

# GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器的 电极引接损伤研究

黄醒良 方晓明 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

袁诗鑫

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要:** 从柱形流变模型出发讨论了压焊引接电极时受压面的压强分布、压力损伤半径和深度以及超声压焊时的损伤, 并讨论了 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器的超声压焊的压力损伤和 In 球熔焊的 Au 丝力损伤。

**关键词:** 超声压焊, In 球熔焊, 损伤机理, 多量子阱, 红外探测器。

## 引言

对 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器 (简称探测器) 的制备与特性研究近年来取得了令人瞩目的进展<sup>[1]</sup>。通常是用超声压焊或 In 球熔焊工艺来引接单元和线列探测器的电极。超声压焊引接电极在 Si 工艺以及许多器件工艺中广泛使用, 但用超声压焊直接在探测器的上电极层引接电极往往会损伤探测器, 经改用 In 球熔焊引接电极后损伤现象大为减少, 这说明超声压焊对器件具有不可忽略的压力损伤。文献 [2] 详细讨论了用 Cu 丝取代 Au 或 Al 丝超声压焊 Si 片的损伤, 发现当 Cu 球的硬度  $H_V > 45 \text{ kg/mm}^2$  时 Si 的损伤几率开始随 Cu 球的硬度线性增大。而 Si 的显微硬度高达  $1200 \text{ kg/mm}^2$ <sup>[3]</sup>, 这说明损伤是平均正压强以外的机理在起重要作用。为了探讨压焊的损伤机理, 本文从柱形流变模型出发讨论了压面的压强分布、压力损伤半径和损伤深度、及超声压焊情形下的损伤, 最后讨论了探测器的超声压焊损伤和 In 球熔焊时 Au 丝的拉伸和弯曲对探测器的力损伤。

## 1 压面的压强分布

在热压焊引接电极是通过压针加压使电极流变并键合形成焊接。为了便于分析压焊过程

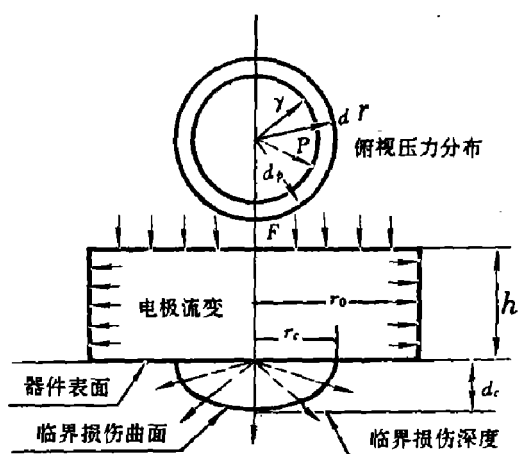


图1 柱形流变模型的压强分布示意图  
Fig. 1 Diagram of pressure distribution for the cylinder flow model

中器件受压面的压力分布, 近似把电极看作圆柱体并忽略其与上下接触面的摩擦力, 则压力的作用下圆柱变短, 半径增大. 由于电极发生压力流变, 根据材料力学可知, 压面的压强近似等于圆柱材料的抗压强度  $\sigma_p$ <sup>[4]</sup>, 柱体变短半径增大可看作是一族同心圆筒被挤大. 如取单位长度的圆筒半径和厚度分别为  $r$  和  $dr$ , 圆筒材料的抗拉强度恒为常数  $\sigma_b$ . 根据力学中的虚功原理, 可知圆筒被挤大  $dr'$  对应的内外压力差所作的功应等于圆筒被挤大的拉伸功 ( $2\pi r dP dr' = \sigma_b dr 2\pi dr'$ ), 即  $dP = \sigma_b dr/r$ . 参见图1. 对径向积分即得柱形流变模型下的压强  $P(r)$  分布为

$$P(r) = \sigma_p + \int_r^{r_0} dP = \sigma_p + \sigma_b \ln \frac{r_0}{r}, \quad (1)$$

