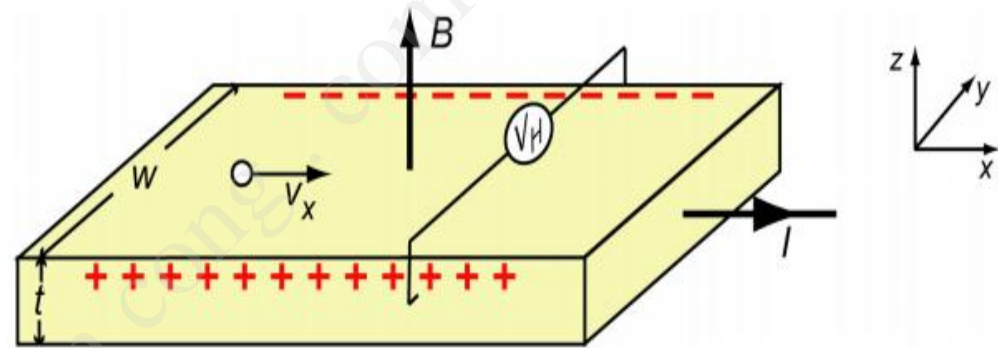


NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT ĐIỆN CỦA MÀNG MỎNG BẰNG PHÉP ĐO HALL

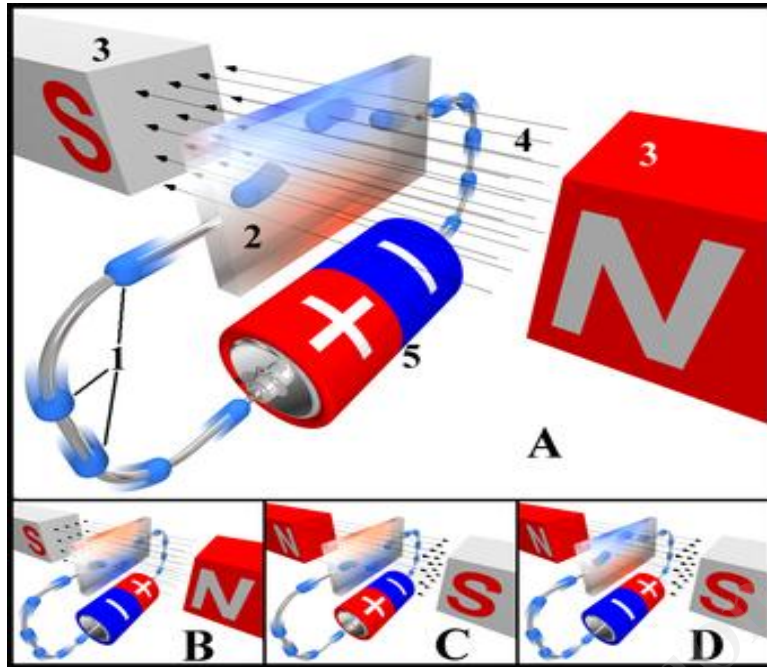
Lịch sử của Hiệu ứng Hall

Năm 1879, một sinh viên trẻ người Mỹ - Edwin H. Hall - đã khám phá ra hiện tượng: khi cho dòng điện một chiều, cường độ I , chạy qua một bản mỏng làm bằng vàng và được đặt trong từ trường vuông góc với bề mặt của bản thì người ta nhận được một hiệu điện thế giữa hai mặt bên của bản. Hiện tượng này sau đó được gọi là *hiệu ứng Hall*.



Hiệu ứng Hall sau này đã trở thành một công cụ hết sức quan trọng trong lĩnh vực nghiên cứu các chất bán dẫn trong Vật lý, công nghiệp nhằm xác định điện tích của hạt tải, nồng độ hạt tải của các chất bán dẫn, độ linh động của hạt tải, v.v...

Cơ chế hiệu ứng Hall trên một thanh Hall kim loại



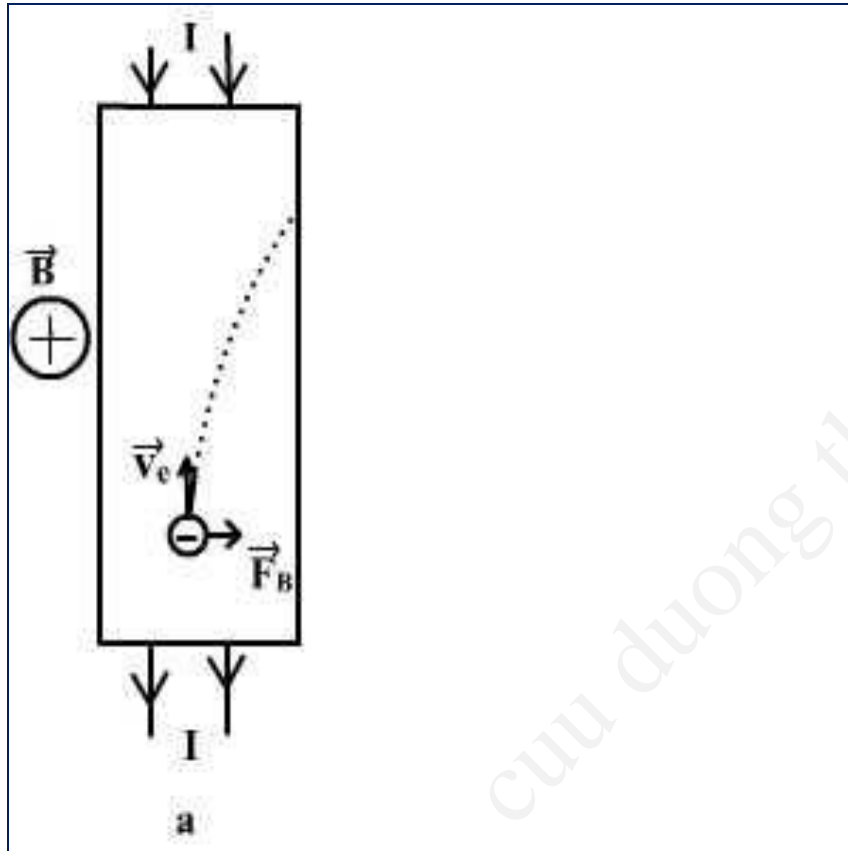
1. Electron
2. Thanh Hall.
3. Nam châm.
4. Từ trường.
5. Nguồn điện.

