

## 红外探测器倒装互连技术进展

耿红艳, 周 州, 宋国峰, 徐 云

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 随着红外焦平面技术的发展, 红外探测器探测波段已由单波段变为双色及四色波段, 半导体元件的封装数量由最初的数十个发展到数百万个, I/O 输出密度不断增大, 传统微互联技术如引线键合技术、载带自动焊技术等已根本无法满足器件要求。倒装焊技术以其封装尺寸小、互联密度高、生产成本低的特点越来越受到人们的亲睐。倒装互连工艺主要包括: UBM 制备、钨膜沉积、回流成球、倒压焊、填充背底胶。介绍了各工艺步骤的发展状况, 并对钨膜沉积、钨柱增高工艺进行详细阐述。

**关键词:** 打底金属; 钨柱; 回流; 倒压焊; 底部填充胶

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0722-05

## Flip chip bonding technology for IR detectors

Geng Hongyan, Zhou Zhou, Song Guofeng, Xu Yun

(Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Two-color and four-color detectors have been emerged as the development of Infrared Focal Plane Array technology. Millions of pixels have arisen on the chips and the spot pitch is even less than 13 micron. So high I/O density makes the fabrication more critical. This is beyond the ability of traditional micro-interconnection technology such as wire bonding (WB) technology and tape automated bonding (TAB) technology. Flip chip hybridization offers numbers of advantages over the widely used wire bonding technique such as small package size, high interconnect density and low cost. It consists of procedures: Under Bump Metallization deposition, indium deposition, reflowing, flip-chip bonding and inserting the underfill. Development of every procedure was performed. And the indium bumps were also emphasized for that indium bumping was a critical technology in the application of high-density interconnection between a focal plane array and a Si read-out integrated circuit (ROIC) by flip chip bonding.

**Key words:** UBM; indium bump; reflow; flip chip bond; underfills

收稿日期: 2013-07-15; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61036010, 61177070); 国家重点“973 计划”基础研究发展计划(2011CBA00608, 2012CB619203); 国家科技重大专项计划(2011ZX01015-001); 北京市自然科学基金(4112058)

作者简介: 耿红艳(1987-), 女, 硕士生, 主要从事 InGaAs 近红外探测器方面的研究。Email: genghy@semi.ac.cn

导师简介: 徐云(1974-), 女, 研究员, 博士, 主要从事红外探测器工艺方面的研究。Email: xuyun@semi.ac.cn

## 0 引言

自1800年世界上最早的红外探测器水银温度计发明以来,应军事变革及商业发展的迫切需求,红外探测器经历了第一代机械扫描型红外探测器、第二代电子扫描型探测器,并已进入第三代高性能、智能化、多波段型探测发展阶段<sup>[1]</sup>,其主体由焦平面阵列和读出电路构成。以法国的5×11元光导HgCdTe器件为代表的10<sup>3</sup>元以下的线列和小面阵结构,红外探测器的像元规模不断上升。20世纪90年代早期以320×256<sup>[2-3]</sup>、288×4<sup>[4]</sup>为代表的第二代红外探测器在西方国家开始批量生产。到2000年更有640×486双色量子阱红外探测器<sup>[5]</sup>出现及2k×2k和4k×4k焦平面问世<sup>[4]</sup>。

像元数目的增加同时增加了焦平面和读出电路设计及互连的难度。传统金丝引线键合技术逐渐暴露出电路过长、互连电阻高、封装尺寸大及互连密度低的缺点。倒装互连技术不仅能满足当前要求更以低廉成本受到业界欢迎。文中主要介绍倒装互连工艺的发展概况,并针对钢膜沉积增高工艺进行详细介绍。

## 1 工艺步骤

倒装焊接即通过倒装焊点直接把器件倒扣在对应的基板上,实现电气和机械互连<sup>[6]</sup>,一般分为冷压焊接和热熔焊接,图1为倒装焊接示意图<sup>[7]</sup>。下面笔者将按照倒装互连步骤展开讨论。

