

分子束外延 InAlSb 红外探测器光电性能的温度效应

陈刚¹, 李墨¹, 吕衍秋^{1,2}, 朱旭波¹, 曹先存^{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: 采用分子束外延生长方法在 InSb(100)衬底上生长 p⁺-p⁺-n-n⁺势垒型结构的 In_{1-x}Al_xSb 外延层。运用 X 射线衍射对材料的晶体质量及 Al 组分进行测试和表征, InAlSb 外延层的半峰宽为 0.05°, 表明外延材料的单晶性能良好, 并通过布拉格方程和维戈定律计算出 Al 组分为 2.5%。然后将外延材料制备成多元红外探测并测得 77~210 K 下的光谱响应曲线, 实验发现探测器的截止波长从 77 K 时的 4.48 μm 增加至 210 K 时的 4.95 μm。通过数据拟合得出 In_{0.975}Al_{0.025}Sb 禁带宽度的 Varshni 关系式以及其参数 E_g(0)、α 和 β 的值分别为 0.238 6 eV, 2.87×10⁻⁴ eV/K, 166.9 K。经 I-V 测试发现, 在 110 K, -0.1 V 偏压下, 器件的暗电流密度低至 1.09×10⁻⁵ A/cm², 阻抗为 1.40×10⁴ Ωcm², 相当于 77 K 下 InSb 探测器的性能。同时分析了温度对器件不同类型的暗电流的影响程度, 并得到器件的扩散电流与产生-复合电流的转变温度约为 120 K。

关键词: 分子束外延; InAlSb; 光电特性; 红外探测器

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1204003

Temperature effect of InAlSb infrared detectors on photoelectric properties by molecular beam epitaxy

Chen Gang¹, Li Mo¹, Lv Yanqiu^{1,2}, Zhu Xubo¹, Cao Xiancun^{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 In_{1-x}Al_xSb epitaxial layers of p⁺-p⁺-n-n⁺ barrier structure were grown on the InSb(100) substrate by molecular beam epitaxy. The crystal quality and Al composition of the material were measured and characterized by X-ray diffraction. The full width at half maximum of the InAlSb epitaxial layer was 0.05°, indicating good performance monocrystalline epitaxial material. The Al content of 2.5% was calculated according to Bragg's formula and Vegard's law. When the InAlSb material was fabricated as an infrared detector diode and the spectral response curve was measured at 77 K to 210 K, it was found that the cutoff wavelength of the detector increased from 4.48 μm at 77 K to 4.95 μm at 210 K. By fitting the Varshni relation of In_{0.975}Al_{0.025}Sb with the experimental data of bandgap, the values of E_g(0), α and β are 0.238 6 eV, 2.87×10⁻⁴ eV/K and 166.9 K, respectively. After the I-V test, the dark current density reached as low as 1.09×10⁻⁵ A/cm² and the resistance area product is 1.40×10⁴ Ωcm² at

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2014DFR50790)

作者简介: 陈刚(1989-), 男, 硕士, 主要从事红外探测器方面的研究。Email: chgang1027@163.com

110 K, -0.1 V bias, which is equivalent to the performance of InSb detector at 77 K. Besides, the influence of the temperature on different types of dark current was analyzed, and the transition temperature between the diffusion current and G-R current was 120 K.

Key words: molecular beam epitaxy; InAlSb; photoelectric properties; infrared detectors

0 引言

In_{1-x}Al_xSb 是一种非常重要的三元半导体材料,在高速电子器件和光电设备领域有着广泛的应用前景^[1-2]。为了满足红外探测器应用的多样化需求,第三代红外探测器正朝着高分辨率、高工作温度、多光谱等应用方向^[3-4]。InSb 基 InAlSb 焦平面红外探测器是建立在现有的 InSb 探测器成熟的工艺技术上面发展起来的,在 InSb 衬底上外延生长 InAlSb 薄膜可以有效地抑制热生载流子的产生-复合效应,降低暗电流,提高器件的工作温度。高工作温度 InAlSb 红外探测器的巨大优势在于它不仅保留了 InSb 探测器量子效率高,可靠性强,均匀性好等特性,可以大大缩小探测器的尺寸,降低能耗与成本,减少制冷单元的启动时间,这对于空空、地空等军事方面具有极其重要的应用价值。在有关 InAlSb 探测器的研究中,QinetiQ 以及 SCD 处于领先地位,其研制的 InAlSb 红外探测器的工作温度可达 110 K,且性能相当于 InSb 探测器在 77 K 下的性能表现。近期,法国的 Montpellier 大学与 SOFRADIR 的合作研究中^[5-6]报道了新型 InSb/InAlSb/InSb 单极 nBn 结构的红外探测器件,与 PIN 型 InSb 探测器相比,其暗电流降低了 2 个数量级,工作温度能达到 120 K。

