

文章编号:1001-5078(2019)01-0077-05

· 红外材料与器件 ·

InSb 红外探测器芯片粘接工艺研究

沈祥伟,朱旭波,张小雷,张力学,李春强,高创特
(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘要:基于 InSb 红外探测器的封装特点,采用正交试验法研究了芯片粘接过程中基板平整度、粘接剂抽真空时间、配胶时间、固化条件等工艺参数对芯片性能及可靠性的影响。通过计算极差和方差分析了各因素对芯片可靠性的影响大小。结果表明,固化条件对粘接后芯片的性能影响最大,其次是配胶时间,而抽真空时间和基板平整度影响相对较小。针对极差分析得出的较优参数组合和较差参数组合,利用 X 射线衍射(XRD)研究了不同参数组合对晶片粘接的应力大小,所得结果与正交试验一致。

关键词:芯片粘接;正交试验;XRD;应力

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.01.013

Research on die bonding of InSb IR detector

SHEN Xiang-wei, ZHU Xu-bo, ZHANG Xiao-lei, ZHANG Li-xue, LI Chun-qiang, GAO Chuang-te
(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China)

Abstract: Based on the packaging features of InSb IR detector, orthogonal experiment is designed for studying the parameters such as substrate bending, vacuuming time of adhesive, preparing time of adhesive and solidify condition, which can influence the electrical properties and reliability of InSb chip during die bonding processing. Range and variance is calculated to evaluate the influence level of the parameters on InSb chip. The results show that the solidify condition has the greatest influence on the electrical performance of the InSb chip after bonding, followed by the preparing time of adhesive, while the vacuuming time of adhesive and the flatness of the substrate have relatively little influence. According to the optimal combination and poor combination of parameters, the stress in InSb chip caused by different combination is investigated with XRD, and the results were consistent with the orthogonal experiment.

Key words: die bonding; orthogonal experiment; XRD; stress

1 引言

InSb 红外探测器以其在 1 ~ 5.5 μm 红外波段具有工艺成熟、成本低、高灵敏度及高可靠性等优点,已广泛应用于武器制导、航空航天、工业、消防和医用诊断等军用及民用领域^[1-2]。InSb 芯片属于探测器的核心部件,用于接收目标辐射并实现光电转换。芯片粘接是 InSb 红外探测器封装过程中极为

重要的工艺环节。粘接剂选择、粘接工艺、粘接界面特性等因素直接影响芯片的粘接质量,对探测器制备的合格率和可靠性起重要作用。由于 InSb 红外探测器芯片需要在液氮温度(即 77K)环境下才能正常工作,为了保证其工作温度和使用寿命,芯片需要封装在与外界绝热的真空杜瓦中。同时考虑到热匹配性和制冷效率,对芯片粘接时胶层厚度、基板材

作者简介:沈祥伟(1982-),男,高级工程师,硕士,研究方向为红外探测器封装与测试技术。E-mail:shenxw2008@sina.cn

收稿日期:2018-05-24;修订日期:2018-09-05

料、封装结构尺寸等都有较严苛的要求。

基于 InSb 红外探测器的封装特点,为保证芯片粘接质量和可靠性,应该优选合适的粘接剂,即选择耐低温性能好、粘接强度高、与 InSb 和基板材料的热膨胀系数匹配、饱和蒸汽压低及弹性模量低的粘接剂^[4-5]。除此之外,粘接界面空洞率、表面洁净度、粗糙度及平整度等^[6]也是芯片粘接考虑的重要因素,影响粘接强度和可靠性。

在粘接剂和界面特性确定后,由于芯片粘接工艺不同而引起的内应力对探测器封装合格率和可靠性显得尤为重要。InSb 晶片作为探测器芯片的衬底材料,具有压电效应,在某些晶向对应力十分敏感,所以当内应力较大时,将严重影响 InSb 芯片的电性能特性,尤其对光刻图形长宽比较大的芯片,影响尤为严重。粘接内应力主要包括收缩应力和热应力,分别由于固化时的体积收缩和热膨胀系数差异而导致。为解决芯片应力难题,孟庆端等^[7-8]借助有限元软件分析了结构和材料参数对 InSb 面阵探测器应力/应变分布的影响。熊雄等^[9]针对 HgCdTe 红外探测器的特点,提出了芯片粘接胶的选用原则以及粘接工艺优化方法。但上述研究主要是依据分析软件建立的模型研究了结构和材料与芯片应力分布的关系,没有通过工艺试验具体分析粘接工艺参数对芯片应力的影响。本文利用正交试验法分组进行工艺试验,研究了芯片粘接过程中基板平整度、粘接剂抽真空时间、配胶时间、固化条件等因素对芯片电性能及可靠性的影响,并利用 X 射线衍射分析了不同参数组合的内应力大小。