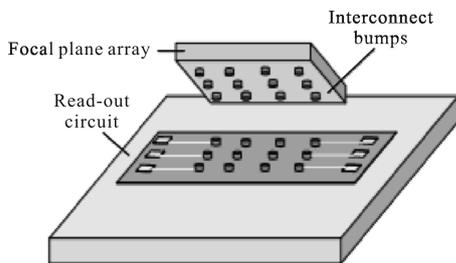


图1 倒装焊接示意图

Fig.1 Flip-chip bonding technology

### 1.1 钢球制备

#### 1.1.1 打底金属

打底金属(Under Bump Metallization, UBM)是处于芯片焊盘与凸点之间的金属过渡层,一般由两到三种金属材料构成如Cr/Au<sup>[8]</sup>、Ti/Cu<sup>[9]</sup>、Ti/Au<sup>[10]</sup>、Ti/Ni/Au<sup>[11]</sup>和Ti/Pt/Au<sup>[12]</sup>等。一方面它能与衬底芯片形

成良好的欧姆接触,减小寄生电阻、电容,另一方面还可起到粘附、阻挡扩散和浸润作用<sup>[13]</sup>。最底层一般选用Ti、Ni、Pt等金属,即可与衬底芯片形成良好的欧姆接触,又可以起到黏附作用;上层金属作用是和钢形成浸润并阻挡其向下层扩散,以Cu、Pt、Au等金属居多。其中Au与In的浸润效果最好,是打底顶层金属的首选材料之一;适宜厚度的金既可通过浸润作用促使钢柱成球,又可形成Au-In化合物阻止In进一步扩散;若Au膜过厚,在回流过程中形成Au-In化合物过厚,焊点延展性变差,钢柱容易脱落<sup>[12]</sup>。

UBM形状对钢柱高度也有一定的影响。谢珩<sup>[14]</sup>等人曾做过读出电路金属打底层与钢柱成球高度关系的实验:钢球高度与钢柱尺寸和钢柱生长高度成正比,与读出电路钢柱打底层尺寸成反比。因此UBM面积要小且形状以圆形或接近圆形为宜。

#### 1.1.2 钢柱制备

倒装焊接技术是1964年由IBM公司的工程师Peter Brofman提出,直到1969年才真正用于读出电路。倒装焊接凸点材料一直是人们关注的热点,曾出现过Cu<sup>[15]</sup>、Sn<sup>[16]</sup>、In等。金属钢比铅软,低温下延展性好,熔点低(156.6℃),具有良好的机械和电气互连特性<sup>[9]</sup>,互连成本低、易操作,特别适用于红外探测器低温工作要求,如图2所示。

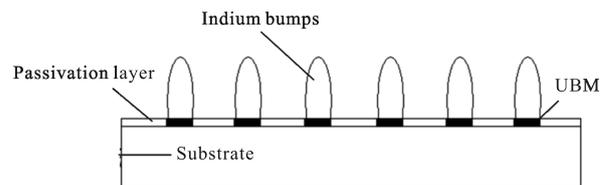


图2 钢柱

Fig.2 Indium bumps

钢柱制备一般包括:在UBM上涂覆光刻胶、曝光、显影、钢膜沉积、剥离等步骤。近年来,随着焦平面技术的发展,红外探测器电极间距可以达到15 μm或更小,因此对钢柱质量提出更高要求:高度不小于7 μm、表面光滑、不被氧化、均匀性不低于95%、粘附性强<sup>[10]</sup>。

#### 1.1.2.1 钢膜沉积

目前钢柱制备方法很多,如蒸发沉积法、印刷法、电镀法、钉头凸点法、钎料传送法、微球法及钎料液滴喷射法等<sup>[17]</sup>。考虑生产成本和操控简易性,多采用蒸发沉积和电镀方法<sup>[18]</sup>。热蒸发法蒸发速度快,

