

文章编号:1001-5078(2024)07-1076-05

· 红外材料与器件 ·

# 红外探测器电极设计

龚志红,甘玉梅,刘森,李忠贺,张磊  
(华北光电技术研究所,北京 100015)

**摘要:**针对红外探测器芯片使用的电极体系展开了调研,虽然国内、外很多红外探测器生产厂商、科研院所都公布了各自的电极体系,但是对于电极的设计很少有人提及,对于电极体系中各层薄膜的厚度设计更是鲜见。本文通过对常用电极材料的物理特性分析,设计了一种电极体系。验证试验结果表明这种电极体系未对器件性能造成影响,可以满足器件的可靠性要求。

**关键词:**IRFPA;电极材料;物理特性;厚度

**中图分类号:**TN215;TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.011

## Infrared detector electrode design

GONG Zhi-hong, GAN Yu-mei, LIU Sen, LI Zhong-he, ZHANG Lei  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015 China)

**Abstract:**In this paper, the PAD used in infrared detector chips is investigated. Although many domestic and foreign infrared detector manufacturers, research institutes have published their own electrode system, but for the design of the electrode is rarely mentioned, for the electrode system of the thickness of each layer of the film design is even rarer. An electrode system is designed by analyzing the physical properties of commonly used electrode materials and the validation test results show that this electrode system does not affect the performance of the device and can meet the reliability requirements of the device.

**Keywords:**IRFPA;PAD;physical properties;thickness

### 1 引言

制冷型红外探测器(以下简称探测器)是各类整机系统寻找目标的核心部件,相当于整机系统的“眼睛”,是目前红外技术发展的一个重要方向,被广泛的应用于航空、航天、安防等领域<sup>[1-3]</sup>。

探测器芯片最为红外探测器的核心元器件,是由光敏二极管阵列和读出电路通过高纯钢(焊料)进行倒装焊接制备而成,其本质是对光敏二极管阵列(以下简称芯片)和读出电路进行焊接工艺。在焊接工艺设计中,被焊接产品的表面状态对焊接效

果起到了至关重要的作用,因此探测器芯片的电极设计对探测器的工作状态也起到了关键作用。

比利时的 Merken 等报道了 Cr-Au 体系的应用,英国的 Yingtao Tian 等报道了 Ti-Cu 体系的应用,美国新墨西哥州立大学的 H. S. Kim 等报道了 Ti-Ni-Au 体系在超晶格体系中的应用。中国电科 13 所的杨孟丽等报道了 Ti-Au 金属化体系的应用,中科院光电技术研究所的黄秋萍等报道了 Ti-Pt-Au 体系的应用<sup>[4-8]</sup>。

根据上述调研情况,当前红外探测器的金属化

体系主要包含 Cr-Au 体系、Ti-Au 体系、Ti-Ni-Au 体系、Ti-Pt-Au 体系几种,但是各文献中均未提及金属化体系各层材料的选用原则和厚度的设计原则。

本文按照传统钎焊的设计原则,对芯片电极开展设计分析,确定了电极体系的构成及各层厚度,并进行了流片验证和可靠性试验。

## 2 电极设计

### 2.1 电极设计原理

探测器芯片的电极的作用是:1)与探测器芯片产生良好的欧姆接触;2)与焊料能够形成良好的焊点;3)能够对探测器芯片起到保护作用,防止焊料或其他元素污染。因此电极体系一般分为三个功能层,分别为上黏附层、下黏附层和阻挡层<sup>[9]</sup>,上黏附层的主要作用是与芯片形成良好的欧姆接触;下黏附层的主要作用是保护阻挡层,并与焊料(高纯 In)有良好的浸润性;阻挡层的主要作用是阻止焊料进一步向上黏附层扩散。探测器芯片的工作温度为 80K 左右,需要保证电极设计的热适配性,在电极体系各层设计时应考虑材料厚度对温度应力的影响;倒装焊接使用的焊料为高纯钢,需要保证电极与高纯钢之间的焊接性。

综合上述设计原理,芯片的电极设计包含的内容主要有:1)电极各层材料的选择;2)电极各层厚度设计。

### 2.2 电极体系设计过程

#### 2.2.1 上黏附层设计

##### 1)材料选择

上黏附层材料选择的原则:与芯片材料(InSb、MCT 等)的热膨胀系数(5.0 ppm)最接近,具有较低的弹性模量,与芯片材料浸润性较好。常用的上黏附层材料物理特性如表 1<sup>[9]</sup>所示,其中:W 金属的热膨胀系数与芯片的热膨胀系数最为接近,W 材料也是 Si 基半导体芯片最常用的电极材料,但是 W 材料的熔点非常高,在进行膜层制备工艺时,需要较大的功率输入,容易对芯片会造成不可逆的损伤(InSb、MCT 等熔点低所致,Si 材料熔点高不存在此问题)。Ti 金属的热膨胀系数最高,其弹性模量比其他三种低,但电阻率最高。V 金属的热膨胀系数较高,电阻率相对较高,其弹性模量较低。Cr 金属的热膨胀系数与芯片的热膨胀系数较为接近,电阻

