

文章编号: 1672-8785(2023)07-0021-05

InSb 焦平面芯片的响应率提升研究

米南阳 宁 提 李忠贺 崔建维

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: InSb 光伏探测器的响应率是评价探测器性能的重要指标之一。探测器的电压信号与响应率成正比。从光敏芯片的角度提出了增大 InSb 红外探测器信号的方法。通过实验设计, 优化了台面湿法刻蚀的方法, 减小了芯片 p 型层的厚度。优化台面刻蚀方法使台面面积增加, InSb 芯片的 $I-V$ 电流增大了 40%, 组件的电压信号值提升了 16%。进一步将 InSb 芯片的 p 型层厚度减小至 0.8~1.2 μm 后, InSb 芯片的 $I-V$ 电流增大了 67.3%, 单元组件的电压信号值提升了 40.2%。基于 InSb 光敏芯片光生载流子的产生到光电流的转换过程, 分析了台面湿法刻蚀以及 p 型层的厚度对信号的影响机理。该研究对于提升 InSb 探测器信号和优化探测器性能具有重要的指导意义。

关键词: InSb 红外探测器; 信号; $I-V$ 性能; 湿法刻蚀; p-n 结

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.07.004

Research on the Response Rate Improvement of InSb Focal Plane Chips

MI Nan-yang, NING Ti, LI Zhong-he, CUI Jian-wei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The response rate of InSb photovoltaic detector is one of the important indicators to evaluate the performance of the detector. The voltage signal of the detector is proportional to the response rate. A method for increasing the signal of InSb infrared detector was proposed from the perspective of photosensitive chips. Through the experimental design, the wet etching method was optimized and the thickness of the p-type layer was reduced. The optimized etching method increased the pixel area, the $I-V$ current of InSb chip increased by 40%, and the voltage signal value of the module increased by 16%. After further reducing the p-layer thickness of the chip to 0.8–1.2 μm , the $I-V$ current of InSb chip increased by 67.3%, and the voltage signal value of the unit module increased by 40.2%. Based on the conversion process from the generation of carriers to the photocurrent of InSb chip, the mechanism of wet etching on the pixel and the influence of the thickness of the p-type layer on the signal was analyzed. This research has important guiding significance for improving InSb infrared detector signals and optimizing detector performance.

Key words: InSb infrared detector; signal; $I-V$ characteristic; wet etching; p-n junction

收稿日期: 2022-11-16

作者简介: 米南阳(1996-), 男, 河南安阳人, 助理工程师, 主要从事红外探测器器件技术研究。

E-mail: nanyangmi@163.com

0 引言

光电探测器可以帮助光学制导导弹和光电设备实现目标探测、截获以及跟踪等功能。InSb 材料凭借其较窄的禁带宽度和常规的单晶生长技术等优势,迅速成为制造红外探测器光敏芯片最常用的材料之一。此外,InSb 红外探测器在中波红外波段(3~5 μm)具有良好的灵敏度和优异的可靠性^[1]。

作为红外探测器最基本的性能参数之一,响应率表征了探测器的光电转换效率,其定义为单位辐射功率投射到探测器上时探测器输出的电信号大小:以电压均方值表示输出信号时,称其为电压响应率 R_v ;以电流均方值表示输出信号时,称其为电流响应率 R_i 。

$$R_v = \frac{V_s}{EA_d} = \frac{V_s}{P} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{I_s}{EA_d} = \frac{I_s}{P} \quad (2)$$

R_v 和 R_i 分别与产生的信号电压 V_s 和信号电流 I_s 成正比。因此,提升探测器的响应率需要增大信号电流。根据光生伏特效应,当芯片吸收光子产生的光生载流子扩散至 p-n 结附近并被 p-n 结的电场捕获后,载流子会转换为光电流。InSb 器件的信号电流通常可以表示为^[2]

$$I_s = -q\eta A_d E_q \quad (3)$$

式中, η 为量子效率, A_d 为芯片的光敏面积。量子效率表示像元吸收单个光子后可被 p-n 结吸收的载流子多少。对于正照射的 p-on-n 型红外探测器而言,光子被 p 区吸收,产生光生载流子;载流子在扩散的作用下移动至结区附近并被 p-n 结获取,最终到达外电路,形成光电流。而在光吸收区内,部分光生载流子会发生复合而湮灭,复合的载流子无法被 p-n 结吸收并转化成光电流^[3]。载流子的量子效率可以表示为^[4]

$$\eta \propto \frac{1}{\cosh \frac{d}{L_n} + \frac{S}{L_n/\tau_n} \sinh \frac{d}{L_n}} \quad (4)$$