钢膜细致,均匀性好,但蒸发速度不可控且一次只能蒸发一种金属。电镀法一次可沉积数种金属并能严格控制沉积时间和速率,成本低,但钢膜质量较差<sup>[19]</sup>。对此田英涛等对实验进行改进,通过施加脉冲电流和超声震荡明显改善了电镀钢膜的质量<sup>[9]</sup>。

### 1.1.2.2 钢柱增高

随着焦平面像元数目和密度增加,钢柱必须达到一定高度才能保证电气和机械互连。一种方法是使用厚光刻胶如:PR-20000P<sup>[20]</sup>、AZ9260<sup>[21]</sup>、AZ4620<sup>[22]</sup>、AZ1512<sup>[23]</sup>等在焦平面和读出电路表面同时生长钢柱<sup>[9]</sup>,可使钢柱一定程度增高并能实现互连要求。

另一种增加钢柱高度的方法是在光刻过程中两次涂覆光刻胶<sup>[24]</sup>:第一次使用正性光刻胶,进行泛曝光使整个胶平面对显影液敏感;曝光之后不立即显影,直接涂覆负性光刻胶。再结合特定光刻板和紫外线曝光技术,使特定区域对显影液敏感,显影之后在衬底上形成特定的形状,而后沉积钢膜。

还有一种增加钢柱高度的方法是两次沉积钢膜<sup>[24]</sup>:在第一次蒸钢后不剥离直接涂覆光刻胶进行第二次钢柱生长工艺。此方法即能增加高度又能在同一平面制备不同高度的钢柱,如图 3 所示<sup>[24]</sup>,特别适用于双色、四色探测器或其他要求钢柱高度和直径不同的器件封装。

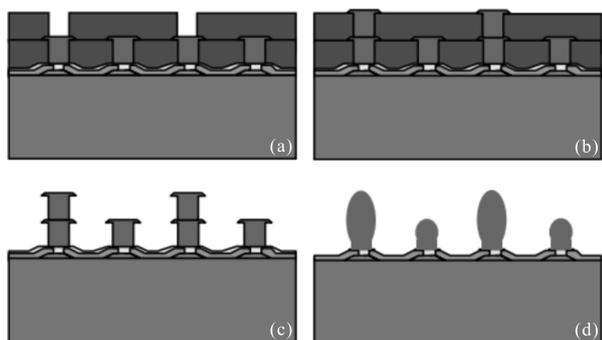


图 3 叠层钢柱电镀技术,同一芯片上获得不同钢柱

Fig.3 Schematic of "multi-stack" indium bump electroplating technique. Variable height (shown here) and diameter bumps can be fabricated on the same chip with this technique

### 1.1.3 回流缩球

回流是指给钢柱加热使之融化,通过浸润作用和表面张力,钢柱收缩成球。回流后钢球表面更光滑,均匀性更好;高度也得到提升,这样能降低焊接

压力,减小焊接后的横向剪切拉力,提高器件的可靠性<sup>[25]</sup>。回流工艺的温度设计分恒温 and 梯度变温。梯度变温法在升至最高温和降至最低温过程中设计多个温度阶梯,升温速度慢,便于钢柱成球,且对烧结炉的要求较低,多被采用。但钢易氧化,钢柱制备完成后一旦与空气接触极易形成  $\text{In}_2\text{O}_3$ , 该氧化物熔点高、比重大、延展性差,回流过程中将以固体形态包裹在钢柱表面,抑制成球和热熔焊接,回流之前须去除表面氧化层。目前使用较多的方法是:回流炉中通入甲酸、 $\text{H}_2$  等还原性气体、利用化学试剂  $\text{ZnCl}_2$ <sup>[25]</sup>、稀盐酸<sup>[26]</sup>等去除表面氧化物或在钢柱制备时表面沉积金属保护膜 Au、Ag 等防止氧化<sup>[27]</sup>。

