

文章编号:1001-5078(2010)02-0169-05

· 红外材料与器件 ·

近红外 InGaAs 探测器台面结构对器件性能的影响

朱耀明^{1,2,3}, 李永富^{1,2,3}, 唐恒敬^{1,2}, 汪洋^{1,2}, 李淘^{1,2,3}, 李雪^{1,2}, 龚海梅^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用湿法腐蚀方式在 PIN 型 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 材料上制备了不同台面结构的正照射 In_{0.53}Ga_{0.47}As 探测器, 通过比较不同结构器件的性能, 如暗电流、信号、噪声, 研究了器件性能跟器件结构之间的关系, 并分析影响器件性能的因素。研究表明, 探测器的暗电流、噪声与台面面积是成线性关系的, 而信号与台面面积则不是线性关系。探测器的台面可分为光敏区和光敏区外部分, 光敏区外部分对暗电流、噪声的贡献与光敏区是一致的, 但对信号的贡献这两部分则是不一致的, 这主要是由于衬底反射和器件之间的沟道光生载流子的侧向扩散所造成的。

关键词:近红外 InGaAs 探测器; 台面结构; 器件性能

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

Influence of mesa structure on the characteristics of the near infrared InGaAs photodiodes

ZHU Yao-ming^{1,2,3}, LI Yong-fu^{1,2,3}, TANG Heng-jing^{1,2}, WANG Yang^{1,2}, LI Tao^{1,2,3},
LI Xue^{1,2}, GONG Hai-mei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Front illuminated In_{0.53}Ga_{0.47}As photodiodes with different mesa structures were fabricated on the materials of PIN InP/ In_{0.53}Ga_{0.47}As /InP by wet etching. The characteristics of these diodes, such as dark current, signal and noise were compared, and the influence of mesa structures was analyzed. The results indicated that the dark current and noise of diodes are linear with mesa area, but the signal is not. Mesa of diode consists of the sensitivity area and the outside section of the sensitivity area. The outside section of the sensitivity area does contributions to the dark current and noise in the same way as sensitivity area, but the outside section's contribution to the signal is not in accord with the one of the sensitivity area. That is mainly because of the reflection of substrate and the transverse diffusion of carriers generated by the absorption in the spacing between pixels.

Key words: near infrared InGaAs photodiodes; mesa structure; characteristics

1 引言

InGaAs 是一种 III - V 族化合物半导体合金材料, 随着其组分的不同, 响应波长可在 0.87 ~ 3.5 μm 变化。InGaAs 器件在光通讯领域应用非常广泛, 在其推动下, InGaAs 材料生长和器件技术有

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 50632060); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(No. C2-32), (No. C2-50)资助。

作者简介:朱耀明(1985 -), 男, 博士研究生, 主要从事短波红外探测器的研究。E-mail: yaoming85@hotmail.com

收稿日期:2009-08-25; **修订日期:**2009-09-28

了很大发展,日益成熟。InGaAs 近红外探测器在室温下即可获得优良的性能,虽然 HgCdTe 在短波范围也可以不需要制冷,但是其优值因子要低接近一个量级,而且在制冷条件下其优值因子增幅较 InGaAs 要小。InGaAs 近红外探测器在小型化、低成本、高可靠性等方面具有较大的优势,逐渐被应用于夜视、红外成像制导、侦察监视以及空间遥感等诸多领域^[1]。

国外对于 InGaAs 红外焦平面的研究较早,线列、面阵 InGaAs 红外焦平面已被用于各种卫星。法国陆地卫星用于土壤和植被湿度监测的高分辨率可见红外系统和植被仪采用了工作波段 $1.55 \sim 1.77 \mu\text{m}$ 3000 元线列焦平面器件^[2]、欧洲环境卫星的大气分布扫描成像吸收光谱仪采用了 $1.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 波段 1024 元线列焦平面器件^[3]、印度环境和资源卫星的线性成像自扫描仪和高级广角传感器采用了 $1.55 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段 6000 元线列焦平面器件^[4]、美国新千年计划地球观测 1 号卫星采用了 3 个工作波段 $0.9 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 256×256 面阵焦平面器件等。随着国内空间遥感领域的发展,对高性能 InGaAs 红外焦平面的需求越来越迫切,人们开始关注和发展空间遥感用红外焦平面。

