶状态类似于 LEC 法拉制 GaAs 单晶,不存在双坩埚法的传热滞后、温度难以控制等不足,可以批量地拉制出 GaSb 单晶材料。

为了进一步解决熔融 GaSb 表面氧化物薄膜的问题,于凯等^[30-31]采用 LEC 工艺对 GaSb 单晶展开实验研究,重点对比了 LiCl 和 KCl 的混合剂(其中 LiCl 和 KCl 的摩尔分数相等)以及 B_2O_3 两种液封剂作用下的晶体生长效果。图 2 为 LiCl 和 KCl 混合剂作为液封剂生长的 GaSb 晶体样品,从图中可见晶体的表面覆盖着较厚的杂质,其原因为 LiCl 和 KCl 混合剂具有较强的吸水能力,在晶体融化过程中可能与 GaSb 多晶料发生反应,生成了氧化物等杂质。采用脱水后的 B_2O_3 作为液封剂进行了两次实验,图 3 为第一次实验结果,即无保温罩且 B_2O_3 作为液封剂时生长的 GaSb 多晶;图 4 为第二次实验结果,即 B_2O_3 在保温罩下作为

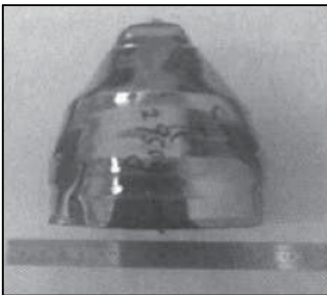


图 1 直径为 7.62 cm 的 GaSb 单晶

Fig. 1 GaSb single crystal with diameter of 7.62 cm



图 2 摩尔分数相等的 LiCl 与 KCl 的混合剂作为液封剂时生长的 GaSb 多晶

Fig. 2 GaSb polycrystal grown by mixture of LiCl and KCl with equal mole fraction as liquid sealing agent

液封剂时生长的 GaSb 夹晶。从图中可以看出,第一次实验中金属表面具有一定的光泽,且杂质较少,这是由于等径生长过程中,在提拉作用下, B_2O_3 在晶体和坩埚间呈现出圆环状,较其原来的平面状态高 2 cm,随着温度的降低, B_2O_3 的黏性逐渐增大,导致籽晶的转动减慢,减缓了降温速率,拉晶状态接近于恒温提拉,使得晶体质量提高。可见,液封剂是 LEC 工艺中影响晶体质量的一个重要因素,通过选取合适的液封剂可以在很大程度上提高晶体质量。



图 3 无保温罩下 B_2O_3 作为液封剂时生长的 GaSb 多晶
Fig. 3 GaSb polycrystal grown by B_2O_3 as liquid sealing agent without thermal insulation cover



图 4 有保温罩下 B_2O_3 作为液封剂时生长的 GaSb 夹晶
Fig. 4 GaSb clip crystal grown by B_2O_3 as liquid sealing agent with thermal insulation cover

综上所述,CZ 法的控制条件相对复杂,制备 GaSb 单晶时往往处于开放的环境中,容易导致晶体表面产生氧化物浮渣(主要成分为 Ga_2O_3),进而产生 GaSb 多晶以及一些其他缺陷,如位错、孪晶等。改进的 LEC 工艺很好地解决了这一问题,通过规范各项条件,或加入磁场、选取合适的液封剂等,有效地提高了晶体质量,减少了晶体中的缺陷。加入磁场可以在一定程度上减小杂质偏析或温度过低造成的溶质分布的不均匀性;常用的液封剂有 LiCl 和 KCl 的混合剂以及 B_2O_3 ,但前者具有较强的吸水性,容易产生氧化物杂质,后者经脱水后更适合作为 LEC 工艺的液封剂。

2.2 HB 法和 VB 法

HB 法的控制系统相对简单,在结晶界面能够获得较强的对流,VB 法则更有利于获得圆周方向对称的温度场和对流模式,从而使生长的晶体具有轴对称的性质,提高晶体的均匀性^[32]。采用 VB 法制备的 GaSb 单晶质量要优于用常规 CZ 法制备的 GaSb 单晶,但是用 VB 法制备的单晶的最大直径有限制,当生长直径超过限制时会形成多晶^[22]。近年来,通过国内外研究者的不断改进,HB 和 VB 技术取得了较大的进展。

