

霍爾效應及鍺晶體的導電載子的密度

目的:

1. 理解霍爾效應原理，並利用霍爾效應求出樣品(n-type or p-type)載子之極性、濃度及移動率。
2. 利用霍爾效應觀察並了解不同溫度對載子濃度的影響。
3. 由導電率測量半導體能隙。

原理:

在 1879 年，霍爾(Edwin H. Hall)利用於導體中導入電流，將導體置於外加磁場中量測其感應霍爾電壓(Hall Voltage)來判斷傳導載子的極性與濃度，稱為霍爾效應(Hall effect)。此方式廣泛的被利用於半導體中參雜載子性質與濃度的量測上。

半導體:

一般的物質分為導體(metal)與絕緣體(Insulator)，決定物質是否為導體的原因在於價帶和傳導帶之間的能隙(energy gap)大小，絕緣體的能隙通常很大，導致價帶中的電子無法輕易的上升到傳導帶，所以絕緣體不導電，但有些物質的能隙不大，平常電阻極大，但若添加一些特定雜質就可使其電阻減小，這些物質稱為半導體(semiconductor)如圖 1 所示。加入雜質的種類可以決定半導體的導電載子，例如：在四價的矽中添加五價的磷，因為磷比矽多一顆電子，所以形成許多自由電子，故導電載子為電子，此種半導體稱為 n-type 半導體；若添加的雜質為三價的硼，硼比矽少一顆電子而形成電洞，故導電載子為電洞，稱為 p-type 半導體。

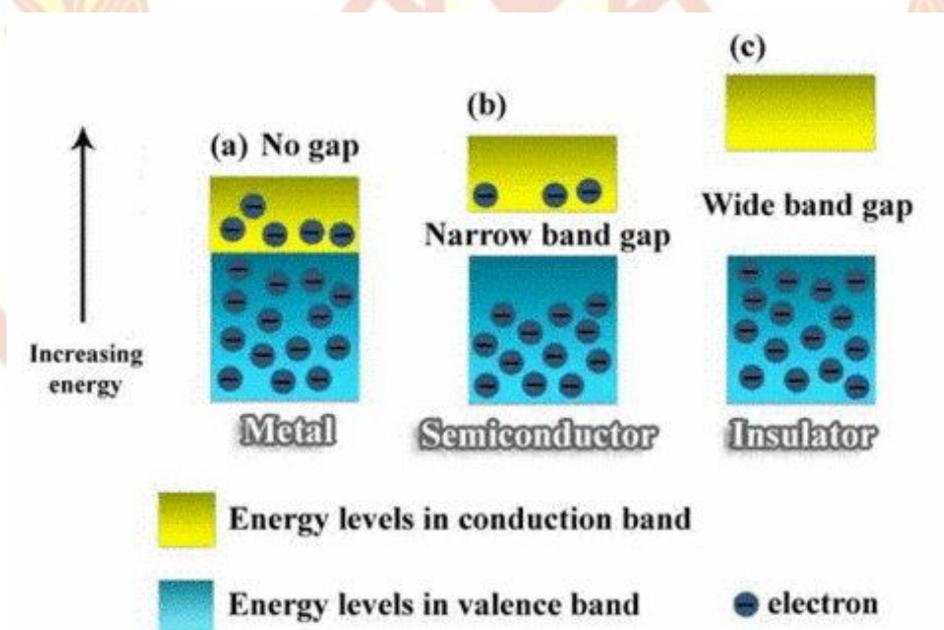


圖 1

霍爾效應(Hall Effect):

在+Z 方向施磁場，+X 方向施加電壓，當電流通過導體後，電流載子受磁力的影響而往其中一邊堆積，因此產生側向的電壓，當穩定狀態時，磁力與側向電壓產生之電力達到平衡，此時的側向電壓就稱為霍爾電壓(VH)。如圖 2 所示