式中  $r_0$  为圆柱半径, 第二项是因流变产生的附加压.  $r_0/r$  越大则压强  $P(r)$  越大, 这与金刚石对顶砧的压缩增压情形相似. 如认为电极材料是多晶结构, 并且其流变是由晶粒边界的滑移造成的, 则应有  $\sigma_p \approx \sigma_b$ , 并且当  $r$  小于晶粒半径  $r_g$  时, 式(1)中的附加压就不随  $r$  减小而增大 (即  $r_{\min} = r_g$ ). 对式(1)积分可得到整个压面的总压力  $F(r_0)$  为 (因  $r_g$  很小, 把  $r_g$  看作 0 对  $F(r_0)$  影响很小)

$$F(r_0) = \int_r^{r_0} P(r) dr = \frac{3}{2} \pi \sigma_p r_0^2, \quad (2)$$

即压面的平均压强是抗拉强度  $\sigma_b$  或柱边压强  $\sigma_p$  的 1.5 倍. 在柱体上加一定的压力  $F$  时, 可通过  $\sigma_b$  求得流变稳定后的柱体半径  $r_0$  和压面的压强分布  $P(r)$ .

## 2 损伤半径和损伤深度

设特定损伤机理对应的临界损伤强度为  $H_c = \alpha H$  ( $\alpha$  为临界损伤系数,  $H$  为材料的硬度值),  $\alpha = 1$  对应于压痕等形变损伤. 取  $H_c$  等于式(1)的  $P(r)$ , 可求得对应损伤机理的临界损伤半径  $r_c$  为

$$r_c = r_0 \exp \frac{\sigma_p - \alpha H}{\sigma_b} = r_0 \exp \left( 1 - \frac{\alpha H}{\sigma_b} \right). \quad (3)$$

当  $r_c > r_g$  时,  $r < r_c$  区域的压强大于材料的临界损伤压强而被损伤; 当  $r_c < r_g$  时, 整个压面的压强均小于材料的临界损伤压强而不被损伤. 通常更关心的是压力损伤深度, 按理可从边界条件和材料参量求解, 但求解较复杂, 在此仅作简单估算. 压面的压强随  $r$  变小而对数增大, 因高压区较小且在向体内传播压力时近于放射弱化, 所以可近似看作是点压源在体内传播. 点压源对应于球形等压面, 球面的曲率比圆柱面的大一倍, 因而球面的压强

减小比柱面快一倍, 所以等压面对应的临界损伤深度  $d_c$  近似为  $r_c$  的一半 (参见图 1), 即

$$d_c = \frac{r_c}{2} = \frac{1}{2} r_0 \exp\left(1 - \frac{\alpha H}{\sigma_b}\right). \quad (4)$$

### 3 超声压焊损伤

文献 [2] 用直径为  $30 \mu\text{m}$  的 Cu 丝烧成直径为  $90 \mu\text{m}$  的 Cu 球超声压焊 Si 片, 当 Cu 球的硬度  $H_V > 45 \text{ kg/mm}^2$  时, Si 片出现  $r_c \approx 2 \mu\text{m}$  的损伤坑, 根据式 (2), 有  $H_V = \bar{P}(r) = 1.5\sigma_b$ , 并可估算出 Cu 球的  $\sigma_b \approx 30 \text{ kg/mm}^2$  和压面的  $r_0 \approx 45 \mu\text{m}$ . 根据文献 [3] 的  $H_B(\text{Si}) = 1200 \text{ kg/mm}^2$  和  $H_B(\text{GaAs}) = 750 \text{ kg/mm}^2$ , 以及 Cu、Al 和 Au 的  $H_B$  和  $\sigma_b$  数据, 用式 (3) 可算出 Cu 球超声压焊的损伤系数  $\alpha = 0.103$ . 再以此  $\alpha$  值计算  $r_0 = 45 \mu\text{m}$  时 Cu、Al 和 Au 等电极对 Si 和 GaAs 的临界损伤半径值  $r_c$  (参见表 1). 计算参数为: 对 Cu 丝<sup>[2]</sup>,  $H_B = 39 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_b = 26 \text{ kg/mm}^2$ ; 对退火 Cu<sup>[3]</sup>,  $H_B = 35 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_b = 21 \sim 24 \text{ kg/mm}^2$ ; 对退火 Al<sup>[3]</sup>,  $H_B = 35 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_b = 7 \sim 11 \text{ kg/mm}^2$ ; 对退火 Au<sup>[3]</sup>,  $H_B = 28 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_b = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ .

