

## 第四章 實驗結果與分析

本章節將分為幾個主要的主題，依序討論此批樣品,  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ , 的「電阻率」以及「熱電勢」之展透行為，並定性說明其關聯性。

### 4-1 電阻率量測結果

此批樣品是取自香港科技大學張西祥教授實驗室，所製備的鋅-氧化矽之金屬絕緣體複合物，而表 4-1 為此一系列樣品其室溫電阻率與各成份比的膜厚大小；此表是由張西祥教授實驗室所測量的數值，在他們所製備的樣品中，膜厚皆在數千個 angstrom 以上，是良好的三維厚膜，且其所測的室溫電阻率，在成分體積比  $x=25\% \sim 30\%$  間有明顯上升的趨勢，故其應為研究三維電性展透行為的良好樣品。

$Zn_x(SiO_2)_{1-x}$			
atom fraction $x$ (%)	resistivity $\rho$ ( $\Omega m$ )	thickness (angstrom)	sample No.
20.64	63.93	2200	14#
22.38	72.36	5000	15#
23.21	62.14	4500	26#
24.78	21.61	4100	16#
27.34	10.17	3400	18#
30.44	5.77	3300	32#
31.54	0.995	4300	22#
42.15	0.182	4400	20#
51.46	0.116	6000	27#
53.48	0.363	5400	21#
55.14	0.021	3500	31#
62.23	0.178	7200	23#
70.57	0.031	11000	30#
73.02	0.009	9950	29#
77.00	0.011	8000	24#
85.40	0.0013	11000	25#
100.00	1.80E-04	12000	28#

表 4-1  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$  各成分比之室溫電阻率與樣品膜厚

另外隨著溫度下降，會拉大金屬與絕緣體的導電率比值；理想的金屬其電阻率會隨著溫度下降而下降，反之，絕緣體的電阻率會隨溫度下降而飆高，意指當溫度下降至低溫時，將更接近理想的展透模型(percolation model)。

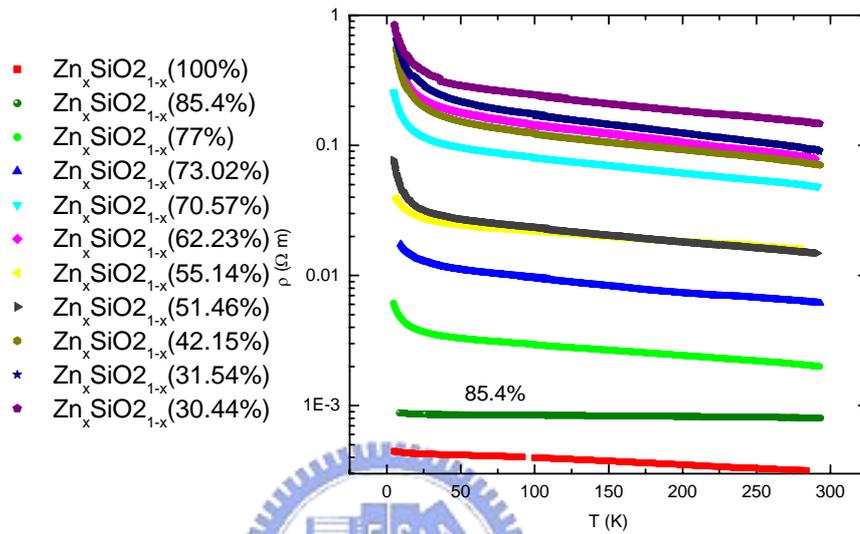


圖 4-1(a)  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$  電阻率與溫度的關係圖； $30.44\% \leq x \leq 100\%$ 。注意，當中樣品成分體積比  $x=85.4\%$  其電阻率隨溫度改變的斜率與其附近比例的樣品有顯著的差異

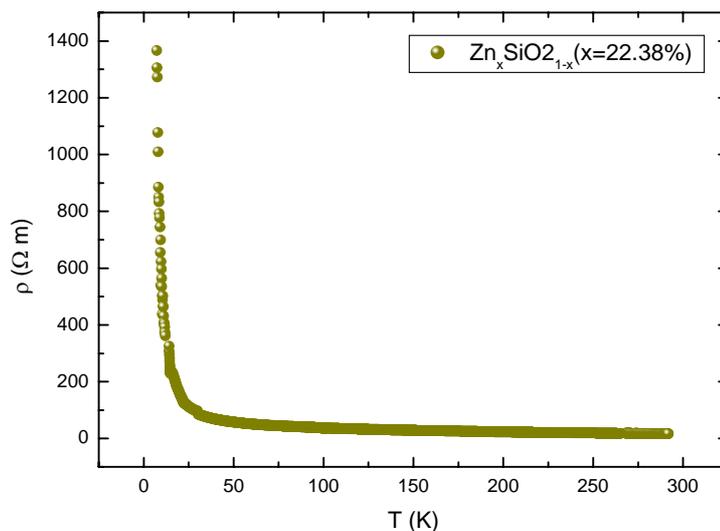


圖 4-1(b)  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$  電阻率與溫度的關係圖； $x=22.38\%$

圖 4-1(a)、(b)顯示一系列不同成分比的 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ 電阻率與溫度之關係圖，其測量的溫度範圍約從室溫 300 K 至 5 K，若我們細看此批複合物在鋅成分比較高之樣品，其並不如預期有著良好的金屬性；意指其隨溫度降低，電阻率並無明顯的下降，且值得注意的是樣品 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ ； $x = 85.4\%$ ，在圖 4-1(a)中可以很容易的發覺，此樣品隨溫度改變的斜率與其附近比例的樣品有顯著的差異，即指在測量其電阻率時，雖一如其他樣品在溫度下降時電阻率會往上升，但上升的幅度最不明顯，而此現象將會如何影響熱電勢的測量值，將在本章節的後半段會定性的說明。然而若我們先撇開此現象不談，依舊可發覺隨著溫度的下降，其如預期一般拉大了金屬與絕緣體的導電率比值，而更接近理想的展透模型(percolation model)。

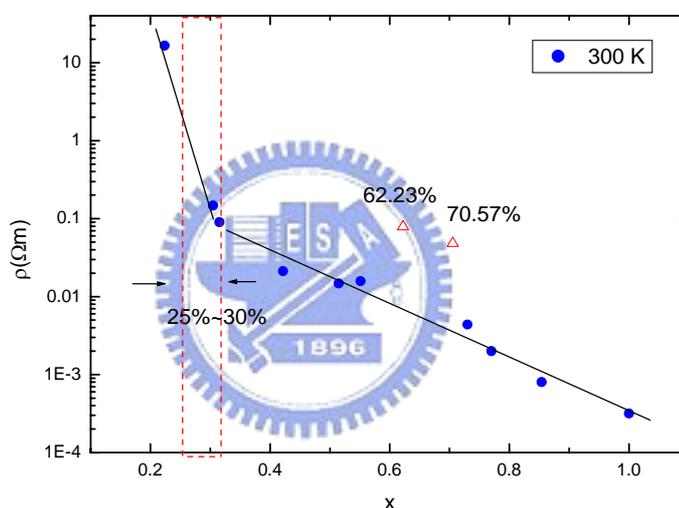


圖 4-1(c) 室溫下電阻率與樣品 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ 成分體積比之關係圖

