

文章编号: 1672-8785(2019)06-0007-06

铟化铟红外焦平面阵列制备技术

梁进智¹ 徐长彬² 李海燕²

(1. 北京华北莱茵光电技术有限公司, 北京 100015;

2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 铟化铟作为制备中波红外探测器的主流材料, 其光敏芯片规模经历了单元、多元、线列到面阵的发展过程。出于市场应用需求, 光敏芯片的制备技术不断更新换代。按发展先后顺序介绍了铟化铟光敏芯片 PN 结的制备技术, 具体包括热扩散技术、离子注入技术和外延技术。目前国内成熟的光敏芯片成结技术为热扩散技术。国外主流厂家在热扩散、离子注入、外延工艺方面都已研发成熟, 并投入实际生产。着重介绍了三种工艺技术的优缺点及配套的焦平面阵列结构设计。

关键词: 铟化铟; 热扩散; 离子注入; 外延

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.06.002

Fabrication Technology of InSb IR Focal Plane Array

LIANG Jin-zhi¹, XU Chang-bin², LI Hai-yan²

(1. Beijing North China Rhine Photoelectric Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China;

2. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: InSb is the mainstream material for the fabrication of mid-wave infrared detectors. Its photosensitive chip scale has undergone the development process from cell, multi-element, line array to area array. Due to the demand of market application, the fabrication technology of photosensitive chip is constantly updated. According to the development sequence, the fabrication technology of PN junction of InSb photosensitive chip is introduced, including thermal diffusion technology, ion implantation technology and epitaxy technology. At present, thermal diffusion technology is the mature technology of photosensitive chip formation in China. The main foreign manufacturers have mature technologies in thermal diffusion ion implantation and epitaxy technology and put them into actual production. The advantages and disadvantages of the three technologies and the design of the corresponding focal plane array structure are introduced emphatically.

Key words: InSb; thermal diffusion; ion implantation; epitaxy

收稿日期: 2019-06-01

作者简介: 梁进智(1980-), 男, 山东海阳人, 高级工程师, 主要从事红外与激光技术应用研究。

E-mail: lyjz88@163.com

0 引言

自硫化铅探测器问世以来,红外探测技术开启了发展之路。红外探测器被广泛应用于民间与军事的诸多领域,如前视、导弹制导、无损材料测试、肿瘤检查等。由于国防需求,红外技术最重要、最高水平的应用都在军事方面,可以说,军事需求推动红外探测器技术不断发展^[1]。

在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的中红外探测方面,基于 InSb 材料的探测器因材料工艺成熟、灵敏度高、稳定性好等优点从诸多材料器件中脱颖而出,InSb 成为中波红外探测器制备的首选材料。InSb 作为一种直接禁带半导体材料,其电子有效质量小,迁移率高,禁带宽度窄(在 300 K 时为 0.17 eV,77 K 时为 0.23 eV)。低温下,InSb 对红外光的吸收系数高($\sim 10^{14}\text{ cm}^{-1}$),量子效率大于等于 80%,载流子迁移率高($\mu_n \sim 10^5\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。随着红外探测技术的不断发展,基于 InSb 材料的光敏芯片经历了一代、二代、三代的发展历程,从单元芯片发展到多元、线列、面阵芯片。经倒装互连工艺处理,光敏芯片与信号处理电路结合在一起,安置在光学系统的焦平面上,构成了红外信号探测的核心部件。在光电转换的实现过程中,光敏芯片的性能是决定焦平面探测器探测水平的关键因素之一。在面阵光敏芯片的制备中,PN 结的质量、光敏像素单元的有效隔离是面阵芯片制备的核心关键。PN 结的制备工艺分为扩散工艺、离子注入工艺和外延工艺。这三种工艺技术都被国内外主流 InSb 红外探测器制造厂商使用。针对不同的 PN 结制备工艺,相应的面阵结构制备技术也各不相同。下面将针对三种 PN 结制备工艺介绍光敏芯片的制造技术。

