

## 第一章 四點探針 電阻量測

Ref: 清華大學網站

電阻量測是電子材料檢測中最基本也是最重要的一種。從量到的電阻，我們可以進而推知材料的電阻係數。假如該材料為一已知電阻係數的均勻薄膜，其厚度還可從量得的電阻推知。假如該薄膜材料進而被做成一條等寬的電子電路，我們還可從電阻量測推知該電路的寬度。在電子工業中所使用的電子材料，從電阻係數、薄膜厚度、到電路寬度都是製程參數的函數如鍍膜真空度、溫度、速率等。因此，透過電阻量測往往可以檢測出這些參數在材料與電路製作過程中是否穩定。而製程參數穩定度是影響一電子工廠之產品良率的重要關鍵因素之一。

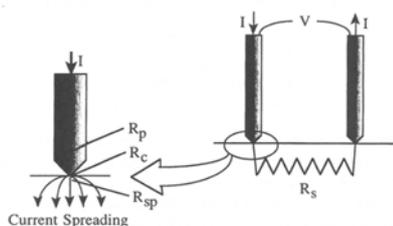
電阻量測最常見的方法就是用一個三用電表的兩根探針點在被測物件的兩端，然後從電表上就可讀到電阻。這是我們最常用來量一個電阻元件的電阻以及判別一條電路是短路抑或斷路的方法。這種方法，一般稱為兩點探針量測，雖然是最簡便但卻很難用在電子材料的電性檢測上，因為材料的電阻係數很難從兩點探針量得的電阻推知。這主要是因兩點探針量測中，電流的提供與電壓的量測共用同一根探針所引起的。因此我們若改用四根探針，用其中兩根提供電流通路而用另兩根來量電壓，就可以解決這個問題。這種方法，我們稱為四點探針量測。

雖然四點探針比兩點探針量測來得好，但正確的電阻量測卻和量測設備、試片結構、試片大小、乃至所使用的量測條件都有關係。本實驗單元的目的即是想讓大家藉由實際量測，來培養正確的量測觀念與技術。整個單元分成兩週進行，所包含的實驗內容如下：

- 一、量測設備講解及量測操作示範
- 二、標準電阻量測
- 三、金屬薄膜之片電阻量測
- 四、半導體晶片之電阻係數量測
- 五、半導體擴散層之片電阻量測

本章共分為四節，第一節介紹四點量測的原理以及影響電阻量測的幾種因素，第二節則是量測設備與操作簡介，第三節是實驗項目介紹，最後一節則是實驗結果與討論要求。

## 1-1 四點探針量測



圖一 Two-point probe arrangement showing the probe resistance  $R_p$ , the contact resistance  $R_c$ , the spreading resistance  $R_{sp}$ , and the semiconductor resistance  $R_s$ .

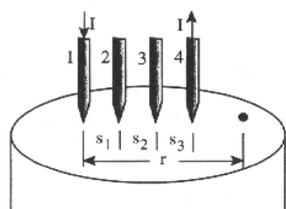
四點探針在半導體電阻率的量測上是相當常見的技術，它並不需要用標準試片做參考校正，而且它也常提供其它量測方法做

標準。兩點探針是較簡單的工具，因只需要操作兩個探針，但量測數據的分析卻有困難，如以下之圖一所示，每支探針要通電流，並且也要量電壓，則在這兩探針之間的總電阻  $R_T$  為：

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_p + 2R_c + 2R_{sp} + R_s$$

其中， $R_p$  是探針電阻； $R_c$  為探針/半導體接面的接觸電阻； $R_{sp}$  試探針下方的 spreading resistance ； $R_s$  是半導體的電阻。在此假定兩個接觸點的  $R_c$  與  $R_{sp}$  是相同的，而  $R_{sp}$  是可由通電流所測得的，因為對於一般的四點探針  $R_{sp} \gg R_s$ 。 $R_p$  可在使兩探針短路情況下量得，但  $R_c$  與  $R_{sp}$  無法單獨量得，所以無法由  $R_T$  中正確地得出  $\rho$  值。

為解決以上的難題可使用四點探針，由兩探針加電流再用另兩探針來量測電壓。這類的四點探針量測技術有時也稱為 kelvin techniques。在四點探針量測中，量測電壓的探針實際上還是有微量電流通過所以還是存在由  $R_c$ 、 $R_p$ 、與  $R_{sp}$  寄生電阻所產生的壓降。但由於通過電壓探針的電流通常比試片中的實際電流來得小很多，因此這寄生壓降一般是可以忽略不計的。



圖二 A collinear four-point probe.

