

# 固態結構的導熱性質之探討

## 高中組物理科第一名

省立台中第二高級中學

作者：王厚藻

指導教師：許申如、楊賢寬

### 一、實驗動機與目的

熱是能的一種形式，在固態的物質中，原子的振盪表現了熱，振盪能量的轉移造成了熱能的傳導。在電的非導體中，熱能的傳遞全靠聲子的傳遞，如果分子的固態結構諧和，依聲子的速度，固態結構的導熱率應該相當大。但是因為分子的排列非完美，及聲子的碰撞的反跳過程，所以固態結構的導熱率非常有限。不同的固態結構對聲子的散射也不同，所以各種固體的導熱率也不同。因此我們做了一系列的推論與實驗，來了解電的非導體中，固態結構如何影響導熱率。另外，對電的導體來說，自由電子與聲子的碰撞造成能量的轉移，自由電子的運動使導體的導熱率增加。我們也設計了實驗，來了解自由電子的運動對增加導熱率的貢獻。

### 二、實驗方向與項目

實驗計劃包括導體及非導體二大部份，非導體部份主要討論物質的物態結構對聲子的散射關係。導體部份主要討論自由電子對導熱率的影響。

#### (一)非導體實驗

在非導體中，晶格振動之能量可為量子化。此量子化之能量被稱為聲子( *phonon* )，其和電磁波中之光子乃互為對比。晶體中之彈性波係由聲子組成，晶體中之熱振動即熱激聲子。聲子在晶格的運動即造成熱能的傳播。固體之導熱係數  $K$ ，對沿一具有溫度梯度  $dt / dx$  之長桿流動之穩態導熱式為：

$$q = -K A \cdot \frac{dt}{dx}$$

$q$  代表熱傳遞率， $dt/dx$  為熱流動方向的溫度梯度，根據氣體動力論，於某些近似情況下，我們可知導熱係數之式如下：

$$K = C V \ell$$

式中  $C$  表單位容積之容量， $V$  是平均的粒子速度， $\ell$  是一粒子於兩次碰撞間之平均自由路程。此結果應用於聲子上，以  $C$  作聲子的熱容量， $V$  作聲子速度， $\ell$  表聲子之平均自由路程，聲子平均自由路程主要乃決定於兩個過程，即晶體結構幾何之散射及其他聲子所生之散射。聲子間之碰撞所造成反跳過程是降低固體導熱率的重要因素。但固態結構的幾何效應於限制平均自由路程上也是重要因素，不同結構的固態物質對聲子的散射也都不同，所以造成不同的導熱率。聲子本身有其振盪頻率，而晶格中之原子也因其本身質量的大小及與周圍原子的結合鍵多寡，及每個結合鍵的方向和結合力，也有其振盪之頻率。若幾何結構愈簡單，構成原子種類愈少，則此物質之振盪系統愈單純，聲子被散射的機會就愈小。反之亦然。

在非導體中，我們設計了三項實驗計劃。

- (1) 純硫異溫冷卻實驗
- (2) 硫與硒混合實驗
- (3) 硫與碳混合實驗

#### (二) 導體實驗

金屬導體因自由電子的運動能攜帶大量的熱，對於金屬的導熱性質有很大的影響。在導體實驗的設計中，我們希望藉著外來電子流強度及方向的影響，來觀察金屬導體導熱性質的變化。

### 三、純物質試驗的推論與預測

在此項試驗中，我們將採用硫做為樣品，硫晶體的一般結構是斜

方晶體，將熔化的硫冷卻，即可使原來較自由之硫原子逐漸排列於晶格上而形成硫的固態結構。當熔化的硫在較高的溫度使其凝固時，液態硫可緩緩釋出凝固熱，亦即硫原子本身有較長的時間來將其本身固定於晶格上，形成較完整之晶體結構。如果熔化的硫在較低的溫度使其冷卻凝固時，液態硫就可在較短的時間內釋出凝固熱，硫原子必須在較短的時間內固定於晶格上，則其整齊度必較高溫凝固的固態硫為差，結構整齊，簡單的晶格有較為單純的振頻系統，固定頻率的聲子也較容易通過，使其自由路程增加，可使導熱率增加。結構有缺陷，複雜的晶格，其晶格的振頻不一致，在頻率不同及鍵角方向不同的地方，聲子就容易被散射，使其自由路程減少，而造成導熱率的下降，所以將硫熔解後，使其在從高溫至低溫各個不同的溫度下冷卻，凝固所製成的樣品，其導熱率應隨冷卻溫度之下降而下降。

#### 四、混合物導熱之推論與預測

晶格的結構愈簡單其聲子被散射的機會也愈小，導熱率也就愈大，純物質的晶格中，若夾帶有其他物質，在此含有異物的部分會形成鍵方向的不正常和振盪頻率的不同，造成聲子散射的機會增加，使導熱率下降，二種純質相混合時，當一種純質含少量的另一種純質，其導熱率就會下降，隨著此純質的含量漸增，晶格的亂度也隨著增加，混合物的導熱率就隨著下降，但當原物質含量漸減而趨於零時，物質的亂度也慢慢減小，而導熱率就逐漸上升了。