Trên các hình B, C, D, chiều của nguồn điện và/hoặc từ trường được đổi ngược.

Màu đỏ trên thanh Hall thể hiện sự tập trung của điện tích dương, còn **màu xanh**, ngược lại, là nơi tập trung điện tích âm.

Khi chạy qua từ trường, các điện tích chịu lực Lorentz bị đẩy về một trong hai phía của thanh Hall, tùy theo điện tích chuyển động đó âm hay dương.

Cơ chế hiệu ứng Hall trên một thanh Hall kim loại



a) Khi vừa cho từ trường tác dụng, các electron bị dồn sang cạnh phải. Đường chấm chấm là quỹ đạo mới của electron.

b) Một điện trường hướng từ trái sang phải dần được hình thành và tác dụng lực điện lên electron. Khi sự cân bằng giữa lực Lorentz và lực điện được hình thành, electron sẽ tiếp tục chuyển động thẳng.

Sự tập trung các điện tích về một phía tạo nên sự tích điện trái dấu ở 2 mặt của thanh Hall, gây ra hiệu điện thế Hall.

TÍNH TOÁN DỰA TRÊN HẠT TẢI ELECTRON

Xét mật độ dòng electron:

$$\vec{j}_e = -ne\vec{v}_e \quad (1)$$

Nếu có từ trường ngoài tác dụng, $\vec{B} \neq \vec{0}$ và trạng thái cân bằng đã được thiết lập thì vận tốc trung bình của các electron là:

$$\vec{v}_e = -\mu_e \vec{E} - \mu_{eH} \left(\vec{v}_e \wedge \vec{B} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \vec{j}_e &= -ne \left(-\mu_e \vec{E} - \mu_{eH} \left(\vec{v}_e \wedge \vec{B} \right) \right) \\ &= ne\mu_e \vec{E} + ne\mu_{eH} \left(\vec{v}_e \wedge \vec{B} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Với tán xạ đàn hồi trong mọi cơ chế tán xạ, ta có:

$$r_n = \frac{\mu_{eH}}{\mu_e} = \frac{\mu_{hH}}{\mu_h} = r_p \quad (4)$$

Nghĩa là:

$$r_n = r_h = r \quad \text{Độ lớn của } r \text{ phụ thuộc vào cơ chế tán xạ.}$$

Xét trường hợp $r = 1$

$$\Rightarrow \vec{j}_e = ne\mu_e \left[\vec{E} + \left(\vec{v}_e \wedge \vec{B} \right) \right] \quad (5)$$

Do từ trường ngoài hướng theo trục z, nên $B_z = B, B_x = B_y = 0$

➡ Vận tốc trung bình của các electron được khai triển :

$$\begin{cases} \bar{v}_{ex} = -\mu_e E_x - \mu_{eH} \bar{v}_{ey} \cdot B = \mu_e (-E_x - \bar{v}_{ey} \cdot B) \\ \bar{v}_{ey} = -\mu_e E_y + \mu_{eH} \bar{v}_{ex} \cdot B = \mu_e (-E_y + \bar{v}_{ex} \cdot B) \end{cases} \quad (6)$$

Và:

$$\begin{cases} j_{ex} = ne\mu_e (E_x + \bar{v}_{ey} \cdot B) \\ j_{ey} = ne\mu_e (E_y - \bar{v}_{ex} \cdot B) \end{cases} \quad (7)$$

Khai triển phương trình mật độ dòng theo vận tốc trung bình và bỏ qua các số hạng chứa B^2 vì giả thiết là từ trường yếu :

$$\begin{aligned} j_{ex} &= ne\mu_e \left(E_x + \bar{v}_{ey} \cdot B \right) = ne\mu_e \left[E_x + \mu_e \left(-E_y + \bar{v}_{ex} \cdot B \right) B \right] \\ &= ne\mu_e \left(E_x - \mu_e E_y B \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} j_{ey} &= ne\mu_e \left(E_y - \bar{v}_{ex} \cdot B \right) = ne\mu_e \left[E_y - \mu_e \left(-E_x - \bar{v}_{ey} \cdot B \right) B \right] \\ &= ne\mu_e \left(E_y + \mu_e E_x B \right) \end{aligned} \quad (9)$$

TÍNH TOÁN DỰA TRÊN HẠT TẢI LÀ LỖ TRỐNG

Xét mật độ dòng của các lỗ trống:

$$\vec{j}_h = pe\vec{v}_h \quad (10)$$

Vận tốc trung bình của lỗ trống: $\vec{v}_h = \mu_h \vec{E} + \mu_{hH} (\vec{v}_h \wedge \vec{B})$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \vec{j}_h &= pe \left(\mu_h \vec{E} + \mu_{hH} (\vec{v}_h \wedge \vec{B}) \right) \\ &= pe\mu_h \vec{E} + pe\mu_{hH} (\vec{v}_h \wedge \vec{B}) \end{aligned} \quad (11)$$

Khi $r_n = r_h = r$

$$\vec{j}_h = pe\mu_h \left[\vec{E} + \left(\vec{v}_h \wedge \vec{B} \right) \right] \quad (12)$$

