

InAlSb 红外光电二极管性能研究

朱旭波¹, 李 墨¹, 陈 刚¹, 张利学^{1,2}, 曹先存^{1,2}, 吕衍秋^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;
2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 在 InSb 衬底上利用分子束外延生长了 p-i-n 结构的 InAlSb/InSb 材料, 通过在吸收层和接触层之间生长宽禁带的 InAlSb 势垒层, 验证了势垒层对耗尽层中暗电流的抑制作用。分别基于外延生长的 InAlSb 材料和 InSb 体材料, 借助标准工艺制备出二极管, 并对其电性能进行测量分析, 研究发现: 77 K 温度时, 在 -0.1 V 的外偏电压下, p⁺-p⁺-n⁻-n⁺ 结构和 p⁺-n⁻-n⁺ 结构 InAlSb 器件的反偏电流分别为 $3.4 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $7.8 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。基于 p⁺-p⁺-n⁻-n⁺ 结构研制的 InAlSb 二极管的暗电流保持在一个很低的水平, 这为提高红外探测器的工作温度提供了重要基础。

关键词: InAlSb; InSb; 钝化; 高工作温度; 红外探测器

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0704002

Study on performance of InAlSb infrared photodiode

Zhu Xubo¹, Li Mo¹, Chen Gang¹, Zhang Lixue^{1,2}, Cao Xiancun^{1,2}, Lv Yanqiu^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471009, China)

Abstract: The InAlSb/InSb material of p-i-n structure was grown by Molecular Beam Epitaxy(MBE) on (100) InSb substrate. The current suppression effect of the barrier layer on the dark current was verified by growing a barrier layer with a wide gap between the absorber layer and the contact layer. The electrical properties of photodiode fabricated by InAlSb epitaxial material were compared with that of traditional InSb bulk material. When the external bias voltage is -0.1 V, the reverse bias current of p⁺-p⁺-n⁻-n⁺ InAlSb device and p⁺-n⁻-n⁺ InAlSb device is $3.4 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $7.8 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ at 77 K, respectively. The p⁺-p⁺-n⁻-n⁺ InAlSb device suppresses the dark current at a very low level. It provides an important foundation for improving operating temperature of the infrared detector.

Key words: InAlSb; InSb; passivation; high operating temperature; infrared detector

收稿日期: 2016-11-11; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFR50790)

作者简介: 朱旭波(1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外探测器用薄膜材料和器件制备方面的研究。Email: xubo613@163.com

0 引言

InSb 材料具有优异的光电性能,在 III-V 族化合物中其拥有最小带隙、最小载流子有效质量、最大电子饱和漂移速度和最大迁移率等,是制备高性能中波红外探测器的首选材料之一,但传统的 p⁺-n 结构的 InSb 探测器工作温度不能超过 80 K。为了提高其工作温度,在 InSb 材料中加入少量 Al 组分以提高材料的禁带宽度^[1-2],由此 InSb 基 InAlSb 红外探测器发展为一种新型的高温工作红外探测器,在军用和民品开发上都拥有着广泛的应用前景^[3]。

国外的 InAlSb 红外探测器研究起步较早,英国 QinetiQ 公司早在 2003 年就研制了工作温度为 100 K 时具有良好成像性能的 256×256 元 InAlSb 焦平面器件^[4]。2005 年,以色列 SCD 公司成功研制出了像元间距为 30 μm 的 320×256 元 InAlSb 红外焦平面探测器,其工作温度也在 100 K^[5]。2006 年,该公司将 InAlSb 焦平面的规格扩大到 480×384 元,工作温度可达 120 K^[6]。而国内目前还没有成功研制出 InAlSb 红外探测器的报道,只有少量关于 InAlSb/InSb 异质结外延材料生长的研究^[7]。

影响 InAlSb/InSb 基红外探测器研制和应用的关键技术有材料的生长和制备、器件钝化工艺、台面腐蚀工艺等,目前国内华北光电技术研究所对采用分子束外延(MBE)法,通过优化生长温度、束流比、升降温速率以及退火工艺等生长条件,获得高质量的 InAlSb/InSb 晶体^[8-9],但是有关器件制备工艺方法和光电性能的报道还未见到。表面钝化一直制约着 III-V 族半导体器件发展难题之一,与 InSb 器件一样,InAlSb/InSb 器件很容易在空气中氧化,会导致大量的表面态以及漏电流产生。此外,In₂O₃ 也是导电的,也会形成漏电通道,这使得用其自身氧化层作为钝化层性能较差。因此需要去除自身氧化物和饱和悬挂键并保护表面^[10]。