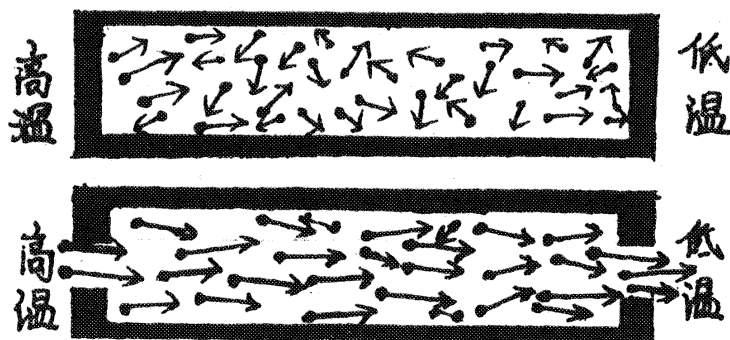
#### 五、金屬導體導熱之推論與預測

自由電子可在晶格中飄移，而增金屬導體的導熱率，自由電子的某些行為在某些情況下，其運動性質和氣體非常相近，其導熱性質也可以應用氣體分子的性質來做推論。

下圖(一)中，氣體中之導熱係數之通常定義乃指不許質量流動之情況。圖中之管子兩端封閉，不讓分子流出。若溫度梯度存在時，則速度於平均質心速度之相互撞擊之各對分子將流向右方，低於平均速度者則流向左方。右邊高者之小濃度梯度便因此成立，致使淨質量輸送

為零。而使淨能量自熱處得以送至冷端。

圖(一)中，氣體分子於一管壁無阻力之長開口管中流動之情形。氣體分子間之彈性碰撞過程，並不改變氣體之動量與能量通量。因於每次碰撞中，相撞粒子之質心速度與能量均保持不變，故能量由左至右並不受溫度梯度驅策，此時熱阻係數為零而導熱係數則無限大。



## 六、實驗裝置

在實驗上，我們設計了一套實驗裝置，其中包括(一)主機(二)控制系統(三)測溫系統(四)熱源供應系統(五)真空絕熱系統。

茲分別介紹如下：

(一)主機：

1. 集熱銅
2. 定溫熱交換器
3. 支柱
4. 活動環
5. 頂蓋
6. 縱向活動臂
7. 橫向活動臂
8. 測溫固定器

主機功能：

實驗的樣品置於定溫交換器上，利用熱供系統使集熱器 1 定好初溫，並使熱交換器定好定溫，當控制系統使活動環 4 下降

時，固定於其上的集熱銅 1 也隨之下降，當 1 和樣品接觸時，熱流便由 2 經樣品導至 1，當固定的時間到達，4 便開始上升，使 1 與樣品分離，經由 2 之定溫，1 之初溫及末溫及所定時間和樣品之大小尺寸，來計算樣品的導熱率。

#### (二) 控制系統

主機因置於真空槽中，不易直接操作，主機的控制，須靠一數位式三動作無線電控制系統始能完成。

本系統包括一發訊機，一接收器和三個伺服機。三個伺服機分別控制活動環的上下運動，機械臂的第一關節之縱向（上下）運動和第二關節橫向運動。控制活動環可控制樣品的導熱時間，控制機械臂可測定熱交換器的定溫和集熱器的初溫和末溫。

#### (三) 測溫系統

測溫系統包括感溫棒連接線和一數字顯示之電子溫度計，其精密度為 $\pm 2\%$ ，為測定初溫、末溫和定溫的重要儀器。

#### (四) 熱源供應系統

熱源供應系統為一可控制水溫之保溫瓶及將水導入及導出熱交換器之導管，保溫瓶構造如下：

9. 外殼
10. 絕熱瓶
11. 瓶內導管
12. 加熱器
13. 水銀溫度計
14. 自動控溫計
15. 電源線
16. 溫度反應器
17. 出水管

#### (五) 真空絕熱系統

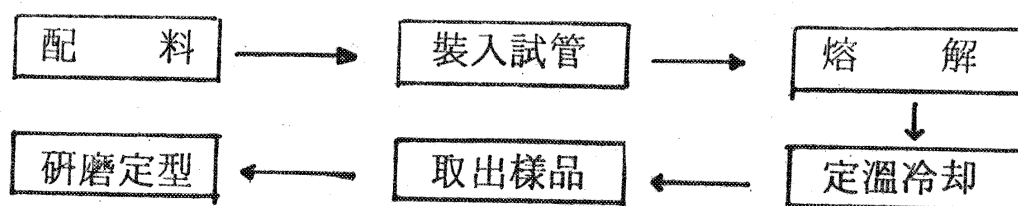
本系統包括一部真空抽氣機、抽氣導管、真空槽和真空計，主機置於真空槽內，真空槽為抵抗內部真空時的外來強大壓

力，所以除最外層爲一玻璃槽外，內部更加以鋁合金之幾何結構以確保安全。實驗時真空槽內部之壓力大約  $8 \sim 9 \text{ cmHg}$ ，可將主機的散熱降到最低的限度。