目前,国外仅有少数研究机构开展了有关 InAlSb 红外探测器的光电性能的研究。参考文献[7-9]通过透射谱、吸收谱等手段研究了 InAlSb 材料的禁带宽度的温度与 Al 组分的变化关系;SCD 公司于 2006 年报道了^[10]低 Al 组分 pin 型 InAlSb 外延材料的生长与红外探测器的性能分析;QinetiQ 公司则首先在 InSb 外延层中加入一层 InAlSb 的势垒结构^[1],然后研究了 pin 型 InAlSb 红外探测器的性能。国内的研究则主要集中在 InAlSb 材料的生长及其条件优化。

不难发现,有关 InAlSb 光学特性的研究均是对材料本身进行实验分析,而未从探测器器件角度进

行探讨,并且还没有关于能隙的 Varshni 方程的研究报道。而国际上对 InAlSb 红外探测器的电学特性也未涉及势垒型结构器件的暗电流机制分析。因此,文中生长并制备了新型 p⁺-p⁺-n-n⁺势垒结构 InAlSb 材料与红外多元探测器,研究了器件的光谱特性并获得 InAlSb 材料的 Varshni 参数及关系式,通过测试器件的 I-V 特性从而有效分析了温度对暗电流的影响机制。

1 实验

采用 RIBER 公司生产的 epineat 分子束外延(MBE)设备在直径为 2 inch(1 inch=2.54 cm)的 InSb(100)衬底上生长 InAlSb p⁺-p⁺-n-n⁺结构外延薄膜层,衬底晶面为 InSb(100)面向(111)B 面偏移 2°,并掺有浓度为 4×10¹⁷ cm⁻³ 的 Te 元素。Sb 源由带阀的裂解炉提供,In 源和 Al 源分别由双温区源炉提供,p 型和 n 型掺杂分别为 Be 和 Te,两者的掺杂浓度均为 1×10¹⁸ cm⁻³,n⁻为非故意掺杂层(n.i.d)。如图 1 所示为外延材料结构示意图。在生长过程中,通过反射高能电子衍射仪(RHEED)来原位观察样品表面平整度、清洁度、表面结构以及确定合适的生长条件,V/III 束流比为 4,生长速率为 0.5 ML/s(原子层/s)。生长温度的读数由非接触式热偶探测到的衬底温度以及衬底表面再构的转变温度共同决定。

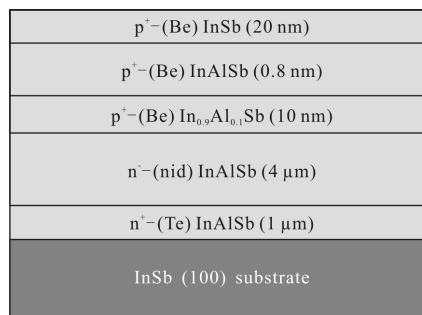


图 1 InAlSb 外延膜层生长结构示意图

Fig.1 Structure of the InAlSb epitaxial layers

InAlSb 外延膜的晶体质量由 Bede D1 型号的高

分辨率 X 射线衍射(HR XRD)进行分析测试,工作电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描模式为 $2\theta-\omega$ 联动模式,扫描步长为 0.005° ,采用铜 K_{α} 特征谱线测试外延层的 X 射线衍射曲线。在 InAlSb 探测器的制备过程中,通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)在芯片表面沉积一层 SiO_2 作为掩模板并采用干法 ICP 刻蚀,台面深度约为 $4\ \mu\text{m}$ 。器件的钝化则采用双层复合钝化结构,光刻腐蚀电极接触窗口后蒸镀 Cr/Cu,进行电极制备。最后将制备好的芯片装入金属变温杜瓦测试不同温度下的电流-电压特性,随后用傅利叶光谱仪对探测器进行变温光谱响应测试。