量子效率随着 p 区厚度的减小而增加。因此,可通过增大芯片上像元的辐照面积 A_d 和减小

p 型层的设计厚度来增大 InSb 红外探测器的光电流,从而提升探测器的信号和响应率^[5]。

本文以 InSb 红外光敏芯片为研究对象,分析了光敏芯片的辐照面积和 p 型层厚度两个因素对红外探测器响应率的影响。通过增大光敏芯片的辐照面积(优化湿法刻蚀工艺)和减小 p 型层的设计厚度两种方案,显著地增大了 InSb 红外探测器的响应率和电压信号。该研究对于优化 InSb 红外探测器性能和提升光学制导导弹能力具有重要意义。

1 实验

实验中使用的 InSb 材料为 n 型,其浓度约为 1×10^{18} 。通过热扩散方法在 InSb 的表面注入 Cd 原子,形成厚度为 2.0~3.0 μm 、浓度约为 1×10^{14} 的 p 型层。采用化学腐蚀的方法去除一定厚度的 p 型层,获得所需的预留厚度。随后通过湿法刻蚀形成具有一定高度的台面。经过钝化、金属化等工艺后,最终获得 InSb 光敏芯片。

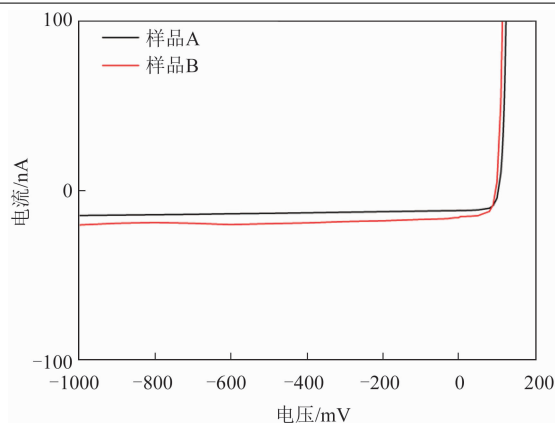
采用以下两种方案获得了 3 个不同的实验样品:(1)通过优化台面刻蚀工艺,在保持设计尺寸不变的情况下增大光敏芯片的辐照面积;(2)改变 p 型层的预留厚度。3 个实验样品的具体工艺如下:对于样品 A,将台面设计成边长为 28 μm 的正方形,并用 1 号腐蚀液(主要由氢氟酸和过氧化氢组成)对台面进行湿法刻蚀;对于样品 B,将台面设计成边长为 28 μm 的正方形,并用 2 号腐蚀液(主要由柠檬酸和磷酸组成)对台面进行湿法刻蚀;对于样品 C,将台面设计成边长为 28 μm 的正方形,将 p 型层的预留厚度设定为 0.8~1.2 μm ,并用 2 号腐蚀液(主要由柠檬酸和磷酸组成)对台面进行湿法刻蚀。

分别对以上 3 个样品进行光电性能测试,包括芯片的 I - V 曲线测试以及探测器组件的电压信号测试。利用电压信号值判断探测器的响应率。所有测试均在液氮温度(77 K)下进行。

2 结果及分析

2.1 增大光敏芯片的辐照面积

对上述样品的测试结果进行分析。其中,

图 1 样品 A 和样品 B 的 $I-V$ 测试结果

样品 A 和样品 B 的 $I-V$ 测试结果如图 1 所示。可以看到, 样品 B 的电流值明显大于样品 A 的电流值。使用 1 号腐蚀液进行台面湿法刻蚀的样品 A, 在电压为 -100 mV 时的电流值为 -12.18 nA。使用 2 号腐蚀液进行台面湿法刻蚀的样品 B, 在电压为 -100 mV 时的电流值增大至 -17.06 nA (提升了 40%)。表 1 和表 2 分别列出了样品 A 和样品 B 的探测器组件的电压信号值。

将样品 A 和样品 B 芯片分别装进组件并对其进行测试性能。以黑体为探测目标, 黑体温度分别为 20°C 和 35°C , 积分时间为 1.2 ms, F 数为 2.3, 读出电路的积分电容为 384 fF。样品 A 的 5 个芯片的电压信号值分别为 499 mV、 465 mV、 478 mV、 510 mV 和 498 mV, 平均值为 490 mV。样品 B 的 5 个芯片的电压信号值分别为 525 mV、 535 mV、 618 mV、 637 mV 和 531 mV, 平均值为 569 mV。样品 B 芯片的信号值比样品 A 芯片的信号值增大了 16%。

图 2 为具有台面结构的单个像元的示意图。可以看出, 入射光从芯片背面被 InSb 的 n 型区吸收, 并且在该区域内产生一定数量的光生载流子。这些光生载流子首先在浓度梯度的作用下朝着 p 型层和 n 型层的界面 (即 p-n 结) 移动。通过 p-n 结界面的光生载流子数量与该界面的面积大小成正比。