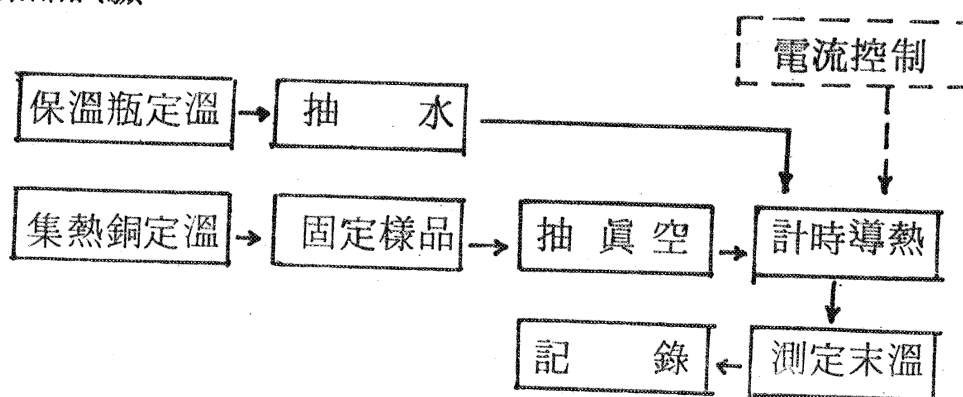
## 七、實驗過程

實驗包括樣品製作和樣品試驗。

(一)樣品製作如下圖所示。



(二)樣品試驗



個別試驗程序

### 1. 純硫異溫樣品試驗

(1)將硫(s)置入試管中加熱，使其熔化，依實驗的經驗須一邊加熱一邊轉動，使內部受熱均勻逐漸熔化，當硫恰完全熔化時，即停止加熱。然後將試管塞上木塞，浸入水中冷却。不同的樣品浸在不同的溫度的水中，水的溫度範圍是  $100^{\circ}\text{C}$ ， $95^{\circ}\text{C}$ ， $90^{\circ}\text{C}$ …… $10^{\circ}\text{C}$ ， $5^{\circ}\text{C}$ ， $0^{\circ}\text{C}$ ， $-5^{\circ}\text{C}$ ， $-10^{\circ}\text{C}$ ， $-15^{\circ}\text{C}$ ， $-20^{\circ}\text{C}$ 使之製造出不同溫度冷却的硫晶體。 $0^{\circ}\text{C}$ 以下水溫可以碎冰和 *NaCl* 混合產生。

待硫冷却後，取出樣品，初自試管中取出，形狀爲圓

柱形，對此圓柱形之硫以砂布加以垂直方向的研磨，使硫成爲一圓柱的薄片，然後以銼刀將表面研磨光滑。

(2)測試樣品導熱率前首先必須先做好定溫工作，包括定集熱銅之初溫和定保溫瓶的初溫，通常將集熱銅的初溫定在 $23^{\circ}\text{C}$ ，水溫測定在 $63^{\circ}\text{C}$ ，保溫瓶內 $63^{\circ}\text{C}$ 的水經尼龍的導管流至定溫熱交換器時，可使熱交換器的溫度固定，即成爲穩定的熱源。真空抽氣機在實驗時可將真空槽內的氣壓降至 $8\sim 9\text{ cm Hg}$ ，使集熱銅的溫度散失降到最低。樣品置於熱交換器上後，即抽真空，然後使水流經熱交換器。利用操作機械臂測得熱交換器的溫度不再上升時，即下降活動環使集熱銅和樣品密度，樣品夾在集熱銅和熱交換器之間，利用集熱銅和熱交換器間的溫差造成樣品的溫度梯度而傳導熱流。導熱的時間定爲4分鐘，當時間到時，活動環上升，導熱停止，然後再操作機械臂測得導熱後集熱銅的末溫，原始數據的記錄與實驗同時進行，內容包括第幾次實驗，日期、天氣、第幾號樣品和室溫、水溫、初溫和末溫。

## 2. 硫與硒、硫與碳的混合物樣品試驗

計算好不同莫耳分率比的硫與硒（或碳）的克數，將硫與硒或碳的粉末混合製造各種不同比例的混合物，充分混合後置於試管中加熱，熔解後使其在室溫中冷卻，然後取出樣品，磨製和定型與前段的純硫樣品相同，混合物樣品的導熱測試方法也和純硫樣品測試方法相同。

## 3. 電導體（金屬）樣品試驗

(1)金屬片如銅、鋅、鋁經研磨後即成爲導體樣品。

(2)導體樣品的實驗過程較非導體樣品的實驗程序多一項電流控制。也就是當樣品導熱時，電子流也流經樣品，其流量或強或弱，且也分成由熱交換器流向集熱銅和由集熱銅流向熱交換器兩種不同的電子流方向。

## 八、原始數據：略

## 九、整理與計算

樣品製成後可測得之資料為厚度(  $\Delta X$  )截面積(  $A$  )，經測驗後又可得：集熱銅之初溫(  $T_1$  )、末溫(  $T_2$  )及熱交換器之定溫(  $T_0$  )，如何利用上述資料求得樣品的導熱率，我們可由導熱率的基本公式來看：

$$q = -K A \frac{\Delta T}{\Delta X} \dots\dots\dots(一)$$

此式可表出在穩定的溫度梯度(  $\Delta T / \Delta X$  )的熱流量。但是實際的實驗中 $\Delta T$ 由(  $T_1 \sim T_0$  )逐漸變為(  $T_2 \sim T_0$  )，而沒有穩定的溫度梯度，於是我們必須用更精確的計算方式來解決，由熱流量的定義可知熱量為熱流量與時間的積分。

$$\Delta H = \int_{t_0}^t q dt \dots\dots\dots(二)$$

(二)式中的  $q$  以(1)帶入得

$$\Delta H = \int_{t_0}^t \left[ -K A \frac{\Delta T}{\Delta X} \right] dt \dots\dots\dots(三)$$

因 $K$ 、 $A$ 、 $\Delta X$ 之值不隨時間變化，且 $\Delta T$ 可表為集熱銅的溫度(  $T$  )與熱交換器溫度(  $T_0$  )的差，即

$$\Delta T = T - T_0 \dots\dots\dots(四)$$

將 $-K A / \Delta X$ 提出並帶入(四)可得

$$\Delta H = \frac{-K A}{\Delta X} \int_{t_0}^t ( T - T_0 ) dt \dots\dots\dots(五)$$



