

# GaInAsSb/GaSb PIN 红外探测器 及其 I - V 特性的研究

刘延祥<sup>1,2</sup> 夏冠群<sup>1</sup> 唐绍裘<sup>2</sup> 程宗权<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海, 200050)

(<sup>2</sup> 湖南大学材料科学与工程学院, 湖南, 410082)

**摘 要** 本文简单介绍了 GaInAsSb/GaSb PIN 探测器的结构及工作原理, 重点分析了生长窗口层和硫钝化两种不同的改善探测器 I - V 反向偏软的特性的方法。

**关键词** GaInAsSb/GaSb 红外探测器 I - V 特性

## Study of a GaInAsSb/GaSb Photodetector and Its I-V Properties

LIU Yanxiang<sup>1,2</sup> XIA Guanqun<sup>1</sup> TANG Shaoqiu<sup>2</sup> CHEN Zongquan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200050)

(<sup>2</sup> Institute of Material Science and Engineering, Hunan University, Hunan, 410082)

**Abstract:** The device structure and operation principle of a GaInAsSb/GaSb PIN detector are described. The effect of sulphur passivation and AlGaAsSb window layer on the I-V characteristics has been discussed and analyzed in detail.

**Key words:** GaInAsSb/GaSb, Infrared detector, I-V property

### 1 引言

1800年, 赫谢尔用热辐射探测器发现了红外线。随着科学技术的不断进步, 以军用为核心的红外探测器逐渐发展起来, 目前在战略预警、战术报警、夜视、制导、通讯、气象、地球资源探测、工业探伤、医学、光谱、测温、大气监测等军用和民用领域都有广泛的应用<sup>[1]</sup>。目前最常用的为硅掺杂型探测器、III - V族砷化镓、III - VI族碲镉汞探测器等, 但它们都要求在低温下工作, 需要专门的制冷设备, 造价昂贵, 应用受到限制。用与GaSb衬底晶格相匹配

的InGaAsSb材料制备的探测器可直接在室温下工作, 并且具有响应速度快、灵敏度高、稳定性好等特点, 因此逐渐受到人们的重视。

1986年, 美国贝尔实验室采用液相外延(LPE)技术制备出了GaInAsSb/GaSb异质结探测器, 但是由于四元合金存在不互熔区, 使某些组分生长困难, 响应波长难以突破 $2.2\mu\text{m}$ 。后来金属有机化学汽相沉积(MOCVD)和分子束外延(MBE)生长技术的出现, 使不互熔区的突破成为可能, GaInAsSb/GaSb探测器得到了进一步的发展。目前GaInAsSb/GaSb PIN探测器的峰值探测率可达到 $10^{10}\text{cm}^2\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助(No.60176011)

**作者简介:** 刘延祥(1978—), 男, 硕士研究生, E-mail: sdliuyanxiang@21cn.com

## 2 InGaAsSb 探测器的结构及工作原理

GaInAsSb 探测器是采用 MOCVD 或 MBE 方法在 GaSb(100) 上依次生长 0.8 $\mu\text{m}$  的 GaSb 缓冲层、2 $\mu\text{m}$  的 N 型掺杂层、2.5 $\mu\text{m}$  的 P 型非故意掺杂层和 0.5 $\mu\text{m}$  的 P 型掺杂 GaInAsSb 外延层而形成的。

图 1 是一个在 n 型 GaSb 衬底上制作的垂直结构 GaInAsSb/GaSb PIN 光电探测器的示意图。在反向偏压下, 轻掺杂的 i 区全部耗尽, 成为主要光吸收区。当被光照射时, 它会产生大量光生载流子。这些光生载流子与在 P<sup>+</sup> 区、n<sup>+</sup> 区产生的部分光生载流子一起以漂移和扩散形式运动, 通过外接电路形成光电流。在入射光功率  $I_0$  的光照射下, 产生的光电流  $i_p$  [2] 为

$$i_p = \frac{eI_0}{hv}(1 - R_S)(1 - e^{-\alpha d}) \quad (1)$$

式中,  $e$  为电子电荷,  $h$  为普朗克常数,  $v$  为入射光频率,  $I_0$  为入射光强度,  $\alpha$  为 GaInAsSb 材料的吸收系数。