率相对较低,但是其弹性模量较大。

综合上述 4 种材料的物理特性,首先可以排除的是 W 金属。在 Cr、Ti、V 三种金属中,从热膨胀系数匹配角度应选择 Cr 金属,从弹性模量(应力传递)角度应选择 Ti 金属,从电阻率角度应选择 Cr 金属。在上述三个因素中,Cr 金属有两个因素排第一,因此笔者更倾向于选择 Cr 金属,但是 Cr 金属硬度最大,需要考虑适当的设计方法降低其硬度。

表 1 常用上黏附层金属的物理性能对比

Tab. 1 Comparison of physical properties of commonly used adhesion layer metals

金属	周期表	熔点	热膨胀系数/ ppm	弹性模量/ GPa	电阻率
Cr	ⅥB-4	1907	6.7	279	12.9
Ti	ⅣB-4	1670	8.5	105~109	42
V	ⅤB-4	1910	8	133~147	25
W	ⅥB-6	3414	4.5	344	5.56

#### 2)膜层厚度设计

为了降低 Cr 金属高弹性模量带来的影响,需要降低金属层的厚度,充分利用超薄材料的尺寸效应,以降低 80 K 左右的低温环境带来的温度应力。结合实际工程经验,最终选择的膜层厚度参考了硅半导体器件中阻挡层的 23 nm 的厚度<sup>[10]</sup>。

#### 2.2.2 下黏附层设计

下黏附的选材相对较为简单,只需要选择易于焊接、导电性能良好、不易氧化的 Au 金属即可。使用高纯钢材料作为焊料时,下黏附层与高纯钢直接接触,会产生金属间化合物。金属间化合物一般表现为脆硬性,不利于探测器芯片的长期可靠性。对于金属间化合物的控制,常规焊接要求为金层厚度低于 1  $\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>,但是在倒装互联时,由于高纯钢焊料的总量较少(一般厚度在 8~15  $\mu\text{m}$  范围,约为常规钎焊焊缝的 1/20),需要进一步降低金层的厚度。

为了确定镀金层的厚度,本文开展了验证试验,分别使用 100 nm 和 300 nm 的金层厚度制备电极,然后采用离子束刻蚀的方法在扫描电镜下观察金属间化合物的生长情况。如图 1、图 2 所示,可以看出 100 nm 厚的 Au 层生成了少量的金属间化合物,基本上不会对焊接效果造成影响。而 300 nm 厚的 Au 层在焊点内生成了大量的金属间化合物,导致焊缝

存在大量的空洞,基于金属间化合物的脆硬性,像元在 80 K 环境下工作时容易发生断开,造成焊点失效。同时金属间化合物的生成会导致材料的晶体体积发生变化,进而导致芯片的受力情况发生变化。金的晶格体积为 18.145,In 的晶格体积为 27.478,金属间化合物  $AuIn_2$  的晶格体积为 74.96。根据上述参数计算,当  $AuIn_2$  生成时,带来的体积膨胀为 2.5%,对光敏元带来压力。同时,焊点中存在大量的金属间化合物不利于钢凸点连接的可靠性。

综合上述分析和试验情况,最终确定的下粘附层(镀金层)厚度为 100 nm。

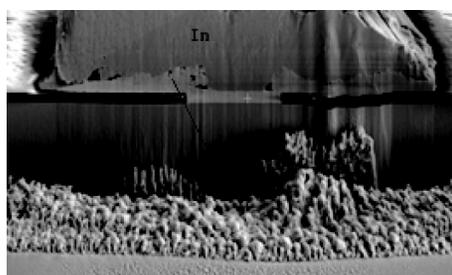


图1 100 nm 厚的镀金层金属间化合物分布情况

Fig.1 The distribution of the IMC at the thickness of 100 nm

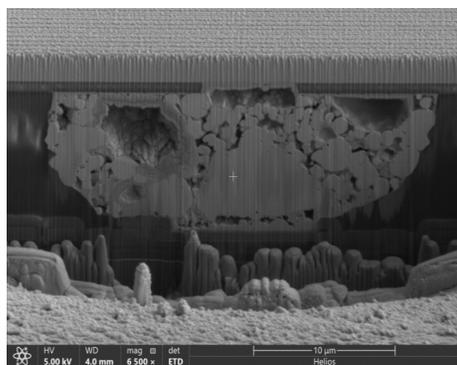


图2 300 nm 厚的镀金层焊点内金属间化合物的分布情况

Fig.2 The distribution of the IMC at the thickness of 300 nm

### 2.2.3 阻挡层的设计

#### 1) 材料设计

阻挡层一方面要阻止上黏附层扩散到下黏附层形成氧化物,造成焊接性变差;一方面要阻挡焊料及其金属间化合物扩散到上黏附层形成断层(主要原因是焊料与上粘附层不润湿,无法形成可靠连接);另一方面其焊接性要较好;因此过渡层的选择特别重要。常用的过渡层金属有 Pt、Ni、Cu 等,也有用合金膜的。从热膨胀系数看,Pt 最好,且焊接难度低。Ni 的焊接难度高,且热膨胀系数较大。Cu