2 试验过程设计

试验选用一种双组份低温粘接剂,柯伐圆片(铁镍钴合金)作为基板进行工艺研究。综合考虑国内外相关芯片粘接工艺参数研究以及探测器封装过程中遇到的实际问题,选择四个影响因素:①基板平整度,用曲率半径 R (mm)表示;②粘接剂抽真空时间,或者粘接剂排气量,指双组份低温粘接剂充分搅拌后的真空排气时间,用 T_1 (min)表示;③配胶时间,指真空排气结束到开始芯片粘接之间的等待时间,用 T_2 (min)表示;④固化条件,包括固化温度和时间,用 T_3 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)表示。所用探测器芯片采用现有成熟工艺制备:在 n 型衬底上扩散 p 型层,通过光

刻、腐蚀、钝化等工艺形成 p-n 结二极管,最后热蒸发法镀制金电极。利用 PM8 探测器芯片测试系统进行芯片电性能测试,主要考核电性能指标为短路电流 I_{sc} 、漏电比 I_l/I_{sc} 和动态阻抗 R_o 。

试验中,将合格芯片按照不同工艺条件进行粘接,完成固化后,进行温冲老化试验,最后进行电性能测试。温冲老化试验过程为:以常温 \rightarrow 液氮温度(5 min) \rightarrow 常温(20 min)为一个循环,进行十个循环后,再在 80°C 烘箱中保持 2 h。为获得较为准确的数据,采用大数据方法,统计芯片电性能合格率,本试验中每组试验的芯片数量为 24 片。根据试验条件确定各因素的水平数为 3 个,不考虑各因素之间的交互作用,需要设计一个四因素三水平的正交试验,即按照正交表 $L_9(3^4)$ 进行试验设计。因素水平表如表 1 所示。

表 1 因素水平表

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	R/mm	T_1/min	T_2/min	$T_3/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$
1	∞	0	0	22/480
2	375	3	30	40/40
3	130	6	60	80/20

3 试验结果与分析

3.1 极差分析

根据四因素三水平正交表 $L_9(3^4)$ 的方案,设计了 9 组试验。首先进行极差分析,确定出试验因素的最优水平组合以及各因素对试验指标影响程度的主次。正交试验方案、结果及极差分析见表 2。

从极差分析结果看,固化条件对粘接后芯片的性能影响最大,其次是配胶时间,而基板平整度和抽真空时间影响相对较小。根据 K 值结果,首先可知随着固化温度的升高,芯片电性能合格率逐渐降低。这主要是因为温度越高,固化过程中粘接剂还没有达到体积平衡状态就已失去流动性,失去流动后体积的收缩产生收缩应力。应力过大会引起 InSb 芯片变形,使芯片产生电荷积累或裂痕,进而影响芯片性能和可靠性。其次,芯片电性能合格率随着配胶时间的增加而提高,这可能主要由于配胶完成后等待一定时间再进行芯片粘接,会使固化剂和环氧胶交联固化作用更加充

分。但配胶时间亦不能过长,否则会影响粘接剂的流动性,在粘接界面形成空洞等。根据表 2 结果可得出本次正交试验的最优组合为 $T_31T_23R1T_13$,即常温固化,配好胶后常温放置 60 min 后粘接,基板平整,排气 6 min;较差组合为 $T_33T_21R2T_12$,即 80° 固化 20 min,配好胶后立刻粘接,基板曲率半径 $R = 375$ mm,抽真空 3 min。

表 2 正交试验方案、结果与极差分析

Tab. 2 Scheme and results of orthogonal experiment and range analysis

试验号	R	T ₁	T ₂	T ₃	合格率/%
1	1	1	1	1	95.83
2	1	2	2	2	100
3	1	3	3	3	95.83
4	2	1	2	3	91.67
5	2	2	3	1	100
6	2	3	1	2	93.75
7	3	1	3	2	100
8	3	2	1	3	83.33
9	3	3	2	1	100
K ₁	0.972	0.958	0.910	0.986	
K ₂	0.951	0.944	0.972	0.979	
K ₃	0.944	0.965	0.986	0.903	
R	0.028	0.021	0.076	0.083	

3.2 方差分析

通过对芯片电性能合格率数据方差分析,可以考察各因素对芯片性能及可靠性影响的显著性大小。根据试验数据,分别计算出四个因素的偏差平方和、自由度和 F 比,显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,查 F 临界值,可得方差分析结果,如表 3 所示。从表 3 中 F 比可知,四个因素对芯片性能影响的显著性大小依次为 $T_3 > T_2 > T_1 = R$,即固化条件影响最显著,其次是配胶时间,而基板平整度和排气量影响较小,所得结果与前述极差分析结果一致。