台面型 InGaAs 探测器具有串音小、制备工艺简单等特点,但是其侧面钝化比较困难、器件性能受台面结构影响比较大,因此研究台面型器件台面结构对器件性能的影响,对优化器件结构设计和工艺流程、提高线列探测器性能及分辨率具有重大意义。我们制备了不同台面结构的正照射近红外 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器,研究了台面结构对探测器性能的影响,如暗电流、信号和噪声等。

2 器件制备

实验用外延材料是由中科院上海微系统与信息技术研究所提供,采用 MBE 技术在 InP 半绝缘衬底上依次外延生长厚度为 $1.5 \mu\text{m}$ Si 掺杂的 $n^+ - \text{InP}$ 缓冲层($n > 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)、厚度为 $2.0 \mu\text{m}$ 与 InP 晶格匹配的 Si 轻掺杂的 $n^- \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层($n \approx 7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)、厚度为 $0.6 \mu\text{m}$ Be 掺杂的 $p^+ - \text{InP}$ 帽层($p > 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)。外延材料经有机溶剂清洗后采用湿法腐蚀的方法制作台面,i 层部分保

留,形成浅台面结构,然后经钝化、电极生长等工艺制备出浅台面 InGaAs 探测器,其剖面示意图如图 1 所示,器件台面的表面和侧面由 SiN_x 钝化层覆盖,p 电极采用 Ti/Pt/Au 金属膜系,n 电极则采用 Cr/Au。

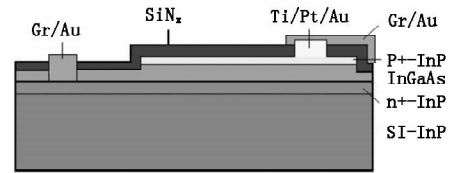


图1 InGaAs 探测器剖面示意图

Fig. 1 schematic cross structure of InGaAs photodiode

正照射近红外探测器,其台面结构如图 2 所示,成型台面面积是由光敏区面积 S_a 和光敏区外面积 S_1 组成,p 电极孔面积为 S_p ;光敏区侧面长为 a (光敏区侧面周长除去跟加厚电极接触的一边),光敏区外部分侧面长为 b (虚线部分)。为了研究不同参数对器件性能的影响,设计了不同台面结构的探测器,版图如图 3 所示,各元台面尺寸如表 1 所示。

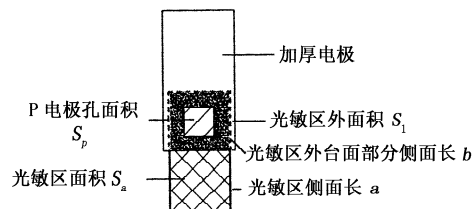


图2 InGaAs 台面结构示意图

Fig. 2 schematic structure of mesa

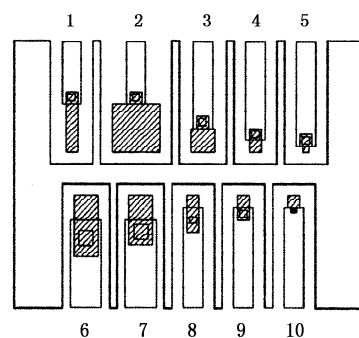


图3 不同台面结构探测器版图设计

Fig. 3 detector layout of different mesa structures

将制备好的器件封装测试,在室温条件下进行 $I - V$ 测试,测试仪器为 Keithley236 测量单元,器件信号响应测试系统的红外光源为温度 900 K 的黑体,黑体孔径 5 mm,测试带宽 80 Hz。

表1 探测器各元台面尺寸

Tab.1 mesa sizes of pixels

器件编号	光敏区尺寸 /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	光敏区外台面尺寸 /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	电极孔尺寸 /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)
1	50 × 200	50 × 50	25 × 25
2	200 × 200	50 × 50	25 × 25
3	100 × 100	50 × 50	25 × 25
4	50 × 50	50 × 50	25 × 25
5	25 × 25	50 × 50	25 × 25
6	100 × 100	100 × 150	60 × 60
7	100 × 100	100 × 100	60 × 60
8	50 × 50	50 × 100	25 × 25
9	50 × 50	50 × 50	25 × 25
10	50 × 50	25 × 20	15 × 15