圖 4-1(c)是室溫電阻率對樣品成分體積比作圖，在此圖中縱座標為電阻率，橫座標為鋅在樣品裡所佔的體積比，當中有兩個重點值得注意，首先在圖中刻意標記兩三角形的點( $\Delta$ )作為區分，此兩點的成分比分別為 62.23%、70.57%，其量測的電阻率差異最大，且在室溫重新做接點，並多次量測其值並無改善，因而推論此一現象應當是在濺鍍樣品時所產生的奇異行為，故在隨後展透行為的分析中並不討論此兩樣品。而另一個重點，在圖中我們不難發現，成分體積比在 25%至 30%間電阻率快速飆升，此處即為展透現象發生的臨界成分體積比。

#### 4-1-1 電阻率的展透行為(percolation behavior)

最早利用展透理論來描金屬-絕緣體複合物導電率的展透行為，應該是在 1971 年物理學家 B. J. Last 與 D. J. Thouless[8]，他們比照之前第二章描述展透行為所用的定律，並重新寫出一個導電率 power law：

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = (x - x_c)^t ; x > x_c \quad (4-1)$$

在式(4-1)中， $\sigma$  為導電率、 $x_c$  為導體內金屬所佔的臨界體積比(critical point)，而  $t$  為臨界指數(critical exponent)。本節將利用此定律描述各不同溫度下(300 K、150 K、30 K 以及 10 K)鋅-氧化矽複合物電阻率的展透行為。

在圖 4-2(a)、(b)中，其橫座標表示鋅在樣品內的成分體積比，而縱座標為電阻率。由此圖我們可以明顯的看出，隨著鋅在樣品內的成分體積比增加，其導電率也逐漸上升，且當鋅的比率增加至 25%~30%時，電阻率快速上升。

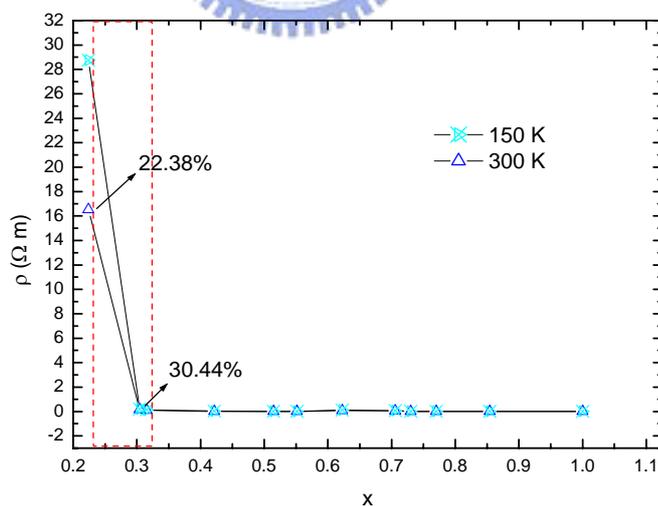


圖 4-2 (a) 一系列樣品的電阻率( $\rho$ )與鋅在樣品中的成分體積比( $x$ )作圖，圖中兩條曲線表示不同的溫度，分別為 300 K 與 150 K

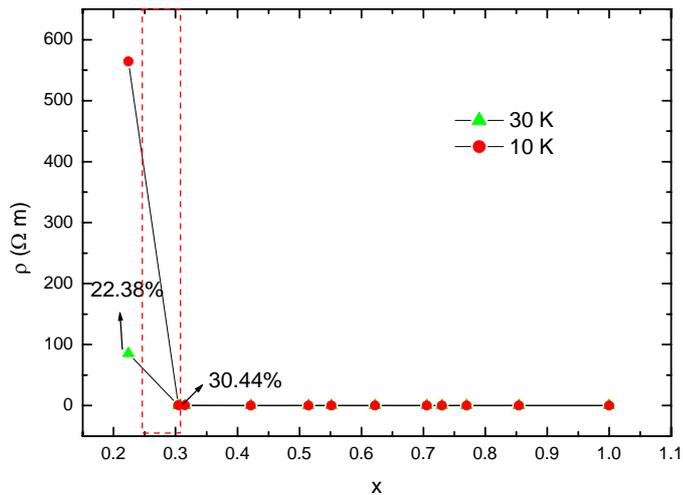


圖 4-2 (b) 一系列樣品的電阻率( $\rho$ )與鋅在樣品中的成分體積比( $x$ )作圖，圖中兩條曲線表示不同的溫度，分別為 30 K 與 10 K

如之前所述，在金屬-絕緣體複合物的展透模型中，決定導電率的臨界指數與臨界體積比，是以一個簡單的 power law( $\sigma/\sigma_0 = (x-x_c)^t$  ;  $x > x_c$ )所表示，而若將此式加以改寫，並以電阻率的形式表示即可寫成：

$$\rho = \rho_0(x-x_c)^{-t} ; x > x_c \quad (4-2)$$

(4-2)式即為本文決定電阻率展透行為的臨界體積比( $x_c$ )，以及臨界指數( $t$ )的公式。為了分析方便，我們將上式取對數改寫成：

$$\ln \rho = \ln \rho_0 - t \ln(x-x_c) ; x > x_c \quad (4-3)$$

由(4-3)式可知， $\ln \rho$  與  $\ln(x-x_c)$  成一線性的關係式，換而言之，若我們在一次近似的最小平方差下選取  $x_c$  值(critical point)，並將  $(x-x_c)$  與  $\rho$  取自然對數作圖，其斜率( $t$ )即為臨界指數(critical exponent)。圖 4-2(a)、(b)為各個不同溫度下(300 K、150 K、30 K 以及 10 K)， $(x-x_c)$  與  $\rho$  取自然對數作圖。

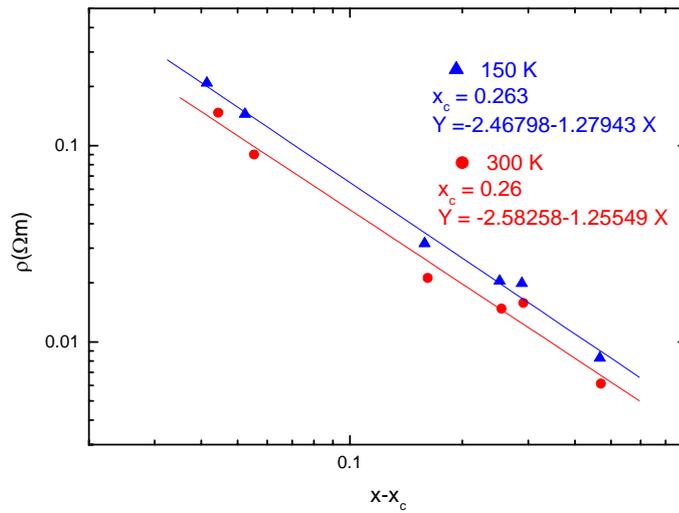


圖 4-3 (a)  $(x - x_c)$  與  $\rho$  取自然對數作圖，而其斜率即為臨界指數(critical exponent)，當中兩種不同形狀的符號，分別表示兩個不同的溫度(300 K、150 K)，而圖中的實線是利用 Origin 軟體，取線性分析(linear fit)所得出的直線。