1 面阵光敏芯片的制备

1.1 热扩散工艺

热扩散工艺是最先发展成熟的工艺方法,也是目前国内主流的 InSb 材料成结工艺。其工艺实现原理是,通过高温加热的方法使掺杂

元素原子获得足够的能量,进入到晶体中,并占据晶格空位,实现元素掺杂及材料改性,其工艺实现过程如图 1 所示。国外目前只有美国 L3 通信公司所属的 CMC Electronics Cincinnati 公司采用扩散技术成结。扩散工艺技术成熟,设备简单,缺点在于对掺入杂质的控制能力差。因此,批次间的重复性、同批次片间的重复性相对较差,大面阵扩散的均匀性控制力差;在杂质元素纵向掺入材料的过程中存在严重的横向扩散,如图 2 所示。因此,在面阵光敏芯片制备中,通常需要采用湿法腐蚀技术或干法刻蚀技术制备台面结型焦平面阵列,通过制备台面凹槽结构实现焦平面阵列像元间的物理隔离,从而彻底解决像元间信号串音的问题。普遍的像元隔离器件的结构如图 3(b)所示。CMC 公司采用的是一种独一无二的器件结构——将所有的像元完全隔离,如图 3(a)所示。该结构可以完全释放光敏芯片在高低温变化等过程中的应力,有利于提高器件长期使用的可靠性。



图 1 扩散系统的示意图

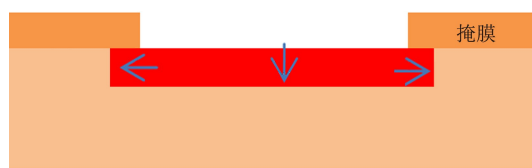


图 2 横向扩散的效果图

1.2 离子注入工艺

离子注入工艺是由于人们对更高性能 PN 结的需求而产生的。注入工艺通过设备离子源部件将杂质元素离化成为高能离子,通过加速管等管路将具有高达千、兆级的高能离子注入到衬底材料,实现材料组分掺杂,改变材料性能,如图 4 所示。由工艺实现过程及工艺原理可知,在扩散工艺衬底材料掺杂过程中,材料表面的掺杂浓度最高。随着掺杂深度深入,

掺杂浓度逐渐降低, 扩散工艺成结为缓变结, 如图 5(a)所示。在注入工艺成结过程中, 高能粒子在注入衬底材料后受到原子核及核间电子的阻碍, 逐渐减速并停留在一定深度中。注入最高浓度处于注入射程中某一位置而不是衬底材料的表面。注入元素分布相对集中, 形成的