Do từ trường ngoài hướng theo trục z, nên $B_z = B, B_x = B_y = 0$

Tính toán tương tự trường hợp hạt tải là electron, ta có :

$$\bar{v}_{hx} = \mu_h \left(E_x + \bar{v}_{hy} \cdot B \right) \quad (13)$$

$$\bar{v}_{hy} = \mu_h \left(E_y - \bar{v}_{hx} \cdot B \right)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} j_{hx} = pe\mu_h \left(E_x + \bar{v}_{hy} \cdot B \right) \\ j_{hy} = pe\mu_h \left(E_y - \bar{v}_{hx} \cdot B \right) \end{cases} \quad (14)$$

Trong bán dẫn, khi cả electron và lỗ trống cùng tham gia vào sự dẫn điện, thì mật độ dòng toàn phần:

Ta có:
$$\vec{j} = \vec{j}_e + \vec{j}_h \quad (17)$$

$$j_x = j_{ex} + j_{hx} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &= ne\mu_e (E_x - \mu_e E_y B) + pe\mu_h (E_x + \mu_h E_y B) \\ &= (ne\mu_e + pe\mu_h) E_x + (-ne\mu_e^2 + pe\mu_h^2) E_y B \end{aligned}$$

$$j_y = j_{ey} + j_{hy} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &= ne\mu_e (E_y + \mu_e E_x B) + pe\mu_h (E_y - \mu_h E_x B) \\ &= (ne\mu_e + pe\mu_h) E_y + (ne\mu_e^2 - pe\mu_h^2) E_x B \end{aligned}$$

Khi sự cân bằng giữa lực Lorentz và lực điện trường được thiết lập thì lúc này dòng điện sẽ không còn bị lệch nữa, các hạt tải điện chỉ di chuyển theo trục x và $j_y = 0$

→ Từ (19), ta có
$$E_y = \frac{pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2}{ne\mu_e + pe\mu_h} E_x B \quad (20)$$

↪
$$j_x = (ne\mu_e + pe\mu_h) E_x + (pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2) \left(\frac{pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2}{ne\mu_e + pe\mu_h} \right) E_x B^2$$

$$\Leftrightarrow j_x = (ne\mu_e + pe\mu_h) E_x$$

$$\Leftrightarrow E_x = \frac{j_x}{ne\mu_e + pe\mu_h} \quad (21)$$

Thay (21) vào (20), ta được:

$$E_y = \frac{pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2}{(ne\mu_e + pe\mu_h)^2} j_x \cdot B \quad (22)$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_y}{a} = \frac{pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2}{(ne\mu_e + pe\mu_h)^2} \frac{I}{a \cdot d} B$$

Hiệu điện thế theo trục y, U_y , chính là hiệu điện thế Hall, U_H

$$\Rightarrow U_H = \frac{pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2}{(ne\mu_e + pe\mu_h)^2} \frac{I \cdot B}{d} \quad (23)$$

$$\Leftrightarrow U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

Ta có biểu thức của hằng số Hall:

$$R_H = \frac{pe\mu_h^2 - ne\mu_e^2}{(ne\mu_e + pe\mu_h)^2} = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2} \quad (24)$$

Trong trường hợp dẫn điện do electron (kim loại hoặc bán dẫn loại n) thì $p = 0$:

$$\Rightarrow R_e = -\frac{1}{ne} < 0 \quad (25)$$

Ở bán dẫn loại p thì $n = 0$, do đó:

$$\Rightarrow R_h = \frac{1}{pe} > 0 \quad (26)$$

Ở nhiệt độ đủ cao thì sự dẫn điện tạp chất là không đáng kể so với sự dẫn điện riêng. Khi đó, $n \approx p$ và từ (24), ta tính được:

$$R_H = \frac{\mu_h^2 - \mu_e^2}{ne(\mu_e + \mu_h)^2} \quad (27)$$

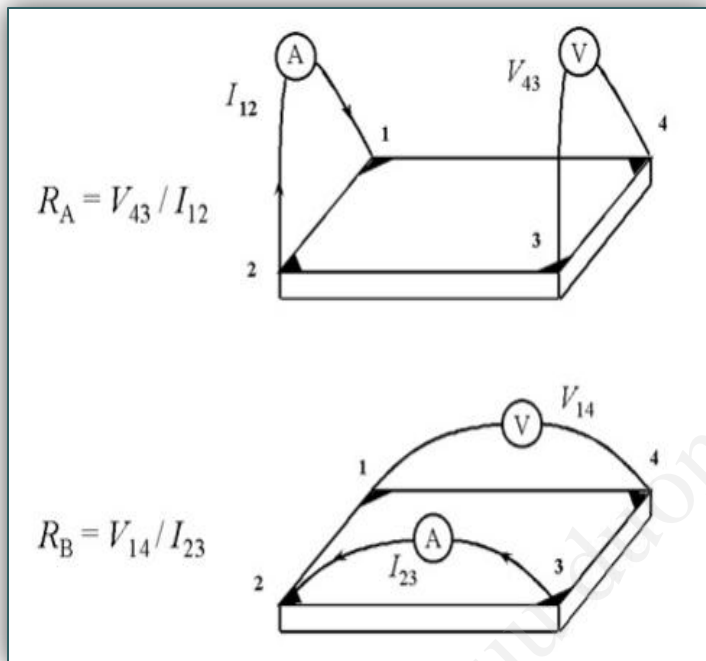
➡ *Dấu của hằng số Hall phụ thuộc vào sự chênh lệch về độ linh động của lỗ trống và electron.*