四點探針量測最早是在 1954 年被 Valdes 應用於半導體晶片之電阻率的量測上。探針

通常是 collinear 的形式，也就是說各探針以等間距排列在一直線上，如圖 2 所

示。推導四點探針電阻率，考慮電流  $I$  由探針 1 進入，由探針 4 出，如圖二所

示，電位  $V$  與通一電流  $I$  於電阻率  $\rho$  的材料與電極距離  $r$  的關係式為

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

在圖 2，探針加在半無限 semi-infinite 試片的中央，則其電壓相對於零參考電位為  $V_o$ 。

$$V_o = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_4} \right)$$

$r_1, r_4$  分別為與探針 1, 4 的距離，負號是指電流離開探針，如圖 2 所示探針間

距為  $S_1, S_2, S_3$  則在探針 2 的電位為  $V_2$ ：

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right)$$

在探針 3 的電位為  $V_3$ ：

$$V_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_3} \right)$$

總測得電位  $V = V_2 - V_3$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right)$$

則半導體的電阻率  $\rho$  為

$$\rho = \frac{2\pi V / I}{\frac{1}{S_1} - \frac{1}{(S_1 + S_2)} - \frac{1}{(S_1 + S_2)} + \frac{1}{S_3}}$$

通常以 ohm-cm 表示其單位，對於一般的四點探針而言，探針間距是相等的，

即  $S=S_1=S_2=S_3$ ，所以

$$\rho = 2\pi S \left( \frac{V}{I} \right)$$

根據上式，我們只要知道探針間距、施以固定電流，就可從電壓讀數得到試片的電阻率。

量測理論雖然簡單，但量測的結果有時會和試片的實際電阻係數有很大的出入。影響量測結果的原因主要有二。第一是我們高估了量測設備的能耐。一般的量測儀器都有其可靠的功率輸出與準確的檢測範圍，在這個範圍以外進行量測，其誤差就變大甚而給予錯誤的結果。假如，整套量測系統是由多種儀器組成，那量測更應是要確保在每一組成儀器的可靠範圍之內進行才有可能得到正確的結果。另一是我們將試片理想化了，而且在不知不覺間假設試片的特性不會隨量測條件而變，可是實際的情況往往不是這樣。舉例而言，假設試片具有高電阻係數但表面因沾有雜質而有相當的漏電可能。如此，假如你的量測讓很大一部分的探針電流都是經由表面漏電途徑而不流過試片內部；那從上面的公式的推導過程，我們就很清楚可看出，如此的量測的結果當然不會正確了。其次，假設你的試片的電阻係數對溫度或光照敏感，那麼量測時若不注意焦耳加熱效應或加以遮光的話，其結果當然也不會正確。

上面的公式是假設試片為一半無限大試片。設若試片在側向或縱向並非 semi-infinite，那上面的公式還必須乘一修正因子 F 修正來自試片形狀的限制：

$$\rho = 2\pi s F \left( \frac{V}{I} \right)$$

F 通常是數個獨立參數的乘積，如試片厚度、大小、溫度、探針相對於試片邊界的位置等。修正參數 F 在 Collinear 探針排列是以三個獨立的參數相乘的乘積： $F=F_1F_2F_3$ ；其中  $F_1$  為試片的厚度修正參數， $F_2$  為試片側向修正參數， $F_3$  為探針相對於試片邊界的距離修正參數。他們的數學表示式分別如下：

$$F_{11} = \frac{t/s}{2 \ln \{ [\sinh(t/s)] / [\sinh(t/2s)] \}}$$

$$F_2 = \frac{\ln(2)}{\ln(2) + \ln \{ [(D/s)^2 + 3] / [(D/s)^2 - 3] \}}$$

$$F_{31} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1+(2d/s)} - \frac{1}{2+(2d/s)} - \frac{1}{4+(2d/s)} + \frac{1}{5+(2d/s)}}$$

$$F_{32} = \frac{1}{1 + \frac{2}{[1+(2d/s)^2]^{1/2}} - \frac{1}{[1+(d/s)^2]^{1/2}}}$$