2 实验结果与讨论

2.1 InAlSb 外延的 XRD 分析

如图 2 所示为 InAlSb 外延材料的 X 射线衍射曲线,衍射面为(004),衬底和外延层分别在 56.409° 和 56.499° 处出现衍射峰,失配度为 0.15%且 InAlSb 层的半峰宽(FWHM)为 0.05° ,表明 InAlSb/InSb 的晶体质量良好。

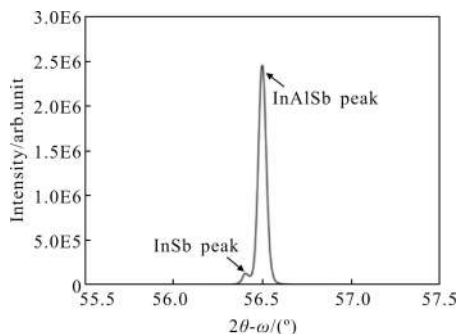


图 2 InAlSb 外延材料 XRD 图谱

Fig.2 XRD graph of InAlSb epitaxial material

根据晶格衍射的布拉格公式:

$$2 \times \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \sin \theta = \lambda \quad (1)$$

及维戈定律:

$$a_{\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}} = x \times a_{\text{AlSb}} + (1-x) a_{\text{InSb}} \quad (2)$$

式中: $h, k, l=0, 4$, 联立以上两式并代入 InSb 和 InAlSb 的特征峰角度可计算得出 Al 组分为 2.5%。

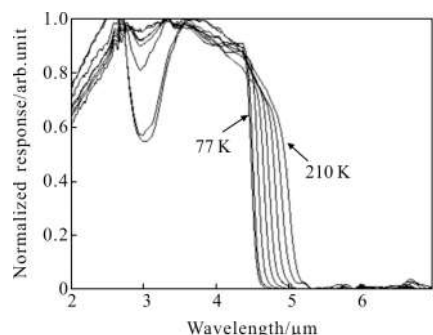
2.2 光学特性分析

该次实验选择规格为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的单元二极管进行测试,测试结果如图 3(a)所示为 InAlSb 二极管在不同温度下的归一化光谱响应曲线,此处定

义的截至波长为峰值响应 50%所对应的的波长,可以看出随着温度的升高,响应曲线向长波方向移动。截止波长 λ_c 随温度的升高而增加,由 77 K 时的 $4.48\ \mu\text{m}$ 增加至 210 K 时的 $4.95\ \mu\text{m}$,如图 3(b)所示。由图中可以看出,在低温部分(77~100 K),截止波长随温度的变化呈非线性关系,但随着温度的升高,两者的变化趋于线性变化。在不考虑压力的情况下,这种现象是由 InAlSb 材料的禁带宽度随温度的变化趋势所导致的,两者之间的数值关系可以由 Varshni 方程确定^[11]:

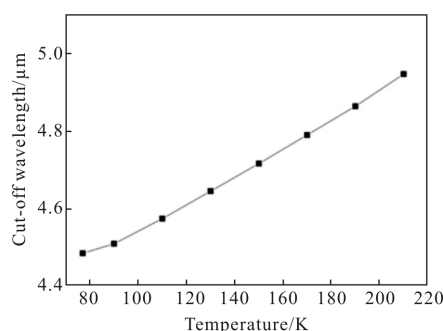
$$E_g(T) = E_g(0) - \left(\frac{\alpha T^2}{T + \beta} \right) \quad (3)$$

式中: $E_g(0)$, α 和 β 均为 Varshni 参数; $E_g(0)$ 为 $T=0\ \text{K}$ 时的禁带宽度; α 的单位为 eV/K; β 与材料的德拜温度密切相关,单位为 K。



(a) 光谱响应随温度的变化

(a) Spectral response at different temperature



(b) 截止波长相对温度的变化

(b) Cut-off wavelength at different temperature

图 3 $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 红外探测器参数随温度变化关系

Fig.3 Dependence of $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ infrared detector parameters on temperature

依据截止波长与禁带宽度的关系 $hc/\lambda_c = E_g = 1.24/\lambda_c$,可以计算得出 $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 在不同温度下的