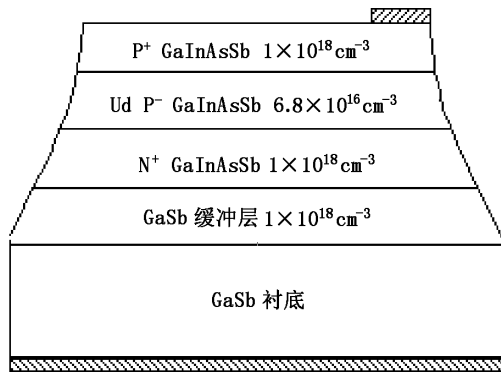


图 1 GaInAsSb 探测器结构

扩散电流的均方噪声电流为

$$\overline{I_n^2} = 2q \left[ AI_{sat} \left( e^{\frac{eV}{kT}} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中,  $A$  为器件光敏面积。

零偏压电阻为

$$R_0 = \frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} = \frac{qI_{sat}}{kT} \quad (3)$$

式中,  $V$  为外加电压,  $I_{sat}$  为反向饱和电流。

探测器的光谱探测率和峰值探测率可以表示为

$$\begin{aligned} D_\lambda^* &= g \cdot D_b^* = \frac{\eta \lambda (q/J_0)^{1/2}}{2hc} \\ &= \frac{(1 - R)(1 - e^{-\alpha x}) \lambda (q/J_0)^{1/2}}{2hc} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $R$  为探测器表面的反射率,  $\alpha$  是 GaInAsSb 材料的吸收系数,  $J_0$  为探测器的暗电流密度。

由 (4) 式可见, GaInAsSb PIN 探测器的探测率主要由量子效率和暗电流以及探测器表面的反射率所决定。光子入射后, 除探测器表面反射损失外, 探测器表面态的存在, 使少数子在扩散过程中产生极大的复合损失, 限制了量子效率; 除了 PIN 结本身少数子扩散电流、势垒区产生 - 复合电流外, 由于表面损失引入的表面漏电流构成了探测器暗电流的主要机构。为了得到高的探测率, 应有高的量子效率与尽可能小的暗电流和表面反射率。

## 3 GaInAsSb 探测器的 I - V 特性

长期以来, GaInAsSb 探测器零偏电阻较小、暗电流较大的反向偏软的特性, 妨碍了探测器的进一步实用化。产生暗电流的因素很多, 例如扩散电流、产生 - 复合电流、表面电流等, 其中的产生 - 复合电流是产生暗电流的主要原因。高的表面复合速率极大地限制了探测器性能的提高。为了降低表面复合电流, 人们提出了几种不同的方法。

### 3.1 在 InGaAsSb 表面生长窗口层

在太阳能电池的研究中, Wodall 和 Hovel 提出了在 GaAs 表面外延一层 AlGaAs 异质层, 从而使界面处形成导带势垒、使表面产生 - 复合电流降低的方法 [3]。探测器的结构与太阳能电池的类似, 由此可以借鉴太阳能电池的设计思想, 在 GaInAsSb 表面生长一层 AlGaAsSb 窗口层。

由图 2、图 3 可以看出, AlGaAsSb 窗口层的禁带宽度要比 InGaAsSb 外延层的禁带宽度大大约 2eV, 生长 AlGaAsSb 后明显增加了 P 层与 I 层之间的导带势垒, 使得 I 层中光生载流子