上面各式中， $t$  為試片的厚度， $D$  為試片的邊長或直徑， $d$  為最近一根探針與試片邊界的距離。圖 3-5 則為上面各修正因子的圖示結果。其中比較有趣，而且較常碰到的是當試片是一薄膜而且厚度遠小於探針間距的情況。從上面式子，當試片厚度  $t \leq s/2$  時， $F_1$  可以簡化成

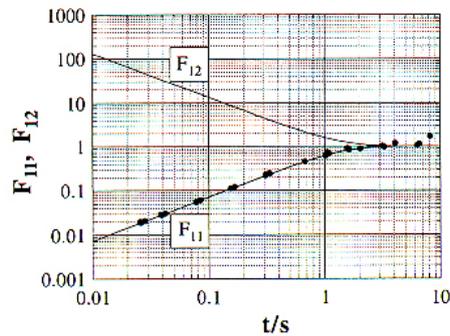
$$F_1 = \frac{t/2}{2\lambda n 2}$$

將之代入電阻表示式，同時假設其他兩個修正因子都可假設為一時，

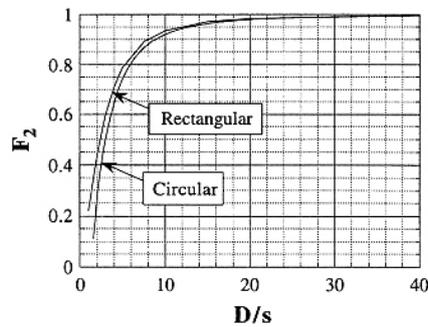
$$\rho = \frac{\pi t}{\lambda n 2} \frac{V}{I} = 4.532t \frac{V}{I}$$

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\lambda n 2} \frac{V}{I} = 4.532 \frac{V}{I}$$

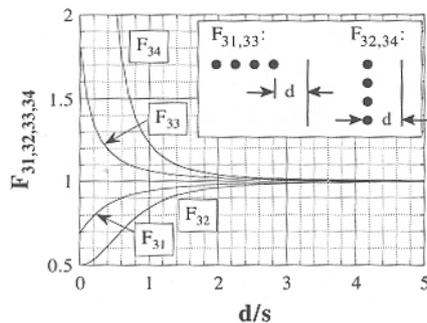
$\rho_s$  一般稱為片電阻 (sheet resistance)。對大部分金屬鍍膜，其電阻係數通常變化不大，因此片電阻值其實就代表它的膜厚。反過來說，固定薄膜厚度，我們也可藉由片電阻來判斷不同薄膜製程條件對電阻係數的影響。片電阻量測也常用來檢測整片半導體晶片上的擴散層或離子佈植層的均勻性，如圖 6 所示。



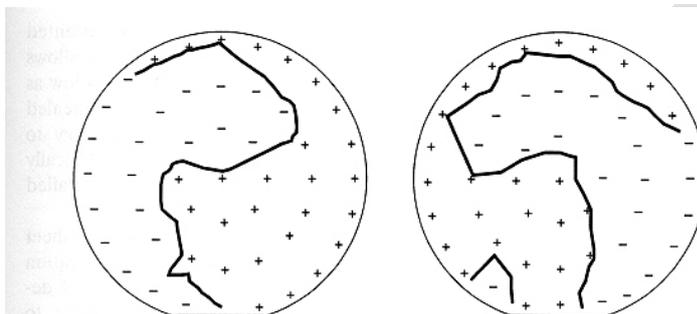
圖三 Wafer thickness correction factors versus normalized wafer thickness;  $t$  is the wafer thickness,  $s$  the probe spacing. The data points are taken from Ref. 15.