表 1 对不同材料的损伤半径估算值  
Table 1 The calculated radius of damage for several materials

	Cu 球	Cu 丝	Cu (退火)	Al (退火)	Au (退火)
$r_c(\text{Si})(\mu\text{m})$	2	1.05	0.71	0.0016	0.013
$r_c(\text{GaAs})(\mu\text{m})$	9.3	6.3	4.9	0.11	0.40

从前述引用的计算参数可知 Cu 的  $H_B = 1.5\sigma_b$ , Al 和 Au 的  $H_B \approx 2\sigma_b$ , 与式 (2) 的结果符合很好. 随着 Cu 球、Cu 丝以及退火的 Cu 的硬度  $\sigma_b$  依次变小, Si 的临界损伤半径也变小, Al 和 Au 对 Si 的  $r_c < 0.05 \mu\text{m}$ , 这显然小于电极材料的晶粒半径  $r_c$ , 所以在 Si 工艺中用 Al 或 Au 丝压焊很少损坏器件. 由于 GaAs 的  $H_B$  较小, 因而其  $r_c$  较大, 如果采用 Si-Al 丝或退火不足的 Au 丝, 其硬度和抗拉强度以及临界损伤半径会更大.

上面计算得 Si 的超声压焊的损伤系数只有 0.103, 以此损伤系数来计算 GaAs 材料会有一些的偏差, 但因它们的晶型结构类似, 而相似结构的材料的力学性质一般也是相似的. 下面先分析超声压焊时电极的受力过程和损伤机理, 然后借助金属材料的疲劳效应来讨论 Si 的超声压焊的损伤系数较小的成因: 在超声压焊时除了垂直方向有压力外, 在水平方向还有压头的振动, 这种复杂的剪切运动会产生更高的附加压并随所加超声功率增大而增大, 使器件更容易损伤. 从流变动力学方程来求解超声压焊问题显然很难, 同时材料受周期外力作用的疲劳极限  $\sigma_{-1}$  比抗拉强度  $\sigma_b$  小得多<sup>[4]</sup> (对 Al 材料有  $\sigma_{-1} \approx 0.25\sigma_b^*$ , 对于半导体材料未能查到此类参数), 其实疲劳极限是一种久期复杂损伤过程的唯象描述. 超声压焊在较短时间内已使被压的半导体材料经历了  $10^3 \sim 10^5$  周期的力作用, 疲劳效应会使临界损伤强度大大降低, 因而损伤系数较小.

\* 上海市第二机电工业局. 材料手册 (金属材料) (内部资料), 1975

## 4 GaAs/AlGaAs 探测器的超声压焊损伤

用直径为  $55\ \mu\text{m}$  的 Si-Al 丝超声压焊引接探测器的电极, 在液氮温度下测量器件的  $I-V$  特性, 得到的负阻振荡峰常比材料周期数少得多, 有时只出现几个峰, 基本上是肖脱基型  $I-V$  特性. 当电极经低温循环或在较小的外力作用下脱落时, 在显微镜下可看到不规则的损伤坑. 用 In 球热压焊引接电极时, 如 In 球和压力都较大, 电极冷却后会脱落并有损伤坑. 经改用 In 球熔焊引接电极后, 较少出现不完整的负阻振荡, 这说明用 Si-Al 丝超声压焊直接在器件的上电极层引接电极较易部分或全部损伤超晶格结构.