集熱銅的溫度  $T$  顯然為時間 ( $t$ ) 之函數

$$T = f(t)$$

其函數可以推論方式求出：

導熱前的溫度

$$a_0 = T_1$$

一單位時間的上升溫度為  $\Delta T$ ，則一單位時間後之溫度為

$$a_1 = T_1 + \Delta T$$

二單位時間的上升溫度為  $r \Delta T$ ，則二單位時間後之溫度為

$$a_2 = T_1 + \Delta T + r \Delta T = T_1 + \Delta T + (1 + r) \Delta T$$

同理

$$a_3 = T_1 + \Delta T (1 + r + r^2)$$

⋮  
⋮

$$a_n = T_1 + \Delta T (1 + r + r^2 + \dots + r^{n-1})$$

$$= T_1 + \Delta T \left( \frac{1 - r^n}{1 - r} \right)$$

如此即導出  $T$  與  $t$  之關係為

$$T = T_1 + \Delta T \left( \frac{1 - r^t}{1 - r} \right) \dots\dots\dots(六)$$

$\Delta T$  與  $r$  之值的確定也可以推論方式求出

由(六)式可知  $T$  值為  $T_1$  加上一等比級數

由於

$$| (T_1 - T_0) | > | (T_2 - T_0) | \quad (\text{溫差逐漸減小})$$

可知  $r$  之範圍為

$$0 < r < 1$$

即

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} a_n &= T_1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \Delta T \left( \frac{1 - r^n}{1 - r} \right) \\ &= T_1 + \frac{\Delta T}{1 - r} \dots\dots\dots(七) \end{aligned}$$

即  $T$  之極限為

$$T_1 + \frac{\Delta T}{1 - r}$$

(六)式與(七)式之物理意義為：

當  $t = 0$  時，溫度為  $| ( T_1 - T_0 ) |$  其值最大，根據(一)式，其  $q$  最大，溫度上升最快。隨著  $t$  值的增加  $| T - T_0 |$  的值逐漸減小， $q$  也逐漸減小，溫度上升趨於緩慢，當  $t \rightarrow \infty$  時， $| T - T_0 | \rightarrow 0$ ， $q$  值極小，溫度  $T$  逐漸接近  $T_0$ ，溫度的上升呈漸近線，而  $T$  之極限為  $T_0$ 。

故由(六)式知導熱 4 分鐘後的溫度為：

$$T_2 = T_1 + \Delta T \left( \frac{1 - r^4}{1 - r} \right) \dots\dots\dots(八)$$

由(七)式知若導熱時間無窮盡的溫度為：

$$T_0 = T_1 + \Delta T \left( \frac{1}{1 - r} \right) \dots\dots\dots(九)$$

解(八)(九)聯立方程組可得：

$$r = \sqrt[4]{\frac{T_0 - T_2}{T_0 - T_1}}$$

$$\Delta T = (T_0 - T_1) \left( 1 - \sqrt[4]{\frac{T_0 - T_2}{T_0 - T_1}} \right)$$

令  $T_0 - T_2$  (定溫 - 末溫) =  $p$

$T_0 - T_1$  (定溫 - 初溫) =  $q$

則  $r = \sqrt[4]{\frac{p}{q}}$   $\Delta T = q \left( 1 - \sqrt[4]{\frac{p}{q}} \right) \dots\dots\dots(+)$

將(+)式帶入(五)式，並且時間由 0 到 4 分鐘

$$\Delta H = \frac{-KA}{\Delta X} \int_0^4 \left[ (T_1 - T_0) + \Delta T \left( \frac{1-r^t}{1-r} \right) \right] dt$$

$$\Delta H = \frac{-KA}{\Delta X} \left( \int_0^4 (T_1 - T_0) dt \right) + \frac{\Delta T}{1-r} \int_0^4 (1-r^t) dt$$

$$\Delta H = \frac{-KA}{\Delta X} \left[ \int_0^4 (T_1 - T_0) dt + \frac{\Delta T}{1-r} \left( \int_0^4 dt - \int_0^4 r^t dt \right) \right]$$

$$\Delta H = \frac{-KA}{\Delta X} \left[ 4(T_1 - T_0) + \frac{\Delta T}{1-r} \left( 4 - \frac{1}{\ln r} (r^4 - 1) \right) \right]$$

$$\Delta H = \frac{KA}{\Delta X} \left[ 4(T_0 - T_1) - \frac{\Delta T}{1-r} \left( 4 - \frac{1}{\ln r} (r^4 - 1) \right) \right]$$

故得  $K$  值

$$K = \frac{\Delta H \Delta X}{A \left\{ 4(T_0 - T_1) - \frac{\Delta T}{(1-r)} \left[ 4 - \frac{1}{\ln r} (r^4 - 1) \right] \right\}}$$

$$K = \frac{\Delta H \Delta X (1 - r)}{4A(T_0 - T_1)(1 - r) - A\Delta T \left(4 - \frac{1}{\ln r} (r^4 - 1)\right)} \dots\dots (1)$$