以 P - t y p e 半導體為例，達平衡時：

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0 \rightarrow E_y = v_{dx} B_z$$

$$v_{dx} \text{ 為載子飄移速率: } v_{dx} = \frac{J_p}{qp}$$

(q 為載子帶電量(+e), p 為電洞濃度, J_p 為電流密度)

所以霍爾電壓 (V_H) 為：

$$V_H = E_y W = v_{dx} B_z W = \left(\frac{J_p}{qp} \right) B_z W = R_H J_p B_z W$$

R_H 為霍爾係數 W 為晶體 y 方向，定義 $R_H \equiv \frac{1}{qp}$ ，故

$$\left. \begin{aligned} v_{dx} &= \frac{V_H}{WB_z} \\ v_{dx} &= \frac{J_x}{qp} = \frac{I_x}{(qp)(Wd)} \end{aligned} \right\} \text{合併得: } \frac{I_x}{(ep)(Wd)} = \frac{V_H}{WB_z} \quad (1)$$

e 為 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ d 為樣品厚度 0.001m

所以可由上式求得電洞的濃度 (p)，反之 N-type 半導體也相同。

利用霍爾電壓求移動率 (mobility)

定義載子移動率 $\mu_p \equiv v_{dx} / E_x$

$$\left. \begin{aligned} v_{dx} &= \frac{J_x}{qp} = \frac{I_x}{(qp)(Wd)} \\ v_{dx} &= \mu_p E_x = \mu_p \frac{V_x}{L} \end{aligned} \right\} \text{合併得: } \mu_p = \frac{I_x L}{qp V_x W d} \quad (2)$$

同理也可求得 N-type 半導體的移動率: $\mu_n = \frac{I_x L}{qn V_x W d}$

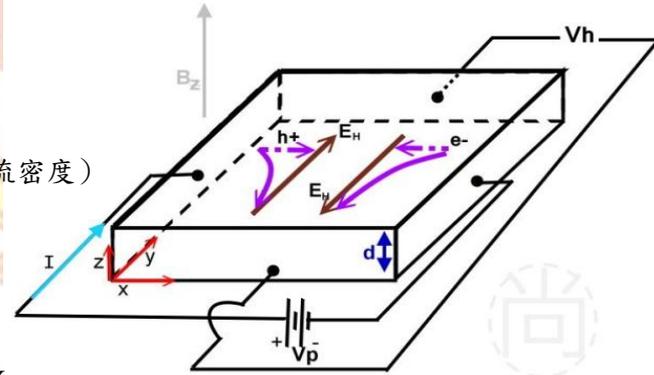


圖 2

溫度與霍爾效應的關係:

半導體中添加雜質後就可導電，溫度為室溫時，半導體導電主要的載子為雜質提供的電子或電洞；P型與N型半導體在室溫時經由加入些許雜質後產生的自由電子或電洞導電。當溫度稍微提高時，傳導子與物質中的電子碰撞機率增加，電阻也提高；但當溫度增加到一定程度時，原先在價帶的電子將有部分能由晶格震動中得到足夠的能量而躍遷到電導帶，變成導電載子，導電載子濃度增加提升導電率 σ 。

假設電導帶與價帶之間的能隙為 E_g 。當溫度為 T 時，導電子數量 n 與晶片溫度之關係為波茲

曼分布 $n(T) \propto e^{-\frac{E_g}{kT}}$ ，又導電率 σ 正比於導電子數量 n ，因此中導電率與溫度的關係為:

$$\sigma_{(T)} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3)$$

其中 k 為波茲曼常數 $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ， T 為絕對溫度。

E_g 為energy gap。

因為歐姆定律 $V = IR$ ，又 $R \propto \frac{1}{\sigma}$ ，所以可得 $V \propto \frac{1}{\sigma}$ 。

將上式取自然對數後化簡得

$$\ln(\sigma) = \ln(\sigma_0) - \frac{E_g}{2kT} \Rightarrow \ln(V) = \ln(V_0) + \frac{E_g}{2k} \left(\frac{1}{T}\right)$$

