

# 硅与玻璃静电封接机理的研究

冯景星

(福州大学电子科学与应用物理系 福州 350002)

**摘要** 本文利用板壳理论,分析在硅与玻璃静电封接时,硅与玻璃界面间的静电力与硅片弯曲应力的关系;推导出封接成功的条件,即界面间距  $d$  与电压  $V$ ,刚度  $D$ ,挠度  $\omega$  等的关系,并进行了实验验证。

**关键词** 静电封接,静电力,板壳理论,硅,玻璃

## 1 引言

在研究真空微电子学、冷阴极材料以及 CY 系列第三代扩散硅压力传感器中,实践证明必须采用硅与玻璃的静电封接技术。这是由于它不需要其它任何粘合剂,是在真空中将硅与玻璃封接,键合后形成硅与玻璃的组合体是一种刚性结构。其特点是键合牢固、气密性好,不产生蠕变,能耐高温,耐潮湿,而且是在真空中进行键合,特别适合于真空微电子学的研究。

## 2 理论

当 N 型硅与玻璃相接触时,从宏观上观察硅与玻璃的界面似乎实现了面接触,但是从微观上观察,其界面是由接触部分和未接触部分的间隙组成,如图 1 所示。图中  $t$  为硅片的厚度、 $d$  为硅片与玻璃间隙的距离,  $a$  为间隙半径,  $R$  为距离间隙中心的距离,  $V$  为外加高电压。

在静电封接时,需要在硅与玻璃之间加上直流高电压,其中 N 型硅接电源的正极,玻璃接电源的负极。现在我们来分析外加高电压在这两部分的作用情况。

硅与玻璃接触部分的界面,在外加电压的作用下,由于玻璃中的可动离子(如  $\text{Na}^+$ )的迁移,在硅与玻璃界面的玻璃一侧的表面形成负的空间电荷层。由探针法和电容法测量表明,  $\text{Na}^+$  漂移后空间电荷层的厚度约为几个微米。因此在稳态时,电压在玻璃内的分布是不均匀的。由于在外加高电压作用下,玻璃中偶极子产生极化取向,故 N 型硅和玻璃均能导电,外加高电压绝大部分降落在上述几个微米的负空间电荷层上,相应地电场强度极高,并且将电能转变为热能,使硅与玻璃键合在一起。

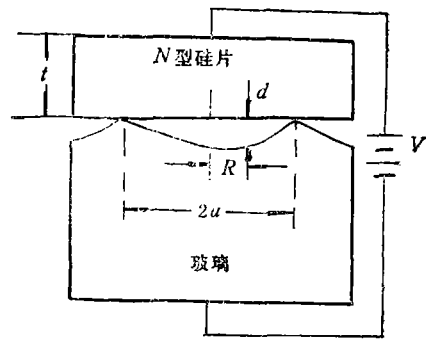


图 1 玻璃与硅片接触界面的示意图

1994-05-31 收到,1994-10-24 定稿

冯景星 男,1938 年生,副教授,现从事传感器教学和研究工作。

另一方面在硅片与玻璃未接触部分的情况,在外加高电压  $V$  作用下,同样玻璃也发生极化取向,  $N$  型硅和玻璃均能导电,这时电压主要降落在硅片与玻璃的间隙上。参看图 1,如果间隙中的电场强度为  $E$ ,间隙的距离为  $d$ ,则静电力  $F$  为

$$F = \epsilon_0 E^2 / 2 = \epsilon_0 [(V - V_{\text{反}}) / d]^2 / 2 \approx (1/2) \epsilon_0 V^2 / d^2. \quad (1)$$

设玻璃与硅片未接触的边界近似为圆形,其半径为  $a$ ,静电封接时所用的硅片厚度为  $300 \mu\text{m}$ ,而玻璃厚度为  $4 \text{mm}$ 。由于硅片厚度小于玻璃厚度,所以要想封接牢固,硅片在静电力的作用下必须弯曲到与玻璃相接触。而硅片弯曲挠度  $\omega$  与所需压力  $p$  之间的关系,可以由圆形薄板弯曲小挠度理论求得。