### 1.2 热熔焊接

热熔焊接是芯片互连的关键,决定着电气和机械互连的可靠性。主要工艺流程为:把基板固定在加热台上加热,利用真空吸头通过夹具夹持芯片,并利用光学系统实现芯片与基板焊盘的对准;带有芯片的夹具缓慢下降,直至芯片凸点与基板焊盘相互接触,并施加一定的压力;焊接完成后,释放真空吸力,夹具提升<sup>[28]</sup>。

由于钢柱细小且排列密集,焊接前基板须完全平行、钢球精确对准。简单易行的方法为在焦平面和读出电路上同时制作对准标记,通过分光镜使对准标记完全重合进行光学对准,该方法适用于芯片表面反光性好且钢球尺寸大的器件;非反光芯片多采用接触式对准,即在钢球对准后调整检测,当芯片边缘压力处处相等即表明已对准。该方法仍会产生微小误差,不能满足更高 I/O 密度封装。目前较先进的为激光对准找平技术,通过对不同位置激光测距实现自动找平,简捷精确,但费用较高<sup>[29]</sup>。

对准后的钢球需要进一步压力作用和热辅助作用才能完成互连,压力大小和温度高低由钢球体积、密度及表面氧化程度确定。热熔焊接后互连质量检测有多种方法,如横向拉力测试、电阻测试、X 射线图像检测等<sup>[30-31]</sup>。其中电阻测试不但能测试出焊点的互连性,还可通过施加电压修复由表面氧化层导致的钢球短路问题。

### 1.3 底部填充

红外探测器是一种低温工作器件,工作温度 77 K 而储存于室温;由此决定了红外探测器需不断经受温度冲击。读出电路和焦平面材料不同,热膨胀系数

差异大(如表1所示<sup>[32]</sup>),在温度循环过程中器件内部产生横向拉力造成疲劳,严重影响探测器的可靠性。

表1 适用于红外探测器材料的热膨胀系数

Tab.1 CTE of the materials for infrared detectors

Materials	Al	Cu	Sdder	FR4	Ceramic plate	Si	Underfills
CTE / $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	23	17.5	25.26	18-25	~6	2.3	19-25

底部填充胶(Underfill)是一种低粘度、低温固化的粘接剂填充于钢球底部和芯片缝隙,既能起到内部机械支撑,又能与In柱高度方向热膨胀适配。通过重新分配由热胀系数差产生的机械力,可使器件寿命延长10~100倍。底部填充胶一般由环氧基热固树脂和硅填充颗粒组成,其中环氧树脂起到粘附作用,而通过控制硅填充颗粒含量可实现上下基板热膨胀适配<sup>[33]</sup>。

尽管倒装互连后基板间缝隙仅10 $\mu\text{m}$ 左右,利用虹吸作用仍可方便灌胶。为保证胶填满缝隙:可选用两边L或三边U型灌胶方法,在倒扣基板上钻蚀圆孔能更快的排出内部空气,还可通过特殊模具进行灌胶<sup>[33]</sup>。

## 2 结束语

在红外探测器倒装互连技术中,打底金属(UBM)主要起粘附、阻挡扩散、浸润以及功函数匹配作用;钢球是连接上下基板的纽带,但钢球表面氧化物的去除以及对高度的要求是目前面临的关键问题;热熔焊接是将上下基板连接的重要步骤,钢球高度的均匀性、上下基板对准程度以及压力大小将直接影响焊接质量;底部填充胶可在一定程度上延长器件寿命,利用虹吸作用灌胶,方便快捷,但在商业化生产过程中仍需机械器材辅助。虽然倒装焊接工艺仍存在诸多问题,但对比其他封装工艺,它能够很好地满足当前红外探测器集成化、高输出、小型化的要求。在钢柱间距更小的情况下增加钢柱高度将成为人们未来的研究方向。