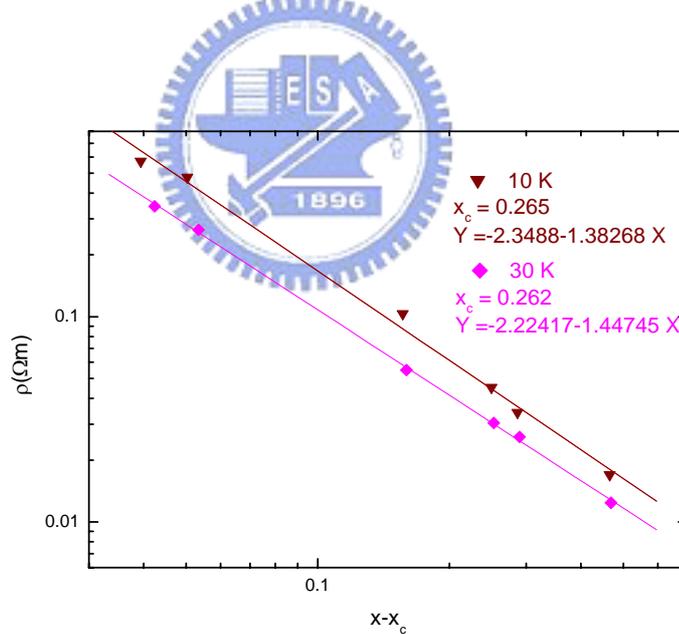


圖 4-3 (b)  $(x - x_c)$  與  $\rho$  取自然對數作圖，而其斜率即為臨界指數(critical exponent)，當中兩種不同形狀的符號，分別表示兩個不同的溫度(30 K、10 K)，而圖中的實線是利用 Origin 軟體取線性分析(linear fit)所得出的曲線。

圖 4-3(a)、(b)顯示此批樣品的臨界體積比  $x_c$  約在 0.26~0.265 間，而由之前所敘述的展透理論得知，臨界體積比與樣品本身的『維度』以及『晶格排列的形狀』有關；1980

年數學家 H. Kesten 證明[26]，三維的臨界體積比小於二維的臨界體積比( $x_c(3) < x_c(2)$ )，且當晶格排列越緊密時，所對應的臨界體積比也會隨之降低。我們知道在二維中最密堆積的晶格形狀為三角形晶格[28]，其臨界體積比為  $x_c(2) = 0.347$ ，而三維的最密堆積為面心立方，臨界體積比為  $x_c(3) = 0.119$ 。而我們得出的  $x_c$  值恰介於其間，故是在相當合理的範圍內。

#### 4-1-2 電阻率的比值與臨界指數的關係

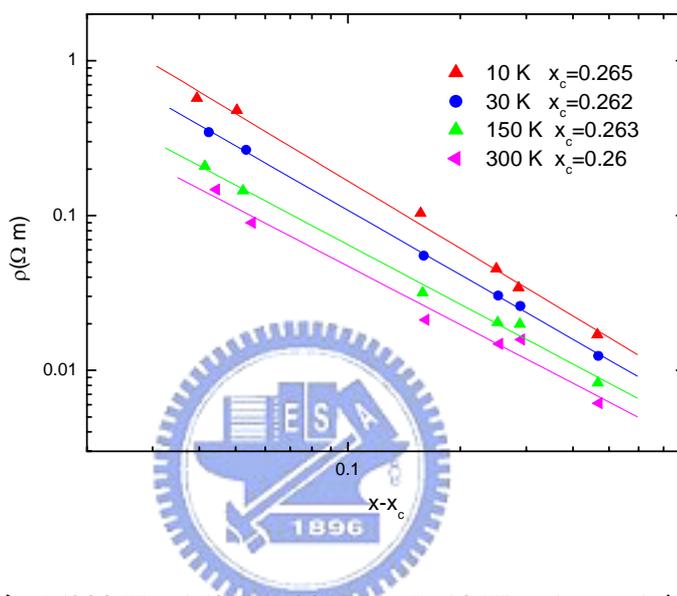


圖 4-4 各溫度下(300 K、150 K、30 K 以及 10 K)， $(x - x_c)$ 與  $\rho$  取對數作圖

$T(K)$	$\ln \rho_0$	$t$ (critical exponent)	$\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$
300 K	$-2.57 \pm 0.01$	$1.23 \pm 0.03$	$> 5.21 \times 10^4$
150 K	$-2.47 \pm 0.02$	$1.28 \pm 0.04$	$> 7.77 \times 10^4$
30 K	$-2.34 \pm 0.02$	$1.38 \pm 0.04$	$> 2.02 \times 10^5$
10 K	$-2.23 \pm 0.02$	$1.49 \pm 0.04$	$> 1.27 \times 10^6$

表 4-2 各溫度(300 K、150 K、30 K 以及 10K)下， $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ 之  $\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$  比率與臨界指數( $t$ )間的關係表。(臨界體積比  $x_c$  取  $0.262 \pm 0.003$ ，而  $\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$  為此批樣品鋅含量最少(22.38%)與純鋅(100%)之電阻率比值所推算)

圖 4-4 顯示，在各個溫度下  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$  的臨界體積比約在 0.26 到 0.265 之間，因而在表 4-2 中，我們取臨界體積比  $x_c = 0.262 \pm 0.003$  的誤差範圍內，觀察  $\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$  比值與臨界指數( $t$ )間的關係。依照理論上的預測，電阻率的臨界指數約逼近於二( $t \approx 2$ )，但若是考慮在金屬與絕緣體比率相差極大的要求下，所模擬出的數值，而在本實驗的數據裡，雖無法做到導電率比率無限大的要求(實驗中，導電率比相差最大的數值約在  $1.27 \times 10^6$  左右)，但亦可由表 4-2 看出，隨著導電率比率( $\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$ )增大，此實驗所得到的臨界指數( $t$ )，也逐步接近理想模型裡的理論預測( $t \approx 2$ )。

#### 4-2 熱電勢的量測結果

在結束電阻率展透行為的討論後，我們已經可以得知對於電阻率而言，此批樣品發生展透行為的臨界體積比約為  $0.262 \pm 0.003$ ，且其臨界指數會隨著電阻率比值的增大而接近理論預測的數值( $t \approx 2$ )，因而在熱電勢量測結果的討論中，我們將著重探討此批樣品，其熱電勢的「臨界指數」與電阻率有何相關，以及「臨界體積比」是否相同。