PHÉP ĐO HIỆU ỨNG HALL VỚI CÁCH BỐ TRÍ THEO PHƯƠNG PHÁP van der Pauw

Đo điện trở suất

Đo nồng độ và độ linh động của hạt tải

Đo điện trở suất của màng: $\rho = R_S \times d$

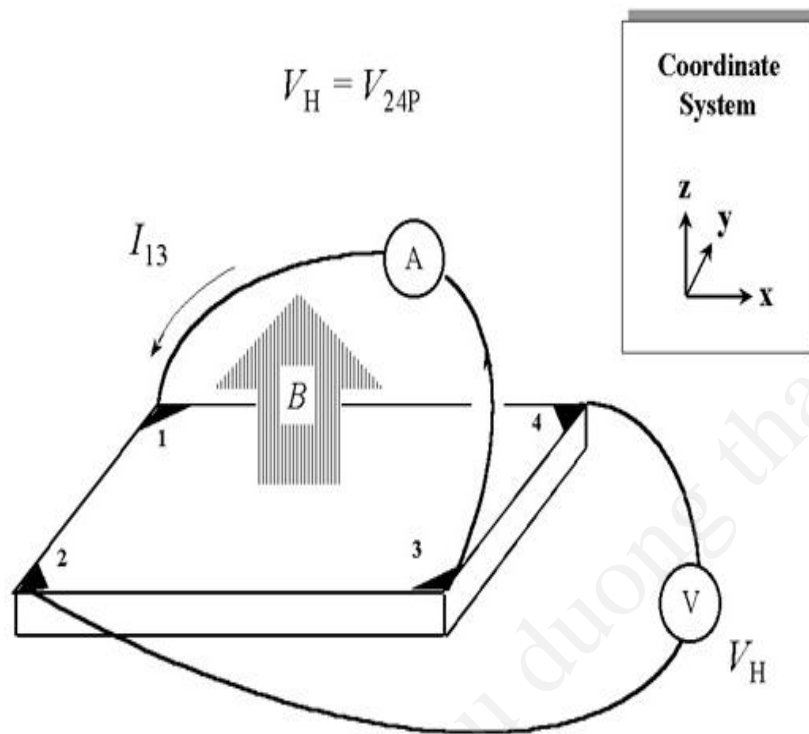


Mối quan hệ giữa các điện trở đặc trưng với điện trở mặt R_S của màng được van der Pauw chứng minh và gọi là phương trình van der Pauw:

$$\exp(-\pi R_A / R_S) + \exp(-\pi R_B / R_S) = 1$$

Sơ đồ bố trí cách đo các điện trở đặc trưng để tính điện trở mặt

Đo nồng độ và độ linh động hạt tải:



$$n_s = nd,$$

$$n_s = IB/q|V_H|.$$

$$\mu = |V_H|/R_S IB$$

$$= 1/(qn_s R_S).$$

Sơ đồ bố trí phép đo Hall bằng cấu hình van der Pauw

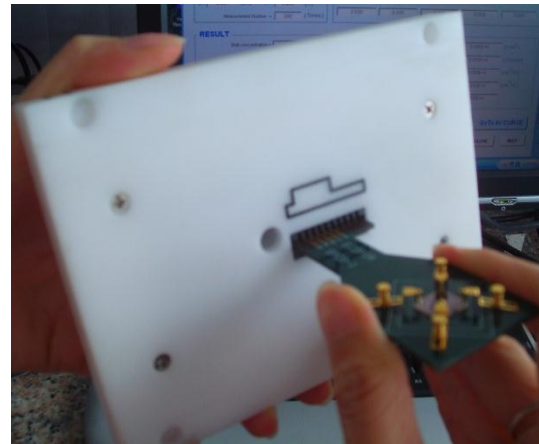
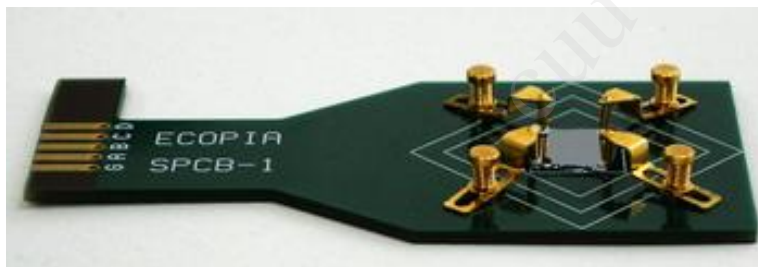
Van der Pauw Ecopia HMS-3000 Hall Measurement System



PCB Sample Holder
(6mm×6mm, 20mm×20mm)



Sample kit with 0.55 Tesla magnet supplied standard with the system.