文中以 InSb 红外探测器制备工艺方法为基础,采用阳极氧化和生长介质膜的双层钝化方法,制备出 InAlSb/InSb 光电二极管器件。通过对 InAlSb/InSb 器件和传统的 InSb 器件进行 I-V、C-V 等电学特性的对比测试,获得了暗电流密度、R₀A 等关键参数,验证了宽禁带势垒层和 InAlSb 材料对暗电流的抑制作用。

1 材料生长及器件制备

InAlSb/InSb 基材料生长是在一台 RIBER EPINEAT 分子束外延设备上进行的,在 InSb 材料中加入少量 Al 组分能够有效提高材料的禁带宽度,其次,分子束外延生长方法生长材料时速率较慢,通过调节源炉温度和快门等方法,可以实现对生长速率和掺杂组分的高度控制,达到生长超精细结构的目的,在 Te 掺杂的 n 型 InSb 衬底上外延 p⁺-n⁻-n⁺结构材料,如图 1 所示。通过控制掺杂浓度和厚度,可以使吸收区达到最高量子效率和最小暗电流。由于工作温度进一步提高时,一方面热激发载流子浓度提高,另一方面材料的禁带宽度变窄,使材料的隧道电流急剧增大^[1]。p⁺-n⁻-n⁺结构最高只能工作到 100 K,为了消除其影响,可以在 p⁺层和 n⁻层之间加入高 Al 组分的高势垒层,形成 p⁺-p⁺-n⁻-n⁺结构,其结构示意图如图 2 所示。

p ⁺ type InSb, 0.02 μm, be doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³
p ⁺ type In _{1-x} Al _x Sb, 0.8 μm, be doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³ , 1.8%Al
n ⁻ type In _{1-x} Al _x Sb, 4 μm, 1.8%Al
n ⁻ type In _{1-x} Al _x Sb, 1 μm, Si doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³ , 1.8%Al
InSb substrate(100) 2 degrees toward(111) B, Te doped 4×10 ¹⁷ cm ⁻³

图 1 InAlSb/InSb p⁺-n⁻-n⁺结构示意图

Fig.1 Structure of p⁺-n⁻-n⁺ InAlSb/InSb

p ⁺ type InSb, 0.02 μm, be doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³
p ⁺ type In _{1-x} Al _x Sb, 0.8 μm, be doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³ , 1.8%Al
p ⁺ type In _{1-x} Al _x Sb, 0.01 μm, be doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³ , 10%Al
n ⁻ type In _{1-x} Al _x Sb, 4 μm, 1.8%Al
n ⁻ type In _{1-x} Al _x Sb, 1 μm, Si doped 1×10 ¹⁸ cm ⁻³ , 1.8%Al
InSb substrate(100) 2 degrees toward(111) B, Te doped 4×10 ¹⁷ cm ⁻³

图 2 InAlSb/InSb p⁺-p⁺-n⁻-n⁺结构示意图

Fig.2 Structure of p⁺-p⁺-n⁻-n⁺ InAlSb/InSb

图 3 所示为高 Al 组分势垒层引入后的能带图,因为势垒层的禁带宽度很宽,对多数载流子起到了阻挡作用,但是对光生载流子几乎没有影响,所以该结构对暗电流具有抑制作用。高 Al 组分势垒层会引入晶格失配,但 10 nm 不超过临界厚度,不会产生过

多晶格缺陷及相应的 SRH 复合电流^[9]。

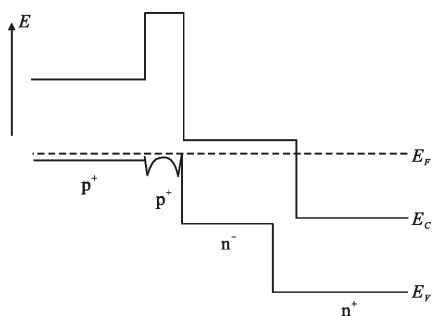


图 3 $p^+-p^+-n^--n^+$ 结构 InAlSb/InSb 能带结构示意图
Fig.3 Band structure diagram of $p^+-p^+-n^--n^+$ InAlSb/InSb

制备 $p^+-n^--n^+$ 结构 InAlSb/InSb 基器件流程如图 4 所示,制备 $p^+-p^+-n^--n^+$ 结构 InAlSb/InSb 基器件流程如图 5 所示。