(1)式就是我們所推出，針對我們實驗裝置的導熱率計算公式，其中  $r$  與  $\Delta T$  可用(1)式的定義求出， $A$  與  $\Delta X$  可直接獲得於樣品資料，而  $\Delta H$  為集熱銅的吸收熱量，計算法為

$$\Delta H = ms \Delta t$$

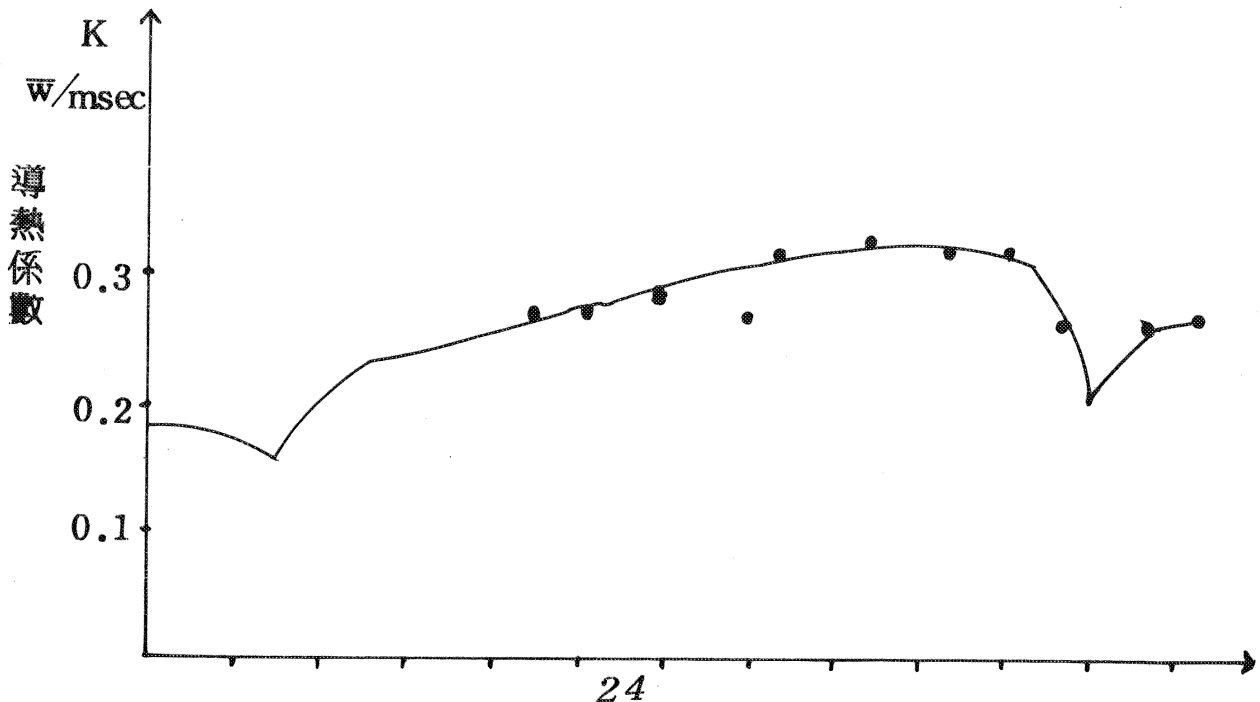
$$\Delta H = m \cdot s \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2)$$

(2)式中， $m$  表示集熱銅的質量，經我們測量，其值為 185 ， 44g  
 $s$  表示集熱銅的比熱，其值為  $0.385 J / g^{\circ}C$   
 $(T_2 - T_1)$  表集熱銅的溫度改變量，其值隨樣品各異。