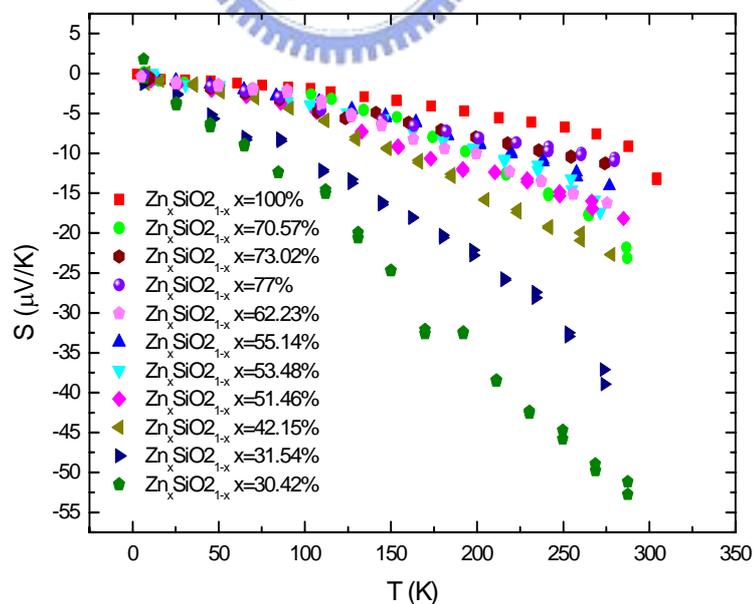


圖 4-5(a)  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$  熱電勢與溫度的關係圖； $30.44\% \leq x \leq 100\%$

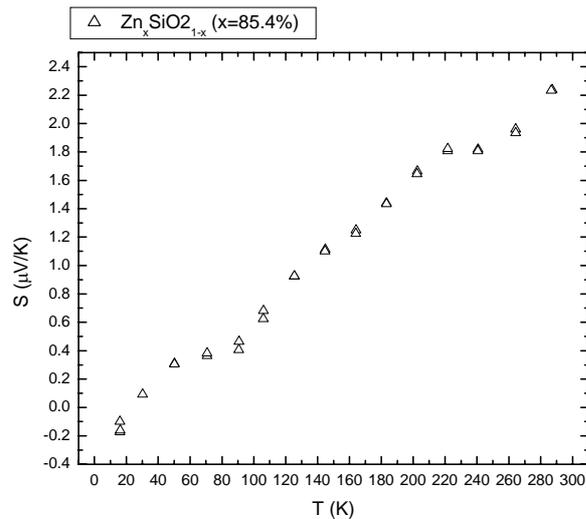


圖 4-5(b)  $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$  ;  $x = 85.4\%$  熱電勢與溫度關係圖

圖 4-5(a)、(b)顯示一系列不同成分比的 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ 熱電勢與溫度之關係圖，其測量的溫度範圍從室溫 300 K 至 5 K，最低溫約在 1.5 K 上下，當中所量測的成份體積比是在 30.44% 到 100% 間，而在此批樣品的量測中，並未測量到更大電阻率的熱電效應值，原因是由於隨著電阻率的上升，其所測量到的電壓雜訊也同時增大，因而無法解析所測量到的電壓值，再者，由先前討論電阻率量測結果中曾提及，在 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ ； $x = 85.4\%$ 之樣品中，其電阻率的斜率與相鄰成份體積比之樣品差異甚大，而在此處我們依舊發現其也是唯一一片熱電勢在室溫時是正值的 $S \approx 2.2(\mu V/K)$ 。而除此之外，倘若觀看各個成份比熱電勢隨溫度的變化可以發現，其皆以一次或二次多項式的行為逐漸趨近絕對零度，因而在隨後的討論中所取的熱電勢值，皆是由此一特性作擬合所得的數值。

#### 4-2-1 熱電勢的展透行為(percolation behavior)

圖 4-6 是各不同溫度下(300 K、250 K、200 K、100 K 以及 30 K)，熱電勢( $S$ )與成份體積比( $X$ )作圖，當中我們可以發覺，在電阻率差異較大的兩樣品(62.23% 以及 70.57%)，其所測得的熱電勢亦有明顯的偏移，此處除了反應先前在電阻率討論中，所發現樣品在此比率下所發生的奇異現象外，同時也直接的顯現電阻率與熱電勢其強烈相互影響的關係。而圖中的另一個重點，當鋅在樣品內的成份體積比逐漸減小時，熱電勢的絕對值將逐漸增大，類似於電阻率的展透行為一般，在成份體積比來到 25%~30% 其熱電勢出現急速的轉變，顯現出其熱電勢的展透行為。

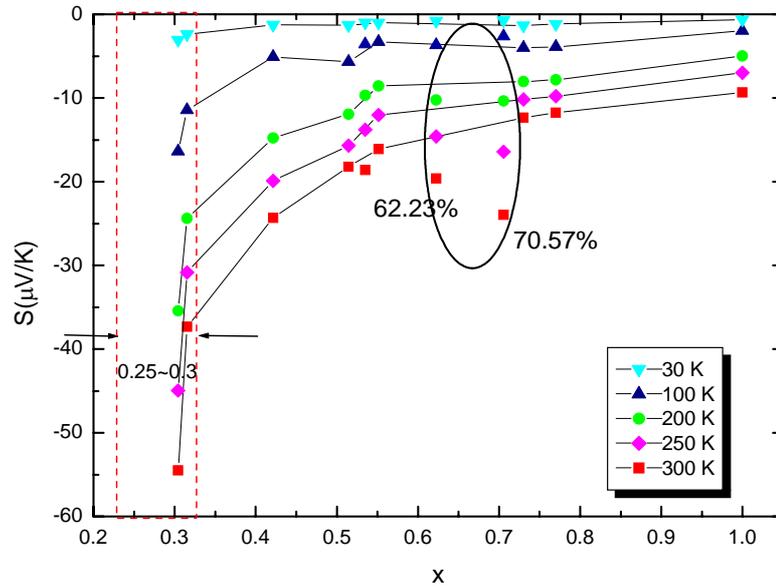


圖 4-6 一系列樣品的熱電勢( $S$ )與鋅在樣品中的成分體積比( $X$ )作圖，圖中兩條曲線表示不同的溫度，分別為 300 K、250 K、200 K、100 K 以及 30 K

在此批樣品的熱電勢量測裡發覺，隨著溫度的下降所測得的電壓訊號將逐漸減小，而影響熱電勢量測之準確性，因而在以下的討論中，我們將區分兩塊溫度區塊來討論，以較高溫度(300 K、250 K、200 K)所得的數值為準，並將較低溫度(100 K、30 K)得出的數值作為參考。

#### 4-2-1a 在較高溫度下(300 K、250 K、200 K)之展透行為

1991 年，Ohad Levy 以及 David J. Bergman[36]認為，熱電勢展透行為的臨界現象，應當與系統內的導電率比值( $\sigma_I/\sigma_M$ )及熱導率比值( $\gamma_I/\gamma_M$ )間的強弱，有很大的關聯性。當導電率比值遠小於熱導率比值( $\sigma_I/\sigma_M \ll \gamma_I/\gamma_M$ )，且金屬在複合物內的成份體積比大於臨界體積比的區塊內時( $x > x_c$ )，熱電勢的臨界行為將滿足：

$$\frac{S_M - S}{S_M - S_I} \propto \left(\frac{\gamma_M}{\gamma_I}\right)^{q/t+q} \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_M}\right) (x - x_c)^{-t} \quad (4-4)$$

當中  $S$  為複合物的熱電勢， $x$  為金屬在複合物內的成份體積比，而  $x_c$  與  $t$  可視為在熱電

勢的展透行為下之臨界體積比與臨界指數。反之，倘若在導電率比值遠大於熱導率比值的情形下( $\sigma_I/\sigma_M \gg \gamma_I/\gamma_M$ )，則其熱電勢的臨界行為將轉變為：

$$\frac{S_M - S}{S_M - S_I} \cong 1 - \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_I}\right)^{q/t+q} (x - x_c)^t ; x > x_c \quad (4-5)$$