要克服更大的势垒才能扩散到表面，降低了表面复合电流。同时由于窗口层材料的吸收系数小，光生载流子少，从而降低了表面复合的速率。

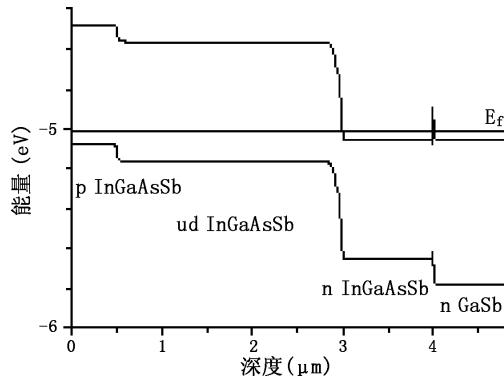


图 2 无 AlGaAsSb 窗口的 InGaAsSb 探测器能带结构

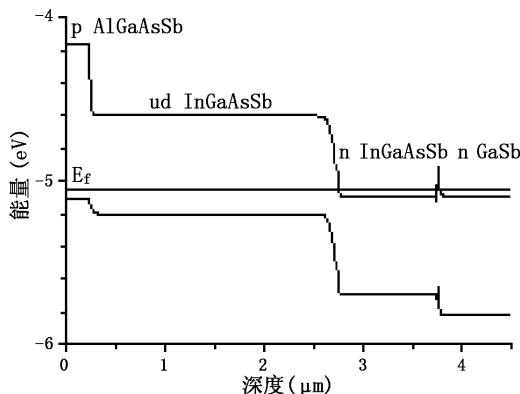


图 3 带 AlGaAsSb 窗口的 InGaAsSb 探测器能带结构

1997 年，美国 MIT 林肯实验室的 Choi<sup>[4]</sup> 在研究 GaInAsSb 热光伏器件时提出了宽禁带 AlGaAsSb 窗口。实验结果表明可以有效地减小反向暗电流，改善“软击穿”的情况，但探测器的探测率并没有明显提高。之后该方法被应用于 GaInAsSb 探测器，发现能显著改善探测器的反向特性<sup>[5]</sup>。2001 年，林春等人对 GaInAsSb 探测器有无 AlGaAsSb 窗口层的特性进行了对比性试验<sup>[6]</sup>，发现不带 AlGaAsSb 窗口层的 GaInAsSb 探测器正向开启电压为 0.15V；反向为明显的软击穿，反向电流随外加负偏压迅速增大，当外加偏压大于 1.5V 时反向电流超过 5mA。而具有 AlGaAsSb 窗口层的 GaInAsSb 探测器开启电

压约为 0.3V，略大于没有窗口层的探测器；反向特性有明显改善，反向偏压为 2V 时，反向电流小于 4mA。

### 3.2 硫钝化处理

III - V 族化合物半导体本征缺陷和自然氧化物的存在，使其具有很高的表面或界面态密度，使费米能级在带隙之间发生钉扎，从而使表面钝化问题成为一个迫切需要解决的问题。一开始人们试图采用硅表面处理的方法，在 III - V 族化合物的表面生长一层其氧化物层，可是试验发现它们各自的氧化物很不稳定，且与半导体界面存在很大的界面态密度。因此人们试图寻找一种更合适的方法来取代在 III - V 族化合物表面生长自身氧化层的方法。1987 年，Sandroff 采用  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  溶液对 GaAs 异质结双极型晶体管 (HBT) 进行表面处理，发现小电流  $\beta$  增大 60 倍<sup>[7]</sup>。后来，硫钝化成了 III - V 族化合物表面处理的一种实用方法，硫钝化可以有效地去除表面不稳定氧化物，生成硫化物层，并且能抑制表面再次氧化，达到降低表面态密度和表面复合速度的目的。

Ali 等<sup>[8]</sup>指出，GaAs 表面的氧化物和单质 As 是形成界面态的主要原因。对于 GaInAsSb，可以认为情况相类似。由于 GaInAsSb 外延片的表面几乎没有 O，所以可以认为悬挂键来自 GaInAsSb 半导体表面的 Sb、In 或 Ga。因此硫钝化也可能同样适用于 GaInAsSb 化合物的表面处理。2002 年，伍滨和、李志怀、黄文奎以及张雄等人报道了 GaInAsSb 探测器硫钝化处理的结果<sup>[9-12]</sup>，研究了钝化前后的 I - V 特性曲线的变化 (图 5)。李志怀等的研究表明<sup>[10]</sup>，在钝化过程中，S 首先与 GaInAsSb 表面的 Ga、Sb 形成 S-Ga、S-Sb 键，减少了悬挂键，进而减少了表面态；同时 S 原子又与更表面的 S 原子形成 S-S 键，在外延片表面形成硫单质 ( $\text{S}_8$  或  $\text{S}_n$ )，形成效果稳定的钝化效果。这样在硫钝化后，有效地消除了 GaInAsSb 表面悬挂键，减小了表面态，使表面复合速度降低，从而使探测器的反向特性和探测率得到改善。

由于经过  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  溶液钝化后的表面会含有 Na 离子, 从而影响探测器的性能及工艺。而采用  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  溶液会产生毒害性气体, 造成环境污染。因此我们选用一种低毒、低污染的有机硫化物进行了初步的实验, 并取得了与  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  溶液一样理想的钝化效果, 可使其暗电流降低一个数量级, 动态电阻增大一个增量级。