## 十、個別實驗結果

樣品的製作及試驗所成之原始數據，經過整理、計算後，求得各樣品的導熱係數，然徐再將此導熱係數與製作樣品的方法綜合整理後，所得曲線表如下：

(一)純硫樣品試驗曲線圖：

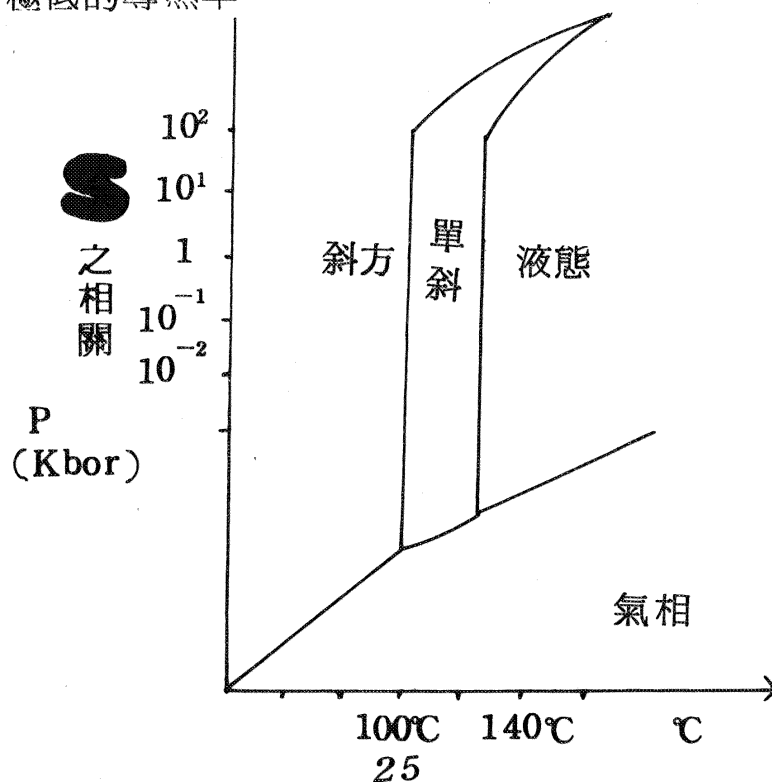


此圖中的曲線顯然與預測的曲線不完全相同，茲特點如下：

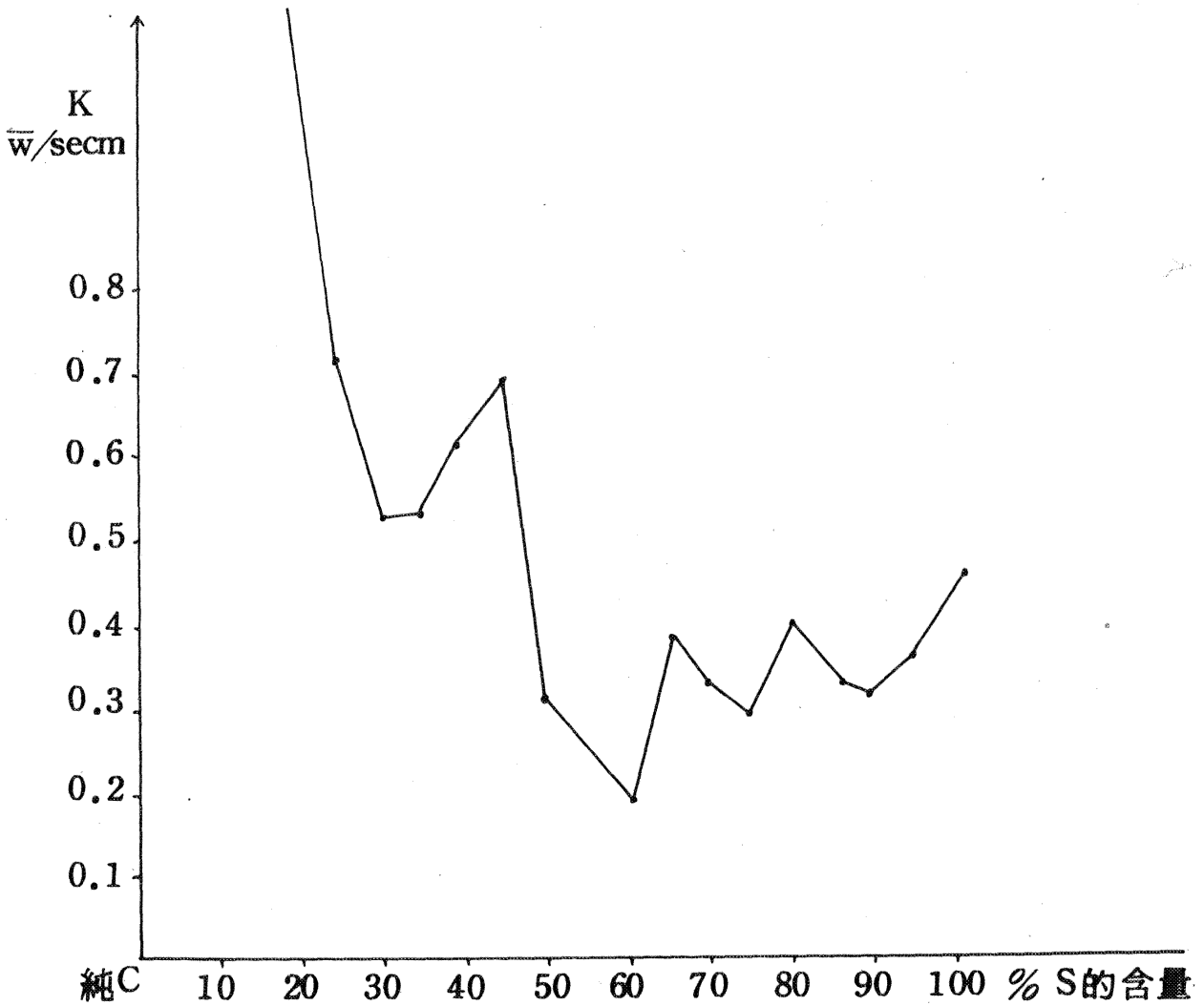
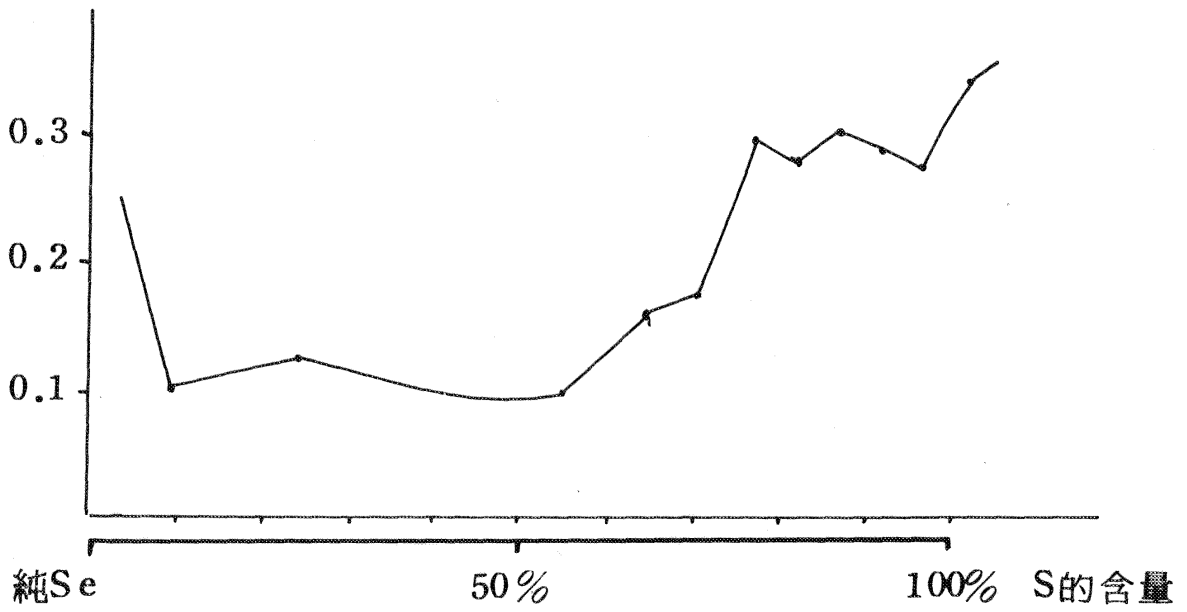
1. 我們可清楚地發現  $-5^{\circ}\text{C}$  至  $80^{\circ}\text{C}$  的曲線與預測的大致相同，硫的導熱係數隨上升溫度而上升。
2. 在  $90^{\circ}\text{C}$  時，硫的導熱率急遽下降，到  $95^{\circ}\text{C}$  時導熱率又上升到穩定的曲線。
3. 在  $-5^{\circ}\text{C}$  時導熱率也有急速下降的情況發生， $-5^{\circ}\text{C}$  以下冷却所製成的樣品導熱率都相當低。