PN 结为突变结结构, 如图 5(b)所示。若该工艺设计得当, 可获得性能优异的 PN 结, 降低器件的噪声电流 [3]。

针对 InSb 红外光敏芯片的制备, 离子注入工艺的优势在于能够自由支配注入能量和剂量, 精确控制注入杂质的数量与掺杂深度, 从

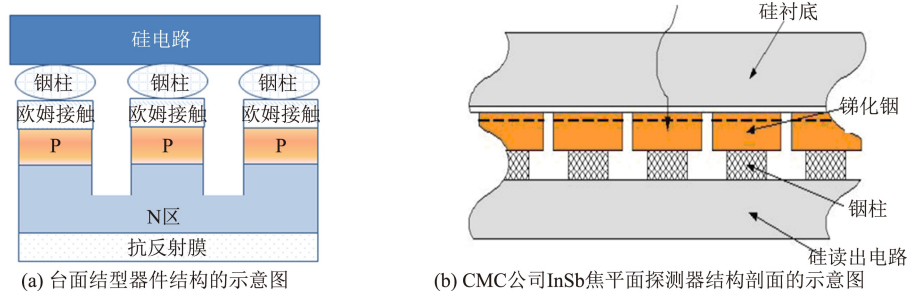


图 3 扩散工艺台面结型焦平面阵列的示意图

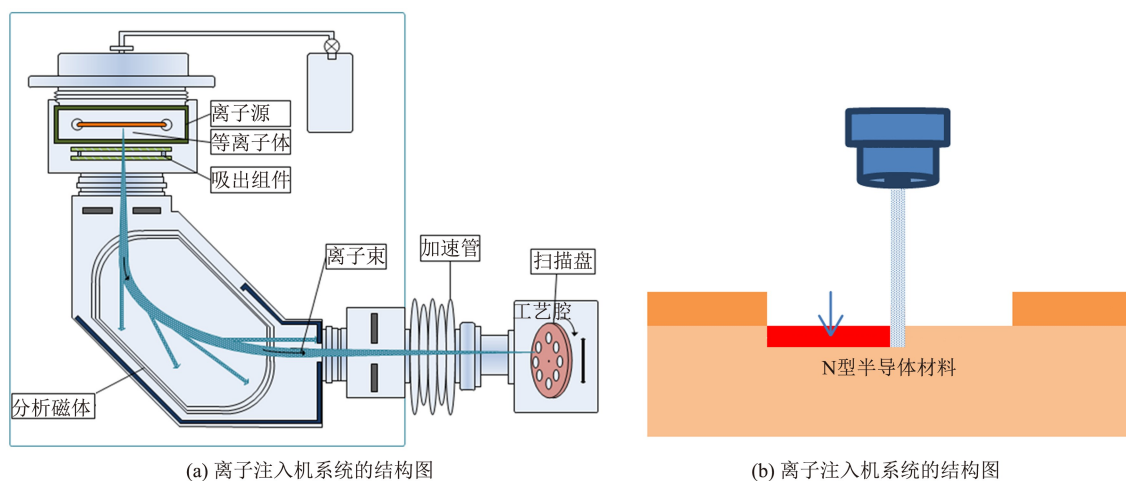


图 4 离子注入工艺设备及原理图

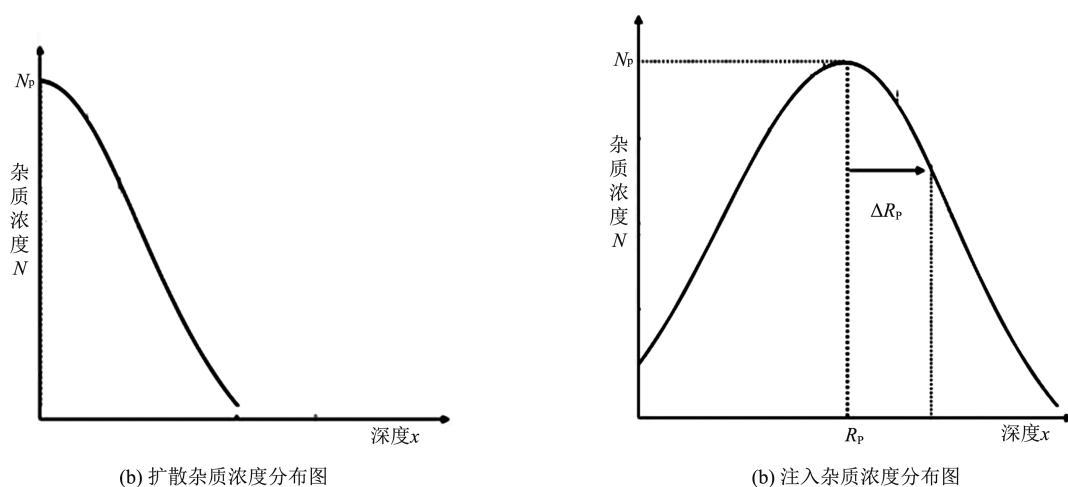


图 5 扩散与注入杂质掺杂曲线图

而实现极低和浅结注入。注入杂质按掩膜图形近乎垂直地入射到基底材料中,不会存在严重的横向扩散;设备高度自动化,能够实现大面积均匀性掺杂,重复性好,保证了掺杂的精度和重复性;能够精确选取单一杂质,保证掺杂元素的纯度^[4]。相较于扩散工艺过程,离子注入过程不需高温处理,工艺时间低于扩散工艺,能够有效提高生产效率。离子注入技术的发展难点在于注入过程中高能粒子物理轰击会给材料带来晶格损伤并形成缺陷,需要高温退火处理,进行缺陷修复并激活注入杂质元素,因此其工艺设计及工艺实现难点远高于扩散工艺。同时,注入设备成本价格高,主流的注入设备都是国外厂家生产的。设备限制也是离子注入工艺在国内发展缓慢的原因之一。对于国外主流红外探测器生产厂商,离子注入工艺已经成为主流工艺技术。美国的 FLIR 公司、法国的 Sofradia 公司、俄罗斯的 RD&P 公司都已采用体晶注入方式实现 384×288 规格、 640×512 规格、 1024×1025 规格,且像元中心间距为 $25 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 的光敏芯片的制备^[5]。

针对离子注入纵向掺杂准直性的优势,离子注入工艺配套的面阵光敏芯片结构一般为平面结结构,通用的平面结器件结构如图 6 所示。离子注入工艺结合平面结结构的优势有以下几点:(1)减少工艺步骤如像元隔离涉及的光刻、腐蚀、刻蚀工艺;(2)光敏面阵的整体性更好,在后期互连点胶过程中不易出现气泡,磨抛减薄过程中应力应对能力更强;(3)不需要通过制备凹槽结构实现像元隔离,可以缩小像元中心间距,减小面阵芯片尺寸,从而减小配套杜瓦、制冷结构的尺寸,降低功耗与成本。