式(4-5)適用於金屬成份體積比大於臨界體積比的區塊內( $x > x_c$ )，且須要求導電率比值遠大於熱導率比值( $\sigma_I/\sigma_M \gg \gamma_I/\gamma_M$ )之情況下才可使用。圖 4-6 為不同熱導率與導電率的條件下，其熱電勢( $\alpha_e$ )以及 $\Delta p_M = x - x_c$ 之關係圖。圖中可發覺，在不同導電率以及導熱率的條件下時，其熱電勢臨界行為有顯著的不同。

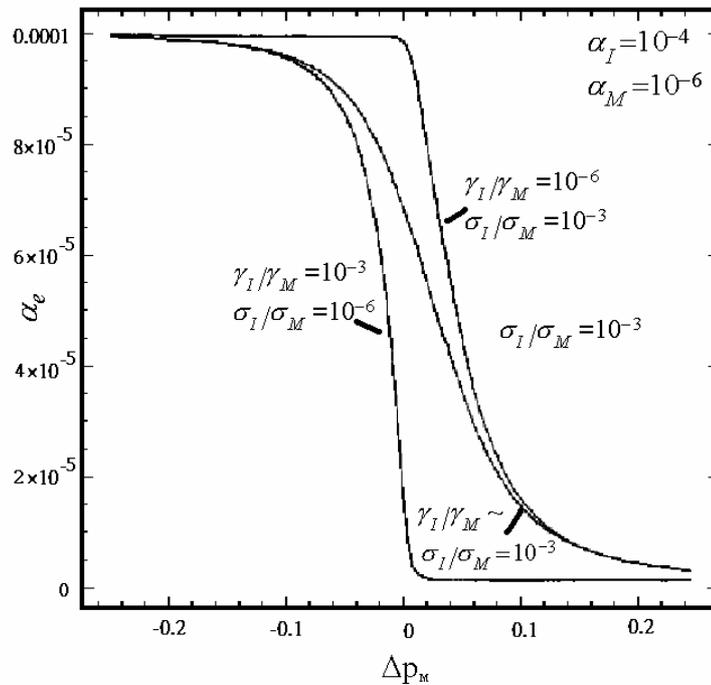


圖 4-7 在不同熱導率與電導率的條件下，所作出之 $\alpha_e$ 與 $\Delta p_M$ 關係圖[39]。 $\alpha_e$ 為各成份體比之熱電勢值， $\Delta p_M$ 為金屬體積比與臨界體積比之差( $\Delta p_M = x - x_c$ )。此為1991年，Ohad Levy 以及 David J. Bergman 所模擬出的曲線。

而在本實驗所探討的 $Zn_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ 之金屬-絕緣體複合物中，其導電率比值( $\sigma_I/\sigma_M$ )以及熱導率比值( $\gamma_I/\gamma_M$ )為：

室溫下導電率比值

$$\begin{cases} \sigma_{SiO_2} < 6.05 \times 10^{-2} (\Omega m)^{-1} \\ \sigma_{Zn} = 3.15 \times 10^3 (\Omega m)^{-1} \\ \sigma_{SiO_2} / \sigma_{Zn} < 1.9 \times 10^{-5} \end{cases}$$

室溫下熱導率比值

$$\begin{cases} \gamma_{SiO_2} = 1.32 \times 10^{-2} (W cm^{-1} K^{-1}) \\ \gamma_{Zn} = 1.16 (W cm^{-1} K^{-1}) \\ \gamma_{SiO_2} / \gamma_{Zn} \cong 1.14 \times 10^{-2} \end{cases}$$

當中導電率是取實驗所量到的數據； $\sigma_{SiO_2}$  是以所量測電阻率最大的樣品( $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ ； $x = 22.38\%$ )為估算值、 $\sigma_{Zn}$  是取樣品 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ ； $x = 100\%$ 之量測數值，而熱導率是由文獻[37,23]中所取出的結果； $\gamma_{SiO_2}$  是參考S. Andersson發表在Journal of Physics之文獻所量測的數值，而 $\gamma_{Zn}$  是由Kittel所著” Introduction to Solid State Physics” 所查到的結果。由上述熱導率以及電導率比值大小可知，在此實驗的系統裡其 $\sigma_{SiO_2} / \sigma_{Zn} \ll \gamma_{SiO_2} / \gamma_{Zn}$ ，因而為了得知此實驗中 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ 其熱電勢發生展透行為時的臨界體積比( $X_c$ )、與臨界指數( $t$ )，我們將套用上述之(4-4)式。且為了分析的便利性，此處將比照討論電阻率展透行為時，將(4-4)式改寫為一個描述熱電勢展透的 power law 來分析所量測到數值：

$$S = S_0 (x - x_c)^{-t} ; x > x_c \quad (4-6)$$

在式(4-6)中，我們將原(4-4)式內繁雜的常數項以 $S_0$ 表示，此一做法僅為了分析的便利性，而不會影響所得之臨界體積比( $x_c$ )、與臨界指數( $t$ )之準確性。隨後我們將兩端同時取絕對值與自然對數，而表示為：

$$\begin{aligned} |S| &= |S_0| (x - x_c)^{-t} \\ \ln |S| &= \ln |S_0| - t(x - x_c) ; x > x_c \end{aligned} \quad (4-7)$$

以下的分析將利用(4-7)式，擬合出 $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ 其熱電勢發生展透行為時的臨界體積比( $x_c$ )、與臨界指數( $t$ )。圖 4-8(a)、(b)、(c)分別為各個不同的溫度下(300 K、250 K、200 K)所得出的數值，當中 a 為 $\ln |S_0|$ 、b 為臨界指數( $t$ )，而 c 為臨界體積比( $x_c$ )