吴光恒等^[33-34]在 HB 法的基础上,结合水平区熔法生长出了高质量的 GaSb 单晶(直径为 23 mm,长为 130 mm,重量达 153 g),即在晶体生长之前,对锭料进行多次区熔提纯,利用分凝效应将杂质和多余的组分赶到晶体两端。此外,为了有效克服沾舟,将舟的喷砂打毛之后,又增加了一道 HF 系列腐蚀剂的化学处理工艺,在一定程度上减少了孪晶的形成,提高了晶体的质量。

Roy 等^[35]用 VB 法研究了非掺和掺杂 GaSb 晶体的生长情况,实验中采用了 1.5,1.3,1.1,0.8 cm 等不同尺寸的石英管,实验结果见表 1,其中,使用 0.8 cm 石英管生长的掺 Te 的 GaSb 晶锭样品如图 5 所示。研究表明,坩埚直径过大或过小都会降低 GaSb 晶体的质量,坩埚直径为 0.8 cm 时最适宜生长 GaSb 晶体,这也在一定程度上限制了 GaSb 晶体的尺寸,是阻碍 GaSb 晶体应用于器件中的一个重要因素。此外,当 Te 作为掺杂剂时,晶体的位错密度最低,且载流子迁移率较高,表明 Te 是生长 GaSb 晶体的良好的掺杂剂。Boiton 等^[36]研究了温度梯度对 VB 法生长 GaSb 晶体的影响,当温度梯度从 8 K/cm 增加到 15 K/cm 时,晶体中的孪晶急剧减少,晶体质量得到显著提高,其质量接近于当时已报道的用 CZ 技术和 LEC 技术生长的 GaSb 晶体的质量。

综上所述,HB 法和 VB 法的控制条件相对简单,更适合进行 GaSb 单晶的量产。这两种方法都需要用到石英坩埚,为了抑制原料与坩埚壁的反应,往往会在坩埚内壁喷砂或涂碳,必要时会事先对原料进行区熔提纯,以去除杂质。VB 法由于重力作用,对坩埚直径和形状有严格的要求,直径太大或太小都会增加晶体缺陷,降低晶体质量。研究表明,坩埚直径处于 0.8 cm 左右时最适宜进行 GaSb 单晶的生长,坩埚常采用锥形底端,更复杂的设计是在底端增加一个缩颈段,便于在其中放入籽晶。温度梯度也是影响 VB 法生长晶体

的质量的一个重要因素,增大温度梯度有利于促进溶质的均匀分布,提高晶体的质量。此外,HB法虽然工艺简单,生长界面对流充足,晶体质量较高,但由于坩埚处于水平方向,往往不容易得到器件所需的圆形晶片;而VB法通过控制各项条件(坩埚形状、温度梯度等)可以制备出质量较高的GaSb单晶体,在器件应用方面更有优势。

表1 各种条件下GaSb晶体的电学参数

Table 1 Electrical parameters of GaSb crystal grown under different conditions

Sample	Crucible diameter /cm	Type of dopant	Type of conductivity	Hall mobility $\mu /[\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}]$	Carrier concentration / $(10^{17} \text{ cm}^{-3})$	Average dislocation density / (10^5 cm^{-2})
1	1.5	Undoped	p	422-521	2.64-2.07	2.7
2	1.3	Undoped	p	232-368	5.83-3.15	
3	1.1	Undoped	p	440-417	2.78-2.36	1.6
4	0.8	Te	p	394-527	1.91-1.25	1.5
5	1.1	Te	n	1870-2217	11.90-6.55	1.8
6	1.1	P	p	214-422	5.44-2.42	4.5
7	1.1	In	p	498-445	1.99-2.26	2.7

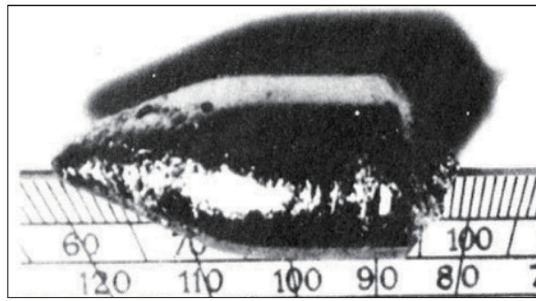


图5 用布里奇曼法生长的典型晶锭

Fig. 5 Typical GaSb crystal ingot grown with Bridgman method

2.3 VDS法

1994年,VDS法就已用于块状晶体的生长,但直到近年来才开始被广泛应用。其主要工艺改进是使用一个几何形状为缩颈的选择结晶装置,只允许一个晶粒生长进入缩颈,或者用一个晶种,形成晶核,生成与晶种相同取向的单晶体。去除C、B、Zr等元素,提高了合金的固相线温度,减轻了化学成分偏析,大大提高了晶体的质量^[37]。由于VDS法优越性明显,很多研究者用其生长出了高质量的GaSb晶体。