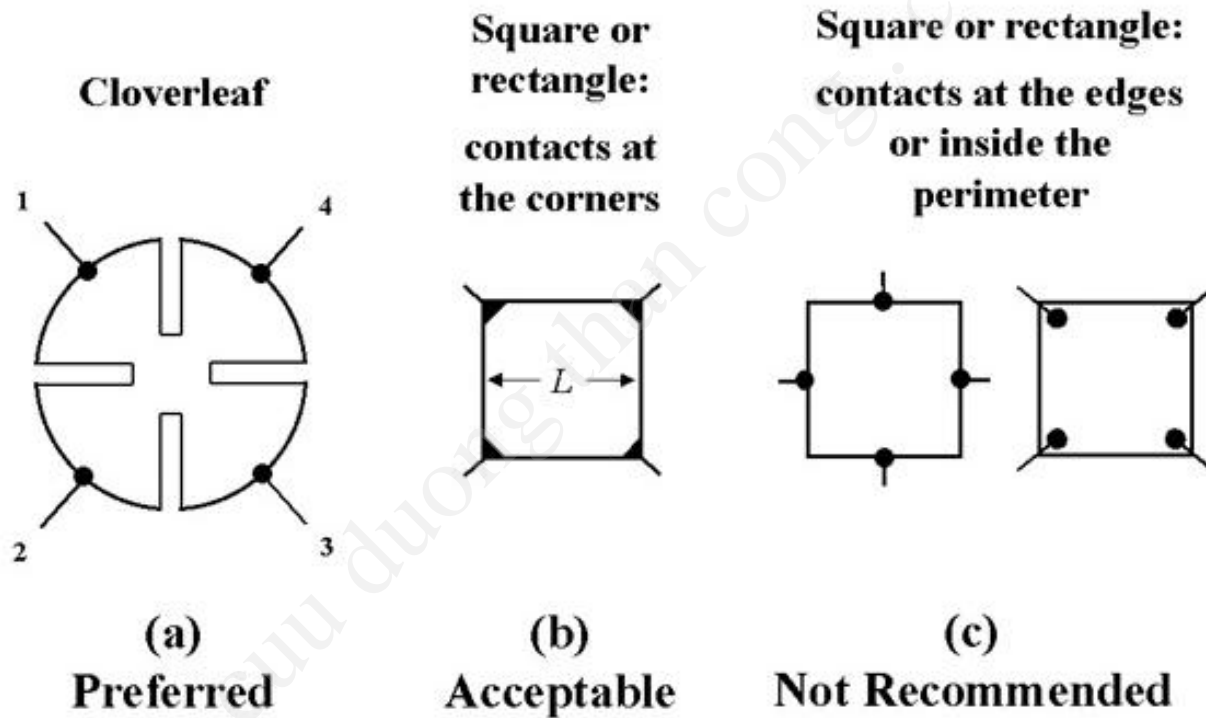


Thông số kỹ thuật của Hệ

Kích thước hệ (dài x rộng x cao):	320 x 300 x 105 mm
Trọng lượng:	7.7 kg
Kích thước mẫu:	6mm x 6mm 20mm x 20mm
Nhiệt độ đo:	300K, 77K (nito lỏng) – giữ nhiệt độ trong 15 phút
Vật liệu đo:	Tất cả các chất bán dẫn gồm Si, ZnO, SiGe, SiC, GaAs, InGaAs, GaN (có thể đo được cả loại P và loại N)
Kích thước nam châm vĩnh cửu:	Đường kính 50mm
Mật độ từ thông:	0.31T, 0.37T, 0.51T, 0.67T
Cường độ dòng vào:	1nA-20mA, hiệu điện thế: 13V
Tính di động (cm²/Volt-sec):	1~10 ⁷ (bao gồm cả nhiệt độ thấp)
Mật độ (cm³):	10 ⁷ ~10 ²¹
Đo điện áp	Trở kháng đầu vào: 2x10 ⁷ Dải điện áp đầu vào: +/- 12V
Dải điện trở suất	10 ⁻⁴ ~10 ⁷ Ohms-cm

Dạng hình học của mẫu đo Hall

Chuẩn bị mẫu





Chuẩn bị mẫu

MOUNTING SAMPLE ON BOARD (1)

 <p>1ST STEP</p> <p>Temp controlling soldering iron</p> <p>Cutting Knife</p> <p>Tweezer</p>	<p>User has to prepare for left cutting knife, tweezer, temperature control soldering iron, Sample board and InSn compound.</p>
 <p>Temp controlling soldering iron</p>	<p>When soldering, pls set up soldering iron on 350 – 400°C. It is best temp to solder. Too high and too low temperature is not so good to solder.</p>
 <p>Cutting wire, using knife</p>	<p>Cutting copper wire or gold wire with proper size to connect, using sharp knife.</p>




MOUNTING SAMPLE ON BOARD (2)

 <p>Cutting InSn compound minutely</p>	<p>Cutting InSn compound minutely. InSn can be usually used for electrical conductivity material. However, for some other samples, silver paste, carbon paste are recommended to improve ohmic contact.</p>
 <p>Soldering in four points, using iron.</p>	<p>Soldering in four points, using soldering iron. It has to be done in four points edge. And, if it was not annealed sample, annealing about 1min might be helpful.</p>
 <p>Pushing on four point soldering</p> <p>Transparent paper</p>	<p>After soldering in four points edge, four points should be flat, using transparent paper and tweezer. It might help to connect wire to soldering. Just push slightly above, seeing through transparent paper.</p>


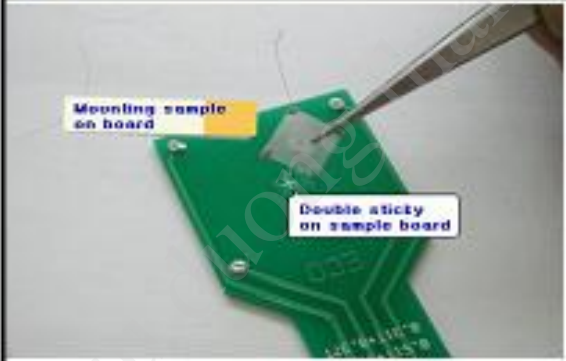

MOUNTING SAMPLE ON BOARD (3)

	<p>Four points soldering was finished as left pictures.</p>
	<p>Put the wire on soldering edge and then push it slightly using tweezer.</p>
	<p>Cutting copper wire or gold wire with proper size to connect, using sharp knife.</p>