表 3 正交试验方差分析结果

Variance analysis results of orthogonal experiment

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
R	0.001	2	1.00	19.00
T ₁	0.001	2	1.00	19.00
T ₂	0.010	2	10.00	19.00
T ₃	0.013	2	13.00	19.00
误差	0.00	2		

3.3 XRD 应力分析

为了量化研究不同工艺参数给芯片粘接带来的内应力,本文利用晶格衍射法测量 InSb 晶片的应力情况。具体方法为:将 10 mm × 10 mm 的 InSb 晶片减薄到 300 μm 后,分别按照较优参数组合 $T_31T_23R1T_13$ 和较差参数组合 $T_33T_21R2T_12$ 进行粘接试验,经温冲老化后,进行 XRD 测试。测试结果见图 1 和 2。

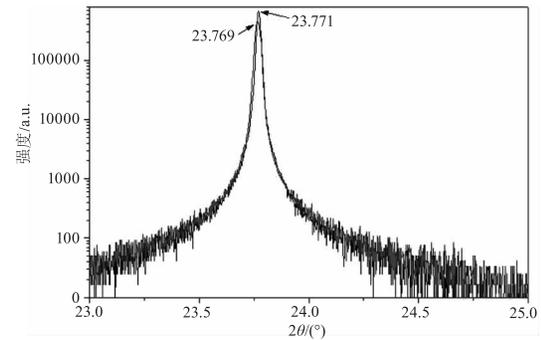


图 1 较优参数组合粘接前后 XRD 图谱
($2\theta = 23.771^\circ$ 衍射峰为粘接前, $2\theta = 23.769^\circ$ 衍射峰为粘接后)

Fig. 1 XRD patterns of optimal combination before & after bonding
(diffraction peak of $2\theta = 23.771^\circ$ was for before bonding, and $2\theta = 23.769^\circ$ was for after bonding)

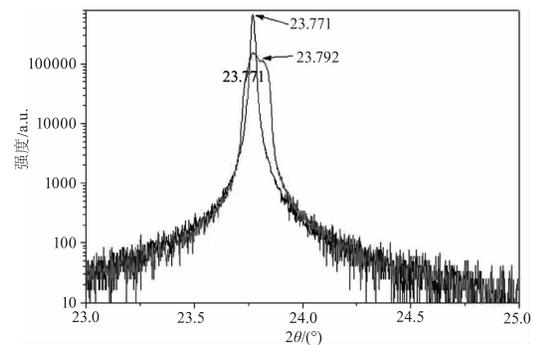


图 2 较差参数组合粘接前后 XRD 衍射图谱
($2\theta = 23.771^\circ$ 衍射峰为粘接前, $2\theta = 23.792^\circ$ 衍射峰为粘接后)

Fig. 2 XRD patterns of poor combination before & after bonding
(diffraction peak of $2\theta = 23.771^\circ$ was for before bonding, and $2\theta = 23.792^\circ$ was for after bonding)

晶格衍射法是利用入射 X 射线与晶体主晶面之间的掠射角 θ 符合布拉格 (Bragg) 定律时会发生 X 射线衍射的原理进行测试的。

布拉格 (Bragg) 公式为:

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{1}$$

式中, θ 为布拉格角度; λ 为 X 射线波长,对于铜靶, $\lambda = 1.54056\text{\AA}$; n 为干涉级,正整数; d 为衍射晶面

间距。

根据应力公式,通过测量晶格的畸变可以算出应力的大小为^[10]:

$$\sigma = \frac{E}{2\gamma}\varepsilon = \frac{E}{2\gamma} \frac{d - d_0}{d_0} \quad (2)$$

式中, E , γ , d_0 ,分别为杨氏模量、泊松比和晶面间距,对于立方晶系的 InSb 材料, $E = 409000\text{MPa}$, $\gamma = 0.35$; d 是由 XRD 测得的样品的晶面间距, σ 为应力, ε 为应变。 $\sigma > 0$,表示晶格受到拉伸,为张应力; $\sigma < 0$,表示晶格受到压缩,为压应力。

在图 1 和图 2 中, $2\theta = 23.771^\circ$ 的衍射峰为粘接前的 InSb 晶片(111)晶向衍射峰。与此衍射峰相比,采用较优参数组合粘接的 InSb 晶片衍射峰几乎无变化,可认为内应力很小;而较差参数组合粘接的 InSb 晶片衍射峰半高宽明显变大,且峰位向高衍射角度方向有一定偏移,说明 InSb 晶片晶格结构的规则性和完整性遭到了破坏,且产生了较大的内应力。这与正交试验结果一致。表 4 列出了两种粘接组合的衍射峰位、晶面间距和应力大小。