样品 A 和样品 B 具有相同的 p 型层预留厚度。两个样品的差异点在于台面湿法刻蚀时使用的腐蚀液不同。湿法刻蚀具有各向同

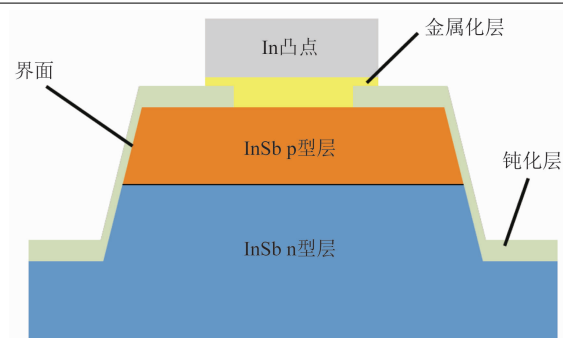


图 2 InSb 光敏芯片的单个台面结构示意图

性的特点, 即腐蚀液对 InSb 材料的各个方向均有腐蚀性。将腐蚀液对材料纵向和横向的腐蚀速率之比定义为深宽选择比。不同的腐蚀液具有不同的深宽选择比。对于样品 B 来说, 所用的 2 号腐蚀液具有更高的深宽选择比, 即刻蚀相同深度的台面时, 其横向钻蚀更小, 因此会获得更大的台面面积。样品 A 和样品 B 的台面尺寸示意图如图 3 所示。当台面的设计尺寸为 $28\text{ }\mu\text{m}$ 时, 样品 A 在进行台面刻蚀后的尺寸为 $21.3\text{ }\mu\text{m}$, 台面面积为 $453.7\text{ }\mu\text{m}^2$; 样品 B 的实际台面尺寸为 $23.0\text{ }\mu\text{m}$, 台面面积为 $529.0\text{ }\mu\text{m}^2$ (比样品 A 增加了 16.5%, 与组件信号的提升值成正比)。在相同强度的人射光条件下, 样品 B 会有更多的光生载流子通过 p-n 结, 表现为 $I-V$ 电流的增大以及信号电压的提升。这一实验结果说明增大台面面积对于 InSb 探测器芯片电压信号有明显的提升作用。

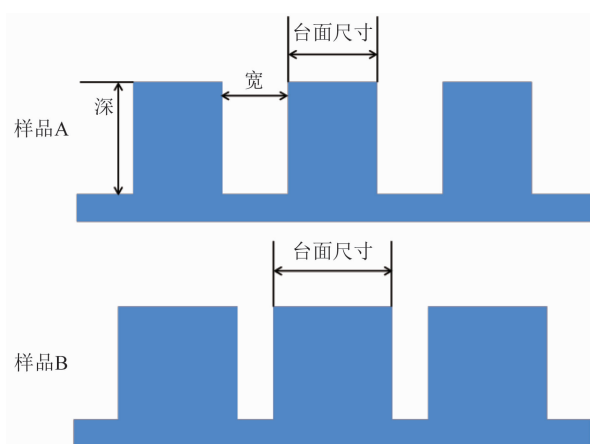


图 3 样品 A 和样品 B 的台面尺寸示意图

表 1 样品 A 的探测器组件的电压信号值

探测器组件(样品 A)编号	1	2	3	4	5
电压信号/mV	499	465	478	510	498

表 2 样品 B 的探测器组件的电压信号值

探测器组件(样品 B)编号	1	2	3	4	5
电压信号/mV	525	535	618	637	531

表 3 组件 E 的电压信号

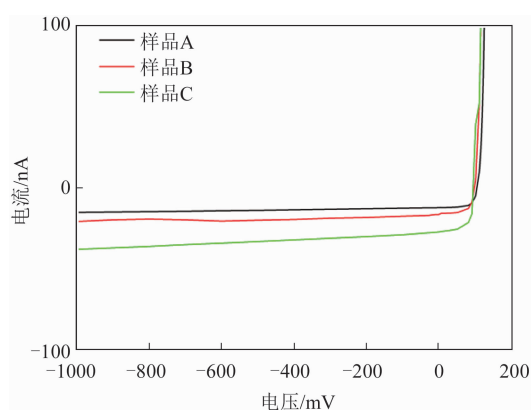
组件 E 编号	1	2	3	4	5
电压信号/mV	23.0	21.5	19.6	20.8	20.5