## 参考文献:

- [1] Shi Yanli. Choice and development of the third-generation infrared detectors [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(1): 104-108. (in Chinese)  
史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. 红外技术, 2013, 35(1): 104-108.
- [2] Jin Jupeng, Liu Dan, Wang Jianxin, et al. 320 $\times$ 256 GaAs/AlGaAs long-wavelength quantum well infrared photodetector focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 833-837. (in Chinese)  
金巨鹏, 刘丹, 王建新, 等. 320 $\times$ 256 GaAs/AlGaAs 长波红外量子阱焦平面探测器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 833-837.
- [3] Sang Jun Lee, Zahyun Ku, Ajit Barve, et al. A monolithically integrated plasmonic infrared quantum dot camera[J]. *Nat Commun*, 2011, 286: 1-6.
- [4] Liu Liping. Status and trend of the readout circuit technology for IR FPA [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(7): 598-600. (in Chinese)  
刘莉萍. 红外焦平面读出电路技术及发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2007, 37(7): 598-600.
- [5] Li Xianjie, Liu Yingbin, Feng Zhen, et al. AlGaAs/GaAs quantum well infrared photodetector focal plane array based on MOCVD technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 435-438. (in Chinese)  
李献杰, 刘英斌, 冯震, 等. 基于 MOCVD 技术的长波 AlGaAs/GaAs 量子阱红外焦平面探测器 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 435-438.
- [6] Li Jinjian. The flip chip for in connected of infrared focal-plane[J]. *Electronics & Packaging*, 2010, 10(6): 6-11. (in Chinese)  
李金健. 应用于红外焦平面钢柱互连的封装技术[J]. 电子与封装, 2010, 10(6): 6-11.
- [7] Kimberley A Olver. Flip chip hybridization using indium bump technology at ARL, ADA470149. Adelphi MD: Army Research Laboratory, 2007.
- [8] Merken P, John J, Zimmermann L, et al. Technology for very dense hybrid detector arrays using electroplated indium solderbumps[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2003, 26(1): 60-64.
- [9] Tian Yingtao, Liu Changqing, David Hutt, et al. Electrodeposition of indium for bump bonding [C]//2008 Electronic Components and Technology Conference, 2008: 2096-2100.
- [10] Yang Mengli, Feng Zhen. Fabrication of In bump for 128 $\times$ 128 QW infrared photodetector array [J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2006, 11: 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: 512-514.
- [11] Kim H S, Plis E, Myers S, et al. Improved performance of InAs/GaSb Strained Layer Superlattice detectors with SU-8 passivation[C]//SPIE, 2009, 7467: 1-9.
- [12] Huang Qiuping, Wang Dongliang, Xu Gaowei, 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.
- [13] Zhang Wanrong, Li Zhiguo, Guo Weiling, et al. The diffusion barrier layer in the ohmic contact of the semiconductor device [J]. *Microelectronics & Computer*, 1998, 15(5): 53-56. (in Chinese)  
张万荣, 李志国, 郭伟玲, 等. 半导体器件欧姆接触中的扩散阻挡层[J]. *微电子学与计算机*, 1998, 15(5): 53-56.
- [14] Xie Heng, Liang Zongjiu, Yang Yaru. Effect of UBM of ROIC on indium bump height [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 63-66. (in Chinese)  
谢珩, 梁宗久, 杨雅茹. 读出电路钢柱打底层对钢柱成球高度的影响[J]. *激光与红外*, 2011, 41(1): 63-66.
- [15] Roesch William J, Suwanna Jittinorasett. Cycling copper flip chip interconnects[J]. *Microelectronics Reliability*, 2004, 44: 1047-1054.
- [16] Enric Cabruja, Marc Bigas, Miguel Ullan, et al. Special bump bonding technique for silicon pixel detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 576: 150-153.
- [17] Li Fuquan, Wang Chunqing, Zhang Xiaodong. Bump fabrication methods for flip chip [J]. *Electronics Process Technology*, 2003, 9(10): 62-66. (in Chinese)  