台面的制备是利用感应耦合等离子(ICP)干法刻蚀工艺完成的,反应气体为 Cl_2 和 Ar,刻蚀台面深度为 $1\sim 5\ \mu m$ 。

表面钝化采用阳极氧化和蒸镀介质膜双层钝化结构。阳极氧化属于电化学方法,能够有效地降低表面态和表面复合速度,但是单纯的氧化钝化层其可靠性不高,在空气中长期放置会出现性能退化,会和

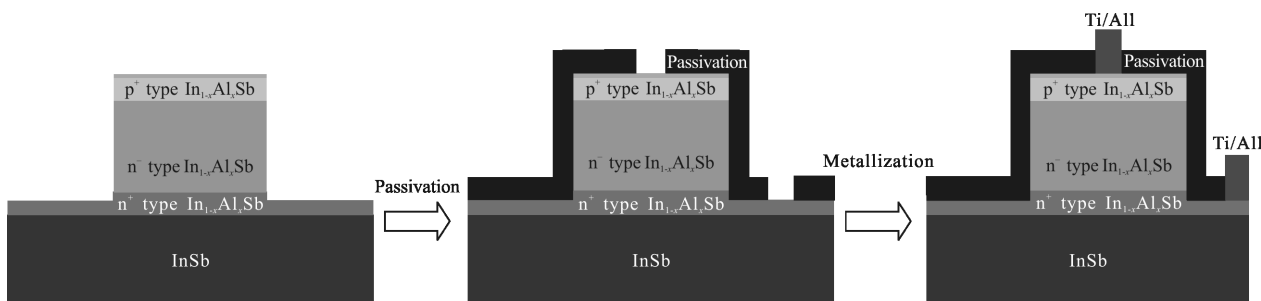


图 4 InAlSb/InSb $p^+-n^--n^+$ 结构器件制备流程
Fig.4 Preparation process of $p^+-n^--n^+$ InAlSb/InSb device

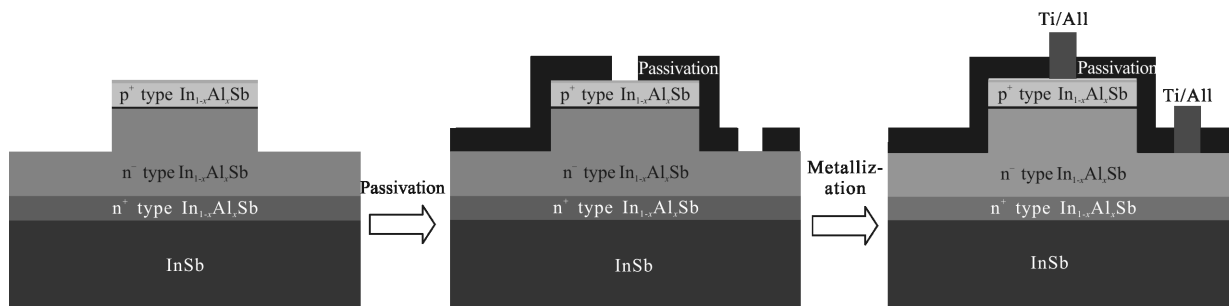


图 5 InAlSb/InSb $p^+-p^+-n^--n^+$ 结构器件制备流程
Fig.5 Preparation process of $p^+-p^+-n^--n^+$ InAlSb/InSb device

空气中的水汽和氧气反应生成氧化层,需要再生一层介质膜加固。一般采用 SiO_2 作为保护膜。

最后制作金属电极,采用溅射方法制备出 Ti/Au 电极。

InAlSb 二极管暗电流主要成分有:扩散电流、产生-复合电流、隧道电流和表面漏电流。扩散电流是由 n 型和 p 型区域的热激发载流子 p-n 结收集形成的。在 p-i-n 结构的二极管中,产生-复合电流和隧道电流是限制器件暗电流的两个主要因素^[11]。在 p⁺层

和 n⁻层之间加入高 Al 组分的势垒层有效控制了产生-复合电流和隧道电流,并且能够对表面漏电流起到有效地抑制作用。

2 结果与分析

对制备的 InAlSb/InSb 基器件进行 $I-V$ 、 $C-V$ 测试,并与 InSb 体材料制备出的器件进行对比分析。在 $I-V$ 曲线测试过程中,为了得到暗电流密度使用了遮光罩。为了避免探测器由于过载导致损坏,测试