第 1 項符合我們的推論，第 2、3 項的成因我們可在硫的相圖上找到答案。

在硫的相圖上我們可以知道在  $1\text{ atm}$  下，硫的熔點為  $119^{\circ}\text{C}$ ， $119^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$  之間冷却形成的硫，其晶體結構為單斜晶體， $90^{\circ}\text{C}$  以下冷却可形成斜方晶體，其相的轉捩點恰好與實驗所得的導熱率轉換點相同。 $90^{\circ}\text{C}$  以下導熱率緩緩上升，到了  $90^{\circ}\text{C}$  時硫處於斜方結構和單斜結構之間，晶格趨於混亂，聲子散射機會較大，待轉為單斜硫後，導熱率則大約相等。 $-5^{\circ}\text{C}$  以下的樣品導熱率極低的原因也起因於硫結構的轉變，當我們製作  $-5^{\circ}\text{C}$  以下冷却的樣品時，發現其形成為有彈性的硫，其分子為不規則的鏈狀，結構混亂，所以造成極低的導熱率。



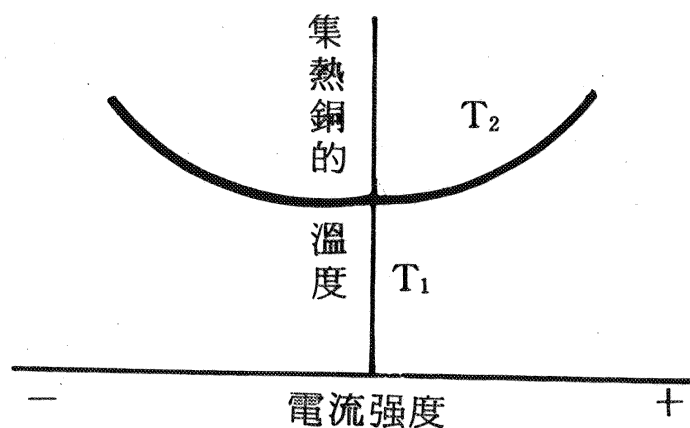
(二) 硫與硒(碳)的混合物曲線圖：



混合的曲線圖如所預測，以純物質的導熱率最高，少量的其他物質就可破壞原物質的導熱率，二種物質的混合物大約各含50%時導熱率最低，然後向二個純物質的方向爬昇。但很明顯的，導熱率的上升和下降並不如預測一般地成爲平滑曲線，有時 $K$ 值下降（上升）緩慢，有時急速，甚至靠近中部時， $K$ 值也有突出之情形。這是由於二種物質相混合時，雖然會彼此破壞對方的結構，但在某些比例的混合時，也可能形成較有利、較有次序的結構或特別亂的結構而影響導熱率。我們也發現 $K$ 值最低點大約在中部而靠近導熱較低的純物質 $K$ 值。

### (三)電導體實驗

金屬導體 $L$ 在 $A$ 與 $B$ 之間，利用 $T_0 - T_1$ 之溫差即可傳導熱量。若 $T_0 > T_1$ 熱流方向爲由 $A$ 至 $B$ ，此時若加一由 $A$ 至 $B$ 的電子流，則自由電子可攜帶大量熱能而增加 $A$ 至 $B$ 方向的導熱率。而電子流方向相反時，則必減少其導熱率。但由於電熱效應的影響，所以我們無法做正確的 $K$ 值的增加或減少的計算。但經我們以 $Zn$ 、 $Sn$ 、 $Pb$ 、 $Al$ 等樣品的試驗，整理出集熱銅溫度上升度數和電流強度關，如下圖：



在同一電流強度之下，電子流流向集熱銅使之上升的度數遠大於電子流向定溫熱交換器使集熱銅上升的度數。前者起因於電子流的幫助導熱，及電子與聲子的碰撞所產生之熱效應，後者則完全來自電的熱效應。

