

时可以引出最多的热中子，其镭比也较大。样品辐照位置最好在离井底 1cm 处。

3. 为了用热中子计测量小样品水分^[1,2]、检测样品内特殊元素含量及探伤等工作，井高 L 应该小一些（例如选 $L = 5\text{cm}$ ），井孔也不宜过大，使井口中子计数率和镭比都大一些。

4. 作为热中子透射计的热中子源，可以采

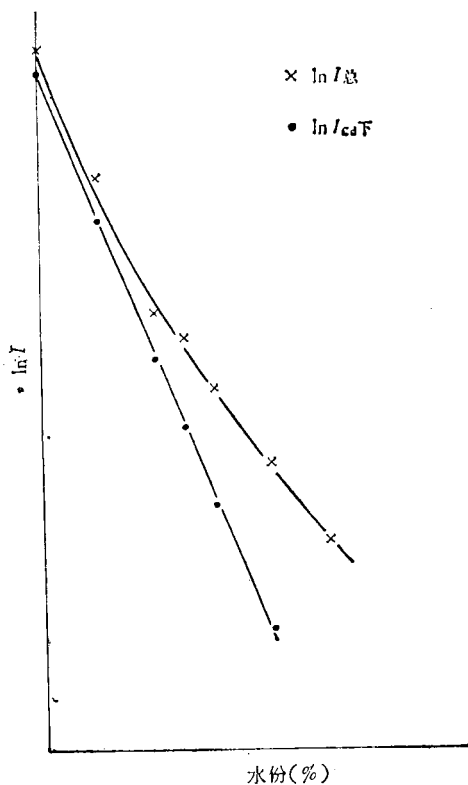


图 11 热中子透射法测小样品水分
中子计数率与样品水分的关系

用无井 ($L = 0$) 慢化体。这种装置比较简单。中子源上面的石蜡板不宜太厚， $d = 5\text{cm}$ 附近镭比较好。但是这种装置的缺点是镭比较小。对此，建议采用镭差法进行测量（即先用不包镭的探头测量计数率，后用包镭探头测镭上中子，两者之差就是镭下中子计数率）。这种测量还可消除本底的影响。图 11 表示用热中子透射法测某样品水分时，中子总计数率、镭下中子计数率与水分的关系。由图可见镭下中子计数率与水分的关系与理论预期更接近。

5. Cox 等曾提出在石蜡柱中的中子源下面放置钢板，可以增加引出的热中子通量。后来 M. Pracy 等反复对这个问题进行了实验研究，否定了 Cox 的结论。我们也进行了类似的实验测量，结论和 M. Pracy 的一样。所以，为了轻便起见，慢化体内不必再加反射体铁。

参 考 文 献

- [1] G. A. Fink, *Phys. Rev.*, **50**(1936), 738.
- [2] C. C. Jonker and J. Block, *Physica*, **15**(1949), 1032.
- [3] A. G. Cox, P. E. Francois and R. P. Gatrell, *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes*, **19**(1968), 541.
- [4] A. J. Cox and P. E. Francois, *Nucl. Instr. and Meth.*, **92**(1971), 589.
- [5] M. Pracy et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **135**(1976), 217.
- [6] P. L. Flgaard and V. Haahr, *Nucl. Eng. Design.*, **5**(1967), 311.
- [7] M. J. Zuber, *Radiostope Instruments in Industry and Geophysics (Proc. Symp. Warsaw, 1965)*, **2**, IAEA Vienna (1966), 383.

介 电 特 性 的 应 用

——静电封接

谢伯兴 何为成 应国民 尹文

(中国科学院昆明物理研究所)

一、前 言

静电封接是在外加电场下进行的封接，故

物理

又叫场助封接。它有快速、简便、牢固、清洁等优点。根据静电封接的基本原理，它可以对半导体(或金属)-玻璃(或其它绝缘体)实行封接。除了平面封接外，只要设计不同的电极形状，也

可以对不规则几何形状的部件实行封接。静电封接最早由 G. Walls 和 D. I. Pomerantz 采用。1968 年, 后者申请此法为专利^[1]。由于静电封接不需要任何其他辅助粘合剂, 无污染问题, 因此, 非常适用于清洁程度要求高的地方, 例如半导体成像器件, 电真空成像器件中靶面与玻璃的密封等。本文作者曾对硅片与玻璃的静电封接进行了试验。结果表明, 这种封接法快速、牢固、很有实用价值。