Gadkari等^[38]基于VDS法设计并制作了一种自动加热炉来控制GaSb晶体生长时的温度梯度、生长条件和各项参数,该方法结合了CZ法和布里奇曼法的特点,使得熔体不接触坩埚壁,且无需籽晶,生长出的典型的GaSb晶锭如图6所示,由图可见生长的晶锭表面光滑透亮,表明晶体质量较好。Choudhari等^[39]通过不断改进VDS技术,生长出了大尺寸且性能优越的掺Se的GaSb单晶,他们设计晶体生长炉时考虑到了旋转速率、轴向移动速率等因素,大大优化了工艺参数。采用光学显微镜观察切割抛光后的样品,并进行扫描电镜(SEM)测试,结果如图7所示。由图可见,其表面除几处微裂纹外,总体比较光滑透亮,且SEM测试也表明晶体的组织比较均匀。



图6 石英管中的GaSb晶锭

Fig. 6 GaSb crystal ingot in quartz tube

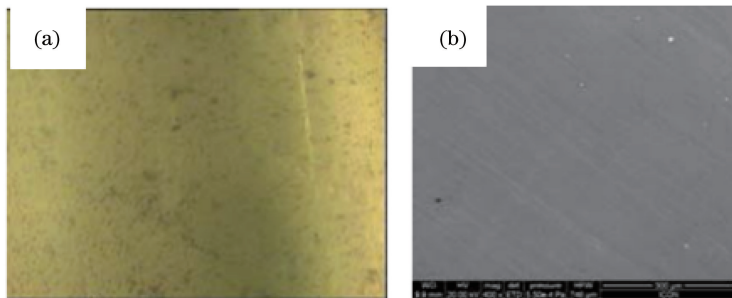


图 7 (a)光学显微镜和(b) SEM 照片

Fig. 7 Photos of (a) optical microscope and (b) SEM

VDS 技术是近年来迅速崛起的新技术, 研究者们结合 CZ 和 VB 法的特点, 设计并制作了较 VB 法更为复杂的精密温控晶体生长炉。VDS 技术无需籽晶, 且晶体在生长过程中不接触坩埚壁, 改善了晶体生长过程中熔体粘连坩埚壁引起的孪晶和位错, 大大提高了晶体的质量。

2.4 VGF 法

VGF 法是近年来常用的生长高质量单晶的技术。与 VDS 法有所不同, VGF 法的坩锅和炉子相对静止, 在适当的温度梯度下, 熔液缓慢冷却, 达到晶体生长的目的。其主要优点是减少了轴向和辐射的温度梯度, 晶体生长过程中的温度分布均匀。不少研究者利用此方法生长出了高质量的 GaSb 单晶。

Reijnen 等^[40]用 VGF 法生长出了直径为 2 inch (5.08 cm) 的掺 Te 的 GaSb 单晶, 如图 8 所示。实验证明, 无论坩锅与晶体间的夹角是 90° 还是 32.5° , 生长出的晶锭都会出现较多的小面。为了消除小面, 增加了生长温度梯度, 将实验所得晶锭样品切割, 得到图 9 所示的横截面, 其中图 9(a)、(b) 分别为低温度梯度和高温温度梯度下晶锭样品的横截面。由图可见, 高温温度梯度下生长的晶锭小面的数量较少, 组织更均匀。Garandet 等^[41]同样采用 VGF 法生长出了高质量的 GaSb 单晶, 位错密度测试结果显示, 其位错密度随生长方向大幅度降低, 可能原因是生长过程中晶体相对 (111) 面逐渐倾斜, 消除了晶体侧面的位错。综上所述, VGF 法通过直接控制温度场来调控温度梯度, 克服了温度梯度对晶体生长的不良影响, 大大增加了晶体生长过程中的稳定性, 有效提高了晶体的质量。