表 4 不同组合样品的微结构参数及应力情况

Tab. 4 Microstructure parameters of different combination samples and stress situations

样品	(111) $2\theta/(\circ)$	$d/\text{\AA}$	σ/MPa
粘接前晶片	23.771	3.7400	0
较优参数组合粘接晶片	23.769	3.7403	48.4
较差参数组合粘接晶片	23.792	3.7368	-508.2

从表 4 可以看出,与自由状态相比,较优参数组合粘接的 InSb 晶片峰位偏移量和晶面间距变化很小,仅产生很小的拉应力;而较差参数组合粘接的 InSb 晶片峰位向高衍射角度方向有一定偏移,晶面间距变小,晶格受到了压缩,产生了较大的压应力。这主要是因为粘接剂、InSb 芯片和基板的热膨胀系数不一致,在温度变化(室温和 77K 之间)过程中,在粘接界面产生了内应力。

4 结 论

芯片粘接是探测器封装过程中重要的工艺环节,对探测器制备的合格率和可靠性起重要作用。本文基于正交试验法研究了芯片粘接过程中基板平整度、粘接剂排气时间、配胶时间、固化条件等因素对芯片

性能及可靠性的影响。通过计算极差分析了各因素对芯片可靠性的影响大小,并得出较优参数组合($T_31T_23R1T_13$)和较差参数组合($T_33T_21R2T_12$)。结果表明,固化条件(T_3)对粘接后芯片的性能影响比较大,其次是配胶时间(T_2),而排气时间(T_1)和基板平整度(R)影响相对较小。方差分析结果与极差分析结果相吻合,验证了各因素影响排序的正确性。利用 X 射线衍射研究了较优参数组合和较差参数组合对应的内应力,所得结果与正交试验分析结果一致,真实反映了探测器芯片粘接的应力情况。根据本文分析结果,可以在芯片粘接过程中对固化条件和配胶时间两个参数的水平进行适当选择,以提高 InSb 红外探测器的性能和可靠性。

参考文献:

- [1] CHEN Boliang, SUN Weiguo, LIANG Zhiping, et al. Development and applications of staring InSb infrared focal plane array assembly[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(5):419-423. (in Chinese)
陈伯良,孙维国,梁平治等. InSb 凝视红外焦平面组件研制和应用[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(5):419-423.
- [2] L Shkedy, T Markovitz, Z Calahorra, et al. Megapixel digital InSb detector for midwave infrared imaging[J]. Optical Engineering, 2011, 50(6):1-8.
- [3] LW Stephen. New technologies for FPA dewars[J]. Proceeding of SPIE, 1992, 1683:102-112.
- [4] LI Jianlin. A reliable design of HgCdTe chips attachment[J]. Infrared Technolog, 2000, 22(1):29-32. (in Chinese)
李建林. HgCdTe 芯片粘接可靠性设计[J]. 红外技术, 2000, 22(1):29-32.
- [5] LIU Dafu, WU Ligang, XU Guosun, et al. Reliability of long wavelength PC HgCdTe IR detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3):289-293. (in Chinese)
刘大福,吴礼刚,徐国森等. 长波光导 HgCdTe 红外探测器的可靠性[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3):289-293.
- [6] GE Qiuling, WANG Yang, DING Rongzheng. Failure mode of die bonding and improved path of bonding strength[J]. Electronics & Packaging, 2009, 9(6):1-

4. (in Chinese)
葛秋玲,王洋,丁荣峥. 芯片粘接失效模式及粘接强度提高途径[J]. 电子与封装,2009,9(6):1-4.
- [7] Meng Qingduan, Tian Wei, Lü Yanqiu, et al. Analysis of structural stress in 8×8 InSb array detector[J]. Open Electrical and Electronic Engineering, 2011, 5(1): 24-28.
- [8] MENG Qingduan, LV Yanqiu, LU Zhengxiong, et al. Stress in InSb infrared focal plane array detector analyzed with ANSYS [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(6): 431-434. (in Chinese)
孟庆端,吕衍秋,鲁正雄等. InSb 红外焦平面探测器结构应力的 ANSYS 分析[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 431-434.
- [9] XIONG Xiong, ZHU Yingfeng, WANG Wei, et al. Die attach technology in HgCdTe IRFPA detector package[J]. Infrared Technology, 2012, 34(8): 444-447. (in Chinese)
熊雄,朱颖峰,王微等. HgCdTe 焦平面红外探测器封装中的芯片粘接技术[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 444-447.
- [10] XIE Jing, LI Bing, LI Yuanjie, et al. Study of ZnS thin films prepared by RF magnetron sputtering technique[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5749-5754. (in Chinese)
谢婧,黎兵,李愿杰等. 射频磁控溅射法制备 ZnS 多晶薄膜及其性质[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5749-5754.