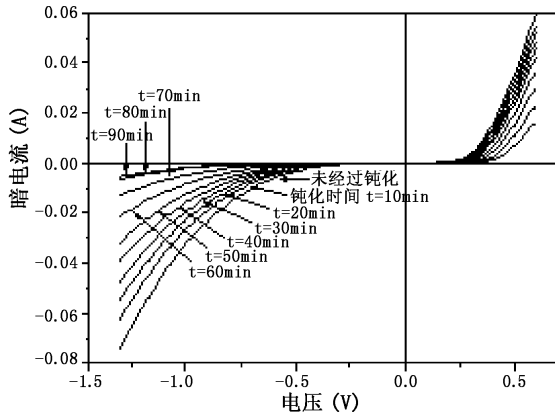


图 4 探测器 I - V 曲线随硫化铵钝化时间的变化

### 4 结论

生长 AlGaAsSb 窗口层和硫钝化处理都是改善 GaInAsSb/GaSb 探测器反向特性的有效方法, 但是相对来说硫钝化处理是一种更简单实用的方法。

### 参考文献

[1] B. Wu, G. Xia, Z. Chen, et al. The 6<sup>th</sup> International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology Electronics Proceedings, Shanghai, 2001: 1289-1291.

[2] 余金中. 半导体光电子技术. 北京: 化学工业出版社, 2003. 106-124.

[3] J. M. Woodall, H. J. Hovel. Appl. Phys. Lett. 1972, 21: 379.

[4] H. K. Choi, C. A. Wang, G. W. Turner, et al. High-performance GaInAsSb thermophotovoltaic devices with an AlGaAsSb window. Appl. Phys. Lett, 1997, 71(26): 3758.

[5] Zane A. Shellenbarger, Michael G. Mauk, Mark I. Cottfried, et al. GaInAsSb and InAsSbP photodetectors for mid-infrared wavelengths. Proc. SPIE 3379, 354(1998).

[6] C. Lin, Y. L. Zheng, A. Z. Li. Mid-infrared GaInAsSb photodetector grown by solid source molecular beam epitaxy, Journal of Crystal Growth, 2001, 227-228: 605-608.

[7] C. J. Sandroff, R. N. Nottenburg, J. C. Bischoff and R. Bhat. Appl. Phys. Lett, 1987, 51: 33.

[8] S. T. Ali, S. Ghosh and D. N. Bose, Appl. Surf. Sci. 1996, 93: 37.

[9] Wu B H, Xia G Q, Li Z H, et al. GaInAsSb/GaSb Long Wavelength Mid-IR Detectors. Appl Phys Lett, 2002, 80(7): 1303-1305.

[10] Zhihuai Li, Guanqun Xia, Binhe Wu, et al. Sulphur-passivation mechanism analysis of GaInAsSb photodetectors. Journal of applied physics, 2003, 94(3).

[11] 黄文奎, 夏冠群, 周萍 等. GaInAsSb 红外探测器的硫钝化和退火研究. 第十二届全国化合物半导体材料、微波器件和光电子器件学术论文集. 厦门: 中国电子科技集团公司第十三研究所, 2002: 511-514.

[12] X. Zhang, A. Z. L, C. Lin, et al. The effects of  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  passivation treatments on the dark current-voltage characteristics of InGaAsSb PIN detectors. Journal of Crystal Growth, 2003, 251: 782-789.

### 简 讯

#### 能对材料应力进行非接触成像的新系统

法国 CEDIP 红外系统公司最近推出一种基于高性能焦平面阵列摄像机和数字图像处理软件的新型测量系统, 该测量系统的名称为 ALTAIR Li 系统, 它能产生处于动态负载条件下的材料和结构的高质量应力图像。当一种结构经受循环负载时, 其材料表面会产生小的温差。在绝热条件下, 温度变化与局部应力之间有一

种线性关系。

这种 ALTAIR Li 系统先用一台先进的 JADE 红外焦平面摄像机以快的帧速对处于应力下的样品进行非接触成像, 然后利用专用的软件将所产生的热图像实时地转换成全场应力图像。对于处于随机、瞬时或动态负载条件下的结构部件, 它都能进行精确的应力测试。当用于测量处于动态负载条件下的结构的热耗散时, 它还能快速测定材料的疲劳极限, 并提供与所包含的损伤机构有关的信息。

□ 高国龙