图 8 VGF 法生长的晶锭

Fig. 8 GaSb crystal ingot grown with VGF method

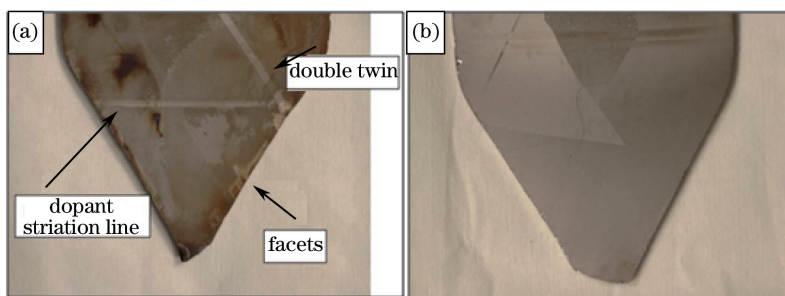


图 9 (a)低温度梯度下和(b)高温温度梯度下 GaSb 横截面

Fig. 9 GaSb cross section under (a) low temperature-gradient and (b) high temperature-gradient

综上所述,由于 CZ 法控制条件苛刻、实验装置复杂,生长出的晶锭质量较差,HB 法不能提供器件所需的圆形晶片,近年来人们逐渐倾向于使用 VB、VDS 和 VGF 法,这三种方法都需要使用晶体生长炉加热,放入坩埚中的原料需与炉子平行,生长出的晶锭具有轴对称性,组织均匀性高,更满足工业化生产以及器件应用的要求。

3 GaInSb 晶体的制备

如上所述,近年来 GaSb 晶体的制备工艺已经取得了重大的进展,但半导体器件的迅猛发展对衬底材料的质量提出了更高的要求。许多研究者对 GaSb 进行改性,以改善其质量。掺入 In 元素生长的三元合金 $Ga_{1-x}In_xSb$ 晶体减少了 GaSb 晶格结构中的固有缺陷(V_{Ga} 和 Ga_{Sb});通过调整 x 的大小控制 In 的组分,以实现对其 $Ga_{1-x}In_xSb$ 晶体禁带宽度等电学参数的调控,使其能够更好地满足器件的要求^[25]。但影响 GaInSb 晶体质量的主要因素是无法精确控制 Ga、In、Sb 三种元素的比例,以至于在晶体中产生较大的成分偏析^[42-45]。研究表明,微重力条件在很大程度上改善了重力驱动的对流对 GaInSb 晶体生长的影响,从而各元素分布的均匀性得到提高,有效地抑制了 In 元素的偏析,因此是改善 GaInSb 晶体质量的良好途径。Murakami 等^[46-47]在 VB 技术中采用 GaSb(111)/Te-doped InSb/GaSb(111)结构,研究了微重力条件下 GaInSb 晶体的生长情况,实验装置及样品如图 10 所示。Arivanandhan 等^[48]在空间站采用 VGF 法进行了 GaInSb 晶体的生长,样品同样采用 GaSb(111)/Te-doped InSb/GaSb(111)结构,生长装置示意图及温度机制如图 11 所示。测试表明,微重力环境极大地提高了 GaInSb 晶体的质量,晶体的成分偏析显著减小,各项性能得到了显著的改善。