出于高分辨率、小体积、低功耗红外探测器的市场需求,像元尺寸与中心间距不断减小。当像元中心间距小到一定程度时,平面结型器件结构存在像元间串音的风险,从而降低了探测器的分辨率。因此,当像元中心间距缩小到 $10 \mu\text{m}$ 左右时,出现了离子注入配合干法刻蚀工艺制备的台面结型器件结构光敏芯片制

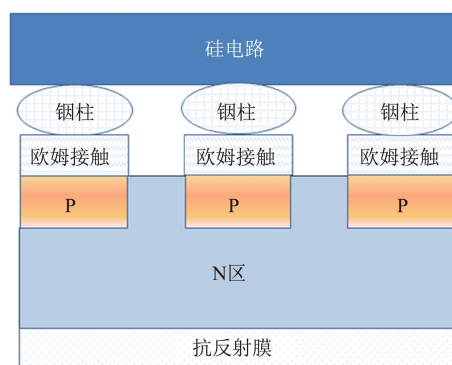


图 6 平面结型器件的结构示意图

备方法。

1.3 外延工艺

外延生长是在低于晶体熔点的温度下,在表面经过细致加工的单晶衬底上按照原结晶晶向生长一层新的单晶层的制备技术。外延技术的重要特点在于在外延晶层的制备过程中,层中的杂质浓度可以通过控制反应中的杂质含量加以调节,不受衬底种类和杂质掺杂水平的影响。所以用这种技术形成 PN 结时,杂质分布可接近于理想的突变型杂质分布情况。常用的外延工艺方法有分子束外延法(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、金属有机化合物化学气相外延(Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)、液相外延(Liquid Phase Epitaxy, LPE)和磁控溅射外延(Magnetron Sputtering Epitaxy, MSE)等。

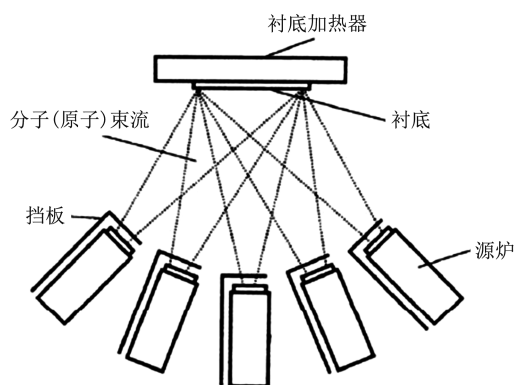


图 7 MBE 系统的示意图

外延工艺可以提供更先进的器件结构,外延技术的优势在于外延结晶过程中按需控制生长半导体的导电类型、随时调控杂质的掺杂

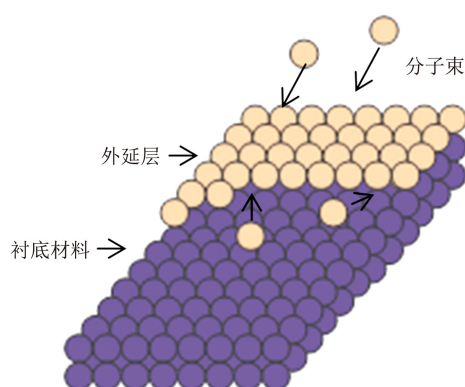
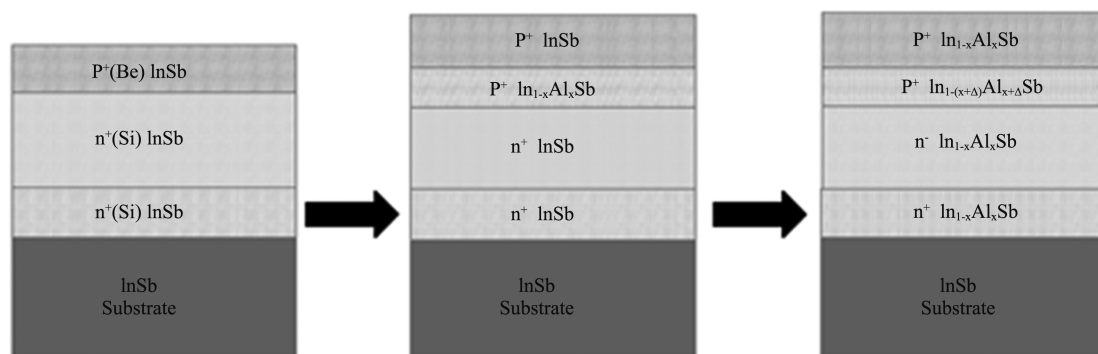