## 十一、討論

### (一)純硫樣品試驗

我們預測各種不同的溫度下所形成的硫晶體導熱率時祇考慮硫能形成一種晶體，而愈高溫所形成的晶體愈完美整齊。愈低溫所形成的晶體其中的錯位也愈多，晶格愈不整齊，所以硫的導熱率預測曲線中，導熱係數  $K$  和冷凝溫度  $T$  成正比。但是實際的實驗值導熱係數曲線與預測曲線並不完全相同。首先我們發現若曲線圖以  $50^{\circ}\text{C}$  為中心，溫度降低時導熱係數一如預測般的緩緩下降，到了  $0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$  時導熱率突然有較明顯的下降， $-5^{\circ}\text{C}$  以下的導熱率都相當低。關於此現象，我們製作樣品時發現， $-5^{\circ}\text{C}$  以下冷卻的樣品具有彈性，也就是形成彈性硫，其分子結構是類似鏈狀的不規則組織，對聲子的散射效應非常顯著，所以造成低的導熱率。另外，以  $50^{\circ}\text{C}$  為中心溫度升高，導熱率也隨著逐漸增高，但是在  $90^{\circ}\text{C} \sim 95^{\circ}\text{C}$  時，則出現一個轉折，而且轉折處也有導熱率的下降。經過我們尋找資料答案，終於在硫的相圖上得到解釋。在硫相圖上我們發現在一大氣壓下，硫的熔點為  $119^{\circ}\text{C}$  並且在大約  $95^{\circ}\text{C} \sim 119^{\circ}\text{C}$  之間形成單斜晶體， $95^{\circ}\text{C}$  以下形成斜方晶體。此相的轉折點，恰好符合導熱率的轉折點，也就是同一種物質以不同的晶體結構來排列，其導熱率也不同。而正好在轉折點上形成的硫因為溫度分佈的不均，所以其結構就變為有單斜亦有斜方結構的混亂狀態，所以也造成了極低的導熱率。

### (二)混合物樣品試驗

硫和碳與硫和硒二項混合物樣品的實驗導熱曲線，和預測曲線也有些不同，和預測相同的是曲線愈接近中部就愈下陷。但不同點為它並不是平滑的，而呈鋸齒狀，有時較接近中部的甚至還會突出，關於此點，我們預測時是依照一般的粗略狀況去判斷一比例愈近 1 : 1 結構愈亂，而導熱率愈低。但是實驗的混合物樣品依各種不同比例製成，有時在某些比例混合時，會產



生較有次序的排列或更混亂的結構而使導熱曲線不再呈平滑曲線了，但是大致上仍然符合預測。此外我們發現導熱曲線的最低點是靠近純物質導熱率較低的一邊。

### (三)金屬導體電導熱實驗

在金屬導體的實驗前，我們預測了外來電流的介入，可以改變金屬的導熱性質。但是有一些困難使我們無法做精確的定量分析，首先，自由電子的運動雖然可以攜帶熱量，但是自由電子和聲子碰撞，也就是電流的熱效應，卻無法避免。另外，外來的電流，也可將導熱系統的熱量帶出而影響精確性。由實驗而得來的曲線是我們綜合銅、鋁、鋅、鉛等金屬樣品的測試後而得之結果，我們可以看到當無電子流通過時，集熱銅所吸收的熱量。當其他條件一樣，而電子流由熱交換器經由樣品流向集熱銅時，集熱銅吸收之熱量較無電子流時為多，隨著電流強度的增加，曲線漸漸升高，且其斜率也隨著增加。當電流由集熱銅經由樣品流向熱交換器時，集熱銅的吸收熱量雖然也較無電流通過時為高，但是相同的電流強度下，其吸收的熱量顯然少於當電子流向集熱銅時所吸收的熱量。關於此現象我們就可以知道當電子流向集熱銅時，自由電子攜帶了熱交換器的熱，然後在集熱銅釋出造成了明顯的集熱銅吸收熱量的增加。所以此時造成集熱銅熱量增加的主要因素(一)樣品本身的導熱(二)電子流攜帶的熱量(三)電的熱效應。而電子流向熱交換器時集熱銅熱量增加的因素則有(一)樣品本身的導熱(二)電的熱效應。此時溫度上升因素少一項，並且由於電子的逆流，降低了樣品的導熱率，所以熱量的上升就較少了。

## 十二、總 結

在大約七十項非導體樣品和導體樣品的一連串實驗和計算整理後，我們對物質的導熱原理，得到許多的了解：非導體的導熱率決定於晶格的結構問題，結構愈單純、完美，導熱率也愈高，金屬導體的導熱，由於自由電子費米氣體的協助，自由電子活動性愈好的金屬即電

阻小的金屬，其導熱率也愈高。所以我們可以知道爲什麼金屬的導熱率大於非金屬。此外，由純硫的試驗中，我們可以發現：純硫在相的轉變上也明顯的影響熱的傳導。所以日後若有未知材料，經導熱測試後發現也有和硫類似的導熱係數曲線出現，我們便可推測該材料在某一特定的溫度下有相的轉變，所以物質的導熱性質，若不考慮溫度的影響，則決定物質導熱率的因素計有：

- (一)固態結構形式(幾何形狀)。
- (二)固態結構的各物質成分。
- (三)晶格的完美性(瑕疵、錯位的多寡)。
- (四)自由電子的多寡和移動率(導電率的大小)。

透過以上各點的精密分析，我們就可以適當的分析和了解，物質固態結構的導熱性質。

評語：完成一套實驗裝置，可用於探討固態物質的導熱性質及影響物質導熱率的因素，研討的題目較爲艱深，作者尚能細心設計實驗儀器，研究紀錄完整，資料豐富，思考亦頗深入周密，就高中二年級同學言之，頗爲難得。