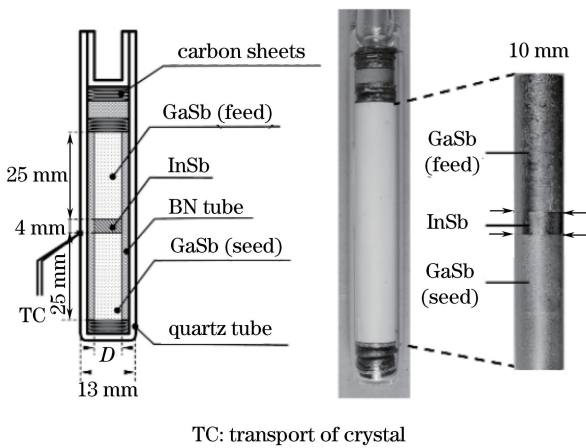


图 10 晶体生长装置及样品

Fig. 10 Crystal growth apparatus and sample

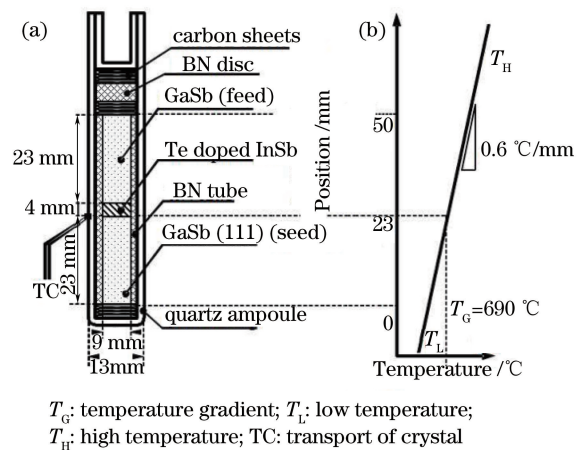


图 11 (a)生长装置示意图和(b)温度机制

Fig. 11 (a)Schematic of growth apparatus and (b) temperature mechanism

如上所述,GaInSb 晶体的制备难点主要在于有效抑制晶体中 In 元素的偏析。用于 GaInSb 晶体制备的工艺主要有 VB、VGF 等,这几种制备工艺都要求坩埚处于垂直或倾斜的状态,晶体很容易受到重力的影响,从而增大了晶体中 In 元素的偏析,降低了晶体质量。上述介绍的微重力环境可以在一定程度上缓解此问题,因为微重力环境抑制了重力驱动的对流对晶体生长的影响,可以有效降低由此因素引起的 In 元素的偏析。此外,交变磁场(AMF)、坩埚加速旋转(ACRT)等技术也可以尝试应用在 GaInSb 单晶体的制备中。

4 GaSb 单晶材料的应用

GaSb 单晶材料由于具有良好的性能及成熟的制备工艺,在器件方面受到了极大的青睐。以 GaSb 单晶为衬底材料制作的激光器和探测器近年来取得了不小的进步^[49-50]。如:尤明慧等^[51]采用分子束外延(MBE)法在 GaSb 单晶衬底上生长了 InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱(MQW),采用 SEM 和 X 射线衍射(XRD)仪测试实验所得的 MQW,如图 12 所示。由 SEM 图可见,量子阱区界面非常均匀;样品的 XRD 谱上有多级

卫星衍射峰出现,表明量子阱结构具有较好的均匀性和晶体质量。可见,衬底材料与 MQW 薄膜之间的晶格匹配是生长出高质量 MQW 的必要条件,而 GaSb 单晶的晶格常数与各种 III-V 族系材料的三元、四元固溶体合金的相匹配,恰好可以用于此类器件的制作。

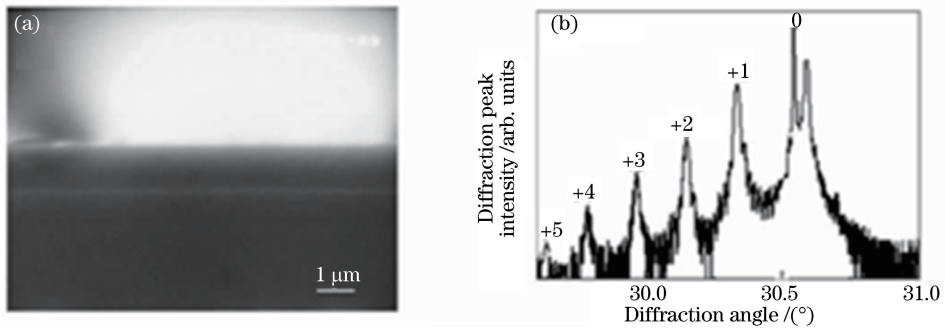


图 12 InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱的 SEM 图和 XRD 图。(a) SEM;(b) XRD

Fig. 12 SEM image and XRD pattern of InGaAsSb/AlGaAsSb MQWs. (a) SEM; (b) XRD

对 GaInSb 晶体材料制备工艺的研究虽然已取得一定进展,但是制备工艺还不太成熟,晶体质量尚未满足器件的要求。GaInSb 晶体材料突出的电学性能和光学性能已经引起了研究者的广泛关注,相信在不久的将来,会在器件方面得到广泛应用。