带隙值。如图 4 所示, 离散点分别为在 77、90、110、130、150、170、190、210 K 下实验测得的禁带宽度值。再结合 $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 的 Varshni 模型, 将 $E_g(0)$, α 和 β 设为待拟合的参数, 拟合曲线如图 4 实线所示, 离散点为实验测量值。

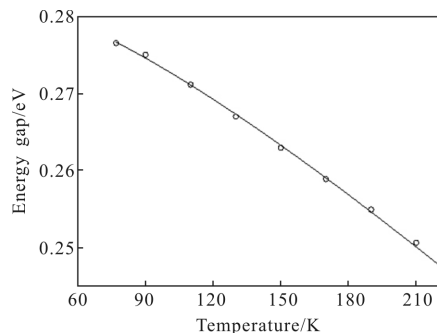


图 4 $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 禁带宽度的数值拟合曲线

Fig.4 Numerical fitting curve of $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ band gap

通过数据拟合, 可以得到 $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 的参数 α 和 β 值分别为 $2.87 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, 166.9 K 以及在 $T=0 \text{ K}$ 时的禁带宽度值 $E_g(0)$ 为 0.2836 eV 。因此, $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 的禁带宽度随温度变化的 Varshni 关系可表达为:

$$E_g^{\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}}(T) = 0.2836 - \left(\frac{2.87 \times 10^{-4} T^2}{T + 166.9} \right) \quad (4)$$

2.3 电学特性分析

实验测试了面元为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的 $\text{In}_{0.975}\text{Al}_{0.025}\text{Sb}$ 单元二极管在不同温度下的 I-V 特性, 测试温度分别设置为 77、90、100、110、120、130、140、150、160、170 K, 经计算得到如图 5 所示 J-V 曲线以及表 1 所

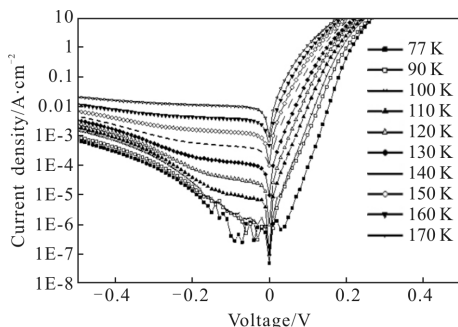


图 5 InAlSb 二极管在 77~170 K 下的 J-V 曲线

Fig.5 J-V curves of InAlSb diodes from 77 K to 170 K

示的电流密度值和阻抗值。可以看出, 当温度低于 100 K 时, 随着温度的升高, 器件的暗电流增长不明显, 电流密度从 77 K 时的 $4.09 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 增加至 100 K 时的 $2.61 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 增长了约 5.38 倍, 阻抗

分别为 $8.04 \times 10^4 \Omega\text{cm}^2$ 和 $3.49 \times 10^4 \Omega\text{cm}^2$, 处于同一个数量级。但随着温度继续升高, 器件暗电流增加比较明显, 在 120 K 时, 电流密度为 $3.71 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, 比 100 K 时的值增加了 13.21 倍。

表 1 -0.1 V 偏压下的电流密度和阻抗

Tab.1 Values of current density and RA at -0.1V bias

| Temperature/K | Current density/ $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ | RA/ Ωcm^2 |
|---------------|--|-------------------------|
| 77 | 4.09×10^{-7} | 8.04×10^4 |
| 100 | 2.61×10^{-6} | 3.49×10^4 |
| 120 | 3.71×10^{-5} | 7.84×10^3 |
| 150 | 1.38×10^{-5} | 7.30×10^2 |

对于理想二极管的 I-V 特性, 可以用肖克莱方程给出解释, 但该方程是基于四条假设进行推导的, 理想情况仅能与实际情况定性符合。对于金属-半导体接触的电流输运来说, 其主要依靠多数载流子, 导致两者偏离的因素可能包括热电子发射、空间电荷区的产生和复合过程、电子穿过势垒的量子隧穿过程或电子的扩散过程, 还可能有边缘泄露, 界面陷阱造成的界面电流等等。总的电流密度可以用经验形式表示:

$$J \propto \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) \quad (5)$$

式中: η 为理想度因子, 与曲线斜率有关。图 6 为 InAlSb 二极管的零偏阻抗随温度变化曲线, 图中纵坐

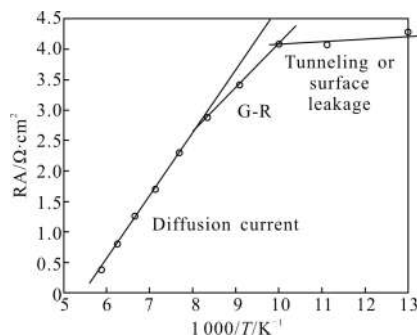


图 6 计算的 R_0A 值与温度的关系

Fig.6 Relation of calculated R_0A versus temperature

标为取对数之后的数量级大小, 在低温时 ($\leq 100 \text{ K}$), 隧穿电流及表面漏电是主要的输运过程, 对温度的变化并不敏感; 随着温度的升高, 产生-复合 (G-R) 电流占据优势, 理想因子 $\eta=2$; 当扩散电流占优时, $\eta=1$, 此时电流密度对温度的敏感度最高; 当两种电流可以比拟时, η 的值介于 1~2 之间。从图中可以看

出,当工作温度由 77 K 升高到 170 K 时,引起器件暗电流的主要成分由隧穿电流向产生-复合电流以及扩散电流发生转变,两个转变温度约为 100 K 和 120 K。

3 结 论

文中生长并制备了 $p^+-p^+-n-n^+$ 势垒型结构的 InAlSb 外延材料及多元红外探测器,从器件的角度分析了 InAlSb 禁带宽度的温度特性,并拟合得到了 $In_{0.975}Al_{0.025}Sb$ 材料的 Varshni 关系式和参数。通过器件的 I-V 测试发现,在 110 K 的工作温度下,暗电流密度能低至 10^{-5} 数量级,达到了 InSb 探测器在 77 K 下的水平,为高工作温度 InAlSb 红外探测器的研制提供了重要依据。然后计算了零偏阻抗与温度的变化关系,进而分析了器件暗电流在不同温度下的主导机制分别为隧穿电流、产生-复合电流以及扩散电流,得到 2 个转变温度分别为 100 K 和 120 K。在实际应用中,一方面,通过控制 Al 组分的掺入量可以实现 $In_{1-x}Al_xSb$ 材料的带隙可调,从而更为精确地调制红外探测器的探测波段。另一方面,拓宽的禁带宽度可以有效地抑制暗电流的产生,提高 InAlSb 红外探测器的工作温度,进一步减少探测器的能耗以及响应时间。因此,文中的结果对材料生长及高工作温度 InAlSb 红外探测器的研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Ashley T, Burke T M, Emeny M T, et al. Epitaxial InSb for elevated temperature operation of large IR focal plane arrays [C]//SPIE, 2003, 5074: 95-102.
- [2] Haigh M K, Nash G R, Smith S J, et al. Mid-infrared $Al_xIn_{1-x}Sb$ light-emitting diodes [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 231116.
- [3] Yao G S, Zhang L X, Zhang X F, et al. Mesa etching process for InAs/GaSb SLs grown by MBE[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 951-954.
- [4] Klipstein P, Calahorra Z, Zemel A, et al. 3rd generation infrared detector program at SCD [C]//SPIE, 2006, 5406: 222-229.
- [5] Evirgen A, Abautret J, Perez J P, et al. Midwave infrared InSb nBn photodetector [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50: 1472-1473.
- [6] Perez J P, Evirgen A, Abautret J, et al. MWIR InSb detector with nBn architecture for high operating temperature [C]//SPIE, 2015, 9370: 93700N.
- [7] Dai N, Brown F, Doezema R E, et al. Determination of the concentration and temperature dependence of the fundamental energy gap in $Al_xIn_{1-x}Sb$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73: 3132-3134.
- [8] Isomura S, Prat F G D, Woolley J C. Electroreflectance spectra of $Al_xIn_{1-x}Sb$ alloys [J]. *Physics Status Solidi A*, 1974, 65: 213-219.
- [9] Komkov O S, Semenov A N, Firsov D D, et al. Optical properties of epitaxial $Al_xIn_{1-x}Sb$ alloy layers [J]. *Semiconductors*, 2011, 45: 1425-1429.
- [10] Klin O, Klipstein P C, Jacobsohn E, et al. Molecular beam epitaxy grown $In_{1-x}Al_xSb/InSb$ structures for infrared detectors [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2006, B24(3): 1607-1612.
- [11] Varshni Y P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors[J]. *Physics*, 1967, 34: 149-154.