超声压焊较易损伤 GaAs/AlGaAs 超晶格的原因较多, 如: GaAs 的硬度比 Si 小得多, 超晶格的多层结构会因异质键合而弱化, 层状结构在水平切应力作用下易剪伤等. 超晶格的上部只有  $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$  的  $\text{N}^+\text{-GaAs}$  和  $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$  强度不很大的 Au/AuGeNi 电极层, 因而压力较容易传到  $\text{N}^+\text{-GaAs}$  和超晶格, 并且  $\text{N}^+\text{-GaAs}$  损伤时就可能殃及同是外延生长的超晶格. 当超晶格有部分区域层错达超晶格的一个周期 (甚至远不足一个周期) 时, 就可导致器件失效, 此外还可能更有更小临界损伤系数的损伤机理, 这就解释了用超声压焊引接探测器容易损伤的现象.

## 5 Au 丝对探测器的力损伤

In 球熔焊第一电极点时几乎无压力损伤, 但在焊接第二电极点等过程中需触及 Au 丝而对 In 电极有力作用. 当 Au 丝的直径和抗拉强度分别为  $d$  和  $\sigma_b$  时, Au 丝对 In 电极的最大拉力和弯曲力矩分别为

$$F_L = \pi r^2 \sigma_b = \frac{1}{4} \pi d^2 \sigma_b, \quad (5)$$

$$M_W = W_{\text{Au}} \sigma_b = \frac{1}{32} \pi d^3 \sigma_b, \quad (6)$$

其中  $W_{\text{Au}}$  为 Au 的抗弯截面模量. 当 In 电极熔润的直径为  $D$  时, 直拉 Au 丝对 In 电极焊接面的平均拉伸强度为  $\sigma_L$ <sup>[8]</sup>. 沿法平面弯曲 Au 丝时如把 In 电极焊接面看作抗弯曲截面, 则 In 电极在圆周上的最大弯曲分离力强度为  $\sigma_R$ <sup>[6]</sup>, 即有

$$\sigma_L = \frac{F_L}{\pi R^2} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \sigma_b, \quad (7)$$

$$\sigma_R = \frac{M_W}{W_{\text{In}}} = \left(\frac{d}{D}\right)^3 \sigma_b. \quad (8)$$

当 Au 丝绕焊接面的法线弯曲时, 因相同圆截面的抗扭截面模量比抗弯截面模量大一倍<sup>[8]</sup>, 而通常材料的抗剪强度  $\tau \approx (2/3)\sigma_b^*$ , 所以 In 电极的最大抗扭力矩比抗拉力矩稍大 (约

\* 上海市第二机电工业局. 材料手册 (金属材料) (内部资料), 1975

4/3 倍), 因而可以把 In 电极沿法平面的最大抗弯曲力矩看作其临界值.

实验上对于直径为  $25\ \mu\text{m}$  的 Au 丝和 In 熔润直径约为  $100\ \mu\text{m}$  的电极, 当弯曲 Au 丝时 In 电极一般不会脱落, 从式 (8) 可算得  $\sigma_R = 2.09\ \text{MPa}$ , 此值也应接近于 In 电极的临界抗拉强度  $\sigma_M$ . 对于不同 Au 丝和 In 熔润直径的参量计算见表 2 (用  $\sigma_b = 134\ \text{MPa}$ <sup>[3]</sup> 计算), 从表 2 可知对直径为  $25\ \mu\text{m}$  的 Au 丝和  $50\ \mu\text{m}$  的 In 熔润直径, 其  $\sigma_R$  比  $\sigma_M$  大 8 倍, 稍微弯曲 Au 丝电极就脱落. 如改用直径为  $15\ \mu\text{m}$  的 Au 丝, 虽然  $\sigma_R$  比  $\sigma_M$  大  $\sim 1$  倍, 但细心操作仍可引接出电极. 实验上对直径为  $25\ \mu\text{m}$  的 Au 丝和  $150\ \mu\text{m}$  的 In 熔润直径, 电极一般不会因弯曲 Au 丝而脱落, 但过分弯曲 Au 丝是导致探测器损伤和性能降低的重要原因, 这可能是探测器的功能损伤强度比其电极脱落的力强度小得多, 所以在 In 熔焊第二电极点时应尽可能少弯曲 Au 丝以免损伤探测器.