5 结束语

综述了 GaSb 晶体的制备方法,分析了各种工艺的优缺点,并比较了各工艺下生长的晶锭样品的表征结果。与 CZ 法、HB 法相比,采用 VB、VDS 和 VGF 法制备的 GaSb 单晶组分更加均匀,缺陷更少,质量更高,更能满足器件的要求,且设备简单,易于操作,容易批量生产,近年来已受到多数研究者的青睐。In 元素的掺入使 GaSb 晶体的质量得到了改善,但需要控制好 Ga、In、Sb 三种元素的配比以减少 In 元素的偏析,这在一定程度上增加了制备 GaInSb 晶体的困难,微重力环境有效缓解了这一困难,今后将得到广泛运用。在器件应用方面,GaSb 单晶由于其突出的电学和物理性能以及成熟的制备工艺,在半导体激光器、红外探测器等领域已占据了一席之地;而 GaInSb 晶体的制备工艺尚不成熟,无法进行批量生产,GaInSb 基器件尚未得到广泛的应用。今后,对 GaInSb 晶体材料的研究和 GaInSb 基器件的应用研究将成为重点。

参 考 文 献

- [1] Zhao Zisen. Past, present and future of optical fiber communications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900109. 赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900109.
- [2] Wang Qiming, Zhao Lingjuan, Zhu Hongliang, *et al.* Progress in active devices for optical fiber communication[J]. Telecommunications Science, 2016(5): 10-23. 王启明, 赵玲娟, 朱洪亮, 等. 光纤通信有源器件的发展现状[J]. 电信科学, 2016 (5): 10-23.
- [3] Li Hongxun, Zhang Rui. Progress of fiber amplification network and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010002. 李宏勋, 张 锐. 光纤放大网络及其应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010002.
- [4] Xu Yunxiang, Xu Mengmeng, Sun Jianfeng, *et al.* Integrated technology of communication and velocity measurement in satellite coherent optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120603. 许云祥, 许蒙蒙, 孙建锋, 等. 卫星相干光通信测速一体化技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120603.
- [5] Xiang Lian, Li Hu, Zhang Xiaoping. Modified perturbation method for multi-span nonlinear fiber [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1033-1036. 向 练, 李 虎, 张晓萍. 多跨距非线性光纤链路中基于微扰理论的优化方法[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1033-1036.
- [6] Bi Shuhe. Research highlight of several III-V semiconductor materials[J]. Thermosetting Resin, 1999(4): 114-117.

- 毕叔和. 几种 III-V 族化合物半导体材料的研究热点[J]. 热固性树脂, 1999(4): 114-117.
- [7] He Wei. Ge-based III-V semiconductor materials and solar cells[D]. Suzhou: Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
何巍. Ge 基 III-V 族半导体材料与太阳能电池器件研究[D]. 苏州: 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 2013.
- [8] Wang Wangping, Ma Jianyi. Material and fabrication process of near infrared response III-V compound semiconductor photocathode[J]. Optoelectronic Technology, 2013, 33(3): 194-197.
王旺平, 马建一. 近红外响应的 III-V 族半导体光电阴极材料及工艺[J]. 光电子技术, 2013, 33(3): 194-197.
- [9] Zhou Xuliang. Study on silicon-based high mobility III-V semiconductor materials and transistors [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2014.
周旭亮. 硅基高迁移率 III-V 族半导体材料与晶体管研究[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2014.
- [10] Aspnes D E, Studna A A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV[J]. Physical Review B, 1983, 27(2): 985-1009.
- [11] Bennett B, Soref R. Electrorefraction and electroabsorption in InP, GaAs, GaSb, InAs, and InSb[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(12): 2159-2166.
- [12] Adachi S. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, $Al_xGa_{1-x}As$, and $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ [J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(12): 6030-6040.
- [13] Glaser E R, Bennett B R, Shanabrook B V, *et al.* Photoluminescence studies of self-assembled InSb, GaSb, and AlSb quantum dot heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(25): 3614-3616.
- [14] Gao Ting. The study of GaSb-based laser cavity facet film [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
高婷. GaSb 基激光器的腔面膜研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [15] 邓志杰. 增大应变可制出效率高的 GaSb 基激光器[J]. 现代材料动态, 2007(8): 11.
- [16] Rong Jiamin, Xing Enbo, Zhao Shuai, *et al.* Modeling of $2\ \mu\text{m}$ GaSb based bragg reflection waveguide lasers with ultra-low vertical divergence[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(12): 1434-1439.
戎佳敏, 邢恩博, 赵帅, 等. $2\ \mu\text{m}$ GaSb 基低垂直发散角布拉格反射波导激光器优化设计[J]. 发光学报, 2015, 36(12): 1434-1439.
- [17] Zhou Yi, Chen Jianxin, Xu Qingqing, *et al.* Long wavelength infrared detector based on type-II InAs/GaSb superlattice[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(3): 210-214.
周易, 陈建新, 徐庆庆, 等. 长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 210-214.
- [18] Hu Riu, Deng Gongrong, Zhang Weifeng, *et al.* Electrical and optical properties of nBn based on type-II InAs-GaSb strained layer superlattice infrared detectors[J]. Infrared Technology, 2014, 36(11): 863-867.
胡锐, 邓功荣, 张卫锋, 等. nBn 型 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器光电特性研究[J]. 红外技术, 2014, 36(11): 863-867.
- [19] Zhang Lei, Zhang Liang, Zhang Xiaolei, *et al.* Research on calculation of quantum efficiency of InAs/GaSb type II superlattice IR detectors[J]. Infrared Technology, 2016, 38(4): 315-318.
张磊, 张亮, 张小雷, 等. InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器量子效率计算研究[J]. 红外技术, 2016, 38(4): 315-318.
- [20] Zhong Xingru, Liu Aimin, Lin Lanying, *et al.* Study of anodization coatings for GaSb solar cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1996, 17(3): 263-265.
钟兴儒, 刘爱民, 林兰英, 等. GaSb 太阳能电池阳极氧化膜的研究[J]. 太阳能学报, 1996, 17(3): 263-265.
- [21] He Zhenliang, Ding Jianning, Ma Chunhong, *et al.* Review of solar cell for micro thermophotovoltaic system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(2): 11-13.
何振良, 丁建宁, 马春红, 等. 微热光电系统中太阳能电池的述评[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(2): 11-13.
- [22] Guo Baozeng. Properties, preparation and applications of GaSb[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1999, 20(2): 73-78.
郭宝增. GaSb 材料特性、制备及应用[J]. 半导体光电, 1999, 20(2): 73-78.