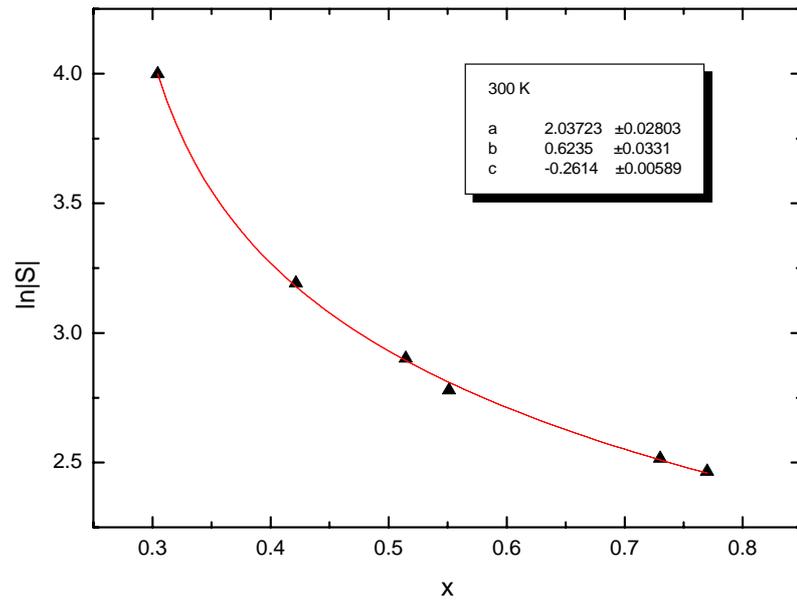


圖 4-8(a) 在 300 K 下， $\ln|S|$  與成分體積比  $x$  作圖

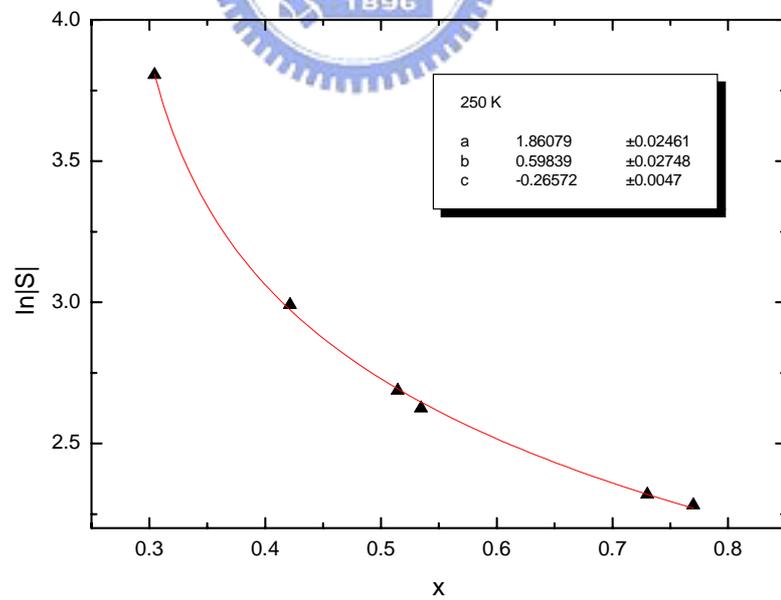


圖 4-8(b) 在 250 K 下， $\ln|S|$  與成分體積比  $x$  作圖

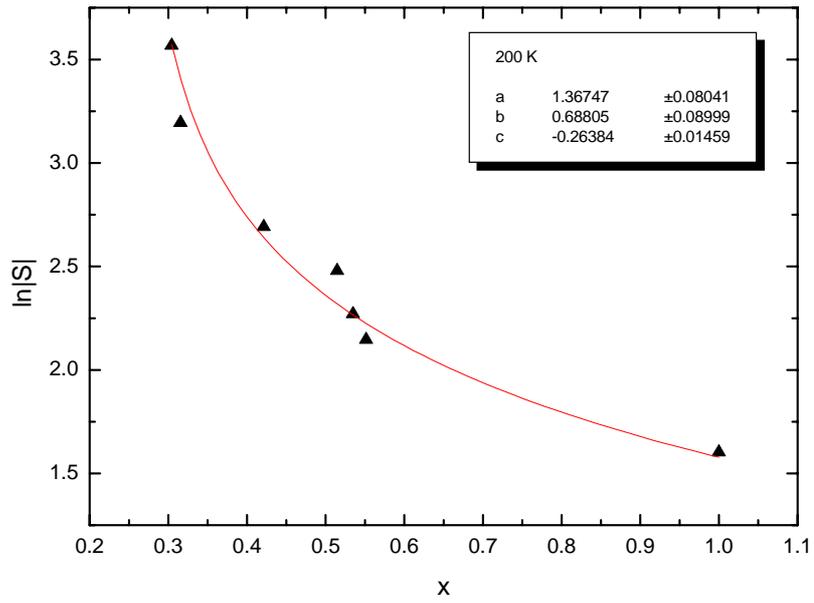


圖 4-8(c) 在 200 K 下， $\ln|S|$  與成分體積比  $x$  作圖

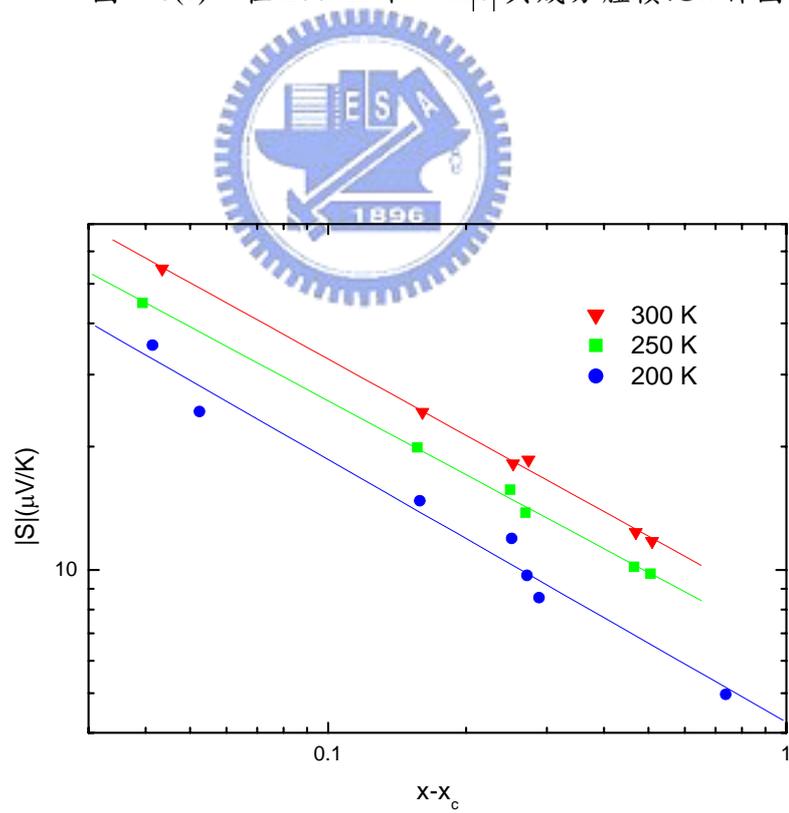


圖 4-9 較高溫度下(300 K、250 K、200 K)， $(x - x_c)$  與  $S$  取對數作圖

$T(K)$	$x_c$ (critical point)	$t$ (critical exponent)	$\ln S_0$
300 K	$0.261 \pm 0.005$	$0.62 \pm 0.03$	$2.03 \pm 0.02$
250 K	$0.265 \pm 0.004$	$0.59 \pm 0.027$	$1.86 \pm 0.02$
200 K	$0.263 \pm 0.014$	$0.68 \pm 0.08$	$1.36 \pm 0.08$

表 4-3 300 K、250 K 以及 200 K 時，熱電勢展透行為的各項參數

由表 4-3 所整理出的結果可知，發生展透行為的臨界體積比( $x_c$ )約在  $0.26 \pm 0.02$  之誤差範圍內，而此結果與電阻率所測得之數值幾乎相等，此外在表中其臨界指數( $t$ )並無明顯趨勢，原因應與此批樣品之金屬、絕緣體的熱電勢比率在高低溫時相差不大有關；在各個溫度下其比率皆在同一個數量級間。

#### 4-2-1b 在較低溫度下(100 K、30 K)之展透行為

本文中也對較低溫度下的熱電勢，進行分析並作為參考數值。圖 4-10(a)、(b) 分別為 100 K 與 30 K 下， $\ln|S|$  與成分體積比  $x$  作圖，而其各項展透參數的結果整理於表 4-4。