二、基本原理

静电封接的核心问题是固体介质在外加电场作用下, 表面发生了极化。如图 1 所示, 在半导体(或金属)一端加正电压, 玻璃(或其他固体介质)一端加负电压, 此时由于外加垂直电场的作用, 在玻璃表面很薄一层的区域内, 正负离子发生相对位移而产生极化。靠阳极附近玻璃中可动的正离子移向阴极, 并在迁移过程中不断地被负离子复合而消失。因此, 造成在与半导体接触的玻璃界面上留下不可动的负电荷空位而带负电。若外加直流电压足够高, 则可以使离玻璃界面一定深度的薄层区内的正离子全部迁移出去(耗尽), 而只留下不可动的负电荷, 这就形成了空间电荷区, 也叫极化区, 其电荷密度为 Q 。这个极化区的宽度与外加电压即电场强度 E 有关。这样, 带负束缚电荷的玻璃表面与带

正电性的半导体表面将产生静电引力 F 。这个静电力就是静电封接的物理基础。由于静电封接是在外加电压和加热的条件下完成的, 因此, 从玻璃中极化区迁移出去的少数能到达阴极附近的正离子, 在一旦去掉外加电场和停止加热时, 再也无法“返回”, 造成不可逆的永久极化, 这就是静电封接牢固密合的原因。根据这个作用原理, 首先要求被封接的两个面很光洁, 能达到“光学胶合”的水平。否则, 过大的缝隙将使静电力大为减弱, 封接不牢。其次, 要求玻璃有一定的离子导电能力。封接时, 为了缩短玻璃中极化区的正离子通过非极化区到达阴极附近的时间, 需要加热。加热能使玻璃界面上的空间电荷区迅速地建立起来, 封接即完成。例如, 相同的外加电压, 180°C 下封接需要几个小时, 而 550°C 时封接几乎瞬间完成。

为了说明玻璃表面空间电荷区建立时玻璃两端极间电压分布的变化情况, 我们用图 2 来表示, 图中 x 为极间距, V 为玻璃两端极间的电压。最初, 极间电压是均匀分布的, 但是在空间电荷区形成后, 电压分布就很不均匀了。此时, 外加电压的极大部份降落在空间电荷区, 如图 2(b) 所示。在远离空间电荷区, 靠近阴极附近区域的电压分布就相对地小得多了。这样, 使电场集中在很小的区域内。例如, 300°C , 800V 时, 空间电荷区的场强可以高达 $3 \times 10^6\text{V/cm}$ 。