圖四 Wafer diameter correction factors versus normalized wafer diameter. For circular wafers  $D$  = wafer diameter; for rectangular samples  $D$  = sample width.



圖五 Boundary proximity correction factors versus normalized distance  $d$  from the boundary.  $F_{31}$  and  $F_{32}$  are for nonconducting boundaries,  $F_{33}$  and  $F_{34}$  are for conducting boundaries.



圖六 Four-point probe contour maps; (a) boron,  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , 40 keV,  $\rho_s(\text{average}) = 98.5 \text{ ohms/square}$ ; (a) arsenic,  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , 80 keV,  $\rho_s(\text{average}) = 98.7 \text{ ohms/square}$ ; 1% intervals. 200 mm diameter Si wafers. Data courtesy of Marylou Meloni, Varian Ion Implant Systems.

## 1-2 量測設備與操作介紹

片電阻的量測設備包括：電源供應器(current source)、電壓計(voltage meter)及四點探針基座。以下是量測設備的操作手冊：

### Model 224 Programmable Current Source 操作手冊

操作簡介：

1. Power up 暖機須一小時以上
2. 設定 V - Limit, 以面版 DATA 輸入所須之值
3. 設定 I - Limit, 第一下出現 Hi 代表欲加之電流上限, 第二下出現 Lo

代表電流下限，以面版 DATA 輸入所須之值以上之 DATA 輸入完畢後必須按 ENTER 才有用。DATA ENTRY 中的 EXPONENT 是控制輸入 DATA 的指數

4. 設定 TIME 輸出電流時間，輸入方法同上
5. 加電流操作：

輸入外加電流值，ENTER.

按下 OPERATE 即可

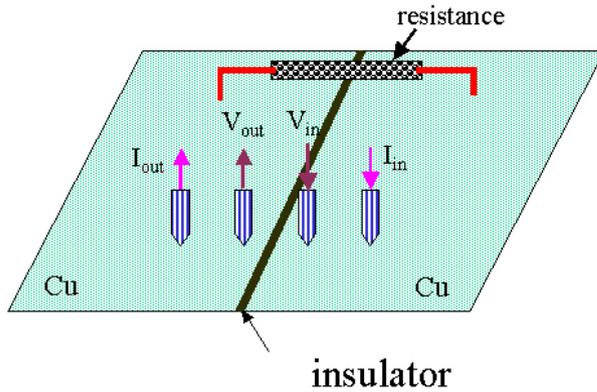
#### Voltage meter

1. 開電源暖機 1 小時
2. 讀取電壓值

### 1-3 實驗項目介紹

本實驗的內容包括：標準電阻的量測、矽基材料片電阻及金屬薄膜片電阻量測。藉此標準電阻的量測期望讀者能夠了解，對不同阻值大小要有精確的量測，所必須外加的電流是不同的，以及外界的環境對量測材料的影響都是在本章所要討論的重點。

#### 標準電阻的量測：



標準電阻的結構如右圖所示，  
標準電阻連接兩個電極，利用四點  
探針量測此電阻的電阻值。

#### 矽基材與金屬薄膜片電阻量測：

在矽基材的電阻量測上希望大家注意的是，光的照射對電阻量測的影響，  
並探討其原因何在？在量測完  $I$ 、 $V$  值之後，經過前文所引用的公式計算得到片  
電阻值，期望讀者在此計算的過程中，能對文中所探討的校正因子有深刻的印  
象。

#### 1-4 實驗結果與討論要求

#### 參考資料

1. 張俊彥，施敏，"半導體元件物理與製作技術"，高立，pp. 40-44，1996.
2. Dieter K. Schroder, "SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE

CHARACTERIZATION", Wiley, pp. 1-17, 1998.

3. J. W. Mayer and S. S. Lau, "ELECTRONIC MATERIALS SCIENCE",

Macmillian, pp. 34-35, 1990.