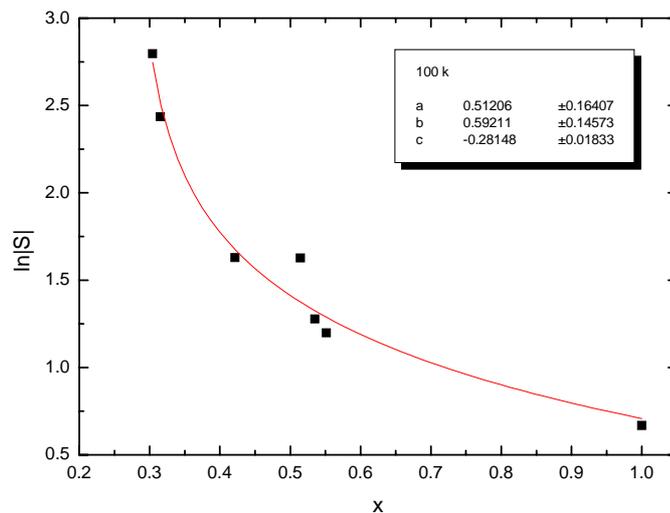


圖 4-10(a) 在 100 K 下， $\ln|S|$  與成分體積比  $x$  作圖

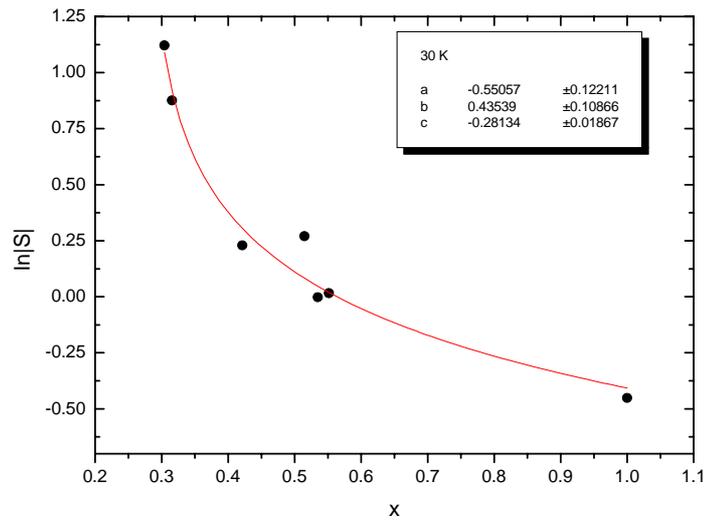


圖 4-10(b) 在 30 K 下， $\ln|S|$  與成分體積比  $x$  作圖

$T(K)$	$x_c$ (critical point)	$t$ (critical exponent)	$\ln S_0$
100 K	$0.281 \pm 0.018$	$0.56 \pm 0.14$	$0.51 \pm 0.16$
30 K	$0.281 \pm 0.018$	$0.43 \pm 0.10$	$-0.55 \pm 0.23$

表 4-4 100 K 與 30 K 時，熱電勢展透行為的各項參數

表 4-4 顯示，在較低溫度下(100 K、30 K)，所擬合出的臨界指數( $x_c$ )約為  $0.281 \pm 0.018$ ，此值與上述結果不符，而其原因應當與低溫時，熱電勢本身的訊號過小有關。且隨著溫度降低我們所建立的溫差，為了不過份的影響環境溫度，往往讓熱端溫度上升不到 1 K，相對的所能測得的電壓訊號，也減小許多，此一結果讓低溫測量時有較大的誤差。

## 第五章 結論

本章主要分為兩部份，第一部份主要為實驗儀器架設的結果，而第二部分為鋅-氧化矽之金屬絕緣複合物，熱電勢的展透行為，以及其與電阻率的展透行為作比較。

### 5-1 熱電勢量測系統架設的結果

在熱電勢的量測裡，如何準確的量測出兩端溫差，往往是影響實驗準確度最主要的因素之一，而在我們的實驗中，使用了兩種主要的方法來量測溫差，依時間先後順序分別為，高靈敏度的『電阻式溫度計』以及『熱電偶式溫度計(thermocouple)』。

#### 5-1-1 電阻式溫度計的量法

利用電阻式溫度計量取兩端溫差，是我們一開始所架設的系統中，所使用的方法，而由於此類溫度計大小的限制，讓我們必須依靠銅座的導熱性使其與樣品達成熱平衡，而此即是最主要的誤差來源，因而在使用此方法來量測熱電勢，最主要的注意事項，便是確定溫度計所量測到的溫度即為樣品兩端溫度，以及熱源是否能均衡且同步的加熱待測樣品與溫度計。實驗中我們實際的解決方法是放置兩個穩定的熱源，並利用量測 Ni、Pb 等具有標準值的樣品校正系統。而使用電阻式溫度計量法的優點在於，實驗中樣品兩端的溫度皆可知，故其環境溫度可利用此二溫度計準確確定。

#### 5-1-2 熱電偶式溫度計的量法

熱電偶式溫度計是最多人使用來量測熱電勢的方法，由於使用時可直接連結在樣品上，故可精準得知樣品兩端的溫差，且其僅由兩種不同材質之導線構成，因而在樣品尺寸縮小時，電阻式溫度計將不易使用，而此一量法也將逐漸重要。

### 5-2 電阻率與熱電勢的展透行為

本文量測了一系列不同成分比的鋅-氧化矽複合物( $Zn_x(SiO_2)_{1-x}$ )，之電阻率與熱電勢。因而在此處我們關心的是，熱電勢會在那一個「臨界成分體積比」下發生展透行為，以及其是以怎樣的「臨界指數」行為向上飆升，並同時觀察其與「電阻率的展透行為」有何相關性。

### 5-2-1 臨界成分體積比與臨界指數

在電阻率的展透行為裡，我們使用一個簡單的power law( $\rho = \rho_0(x - x_c)^{-t}$  ;  $x > x_c$ )來描述其臨界行為。而在熱電勢的展透行為裡，由於其與導熱率以及電阻率比值的大小有很密切的相關性，且我們所量測的樣品是屬於金屬、絕緣體的電導率差異遠大於熱導率的系統； $\sigma_{SiO_2} / \sigma_{Zn} \ll \gamma_{SiO_2} / \gamma_{Zn}$ ，故此處我們套用 1991 年，Bergman與Levy所推導出的定律( $\frac{S_M - S}{S_M - S_I} \propto (\frac{\gamma_M}{\gamma_I})^{q/t+q} (\frac{\sigma_I}{\sigma_M})(x - x_c)^{-t}$  ;  $\sigma_I / \sigma_M \ll \gamma_I / \gamma_M$ 、 $x > x_c$ )來描述熱電勢的展透行為。

#### 5-2-1a 臨界體積比

由本實驗所分析的數據可知，在以較高溫度(300 K、250 K、200 K)，且熱電勢較準確之情形下可得知，熱電勢的臨界體積比約在  $0.26 \pm 0.02$  誤差範圍間，而此值與電阻率的臨界體積比( $x_c = 0.262 \pm 0.003$ )，約略相等，顯示熱電勢與電阻率是在同一個臨界體積比下顯現展透行為。且 1980 年數學家 H. Kesten 證明[25,26,27]，三維的臨界體積比低於二維的臨界體積比( $x_c(3) < x_c(2)$  ;  $x_c(3)_{\min} = 0.119$ 、 $x_c(2)_{\min} = 0.347$ )，而我們得出的  $x_c$  恰介於其間，此處亦顯示其是在相當合理的範圍內。