李福泉, 王春青, 张晓东. 倒装芯片凸点制作方法[J]. *电子工艺技术*, 2003, 9(10): 62-66.
- [18] Huang Qiuping, Xu Gaowei, Luo Le. Indium bump fabricated with electroplating method [C]//2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2009: 650-654.
- [19] Zhang Peng, Li Zhen, Zhao Kai. The In bump growth on the large scale MCT IR device [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(8): 781-783. (in Chinese)  
张鹏, 李震, 赵凯. 新型大面阵碲镉汞探测器 In 柱生长工艺研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(8): 781-783.
- [20] Geng Xiaobao, Pragnesh Patel, Meng D D. A self-adaptive thermal switch array to stabilize the temperature of MEMS devices [C]//2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2010: 148-151
- [21] Huang Qiuping, Xu Gaowei, Yuan Yuan, et al. Development of indium bumping technology through AZ9260 resist electroplating[J]. *J Micromech Microeng*, 2010, 20(5): 1-9.
- [22] Chen Mingyuan, Sun Ping, Li Junwu, et al. A flip-chip bonding of Au-In bumps in MEMS device [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2010, 33(3): 258-261. (in Chinese)
- 陈明园, 孙萍, 李俊伍, 等. 一种用于 MEMS 器件的 Au-In 倒装焊技术[J]. *电子器件*, 2010, 33(3): 258-261.
- [23] Fu Yifeng, Ye Lilei, Liu Johan. Thick film patterning by lift-off process using double-coated single photoresists [J]. *Materials Letters*, 2012, 76: 117-119.
- [24] Jiang Jutao, Stanley Tsao, Thomas O' Sullivan, et al. Fabrication of indium bumps for hybrid infrared focal plane array applications[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, 45: 143-151.
- [25] Shen Tianzhu. Indium bump reflowing flip chip interconnection of infrared focal plane array detectors[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(2): 96-98. (in Chinese)  
沈天铸. 红外焦平面探测器互连中的 In 缩球工艺[J]. *红外技术*, 2007, 29(2): 96-98.
- [26] Aidar M Biktashov1, Nikolai B Kuzmin, Andrei G Paulish. indium bumps investigation for the flip-chip assembly [C]// 7th International Siberian Workshop and Tutorial EDM'2006, 2006.
- [27] Frank Greer, Matthew Dickie, Vasquez R P, et al. Plasma treatment methods to improve indium bump bonding via indium oxide removal [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2009, 27(5): 2132-2137.
- [28] Zhang Caiyun, Ren Chengping. Flip-chip bonding technology [J]. *Electronics & Packaging*, 2005, 5(4): 13-15. (in Chinese)  
张彩云, 任成平. 凸点芯片倒装焊接技术[J]. *电子与封装*, 2005, 5(4): 13-15.
- [29] Zhang Guodong, Gong Qibing, Su Hongyi, et al. Research on flip-chip bonding techniques for hybrid focal plane array applications[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(3): 125-128. (in Chinese)  
张国栋, 龚启兵, 苏宏毅, 等. 混成式焦平面阵列芯片倒装互连技术研究[J]. *红外技术*, 2006, 28(3): 125-128.
- [30] Gemme C, Fiorello A M, Gagliardi G, et al. Study of indium bumps for the ATLAS pixel detector[C]//IEEE NSS-MIC 2003 Conference, 2003, N3-2: 59-62.
- [31] Zhang Xining. Improved blind element inspection algorithm of infrared FPA array [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1149-1153. (in Chinese)  
张熙宁. 一种改进的红外焦平面阵列盲元检测算法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(10): 1149-1153.
- [32] Gillo K. New generation underfills power the 2nd flip chip revolution [C]//Pan Pacific Microelectronics Symposium, 1996: 147-154.
- [33] Zhang Zhuqing, Wong C P. Recent advances in flip-chip underfill: materials, process, and reliability [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packing*, 2004, 27(3): 515-524.