3 实验结果与分析

3.1 暗电流

探测器暗电流分为扩散电流、产生-复合电流、表面漏电流和隧穿电流,一般多为扩散电流或者产生-复合电流占主导^[5]。在较高偏压、缺陷密度,窄禁带宽度时,隧穿电流比较明显。如果是在小偏压下(-10 mV),可以忽略隧穿电流的影响。扩散电流、产生-复合电流和表面漏电流,都与pn结面积A成正比,而侧面暗电流,则是与结侧面周长P有关。

$$I = I_{\text{bulk}} + I_{\text{surface}} + I_{\text{sideface}} = j_{\text{bulk}}A + j_{\text{surface}}A + j_{\text{sideface}}P \quad (1)$$

式中, I_{bulk} , I_{surface} , I_{sideface} 分别为器件体暗电流、表面暗电流和侧面暗电流。图4所示为室温下,第4,8,9,10号器件在-0.5~0.5 V偏压下的I-V曲线,这4个器件中第4号和第9号器件结构完全相同,其暗电流也基本一样。而第8,9,10号器件光敏区面积 S_a 相同,光敏区外部分的面积 S_1 逐渐减小,在相同的偏压下,随着台面面积的减小,暗电流也是依次减小的。

比较-10 mV偏压下器件暗电流大小,如图5所示,光敏区面积相同、光敏区外部分面积不相同的器件暗电流是不相同的,这说明台面型器件的暗电流与光敏区外部分面积也有关。根据公式(1),扩散、产生-复合以及表面暗电流都是与结面积有关的,从器件结构则可以看出pn结面积与台面面积是

相等的,所以器件暗电流是与整个台面相关的。

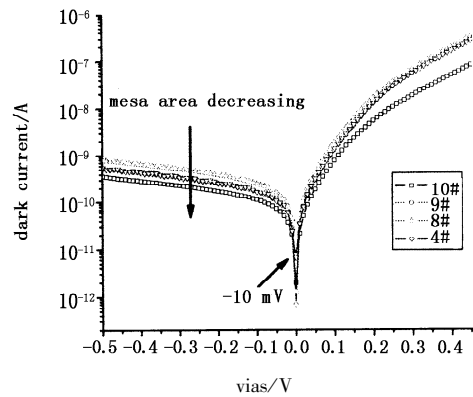


图4 器件I-V曲线随台面面积的变化

Fig.4 I-V characteristic Vs mesa area

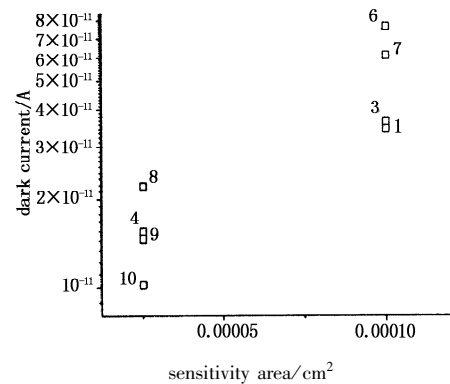


图5 -10 mV暗电流与光敏区面积的关系

Fig.5 The relationship between dark current and the sensitivity area at -10 mV

如果假设侧面暗电流密度很小,侧面暗电流 $j_{\text{sideface}}P$ 相对于 $(j_{\text{bulk}} + j_{\text{surface}})A$ 是一个小量,那么公式(1)可以写成:

$$I = (j_{\text{bulk}} + j_{\text{surface}})A + C_p \quad (2)$$

其中, C_p 是常数,根据公式(2)对-10 mV下器件暗电流进行拟合,如图6所示,暗电流与台面面积成非常好的线性, $C_p = 2.19 \times 10^{-12} \text{A}$,从图3(a)可知在

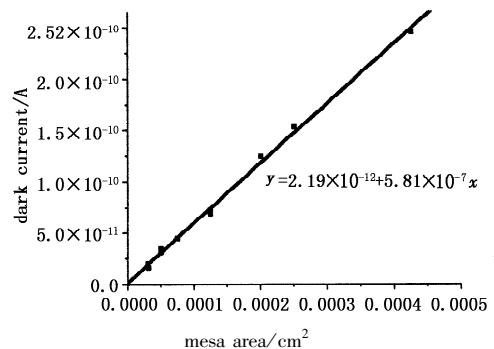


图6 器件暗电流与台面面积的关系

Fig.6 dark current of detector vs mesa area

-10 mV 偏压下器件暗电流在 10^{-11} A 的量级,这说明在 -10 mV 偏压下,与器件 pn 结面积(台面面积)相关的电流成分占主导。器件侧面电流得到了很好的抑制,器件侧面的钝化效果良好。