电路中增加了一个电阻来限制电路电流,探测器的偏压由稳压源提供。两种结构的 InAlSb/InSb 基和 InSb 体材料光电二极管的 $I-V$ 曲线如图 6 所示,温度为 77 K,测试范围从 $-0.4\sim 0.2$ V。

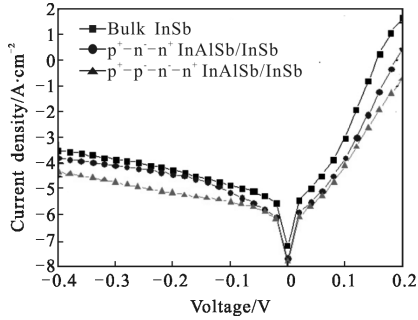


图 6 不同器件结构样品的 $I-V$ 曲线

Fig.6 $I-V$ curves for different structures of the devices

在 -0.1 V 时, InSb 体材料器件的漏电流密度为 1.5×10^{-5} A·cm⁻², $p^+-n^- - n^+$ 结构和 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构的 InAlSb/InSb 基器件的漏电流密度分别为 7.8×10^{-6} A·cm⁻² 和 3.4×10^{-6} A·cm⁻², 可见 $p^+-n^- - n^+$ 结构器件的漏电流密度约为 InSb 体材料器件的 1/2, 而 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器件的漏电流密度则仅为 InSb 体材料器件的 1/4。这是由于 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器件中高 Al 组分的势垒层夹持在 p 区和 n 区中间, 宽禁带的势垒层能够有效阻止耗尽层中的多数载流子向电极传输, 而对光电流基本没有限制作用。

为了探寻 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器件的漏电机理, 考察了不同面积 ($30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$) 光敏元的漏电流。零偏压下的阻抗与探测器的光敏面积的乘积 R_0A 是探测器品质的关键参数, 探测率与 R_0A 平方根成正比。

零偏阻抗是由体电阻和表面电阻并联而成的^[12]:

$$\frac{1}{R_0A} = \frac{1}{(R_0A)_{\text{Bulk}}} + \frac{1}{r_{\text{surface}}} \times \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: P 为光敏元周长; A 为光敏元面积; $(R_0A)_{\text{Bulk}}$ 为体电阻贡献包括扩散机制和体内复合机制; r_{surface} 为表面电阻率。

根据不同器件光敏元尺寸 P/A 的值和测得的 R_0A 值拟合出器件 $1/R_0A$ 与 P/A 的关系, 如图 7 所示。其中直线的斜率即为 $1/r_{\text{surface}}$ 值, 斜率越大, 即 $1/R_0A$ 随 P/A 的增加变化越大, 就表明表面漏电流对漏电流贡献成分越大。可以看出 InSb 体材料器件的斜率约为 7.5×10^{-8} , InAlSb/InSb $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器

件的斜率约为 3.2×10^{-8} , 说明 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器件表面漏电流对漏电流贡献成分很小, 甚至优于 InSb 体材料。可见, 在 p^+ 层和 n^- 层之间加入高 Al 组分的高势垒层能有效地减小表面漏电流。

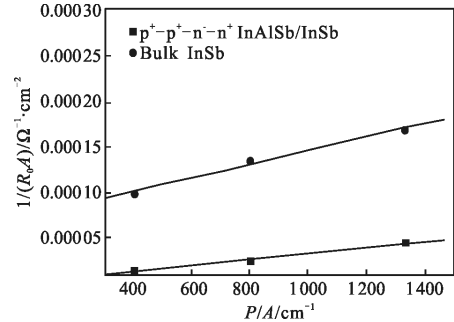


图 7 不同器件结构样品的 $1/R_0A$ 与 P/A 的关系

Fig.7 Relationship between $1/R_0A$ and P/A for different structures of the devices

在半导体材料上制备 MIS 结构, 测试器件的 $C-V$ 特性是表征材料钝化效果常用的方法。通过测量 $C-V$ 特性的平带电压 (V_{FB})、回滞 (ΔV_{FB}) 度量以及从最大电容到最小电容之间过渡曲线的陡峭程度能够对材料表面的快慢界面态密度、固定电荷等作出表征。图 8 给出 InSb 体材料和 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构的 InAlSb 器件的 $C-V$ 曲线。从图中可以看出采用阳极氧化加介质膜的双层钝化方法对 InAlSb 和 InSb 器件都有较好的钝化作用^[13], 这也证明了文中制备 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器件的制备方法的工艺可靠性。