表 4 组件 F 的电压信号

组件 F 编号	1	2	3	4	5
电压信号/mV	30.8	27.8	31.1	29.6	28.5

2.2 减小 p 型层的预留厚度

样品 C 是在样品 B 更换 2 号腐蚀液的基础上,进一步减小了 p 型层的预留厚度。样品 A、样品 B 和样品 C 的 $I-V$ 测试结果如图 4 所示。样品 C 在减小 p 型层的预留厚度以及更换台面刻蚀的腐蚀液后, -100 mV 下的电流达到 -28.54 nA, 相比于样品 A 和样品 B 的电流值分别增加了 134.3% 和 67.3%。这说明减小 p 型层厚度对于探测器芯片的 $I-V$ 电流值有明显的提升作用。

图 4 样品 A、样品 B 和样品 C 的 $I-V$ 测试结果

对于正照射的 p-on-n 型红外探测器芯片,光吸收区在 p 区内,因此减小 p 型层的厚度以减少光生载流子在 p 型层内的复合,有助于提升器件的电压信号。以另一种正照射的单元器件为例,通过测量组件的性能,研究 p 型层的预留厚度对信号的影响。

对于组件 E 的探测器芯片, p 型层的预留厚度为 $0.8 \sim 1.0 \mu\text{m}$; 对于组件 F 的探测器芯片, p 型层的预留厚度为 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。测试组件 E 和组件 F 的性能,得到表 3 和表 4 所示的信号值。

从组件测试结果来看,减小 p 型层的厚度后,组件 F 的平均信号值达到了 29.6 mV, 相比于组件 E 的信号值 (21.1 mV) 提升了 40.2%。这与 $I-V$ 测试结果中样品 C 相比于样品 B 的电流值提升相近。

对于正照射的 p-on-n 型红外探测器,被探测物体产生的光被光敏芯片的 p 型层吸收,在该区域内产生光生载流子。光生载流子在浓度梯度的作用下扩散至 p-n 结界面附近。由于 p-n 结的存在,结区附近沿纵向分布电场,载流子在电场的作用下被 p-n 结捕获。当载流子跨越势垒到达 n 型层后,经过金属电极的引出形成电流并到达读出电路。电流越大,组件的电压信号越大。此时,光生载流子在光吸收区扩散和转移的过程中会不断地发生复合。复合后的载流子不会转换为光电流。p 型层的少数寿命约为 $10^{-3} \mu\text{s}$ 。载流子在 p 型层的寿命更低,光生载流子很容易在 p 型层发生复合,导致量子效率和光电流降低,进而影响组件的信号大小。因此,通过减小 p 型层的预留厚度,可以减少载流子在 p 型区的复合数量,从而增大输出的光电流,提升组件的电压信号。样品

C 的 p 型层预留厚度小, 光生载流子在 p 型层扩散时复合的数量最少, 因此该芯片的 $I-V$ 电流大。组件 E 和组件 F 的测试结果同样验证了这一结论。

3 结束语

本文研究了 InSb 红外探测器光敏芯片的有效光吸收面积以及 p 型层预留厚度对信号或响应率的影响。使用深宽选择比更高的腐蚀液进行台面刻蚀, 可将台面面积增大 17%。台面面积增大会引起有效光吸收面积变化, 导致芯片的 $I-V$ 电流增大了 40%, 电压信号值提升了 16%。进一步将 p 型层的厚度降低至 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 后, 光生载流子在 p 型层的复合数量降低, 载流子被引出的数量增加, 芯片的 $I-V$ 电流增大了 67.3%。单元器件的组件测试结果表明, 减小 p 型层的厚度后, 组件的信号提升了 40.2%。以上实验结果说明, 光敏芯片吸收光子的数量以及 p 型层的厚度均对信号或

者响应率有显著的影响。这一结果对于优化 InSb 红外探测器光敏芯片的工艺和提升探测器的质量具有重要指导意义。未来将继续研究该结论在不同型号/规格探测器上的应用。

参考文献

- [1] 梁进智, 徐长彬, 李海燕. 铟化镉红外焦平面阵列制备技术 [J]. 红外, 2019, 40(6): 7-12.
- [2] 周冠山. 铟化镉探测器扩散结深的探讨 [J]. 航空兵器, 1991, 28(2): 16-18.
- [3] 马京立, 杨翠, 张小雷, 等. p-n 结结深对台面型 InSb 光伏型探测器性能的影响 [J]. 航空兵器, 2015, 42(5): 36-40.
- [4] 龚晓霞, 苏玉辉, 雷胜琼, 等. 铟化镉 p-on-n 光伏器件的离子注入设计 [J]. 红外技术, 2009, 31(4): 232-235.
- [5] 李向阳, 方家熊. 碲镉汞 p-on-n 光伏器件优化掺杂的理论计算 [J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(1): 71-73.