由于硅片与玻璃周边接触成圆形,故采用极坐标求解较方便。在极坐标系中的拉普拉斯算子为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (2)$$

由板壳理论可知,硅片弯曲小挠度的偏微分方程为

$$\nabla^2 \nabla^2 \omega = \frac{p}{D}, \quad (3)$$

即

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \omega = \frac{p}{D}, \quad (4)$$

$$D = \epsilon t / [12(1 - \nu^2)], \quad (5)$$

式中  $D$  为硅片弯曲刚度,  $\epsilon$  为杨氏模量,  $t$  为硅片厚度,  $\nu$  为泊松比。

若压力  $p$  绕  $z$  轴为对称分布时,则弯曲变形也绕  $z$  轴对称。这时挠度  $\omega$  与  $\theta$  无关,则圆形薄板弯曲的微分方程(3),(4)式可简化为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{p}{D}. \quad (6)$$

对(6)式积分四次可解得

$$r \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \right] = \frac{pr^2}{2D} + C_1, \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) = \frac{pr^2}{4D} + C_1 \ln r + C_2, \quad (8)$$

$$r \frac{d\omega}{dr} = \frac{pr^4}{16D} + C_1 \left[ r^2 \left( \frac{\ln r}{2} - \frac{1}{4} \right) \right] + \frac{C_2 r^2}{2} + C_3, \quad (9)$$

$$\omega = \frac{pr^4}{64D} + \frac{C_1 r^2}{4} (\ln r - 1) + \frac{C_2 r^2}{4} + C_3 \ln r + C_4, \quad (10)$$

式中积分常数  $C_1, C_2, C_3$  和  $C_4$  可由边界条件确定。

由图 1 可知,硅片载荷在距离间隙中心  $R$  成对称分布。在对称载荷作用下,横剪力在极坐标下为

$$Q_{r\theta} = -D \frac{d}{dr} \left( \frac{d^2 \omega}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) = -D \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \right]. \quad (11)$$

将(7)式代入(11)式得

$$Q_{rz} = -D \left( \frac{pr}{2D} + \frac{C_1}{r} \right) \quad (12)$$

由(12)式可见, 当  $r = 0$  时,  $Q_{rz} \rightarrow \infty$ , 根据硅片与玻璃在外加高电压下进行静电封接时, 在间隙硅片中心的物理条件, 可以断定这是不可能的, 故必须使  $C_1 = 0$ .

由(10)式可知, 在  $r = 0$  时,  $\ln r \rightarrow \infty, \omega \rightarrow \infty$ . 实际上在硅片与玻璃间隙中心挠度  $\omega$  是一个非常小的数值,  $\omega$  不可能趋于无穷大, 故  $C_3 = 0$

将  $C_1 = 0, C_3 = 0$  代入(10)式得

$$\omega = \frac{pr^4}{64D} + C_2 \frac{r^2}{4} + C_4. \quad (13)$$

由固支边条件可知

$$r = a, \omega = 0; \quad r = a \quad \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0 \quad \text{可求得}$$

$$C_2 = -\frac{pa^2}{8D}; \quad C_4 = \frac{pa^4}{64D}.$$

将  $C_2, C_4$  代入(13)式可得

$$\omega = \frac{pr^4}{64D} - \frac{pa^2r^2}{32D} + \frac{pa^4}{64D} = \frac{p}{64D} (r^4 - 2a^2r^2 + a^4) = \frac{p}{64D} (a^2 - r^2)^2. \quad (14)$$

$$r = 0 \text{ 时, } \omega_{\max} = \frac{pa^4}{64D}, \quad (15)$$

$$p = \frac{64D\omega_{\max}}{a^4}, \quad (16)$$

即在硅片与玻璃间隙中心挠度最大, 这时压力  $p$  也是最大. 所以要使硅片与玻璃封接牢固, 静电力必须大于硅片弯曲所需的压力即  $F > p$ .