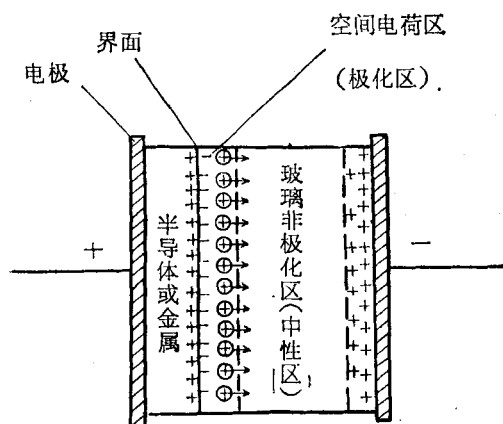


图 1 外加直流电压下半导体-玻璃界面电荷分布

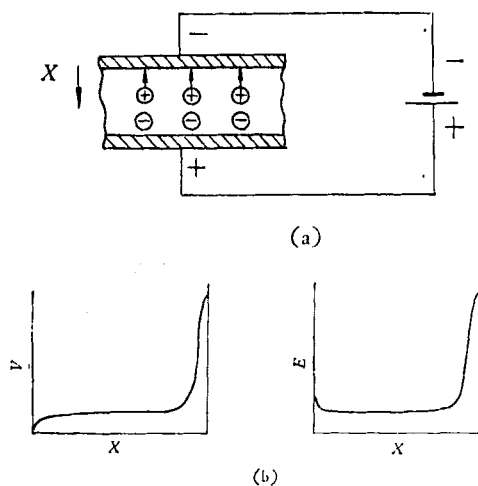


图 2 玻璃两端极间电压的分布

三、封接步骤

静电封接的装置如图 3 所示。它由直流高压电源、烘箱、电极夹具、温度计、微安表等组成。选择合适的电压、温度和时间进行封接。封接硅片和硼硅玻璃时，温度以 250—320℃，电压以 500—600 V 较合适。当温度达到 100℃ 时，开始逐渐施加高压。在温度、电压达到上述值时，维持恒温、恒压约 10—30 分钟，封接即完

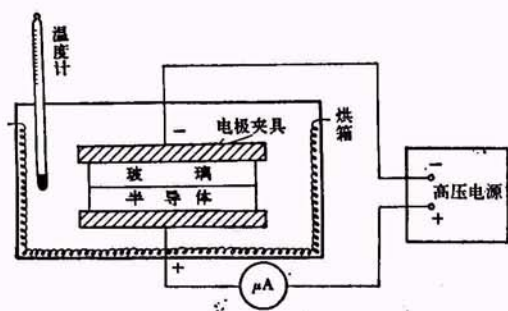


图 3 静电封接装置

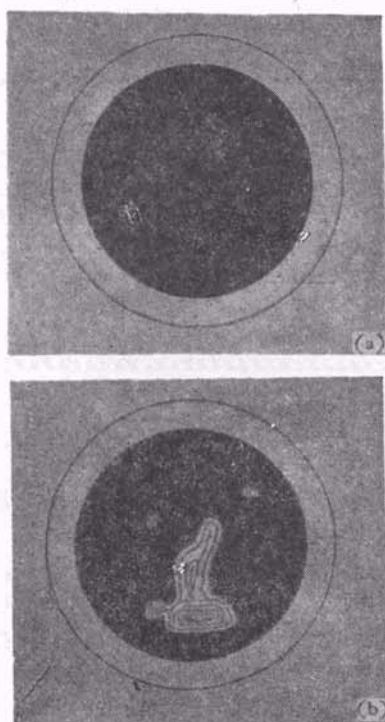


图 4 静电封接的硅-玻璃样品的照片

(a) 封接良好(无斑点),内圆是硅片,外圆是玻璃;
(b) 封接较差(有干涉环)

成。然后关闭电源,任其在烘箱内冷却后取出。在静电封接的过程中,可以从微安表上明显地看到反映玻璃中的离子流变化的过程。起先,微安表指示很小,当正离子发生迁移并出现静电引力时,微安表的指示迅速变大。静电封接后的硅片与玻璃的界面略呈浅灰色。图 4 是两个封接样品的照片。其中一个因局部点上光洁度不够,封接后仍不能完全密合,故有光线干涉条纹。

四、影响静电封接的因素

静电封接与下列因素有关:

1. 外加电压的高低

外加电压的高低,直接影响到介质内的场强大小。电压过高,造成击穿,损坏封接的表面;电压过低,使极化作用不充分,封接不牢。理论上可近似认为静电封接力与界面上电压的平方成正比。电压一般都取在 800 V 以下。

2. 缝隙的宽度

设玻璃与硅片之间的缝隙用 x 表示,图 5 是封接前放大的截面图。假如我们把略有缝隙的硅与玻璃界面近似地看成具有空气间隙的平板电容器,那末从理论上和实验上都可以得出下列关系:

$$V_{\text{缝隙}} = V_{\text{外加}} - V_{\text{极化区}},$$

$$E_{\text{缝隙}} = \frac{V_{\text{缝隙}}}{x},$$

$$F_{\text{缝隙}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\text{缝隙}}^2,$$

式中 ϵ_0 是空气的介电常数, V 是电压。从上式可以看出, x 值增大,缝隙中的场强 $E_{\text{缝隙}}$ 和单位面积的静电力 $F_{\text{缝隙}}$ 显著减小。有的作者^[2]认