的热膨胀系数最大,焊接难度低。对于元素的阻挡性,本文主要借鉴了《钎焊手册》中 Pt、Ni、Cu 三种金属在熔融的铅锡焊料中溶解速度<sup>[10]</sup>。其中:Pt 在 371 °C 下溶解速度为 0.021  $\mu\text{m/s}$ ;Ni 在 371 °C 下溶解速度为 0.043  $\mu\text{m/s}$ ;Cu 在 371 °C 下溶解速度为 1.56  $\mu\text{m/s}$ 。虽然上述三种金属在铅锡焊料中溶解速度不同于在高纯钢焊料中的溶解速度,但是从金属的活性分析,三种金属的阻挡性排序不会发生变化,因此 Pt 金属的阻挡性最佳。

表2 常用阻挡层金属的物理性能对比

Tab.2 Comparison of the physical properties of commonly used barrier layer metals

金属	周期表	熔点	热膨胀系数 /ppm	弹性模量 /GPa	电阻率	焊接难度
Pt	VIII B - 6	1768	9	169	10.6	很好
Ni	VIII B - 4	1455	13	207	6.84	不容易
Cu	I B - 4	1084	16.7	119	1.72	很好

#### 2) 膜层厚度设计

虽然 Pt 的弹性模量不大,硬度也不大,但是其热膨胀系数超过光敏元材料近 1 倍,在低温工作时也会带来较大的温度应力,也应该尽量降低其厚度。结合实际工程经验,最终选择的膜层厚度同样参考了硅半导体器件中提及的 23 nm 的厚度。

#### 2.3 小结

通过上述设计过程,最终确定了一种 Cr-Pt-Au 金属化体系,各层厚度分别为 23 nm、23 nm、100 nm,总厚度为 146nm。

### 3 效果验证及分析

按照上述金属化体系制备探测器,对探测器开展了温度冲击试验(考核探测器长时间工作)和长时间烘烤试验(考核探测器长时间贮存)。

#### 3.1 温度冲击试验

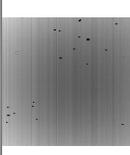
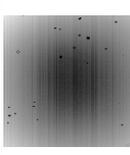
试验条件:使用 J-T 制冷器作为制冷源,降温时间为 2 min(77 K),到温后保持 5 min,然后停止制冷恢复常温 1 h,总计进行 10000 个循环。试验前后探测器的性能指标如表 3 所示,可以看出探测器的性能基本未发生变化。

使用本文设计的金属化体系制备的探测器在经历 10000 个循环的温度冲击后,像元的平均输出电压基本未发生变化,这说明器件的 I-V 特性基本未

发生变化。器件 I-V 特性变化主要与探测器芯片界面元素扩散、界面化学键的生成与断开、温度冲击带来的温度应力等多种因素相关(在此不详述)。探测器芯片在低温下(77 K),其界面元素扩散速度将大幅降低(参照元素扩散速度模型),但是温度应力水平将大幅增加。通过该试验,可以说明探测器芯片可以耐受反复温度冲击带来的应力,可以保证探测器的长时间工作。

表 3 温度冲击前后探测器性能对比

Tab. 3 The performance of the IRFPA before and after the temperature shock

项目	初始	10000 次后
盲元数/个	29	29
平均峰值响应率/(V · W <sup>-1</sup> )	9.88 × 10 <sup>8</sup>	9.78 × 10 <sup>8</sup>
平均峰值探测率/(cm · Hz <sup>1/2</sup> · W <sup>-1</sup> )	2.60 × 10 <sup>11</sup>	2.53 × 10 <sup>11</sup>
平均输出电压/V	3.336	3.340
电平图		

3.2 长时间温度烘烤试验

试验条件:将探测器置入 90 °C 烘箱中,每周进行一次产品测试。试验前后探测器的性能指标如表 4 所示,探测器的 20 °C 黑体输出电压变化情况如图 3 所示,可以看出探测器在经受 33 周(5500 h)的烘烤后,探测器的性能基本未发生变化。