在SI制中， $\ln(V) - \frac{1}{T}$ 圖 fitting 直線的斜率為 $\frac{E_g}{2k}$ 。

由(3)式可見，如果量得晶片電導率 $\sigma(T) \propto \frac{\text{current across sample I}}{\text{Voltage across sample V}}$ ，可以在 $\log(\sigma) - 1/T$ 圖中

找出障隙為 E_g ，此能隙為晶體特性，和雜質內、密度等無關。因為半導體的升溫使價帶的電子躍昇到傳導帶，使電流載子增加，因為霍爾電壓與電流載子濃度成反比

$$V_H = \left(\frac{J_p}{qp}\right) B_z W \propto \frac{1}{p}$$

故溫度升高會使得霍爾電壓下降如右圖3所示。一般而言，不論n-或p-type，當溫度升到一定程度後，電流主要的載子為電子，因此作出的圖形不論n-或p-type霍爾電壓的方向都一樣。

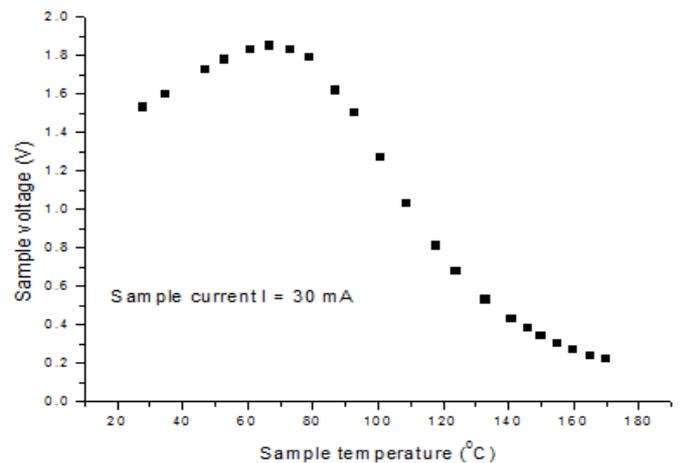


圖 3

儀器及附件:

120Vac-12Vac 變壓器，霍爾晶片模版，P-type 霍爾晶片，N-type 霍爾晶片，DMM，高斯計，強力磁鐵。

霍爾晶片模版:

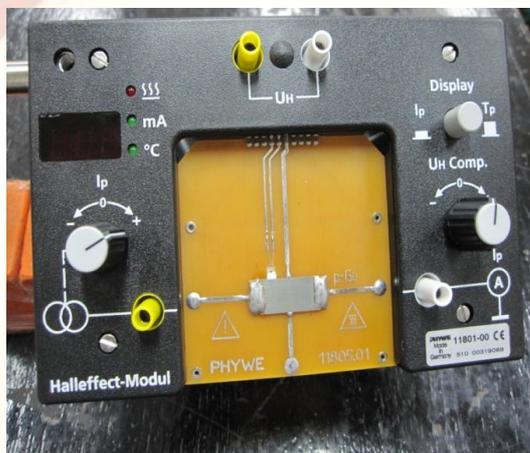


圖 4



圖 5

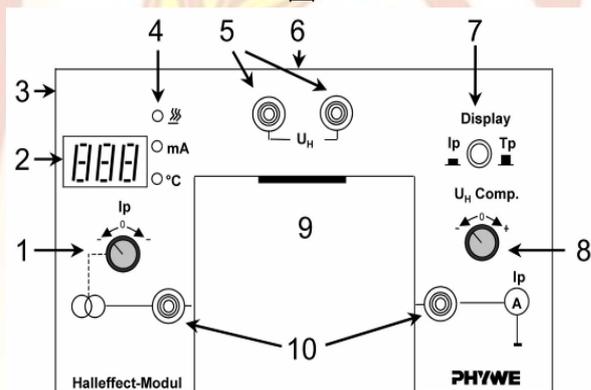


圖 6

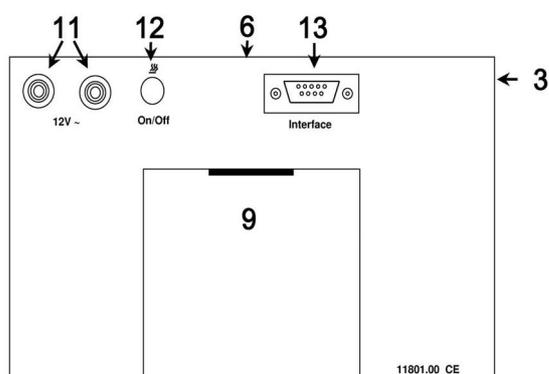


圖 7

儀器正面(圖 4、圖 6)