- [23] Tanaka A, Yoneyama T, Kimura M, *et al.* Control of GaInSb alloy composition grown from ternary solution[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 186(3): 305-308.
- [24] Dutta P S. Bulk crystal growth of ternary III-V semiconductors[M]. Berlin: Springer, 2010: 281-325.
- [25] Gadkari D B, Shashidharan P, Lal K B, *et al.* Growth morphology and compositional analysis of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ crystals-grown by vertical directional solidification technique[J]. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 1999, 37(9): 652-656.
- [26] 义 仡. GaSb 单晶的无泡沫熔融 CZ 生长[J]. 电子材料快报, 1995(9): 7-8.
- [27] Cheng Yu, Liu Jingming, Su Jie, *et al.* Residual impurities analysis on the surface of gallium antimonide wafers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(1): 55-58.
程 雨, 刘京明, 苏 杰, 等. GaSb 晶片表面残留杂质分析[J]. 半导体光电, 2016, 37(1): 55-58.
- [28] 邓志杰, 郑安生, 屠海令, 等. MLEC 铋化镓单晶性能研究[J]. 稀有金属, 1996, 20(6): 401-404.
- [29] Li Jianming, Tu Hailing, Zheng Ansheng, *et al.* Growth of (100) Zn-doped GaSb single crystals[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2001, 25(5): 321-324.
黎建明, 屠海令, 郑安生, 等. 掺锌(100)GaSb 单晶的生长[J]. 稀有金属, 2001, 25(5): 321-324.
- [30] Yu Kai, Li Lujie, Cheng Hongjuan, *et al.* Study on liquid encapsulated czochralski GaSb crystal growth technology[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2016, 38(5): 787-790.
于 凯, 李璐杰, 程红娟, 等. LEC-GaSb 单晶生长技术研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(5): 787-790.
- [31] Li Lujie, Cheng Hongjuan, Zhang Yingwu, *et al.* Research on numerical simulation for LEC-GaSb crystal growth[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2016, 38(5): 799-803.
李璐杰, 程红娟, 张颖武, 等. LEC 法 GaSb 晶体生长数值模拟研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(5): 799-803.
- [32] Jie Wanqi. Progress of Bridgman crystal growth technology[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2012, 41 (S1): 24-35.
介万奇. Bridgman 法晶体生长技术的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2012, 41(S1): 24-35.
- [33] Wu Guangheng, Huang Ximin, Fu Shuqing, *et al.* Growth of low dislocation density GaSb single crystals by horizontal method[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1991, 20(1): 1-7.
吴光恒, 黄锡珉, 富淑清, 等. 水平法低位错 GaSb 单晶生长[J]. 人工晶体学报, 1991, 20(1): 1-7.
- [34] Fu Shuqing, Wu Guangheng, Ma Kai, *et al.* Defects in GaSb crystal grown by horizontal Bridgman method[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1994, 23(1): 72-76.
富淑清, 吴光恒, 马 凯, 等. 水平布里奇曼法生长 GaSb 晶体中的缺陷[J]. 人工晶体学报, 1994, 23(1): 72-76.
- [35] Roy U N, Basu S. Bulk growth of gallium antimonide crystals by Bridgman method[J]. Bulletin of Materials Science, 1990, 13(1): 27-32.
- [36] Boiton P, Giacometti N, Duffar T, *et al.* Bridgman crystal growth and defect formation in GaSb[J]. Journal of Crystal Growth, 1999, 206(3): 159-165.
- [37] 杨金岱. 定向凝固技术[J]. 钢铁研究学报, 1990(1): 48.
- [38] Gadkari D B. Advances of the vertical directional solidification technique for the growth of high quality GaSb bulk crystals[J]. Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 2012, 6(1): 65-73.
- [39] Choudhari R, Joshi M, Maske D, *et al.* Growth and characterization of selenium (Se) doped gallium antimony (GaSb) bulk single crystals using VDS technique[C]. Proceedings of International Conference on Recent Trends in Applied Physics & Material Science, 2013, 1536(1): 877-878.
- [40] Reijnen L, Brunton R, Grant I R. GaSb single-crystal growth by vertical gradient freeze[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1/2): e595-e600.
- [41] Garandet J P, Duffar T, Favier J J. Vertical gradient freeze growth and characterization of high quality GaSb single crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 1989, 96(4): 888-898.
- [42] Dutta P S. III-V ternary bulk substrate growth technology: a review[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1/2): 106-112.
- [43] Dutta P S, Kim H J, Chandola A. Controlling heat and mass transport during the vertical Bridgman growth of homogeneous ternary III-V semiconductor alloys[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2007, 60(2/3): 155-160.
- [44] Corregidor V, Alves E, Alves L C, *et al.* Compositional and structural characterisation of GaSb and GaInSb[J].