3.2 噪声、黑体信号

从噪声来源分析,器件噪声包括热噪声、温度噪声、散粒噪声、光子噪声、产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声等。其中,热噪声、温度噪声和光子噪声只与测量背景和环境有关,而与暗电流无关^[6]。在屏蔽条件比较好的测试环境下,是可以忽略温度噪声和光子噪声的。

$$i_N = \sqrt{2eI \cdot f}$$

产生-复合噪声:

$$i_N = \frac{4I^2}{V_0} \frac{(b+1)^2}{(n_0+p_0)^2} \frac{n_0 p_0}{n_0+p_0} \frac{\tau}{1+4\pi^2 f^2 \tau^2} \cdot f$$

其中, b 为电子-空穴迁移率比; V_0 为样品体积; τ 为载流子寿命。假设电子和空穴寿命相等。

$$1/f \text{ 噪声: } i_N \propto \sqrt{I^2 f^{-\alpha}}$$

式中, I 是暗电流大小; f 是测量频率; Δf 是测量带宽。从上述公式看出噪声遵循与暗电流同样的规律,图7给出了室温下器件的噪声与台面面积的关系,二者成比较好的线性关系,这与理论是相符的。

图8为器件黑体响应信号,黑体信号与噪声不同,与台面面积并不是线性关系。如图9所示,光敏区相同、光敏区外部分面积不相同的器件黑体信号是不同的。假设光敏区和光敏区外部分面积都对信号有贡献且成线性,不同的只是贡献因子^[7]:

$$S = \alpha_{s_a} S_a + \beta_{s_1} S_1 \tag{3}$$

式中, $\alpha_{s_a}, \beta_{s_1}$ 分别表示光敏区和光敏区外部分对信号的贡献因子。将第6,7号器件测试结果代入公式(3)计算得到贡献因子分别为:

$$\alpha_{s_a} = 3.8 \times 10^{-3} \text{ mV/cm}^2$$

$$\beta_{s_1} = 6.0 \times 10^{-4} \text{ mV/cm}^2$$

再根据公式(3)计算其他器件的黑体信号,并与测量值进行比较。结果如表2所示。基本上 S_a/S_1 越大,信号计算值与测量值的偏差越大, S_a/S_1 比值相同的器件 a/b 比值越大,器件信号计算值与测量值的偏差也越大。