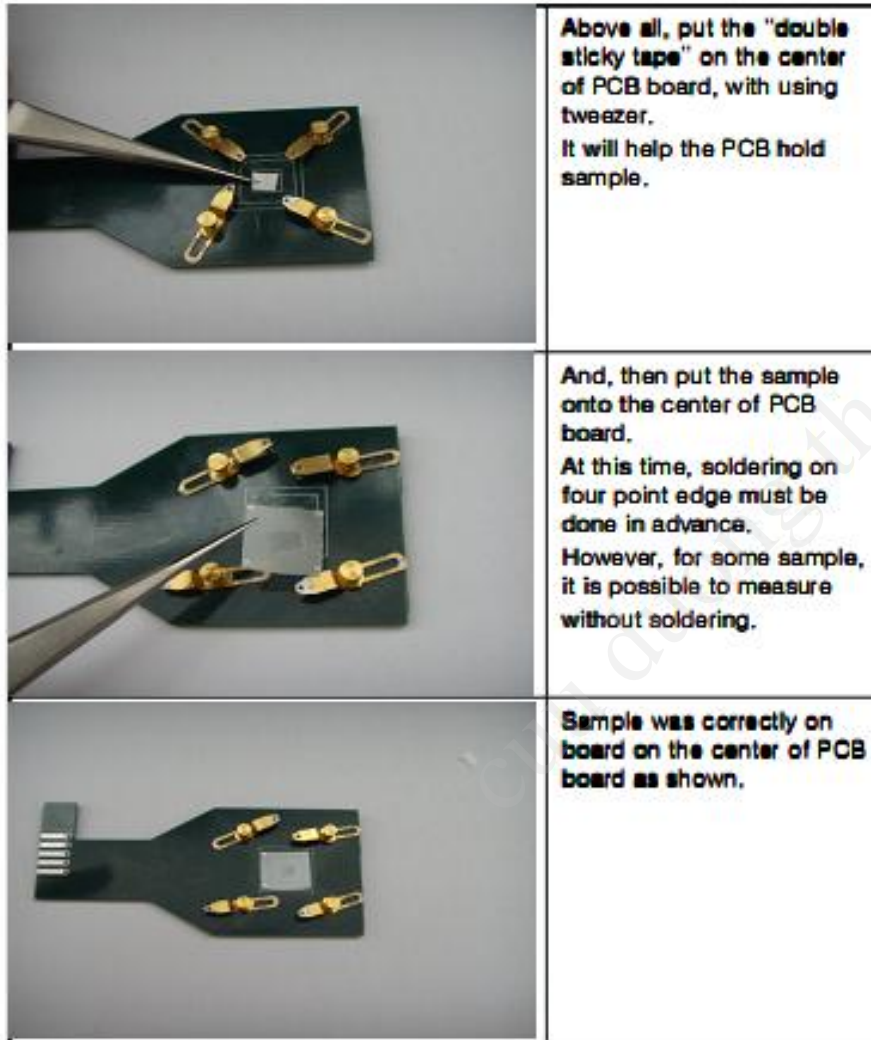
MOUNTING SAMPLE ON BOARD (4)

	<p>Connected successfully. Pull the wire slightly to check if it is really connected.</p>
	<p>Connect wire to soldering 4point each. It was successfully connected as left.</p>
	<p>Put the InSn compound on the sample not used. And, put the soldering iron onto InSn. It is melted as shown left.</p>

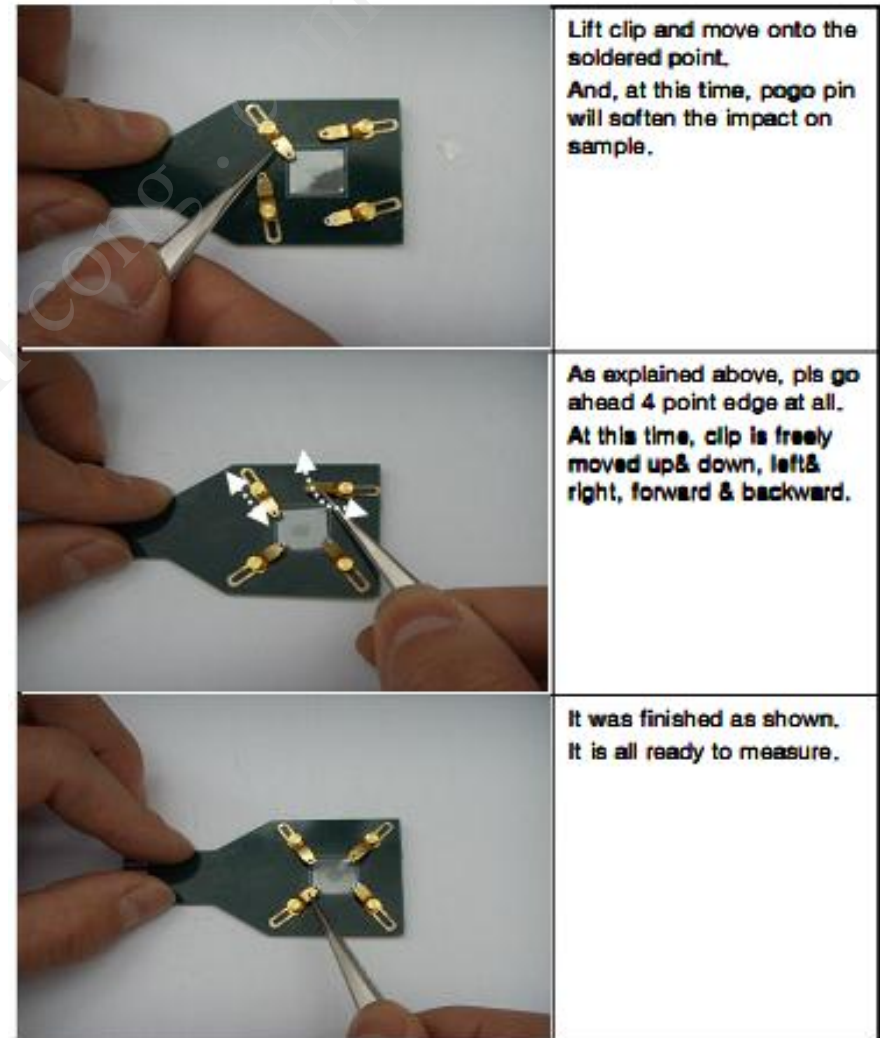
MOUNTING SAMPLE ON BOARD (5)