1. 輸入電流控制旋鈕
2. 溫度/電流值顯示器
3. 支撐臂
4. 加熱/電流顯示/溫度顯示燈號
5. 霍爾電壓量測接孔
6. 探針放置孔
7. 溫度/電流顯示切換開關
8. 霍爾電壓校正鈕
9. 霍爾效應晶片插槽
10. 樣品電壓量測接孔

儀器反面(圖 5、圖 7)

11. 電源輸入端
12. 加熱開關
13. RS232 介面接頭

步驟:

(一)、電流與霍爾電壓的關係

1. 將高斯計霍爾探針在強力磁鐵中央，調整磁鐵至約 2500G 後，將磁鐵中央對準晶片板，裝置如右圖 8 所示。
2. 輸入電流為 +30 mA，等待約 5 秒，
利用 DMM 記下霍爾電壓及對應輸入電流值。
3. 每次減少電流 5 mA，記下霍爾電壓和對應輸入電流值。
4. 重複步驟 2 直到輸入電流為 -30 mA。繪製霍爾電壓對電流的關係圖，找出直線的區段求其斜率，利用公式(1)算出載子密度 p 。

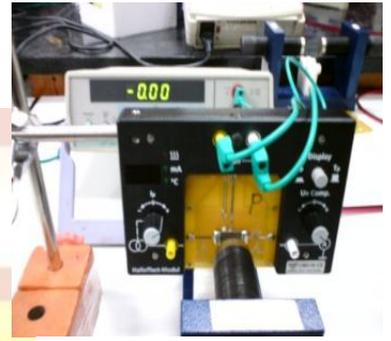


圖 8

(二)、量測溫度與樣品電壓的關係

1. 移除強力磁鐵，DMM 量測為樣品電壓，如圖 9。
2. 輸入電流調為 0 mA，記下樣品電壓，此為背景電壓。
3. 輸入電流調整為 30 mA。
5. 按下模板後的加熱鈕，加熱至 170°C 自動停止，
每降溫 2°C 時記錄樣品電壓
6. 繪出溫度與正確樣品電壓(扣掉背景電壓)關係圖。
7. 作 $\ln(V) - \frac{1}{T(K)}$ ，求出直線部分斜率，利用式(3)



圖 9

計算 Energy gap。

(三)、量測溫度對霍爾電壓的關係

1. 將高斯計霍爾探針在強力磁鐵中央，調整磁鐵至約 3000G 後，將磁鐵中央對準晶片板，裝置如右圖 8 所示。
2. 輸入電流為 30 mA，並調整晶片模板上的
"U_H Comp." 旋鈕使霍爾電壓歸零。
(若無法調到零，可先記下當時的 V_H，
最後在減掉這個背景電壓。)
3. 按下模板後的加熱鈕，加熱至 170°C 自動停止，
紀錄降溫時霍爾電壓對溫度關係，
並作出霍爾電壓對溫度的關係圖。

(四)、更換不同半導體，重複(一)~(三)步驟。並比較 2 半導體的不同。

問題:

1. 在 $\ln(V) - \frac{1}{T}$ 圖中，只有溫度較高的部分才會是直線，原因為何?
2. Part2 與 Part3 中，我們假設背景電壓是常數，但實際上背景電壓隨溫度而變，請問除了忽略外有什麼方法可以解決?不是常數的原因為何?
3. 若磁場方便改變與測量，利用現有的儀器還可以設計出哪些實驗?