图 8 MBE 外延层生长的原理示意图

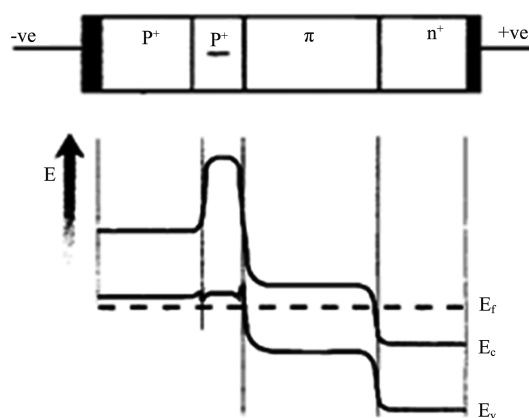
量, 具有均匀生长、原位掺杂、实时控制以及无需减薄等优点, 通过对外延过程中设备参数的控制可以设计、制备不同的器件结构, 从而实现高温工作器件、双多色波段工作器件的制备。图 8 所示为美国防护评估和研究机构研究采用外延技术改进器件结构以提高器件工作温度进行的器件结构设计和工作能带分析^[6]。

除了上述优势, 采用外延技术还可以在相

对低成本的 Si 和 GaAs 衬底上生长 InSb 膜。这种工艺技术一方面有利于探测器阵列与读出电路单片集成的实现, 另一方面半绝缘衬底有利于器件电学隔离的实现。同时, 优秀的外延技术可以产生较高质量的结, 使器件的暗电流很小^[7]。从实验原理可以看出, 外延为分子量级的生长过程, 因此是目前三种成结工艺中难度最高的。由于外延工艺涉及高精度分子结构布置, 因此对设备及工艺技术水平要求极高, 异质外延晶格失配引发的缺陷问题在很大程度上会影响外延结晶效果, 影响器件性能。目前该工艺国内尚处于研发阶段, 国外已经有成熟的产品生产能力。以色列 SCD 公司外延制备的 InSb 和 InAs/GaSb 二类超晶格器件能很好地满足系统小型化、轻型化、低功耗和可靠性的要求。英国 Qinetiq 公司采用 MBE 工艺在高掺杂 InSb 衬底上外延制备了 InSb 薄膜, 研制了像元间距为 26 μm 的 1024 $\times$ 768 大



(a) 器件结构优化设计图



(b) 改进的器件能带图

图 9 外延器件结构优化示意图

格式 InSb 焦平面阵列 (Focal Plane Array, FPA), 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 约为 $12\sim 15\text{ mK}@300\sim 310\text{ K}$ [8]。由于外延工艺采用整片生长方式, 因此只能用于台面结型结构器件制备。目前, 成熟工艺线多采用干法刻蚀工艺制备焦平面阵列台面结构。

2 结论

中波波段基于 InSb 材料的红外探测器技术水平不断提高, 面阵规格不断变大, 分辨率持续提高, 高温工作、双多色探测器全面发展。从文中梳理的技术路线来看, 从扩散工艺到离子注入工艺再到外延工艺, 国外技术水平比较成熟且都能应用于产品生产, 国内稍显落后。目前在外延方面, 中国科学院半导体研究所、中国科学院物理研究所等研究单位已有部分研究成果。从目前外延薄膜展现的性能来看, 外延技术是一种很有前景的焦平面阵列制备技术。

参考文献

[1] 艾琍. 国外探测器的发展及其在制导武器中的

应用 [J]. 红外技术, 1995, 18(3): 5-11.

[2] 贾宝军, 张新宇, 王新宇. InSb 光导探测器量子效率研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(7): 743-746.

[3] 余怀之, 朱祖芳. 半导体硅锗中的离子注入 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.

[4] Hurwitz C E, Donnelly J P. Planar InSb Photodiodes Fabricated by Be and Mg Ion Implantation [J]. Solid-State-Electronics, 1974, 18(9): 753-756.

[5] 牟宏山. InSb 红外焦平面探测器现状与进展 [J]. 激光与红外, 2016, 46(4): 394-399.

[6] Ashleya T, Baker I M, Burkea T M. InSb Focal Plane Arrays (FPA's) Grown by Molecular Beam Epitaxy(MBE) [C]. SPIE, 2000, 4028: 398-403.

[7] Michel E, Xu J, Kim J D, et al. InSb Infrared Photodetectors on Si Substrates Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8: 673-676.

[8] 赵建忠. InSb 焦平面探测器的发展现状与趋势 [J]. 激光与红外, 2016, 38(11): 905-913.