	<p>Put the soldering iron that has melted InSn compound onto four point as shown left. It's o.k to be proceeded in the first step in advance.</p>
	<p>Put the connected sample on the center of the PCB board. There is double sticky tape on the center of the sample. And, then connect wire on the soldering of 4point of PCB.</p>
	<p>It was finished to connect wire to soldering on 4points and mounting sample on PCB board.</p>

NEW CLIP TYPE SAMPLE BOARD (1)

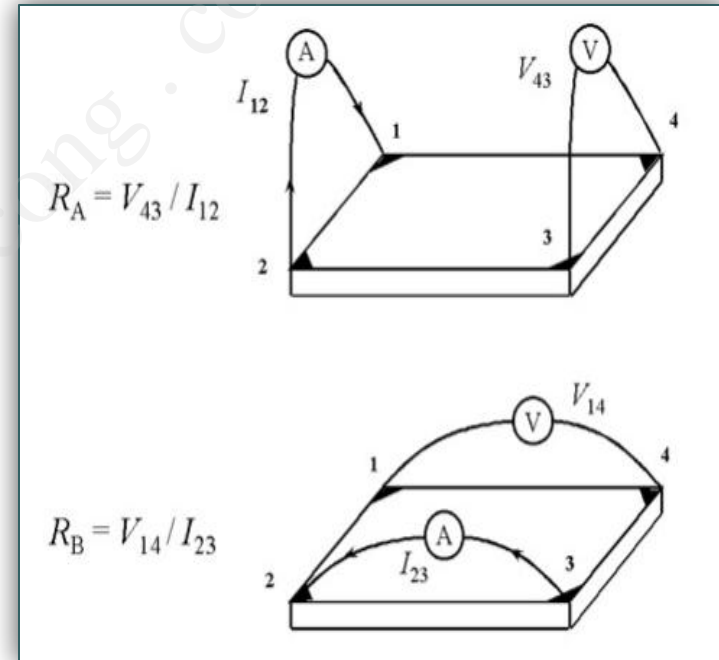


NEW CLIP TYPE SAMPLE BOARD (2)



Tiến hành đo các giá trị V:

- Đặt dòng điện I_{21} vào và đo hiệu điện thế V_{34} .
- Đảo chiều dòng điện (I_{12}) và đo hiệu điện thế V_{43} .
- Tiến hành tương tự với các giá trị còn lại (V_{41} , V_{14} , V_{12} , V_{21} , V_{23} , V_{32}).



Tính toán các số liệu:

Với 8 giá trị hiệu điện thế ghi nhận được, ta sẽ có 8 giá trị điện trở tương ứng (*tất cả đều là giá trị dương*):

- $R_{21,34} = V_{34}/I_{21}$
- $R_{12,43} = V_{43}/I_{12}$
- $R_{32,41} = V_{41}/I_{32}$
- $R_{23,14} = V_{14}/I_{23}$
- $R_{43,12} = V_{12}/I_{43}$
- $R_{34,21} = V_{21}/I_{34}$
- $R_{14,23} = V_{23}/I_{14}$
- $R_{41,32} = V_{32}/I_{41}$

I_{12} = dòng điện một chiều dương I đi vào tại điểm 1 và ra tại điểm 2. Tương tự đối với I_{23} , I_{34} , I_{41} , I_{21} , I_{14} , I_{43} , I_{32} (tính bằng Ampe, A).

V_{12} = hiệu điện thế một chiều đo giữa hai điểm 1 và 2 ($V_1 - V_2$) khi không có từ trường ($B=0$). Tương tự đối với V_{23} , V_{34} , V_{41} , V_{21} , V_{14} , V_{43} , V_{32} (tính bằng Volts, V).

Các điều kiện tiên quyết:

Sự nhất quán:

- $R_{21,34} = R_{12,43}$
- $R_{43,12} = R_{34,21}$
- $R_{32,41} = R_{23,14}$
- $R_{14,23} = R_{41,32}$

Định lý thuận nghịch:

$$R_{21,34} + R_{12,43} = R_{43,12} + R_{34,21}$$

$$R_{32,41} + R_{23,14} = R_{14,23} + R_{41,32}$$

Điện trở mặt của màng:

Theo Van der Pauw, điện trở mặt R_S của màng được xác định theo công thức sau:

$$\exp\left(-\pi \frac{R_A}{R_S}\right) + \exp\left(-\pi \frac{R_B}{R_S}\right) = 1$$

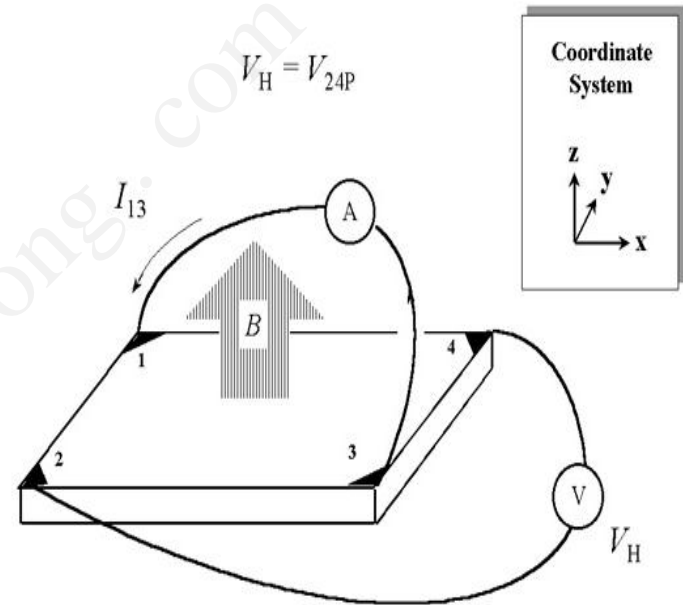
Trong đó:

$$\mathbf{R_A = (R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})/4}$$

$$\mathbf{R_B = (R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})/4}$$

Tiến hành đo hiệu điện thế Hall:

- Đặt một từ trường B dương
- Đặt dòng điện I_{13} vào hai điểm 1 và 3 và đo hiệu điện thế V_{24P}
- Đặt dòng điện I_{31} vào hai điểm 3 và 1 và đo hiệu điện thế V_{42P}
- Tương tự, đo hiệu điện thế V_{13P} và V_{31P} với dòng điện I_{42} và I_{24} tương ứng.
- Đảo chiều từ trường (B âm)
- Tương tự, đo hiệu điện thế V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} và V_{31N} với dòng điện I_{13} , I_{31} , I_{42} và I_{24} tương ứng.



Xác định loại và mật độ hạt tải mặt của mẫu

Với 8 giá trị điện thế đo ở trên, tính các giá trị V_C , V_D , V_E , V_F

$$\begin{aligned} \bullet V_C &= V_{24P} - V_{24N} & \bullet V_E &= V_{13P} - V_{13N} \\ \bullet V_D &= V_{42P} - V_{42N} & \bullet V_F &= V_{31P} - V_{31N} \end{aligned}$$

Nếu tổng $V_C + V_D + V_E + V_F$ dương mẫu là loại p, nếu tổng âm thì mẫu là loại n.

Mật độ hạt dẫn điện mặt (theo đơn vị cm^{-2}) được tính toán theo:

$$p_s = \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)}, \quad n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \right|$$

B là từ trường áp vào (G) và I là dòng điện DC (A).

Tính nồng độ và độ linh động của hạt tải điện:

- Nồng độ hạt tải điện (cm^{-3}) được xác định theo công thức sau nếu biết được độ dày của lớp màng trong thí nghiệm:

$$n = \frac{n_s}{d}; \text{ hoặc } p = \frac{p_s}{d}$$

- Độ linh động Hall ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) được tính bằng công thức:

$$\mu = \frac{1}{qn_s R_s}; \text{ hoặc } \mu = \frac{1}{qp_s R_s}$$

Một số vấn đề chính trong phép đo Hall

- ✓ Nhận diện mẫu: loại vật liệu màng, loại vật liệu đế, dạng hình học của mẫu, nhiệt độ đo mẫu, độ dày, data, vận hành đo.
- ✓ Giá trị dòng điện I và từ trường B .
- ✓ Đo điện trở mặt R_s ; đo điện điện trở suất ρ nếu biết độ dày d của mẫu.
- ✓ Đo mật độ hạt tải mặt n_s or p_s ; đo nồng độ hạt tải n or p nếu biết độ dày d của mẫu.
- ✓ Đo độ linh động Hall μ

Kết quả đo hiệu ứng Hall

DATE 06-23-2008 User_Name Ecopia Sample_Name G 50 tp 300 ck

I(mA) B D D_T MN T(K)
1.000 0.550 0.100 0.100 0 300

Nb u rho RH RHA RHB NS SIGMA DELTA ALPHA
-2.395E+21 3.097E+01 8.417E-05 -2.606E-03 -3.133E-03 -2.080E-03 -2.395E+16 1.188E+04 1.761E-02 9.514E-01

Vab Vbc Vac Vmac V-mac Vcd Vda Vbd Vmbd V-mbd
+I:
-1.966 -2.054 -0.045 -0.091 -0.053 -1.962 -2.049 -0.057 -0.045 -0.070
-I:
1.657 1.763 -0.228 -0.192 -0.223 1.660 1.750 -0.248 -0.250 -0.229

DATE 05-22-2010 User_Name Hanh Sample_Name E21

I(mA) B D D_T MN T(K)
1.000 0.550 0.400 0.100 1000 300

Nb u rho RH RHA RHB NS SIGMA DELTA ALPHA
-2.449E+20 2.493E+01 1.022E-03 -2.548E-02 -2.857E-02 -2.240E-02 -9.798E+15 9.782E+02 3.504E-02 1.796E-01

Vab Vbc Vac Vmac V-mac Vcd Vda Vbd Vmbd V-mbd
+I:
-2.194 -11.857 9.601 9.578 9.658 -2.202 -11.854 9.629 9.677 9.618
-I:
2.034 11.738 -9.747 -9.730 -9.807 2.044 11.738 -9.709 -9.763 -9.700

DATE 06-23-2008 User_Name Ecopia Sample_Name G 50 tp 300 ck

I(mA) B D D_T MN T(K)
1.000 0.550 0.100 0.100 0 300

Nb u rho RH RHA RHB NS SIGMA DELTA ALPHA
-2.395E+21 3.097E+01 8.417E-05 -2.606E-03 -3.133E-03 -2.080E-03 -2.395E+16 1.188E+04 1.761E-02 9.514E-01

Vab Vbc Vac Vmac V-mac Vcd Vda Vbd Vmbd V-mbd

+I:

-1.966 -2.054 -0.045 -0.091 -0.053 -1.962 -2.049 -0.057 -0.045 -0.070

-I:

1.657 1.763 -0.228 -0.192 -0.223 1.660 1.750 -0.248 -0.250 -0.229