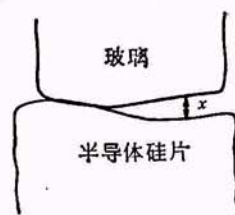


图 5 封接前硅-玻璃片的截面图

为使封接良好，界面上的缝隙必须小于 $5.08 \times 10^{-6} \text{cm}$ 。

3. 玻璃中离子的浓度及其分布

适合于静电封接的玻璃要求有一定的离子浓度，并且其分布应均匀。这种玻璃可以认为是由可动的正离子和不可动的负离子互相补偿组成。国产的硼硅玻璃、铝硅玻璃、钠钙玻璃、碱钾玻璃、光纤面板玻璃和致密的陶瓷都可以与半导体(或金属)进行静电封接。

4. 电极处是否发生离子注入

在外加强电场和加热的情况下，要避免从电极上引进任何可动正离子。也就是要防止电极处的金属离子注入玻璃，或玻璃中的负离子逸出到电极上去。因此，从这一点上讲，也要求电压不要加得太高。为了使电场分布均匀，电极的形式最好不要采用针状，以免发生离子注入或击穿而使封接失败。

5. 玻璃是否存在表面电荷

静电封接的玻璃不应含有电子导电的材料，其表面亦不应吸附或存在有表面电荷。因为前者会使玻璃的极化区难以建立，后者会由

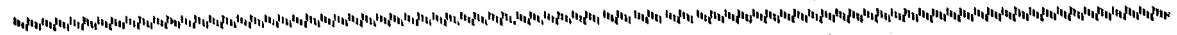
于表面电荷的屏蔽作用而使缝隙中的场强减小。

五、小 结

静电封接后的界面，其密合处除了静电作用力以外，可能还存在某种熔合作用。因此，封接非常牢固，甚至用机械力也难分开。待封的玻璃部件要求内部没有张应力。静电封接也可以在保护气氛中进行。因此对易氧化的金属如可伐合金、钽、钛、镍铬合金等也能与玻璃封接。硅、锗、砷化镓等半导体都能与玻璃满意地封接。厚度小于 2mm 的铝片也可与大多数玻璃相封接。至于玻璃片的厚度，只要在 $5.08 \times 10^{-3} - 2.54 \text{cm}$ 的范围内，似乎对封接无多大影响。但目前对静电封接力作定量测定尚较困难。

参 考 文 献

- [1] D. I. Pomerantz, USP, 3397278, (1968).
- [2] G. Walls and D. I. Pomerantz, *J. Appl. Phys.*, **40** (1969), 3946.



(上接第 118 页)

- [6] N. W. Carlson, F. V. Kowalski, R. E. Teets, and A. L. Schawlow, *Opt. Commun.*, **29**(1979), 302.
- [7] J. E. Lawler, A. I. Ferguson, J. E. M. Goldsmith, D. J. Jackson, and A. L. Schawlow, *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 1046.
- [8] T. W. Hansch, D. R. Lyons, A. L. Schawlow, A. Siegel, Z. Y. Wang, and G. Y. Yan, *Opt. Commun.*, **37**(1981), 87; **38**(1981), 47.
- [9] F. V. Kowalski, R. T. Hawkins, and A. L. Schawlow, *J. Opt. Soc. Am.*, **66**(1976), 965.
- [10] T. W. Hansch, A. L. Schawlow, *Opt. Commun.*, **13**(1975), 68.

(上接第 127 页)

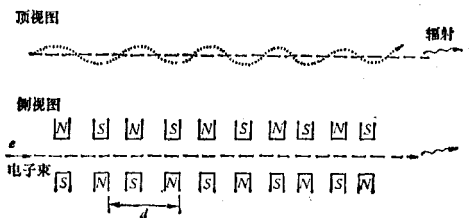


图 5

(a) 指出在轨道的哪些部分产生前向的电磁辐射。

射。

(b) 利用相继各段上的前向辐射一定干涉加强的条件来求出波长 λ 。

(c) 如果波动器由长度为 d 的 N 段组成，对一束单能电子所产生的辐射，求其频谱宽度 $\Delta\lambda/\lambda$ 。

(d) 试将整个波动器和单一段中所产生的前向辐射的强度进行比较。

(e) 如果电子速度与光速相差 $1/10^6$ ，计算 $d = 10 \text{cm}$ 的波动器所产生的辐射的波长。

(李因译)