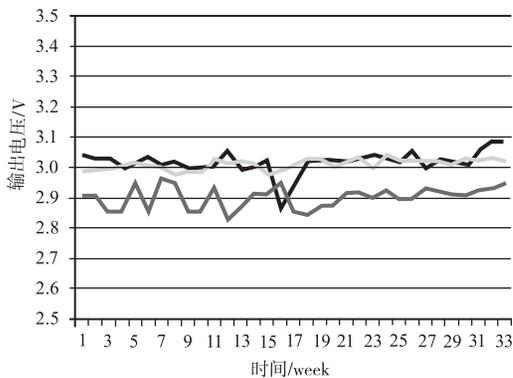


图 3 烘烤前后探测器输出电平变化曲线

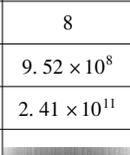
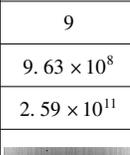
Tab. 3 The voltage variation curve of the IRFPA before and after the high temperature storage

使用本文设计的金属化体系制备的探测器在经历 23 周的烘烤试验后,像元的平均输出电压未

发生变化,这说明探测器芯片的 I-V 特性基本未发生变化。而器件 I-V 特性变化主要与探测器芯片界面元素扩散、界面化学键的生成与断开、烘烤带来的温度应力等多种因素相关(在此不详述)。高温烘烤试验主要影响探测器芯片内元素的扩散,界面化学键的生成与断开,其带来的温度应力较低。通过该试验,可以说明探测器在烘烤后芯片的界面状态一直处于稳定状态,高温烘烤带来的元素迁移、化学键变化未对芯片 I-V 特性造成影响。通过该试验,可以说明探测器芯片可以耐受长时间高温烘烤,可以保证探测器的长时间贮存。

表 4 烘烤前后探测器性能对比

Tab. 4 the performance of the IRFPA before and after the high temperature storage

项目	初始	33 周后
盲元数/个	8	9
平均峰值响应率/(V · W <sup>-1</sup> )	9.52 × 10 <sup>8</sup>	9.63 × 10 <sup>8</sup>
平均峰值探测率/(cm · Hz <sup>1/2</sup> · W <sup>-1</sup> )	2.41 × 10 <sup>11</sup>	2.59 × 10 <sup>11</sup>
电平图		

4 结论

本文依据常规低温钎焊的设计要求,按照红外探测器芯片的设计、工艺和使用条件,对电极体系的材料选择、厚度选择进行了设计分析和试验验证,最终确定了一种 Cr-Pt-Au(厚度分别为 23 nm, 23 nm, 100 nm)的电极体系。电极设计过程中,上黏附层选材是在常规半导体要求基础上考虑了热膨胀系数和弹性模量两个方面的因素,同时为了降低温度应力应尽可能降低其厚度;阻挡层选材应考虑材料的阻挡性、焊接性,同时为了降低温度应力应尽可能降低其厚度;下黏附层镀金层的厚度需要进行控制。经过试验验证,该电极体系可以满足红外探测器的长期使用和贮存条件。倒装焊接作为一种最常用半导体器件的半导体工艺,其工艺本质是一种低温钎焊工艺,在进行倒装焊设计时,应充分考虑低温钎焊设计要求。

## 参考文献:

- [1] Maurer T, Wilson DL, Smith SR, et al. Search and detection comparing midwave and longwave infrared[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(11): 933 - 956.
- [2] Rogalski A. Infrared detectors: an overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3): 187 - 210.
- [3] Rogalski A. Third-generation infrared photo detectors[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(12): 3498 - 3516.
- [4] Merken P, John J, et al. Technology for very dense hybrid detector arrays using electroplated indium solder bumps [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2003, 26(1): 60 - 64.
- [5] Tian Yingtao, Liu Changling, David Hutt, et al. Electrodeposition of indium for bump bonding[C]//*Electronic Components and Technology Conference*, 2008: 2096 - 2100.
- [6] Kim H S, Plis E, et al. Improved performance of InAs/GaSb strained layer superlattice detectors with SU-8 passivation[J]. *SPIE*, 2009, 7467: 1 - 9.
- [7] Yang Mengli, Feng Zhen. Fabrication of in bump for  $128 \times 128$  QW infrared photodetector array[J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2006, 11(4): 512 - 514. (in Chinese)  
杨孟丽, 冯震.  $128 \times 128$  GaAs 量子阱红外焦平面探测器阵列钢柱制备[J]. *纳米器件与技术*, 2006, 11(4): 512 - 514.
- [8] Huagn Qiuping, Wang Dongliang, et al. Analysis of the phenomenon of falling off of indium bumps from substrate during reflow process[C]//*2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2010: 267 - 270.
- [9] Zhang Qiyun, Zhuang Hongshou. Brazing and soldering manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 434 - 444. (in Chinese)  
张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 434 - 444.
- [10] Michale Quirk, Julian Serda. Semiconductor manufacturing technology[M]. Beijing: China Publishing House of Electronics Industry, 2015: 277 - 305.