表 2 Au 丝在直拉和弯曲时 In 球的临界抗拉强度

Table 2 The critical tensile strengths of In electrode pulled or bent by Au wire

Au 丝 直径 $\Phi_{\text{Au}}$ ( $\mu\text{m}$ )	直拉 拉力 $F_L$ (g)	弯曲 力矩 $M_W$ ( $10^{-7}\text{Nm}$ )	In 焊 临界 $\sigma_M$ (MPa)	In 熔润直径 $\Phi 150\ \mu\text{m}$		In 熔润直径 $\Phi 100\ \mu\text{m}$		In 熔润直径 $\Phi 50\ \mu\text{m}$	
				$\sigma_L$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)	$\sigma_L$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)	$\sigma_L$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)
25	6.71	2.06	2.09	3.72	0.620	8.38	2.09	33.5	16.8
15	2.42	0.44	2.09	1.34	0.134	3.02	0.45	12.1	3.62

## 6 讨论与结论

本文从柱形流变模型出发讨论了压焊时压面的压强分布、压力损伤半径和深度、及超声压焊的损伤系数等, 较好地解释了 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器的超声压焊损伤现象, 这也适用于一般的半导体器件的超声压焊的损伤分析. 此外还讨论了 In 球熔焊引接电极时 Au 丝对电极的拉伸和弯曲的力损伤及其临界抗拉强度. 超声压焊引接单元或线列探测器较方便, 只是压力损伤较大. In 球熔焊无压力损伤, 但有回熔而且焊接效率较低, 引接第二电极点时还有 Au 丝的力损伤. 如采用延伸电极和超声压焊就能取长补短, 对于面阵则常用 In 柱对接工艺来互连探测器与读出电路<sup>[1]</sup>.

实际上, 金属材料流变时产生的显微附加压强经常会出现, 如用钢球加压测量材料的硬度时, 增大压力或减小球径都会因流变 (形成压痕) 附加压的作用使硬度的测量值稍微偏大\*. 材料的加工硬化通常与材料的显微结构、晶界的滑移和位错的相互作用等相关, 因而可用位错理论等方法加以描述<sup>[5]</sup>. 材料晶粒细化后往往可大大提高其力学性能, 这似乎也材料的晶粒大小和流变过程相关联. 所以, 材料的微观流变和所形成的附加压可能还是材料的重要微观力学过程之一.

致谢: 本所一室 MBE 小组、六室梁平治和季菊苹、十室李言谨等同志在实验中给予了大力支持, 此外还得到中国科学院表面物理实验室周小川先夫的有益指导, 作者在此表示衷

\* 国营 772 厂. 电真空用金属材料手册 (内部资料), 1973

心的感谢.

### 参考文献

- 1 Leater J *et al.* *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991;ED-11(5):124
- 2 Onuki J, Koizumi M, Suzuki H. *J. Appl. Phys.*, 1990;68(11):5610-5613
- 3 黄运添, 郑德修编. 电子材料与工艺学, 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- 4 何肇基主编. 金属的力学性质, 北京: 冶金工业出版社, 1982
- 5 哈宽富编著. 金属力学性质的微观理论, 北京: 科学出版社, 1982
- 6 范钦珊, 朱祖成译. 材料力学手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 1981

## STUDY OF ELECTRODE BONDING DAMAGE OF GaAs/AlGaAs MULTIPLE QUANTUM WELL INFRARED DETECTOR

HUANG XINGLIANG, FANG XIAOMING, SHEN XUECHU

(*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

YUAN SHIXIN

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Shanghai 200083, China*)

**Abstract:** The pressure distribution, pressure damage radius and the depth in bonding, and the damage in ultrasonic bonding are discussed with the cylinder flow model. Besides, the ultrasonic bonding damage mechanism and the force damage of Au wire in indium ball melt-bonding technique of GaAs/AlGaAs multiple quantum well detector are also discussed in this article.

**Key words:** ultrasonic bonding, indium ball melt-bonding, damage mechanism, multiple quantum well, infrared detector.