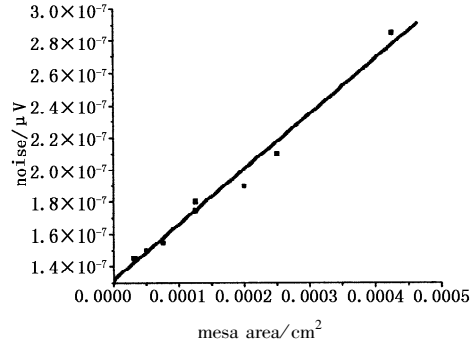


图7 室温下噪声与台面面积的关系

Fig. 7 noise at RT Vs mesa area

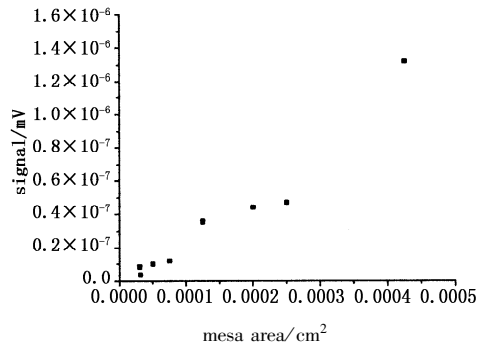


图8 黑体信号与台面面积的关系

Fig. 8 signal of black-body Vs mesa area

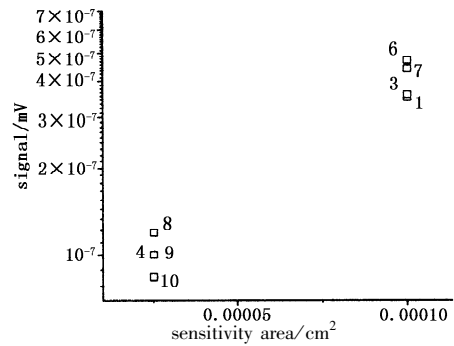


图9 黑体信号与光敏区面积的关系

Fig. 9 signal of black-body Vs sensitivity area

表2 黑体信号理论计算值与测量值对比

Tab. 2 the theoretically calculated signals and the measured ones

	1#	2#	3#	4#	5#	8#	9#
S_a/S_1	4	6	4	1	0.25	0.5	1
a/b	3	4	2	1	0.5	0.6	1
测量信号 / 10^{-7} mV	3.5	13.2	3.6	1	0.37	1.2	1
计算信号 / 10^{-7} mV	3.95	15.35	3.95	1.1	0.39	1.25	1.1
偏差/%	12.86	16.39	9.72	10	4.73	4.17	10

对于上述偏差,我们的分析如下:由于i层部分

保留,浅台面器件各像元之间的沟道仍能够吸收辐射产生剩余载流子,这部分载流子通过向周围侧向扩散并被相邻器件收集对信号产生贡献,产生信号的大小与器件侧面长成成正比。由于光敏区外部分被加厚电极所覆盖,因此扩散到这部分的剩余载流子更容易被电极所收集,导致了光敏区和光敏区外部分收集效率不同;此外,保留的 i 层并不能全部吸收入射的辐射,一部分辐射会穿透 i 层而被衬底反射,被反射到台面区域的辐射会被收集产生信号^[8],产生信号的大小跟结面积成正比,而且光敏区和光敏区外部分对反射辐射的收集效率受到两者面积相对大小的影响。综合以上两个因素,如果假设光敏区和光敏区外部分对信号贡献都是线性的,并且忽略器件台面结构差异的影响来计算信号,那么所得到的信号与测量信号之间就会存在比较大的偏差,而且偏差大小随器件结构变化而有规律的变化。比值 $S_a/S_1, a/b$ 越大,计算信号与测试信号的偏差就越大,这说明了比值 $S_a/S_1, a/b$ 越大,由于沟道光生载流子侧向扩散和衬底反射所造成的信号越小,光敏区外部分对信号的贡献也就越小。因此,精确定义台面结构,抑制衬底反射有利于器件性能的提高。

4 结论

分析表明,正照射 InGaAs 探测器像元之间的沟道所产生的光生载流子侧向扩散以及衬底的反射,都对器件的信号产生贡献,但是由于台面结构和光敏区和光敏区外部分台面状态的不同,导致光敏区和光敏区外部分对信号的贡献不一致,器件信号与台面面积是非线性的;而光敏区和光敏区外部分对

暗电流和噪声的贡献是一致的,器件暗电流和噪声与台面面积成线性关系。台面结构中 $S_a/S_1, a/b$ 越大,由于沟道光生载流子侧向扩散和衬底反射造成的信号就越小,这对于台面 InGaAs 探测器器件结构的优化设计有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈洪钧,周航宇. InGaAs 可见/短波红外焦平面探测器新进展[J]. 红外与激光工程,2007,(4):431-434.
- [2] D Herve, G Coste, et al. SPOT 4's HRVIR and VEGETATION SWIR cameras[C]. Proc. SPIE, 1995, 2552:833-842.
- [3] R J ander A, R W M Hoogeveen, H J Spruijt, et al. Goede, Low noise InGaAs infrared (1.0 ~ 2.4 μm) focal plane arrays for Sciamachy[C]. Proc. SPIE, 1996, 2957:54-65.
- [4] Dave H, Dewan C, Paul S. Awifs camera for resourcesat[C]. SPIE, 2006, 6405:64050X.
- [5] A Zemel, M Gallant. Current-voltage characteristics of metal organic chemical vapor deposition InP/InGaAs p-i-n photodiodes: The influence of finite dimensions and heterointerfaces[J]. SPIE, 2004, 179:448-457.
- [6] 汤定元,糜正瑜. 光电器件概论[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1989.
- [7] 张可锋. 高 In 组分 InGaAs 短波红外线列探测器技术研究[D]. 中科院技术物理研究所,2009.
- [8] Yongfu Li, Hengjing Tang, Kefeng Zhang. Analysis of crosstalk in front-illuminated InGaAs PIN hetero-junction photovoltaic infrared detector arrays[C]. Proc. SPIE, 2009, 7383:73831Z-73831Z-6.