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2005, 240(1/2): 360-364.

- [45] Goza A J, Tritchler S E, Bliss D F, *et al.* Thermodynamic modeling of bulk ternary alloy crystal growth: Comparison of experiments and theory for GaInSb alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 337(1): 60-64.
- [46] Murakami N, Arafune K, Koyama T, *et al.* Measurement of growth rate by thermal pulse technique and growth of homogeneous $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ bulk crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(3/4): 433-439.
- [47] Murakami N, Hikida T, Konno A, *et al.* Growth of homogeneous InGaSb ternary alloy semiconductors on InSb seed [J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(7/9): 1433-1437.
- [48] Arivanandhan M, Rajesh G, Tanaka A, *et al.* Bulk growth of InGaSb alloy semiconductor under terrestrial conditions: a preliminary study for microgravity experiments at ISS[J]. Defect and Diffusion Forum, 2012, 323-325: 539-544.
- [49] Tian Chaoqun, Wei Donghan, Liu Lei, *et al.* Etching of GaSb-based materials of mid-infrared semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3363-3366.
田超群, 魏冬寒, 刘磊, 等. 中红外半导体激光器 GaSb 基材料的刻蚀研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3363-3366.
- [50] Wang Yue, Liu Guojun, Li Juncheng, *et al.* Study of the ohmic contact of GaSb-based semiconductor laser[J]. Chineses J Lasers, 2012, 39(1): 0102010.
王跃, 刘国军, 李俊承, 等. GaSb 基半导体激光器功率效率研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102010.
- [51] You Minghui, Gao Xin, Li Zhanguo, *et al.* Growth of $1.6 \sim 2.3 \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb multi-quantum-well by molecular beam epitaxy[J]. Chineses Journal of Luminescence, 2011, 32(3): 282-284.
尤明慧, 高欣, 李占国, 等. 采用 MBE 生长 $1.6 \sim 2.3 \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱[J]. 发光学报, 2011, 32(3): 282-284.