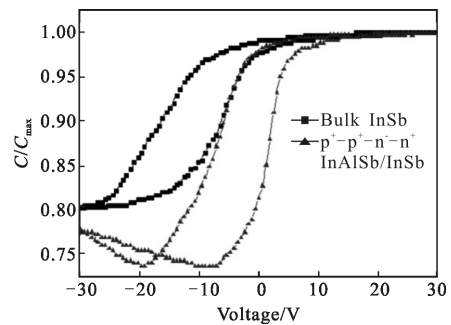


图 8 不同器件结构的 $C-V$ 曲线

Fig.8 $C-V$ curves for different structures of the devices

3 结论

文中研究并制备出 InAlSb 材料 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构与 $p^+-n^- - n^+$ 结构的红外光电二极管, 并与传统的 InSb 体材料器件进行 $I-V$ 、 $C-V$ 特性的对比测试。首

先对比研究了 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构与 $p^+-n^- - n^+$ 结构、InSb 体材料的 $I-V$ 特性, 得出 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构的 InAlSb 器件在 -0.1 V 的漏电流密度比后两种器件都有下降, 它具有更优越的电性能。其次计算了不同结构器件零偏压下的阻抗与探测器的光敏面积的乘积 R_0A , 根据器件 $1/R_0A$ 与 P/A 的关系分析出 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构二极管表面漏电对漏电流的贡献成分较小, 可见在 p^+ 层和 n^- 层之间加入高 Al 组分的高势垒层能有效地减小表面漏电流效果。最后通过 $C-V$ 特性测试说明了 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构器件的钝化效果良好, 也证明了制备 $p^+-p^+-n^- - n^+$ 结构 InSb 基 InAlSb 探测器的工艺可靠性。文中研究为 InSb 基 InAlSb 红外探测器的制备和应用打下了基础。

参考文献:

[1] Ashley T. Higher operating temperature, high performance infrared focal plane arrays[C]//SPIE, 2004, 5359: 89-100.

[2] Klin O. Molecular beam epitaxy grown $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}/\text{InSb}$ structures for infrared detectors [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2006, 24(3): 1607-1615.

[3] Chen Gang, Sun Weiguo, Lv Yanqiu. Progress of high operating temperature InAlSb infrared detectors[J]. *Infrared*, 2016, 37(2): 1-6. (in Chinese)
陈刚, 孙维国, 吕衍秋. 高工作温度 InAlSb 红外探测器的研究进展[J]. 红外, 2016, 37(2): 1-6.

[4] Ashley T, Burke T M, Emeny M T, et al. Epitaxial InSb for elevated temperature operation of large IR focal [C]//SPIE, 2003, 5074: 99-102.

[5] Neshor O, Klipstein P C. High-performance IR detectors at SCD present and future [C]//SPIE, 2005, 5957: 59570S.

[6] Glozman A, Harush E, Jacobsohn E, et al. High performance InAlSb MWIR detectors operating at 100 K and beyond [C]//SPIE, 2006, 6206: 62060M.

[7] Mailhot C, Smith D L. Long-wavelength infrared detectors based on strained $\text{InAs}-\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}$ Type-II superlattices[J]. *J Vac Sci Technol A*, 1989, 7(2): 445-449.

[8] Shang Lintao, Liu Ming, Xing Weirong, et al. MBE growth and optimization of low Al component $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ film[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(10): 1115-1118. (in Chinese)
尚林陶, 刘铭, 邢伟荣, 等. 低 Al 组分 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ 薄膜的 MBE 生长和优化[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1115-1118.

[9] Liu Ming, Zhou Peng, Shang Lintao, et al. Research on quality of InAlSb/InSb crystal grown by molecular beam epitaxy[J]. *Infrared*, 2014, 35(11): 15-19. (in Chinese)
刘铭, 周朋, 尚林涛, 等. 分子束外延 InAlSb/InSb 晶体的质量研究[J]. 红外, 2014, 35(11): 15-19.

[10] Eftekhari G. Electrical properties of sulfur-passivated III-V compound devices[J]. *Vacuum*, 2002, 67(1): 81-90.

[11] Antoni Rogalski. Infrared Detectors[M]. Translated by Zhou Haixian, Cheng Yufang. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese)

[12] Hood A, Razeghi M, Aifer E H, et al. On the performance and surface passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodiodes for the very-long-wavelength infrared [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(15): 151113.

[13] He Kai. Electrical Characterization technique of HgCdTe infrared photovoltaic detectors [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 47-49. (in Chinese)
何凯. 碲镉汞红外光伏探测器电学性能表征技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 47-79.