$$F = \epsilon_0 E^2 / 2 = \epsilon_0 V^2 / (2d^2) > 64D\omega_{\max} / a^4, \quad (17)$$

$$d < [\epsilon_0 a^4 V^2 / (128D\omega_{\max})]^{1/2}. \quad (18)$$

### 3 实验

在实验时, 硅与玻璃的静电封接装置和方法可参阅文献[2,3]. 静电封接时, 所选用的玻璃热膨胀系数应与硅相近. 这样当外界环境温度改变时, 玻璃与硅的交界面封接处,

表1 实验数据

次序	条件 数据	真空度 Pa	直流电压 V	玻璃光洁度 ▽	温度 ℃	时间 min	结果
1		$2.53 \times 10^{-2}$	1600	▽ <sub>13</sub>	420	20	封接牢固
2		$2.53 \times 10^{-2}$	1400	▽ <sub>13</sub>	420	20	封接牢固
3		$2.53 \times 10^{-2}$	1300	▽ <sub>13</sub>	420	20	封接牢固
4		$2.53 \times 10^{-2}$	1200	▽ <sub>13</sub>	420	20	封接牢固
5		$2.53 \times 10^{-2}$	900	▽ <sub>13</sub>	420	20	不能封接
6		$2.53 \times 10^{-2}$	1600	△ <sub>11</sub>	420	20	不能封接

不致裂开,影响器件性能.如选用 DW-211 电真空玻璃,九五料玻璃,硼硅玻璃(pyrex);而玻璃的光洁度在  $\nabla_{13}$  以上均能获得好的封接效果.封接时衬底温度一般应控制在  $420^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ ,不能超过玻璃的软化点和铝硅的共熔点;直流高电压一般控制在  $1200\sim 1600\text{V}$ ,如果直流电压太高,在镀膜机窗口可观察到火花放电.这是由于电压太高时发生击穿现象,在击穿点附近硅片表面有白雾斑点,硅片背面会被打成小凹坑.其实验数据如表 1 所示.

#### 4 结论

(1) 在硅与玻璃封接过程中,静电力的作用使硅与玻璃间隙  $d$  减小,由(1)式可知  $d$  减小会使静电力  $F$  增大;另一方面  $d$  的减小意味着硅片挠度增大,所以要想封接成功,静电力始终要大于硅片弯曲所需要的压力.

(2) 由(18)式可知,成功的封接要求  $d < [\varepsilon a^4 V^2 / (128 D \omega_{\max})]^{1/2}$ .由此可见,外加电压  $V$  越高,硅片弯曲刚度  $D$  越小(即硅片厚度  $t$  越薄),间隙半径  $a$  越大,硅片弯曲挠度  $\omega_{\max}$  越小和玻璃的光洁度越高,上式越易满足,容易实现成功的封接,这已为实验所证实.表 1 中实验数据说明,在同样条件下,外加电压越高,成功的封接越易实现.外加电压低到某一程度后,就不能得到牢固封接.同时实验还表明,在真空静电封接时,要想得到牢固封接,除了严格按工艺操作外,其关键是对玻璃表面进行抛光,表面光洁度应在  $\nabla_{11}$  以上;如果玻璃光洁度在  $\nabla_{13}$  以下,在同样条件下进行实验,玻璃与硅总是焊不上.

#### 参 考 文 献

- [1] Barth W. Sensors and System, 1982, 1(1):22—23.
- [2] 冯景星. 半导体敏感器件,1987,9(1): 34—36.
- [3] 冯景星. 扩散硅压力传感器中的几项新技术. STC89 首届全国敏感元件与传感器学术会议论文集,北京: 1989,11,194—197.

## THE STUDY ON SILICON AND GLASS ELECTROSTATIC BONDING MECHANISM

Feng Jingxing

(Department of Electronic Science and Applied Physics, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

**Abstract** The theory of plate and shell is used to analyze the problem of electrostatic bonding of glass with silicon plate. This problem is to find out the relation between the bending stress of silicon plate and the electrostatic force of interface. The conditions of successful bonding are found. A formula among the distance  $d$  between the two surfaces and the rigidity  $D$ , the bending deflection  $\omega$  and the voltage  $V$  is derived, and a series of experiments to verify it is performed.

**Key words** Electrostatic bonding, Electrostatic force, Theory of plate and shell, Silicon, Glass