#### 5-2-1b 臨界指數

熱電勢		電阻率		
$T(K)$	$t$ (critical exponent)	$T(K)$	$t$ (critical exponent)	$\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$
300 K	$0.62 \pm 0.03$	300 K	$1.23 \pm 0.03$	$> 5.21 \times 10^4$
250 K	$0.59 \pm 0.027$	150 K	$1.28 \pm 0.04$	$> 7.77 \times 10^4$
200 K	$0.68 \pm 0.08$	30 K	$1.38 \pm 0.04$	$> 2.02 \times 10^5$
		10 K	$1.49 \pm 0.04$	$> 1.27 \times 10^6$

表 5-1 熱電勢及電阻率，溫度與臨界指數的關係表

依照理論上的預測，若考慮在金屬與絕緣體比率相差無限大的極限要求下，電阻率的臨界指數約逼近於二( $t \approx 2$ )，而由表 5-1 可知，在本實驗的系統裡，雖無法做到導電率比率無限大的要求(實驗中導電率比相差最大的數值約在  $1.27 \times 10^6$  左右)，但隨著導電率比率( $\rho_{SiO_2} / \rho_{Zn}$ )增大，此實驗所得到的臨界指數( $t$ )，也逐步接近理想模型裡的理論預測( $t \approx 2$ )。而本實驗中熱電勢的臨界指數，隨著溫度下降並無明顯的變化，應當與其熱電勢比率在高低溫時相差不大有關。



## 參考文獻

- [1] *Percolation Structures and Processes*, edited by G. Deutscher, R. Zallen, and J. Adler (Hilger, Bristol, 1983).
- [2] *Proceedings of the Second International Conference on Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media*, edited by J. Lafait and D. B. Tanner [Physica A **157**, 1 (1989)].
- [3] P. J. Flory, J. Am. Chem. Soc. **63**, 3083, 3091, 3096 (1941).
- [4] J. M. Hammersley, Annals of Mathematical Statistics **28**, 790-795 (1957).
- [5] J. M. Hammersley, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **53**, 642-645 (1957).
- [6] S. R. Broadbent and J. M. Hammersley, Proc. Cambridge Philos. Soc. **53**, 629 (1957).
- [7] J. W. Essam, Rep. Prog. Phys. **43**, 834 (1980).
- [8] D. J. Last and D. J. Thouless, Phys. Rev. Lett. **27**, 1719 (1971).
- [9] *Percolation*, edited by Grimmett Geoffrey (Verlag, 1999).
- [10] J. P. Fitzpatrick, R.B. Malt and F. Spaepen, Phys. Lett. **47A**, 207-208 (1974).
- [11] *The physics of amorphous solids*, edited by Richard Zallen (Wiley, New York, 1983).
- [12] *A Treatise on Electricity and Magnetism, 3<sup>rd</sup> Ed*, edited by J. C. Maxwell (Dover Publications, New York, 1892).
- [13] D. Stauffer, Phys, Rep. **54**, 1 (1979).
- [14] *Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Application*, edited by T. C. Harman and J. M. Honig (McGraw-Hill, New York, 1967).

- [15] H. J. Goldsmid and R. W. Douglas, Br. J. Appl. Phys. **5**, 386 (1954).
- [16] *Classical Electrodynamics, 3<sup>rd</sup> Ed*, edited by J. D. Jackson (Wiley, New York, 1998).
- [17] *Electrons and Phonons*, edited by J. M. Ziman (Oxford, New York, 2001).
- [18] *The Electrical Properties of Metals and Alloys*, edited by J. S. Dugdale (Edward Arnold, 1977).
- [19] *Thermoelectricity : an introduction to the principles*, edited by D. K. C. MacDonald, (Wiley, New York, 1962).
- [20] *Quantum Physics*, edited by Robert Eisberg (Wiley & Sons, New York, 1985).
- [21] *The electrical properties of disordered metals*, edited by J. S. Dugdale (Cambridge University Press, New York, 1995).
- [22] *Solid State Physics*, edited by Robert Neil W. Ashcroft and N. David Mermin (Saunders College, Orlando, 1976).
- [23] *Introduction to Solid State Physics*, edited by Charles Kittel (Wiley, New York, 1996).
- [24] *Classical and Statistical Thermodynamics*, edited by Ashley H. Carter (Prentice Hall, 2000).
- [25] H. Kesten, Commun. Math. Phys., **74**, 41, (1980).
- [26] *Percolation Theory for Mathematicians*, edited by H. Kesten (Birkhauser, Boston, 1982).
- [27] J. M. Hammersley and D. J. A. Welsh, Phys. Rev. **126**, 949-951 (1962).
- [28] *Introduction to Percolation Theory*, edited by Dietrich Stauffer and Amnon Aharony (Taylor & Francis, London, 1992).
- [29] Y. R. Shan, W. F. Leonard, H. Y. Yu, Rev. Sci. Instrum, **48**, 688 (1977).
- [30] *Low Level Measurements 5<sup>th</sup> Ed*, edited by Joseph F. Keithley (Keithley, 1991).

- [31] *Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, edited by Guy K. White, and Philip J. Meeson (Oxford, New York, 2002).
- [32] R. B. Rumbos, *Philos. Mag.* **36**, 91 (1977).
- [33] F. J. Blatt, D. J. Flood, V. Rowe, P. A. Schroeder, J. E. Cox, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 395 (1967).
- [34] M. J. Laubitz, T. Mastsumura, P. A. Schroeder, J. Tracy, *Phys. Lett.* **59A**, 316 (1976).
- [35] M. J. Laubitz, T. Mastsumura, *Can. J. Phys.* **51**, 1247 (1973).
- [36] Ohad Levy and David J. Bergman, *J. Phys. A: Math. Gen.* **25**, 1875 (1992).
- [37] S. Anderson and L. Dzhavadovt, *J. Phys.: Condens. Matter* **4**, 6209-6216 (1992).
- [38] J. J. Lin, Teng-Ming Chen, *Phys. B: Condensed Matter* **81**, 13-17 (1990).
- [39] J. J. Lin, *Phys Rev. B* **44**, 789-793 (1991).
- [40] 鐘元良「金鈹合金厚膜之電子-聲子散射時間與電子-電子交互作用之研究」，國立台灣大學，碩士論文，民國八十六年
- [41] 邱劭斌「金鋁合金中之電子-聲子散射時間之研究」，國立交通大學，碩士論文，民國八十九年
- [42] 王陸生「粒狀結構金屬-絕緣體複合物之熱電效應研究」，國立交通大學，碩士論文，民國九十四年

## 簡歷

陳劭其 (Shao-Chi Chen) 1982 年 2 月 27 日出生於台灣省新竹市，父親陳乃堂先生，母親吳麗卿女士。2000 年九月考取國立東華大學物理系，畢業於 2004 年六月。同年考取國立交通大學物理研究所碩士班，在 2006 年七月獲得碩士學位。

