

Septiembre 11, 2018

4:00 p.m.

Integrantes - Iván Mauricio Burbano Aldana  
- Gustavo Adolfo Melgarejo

### Título: Efecto Hall

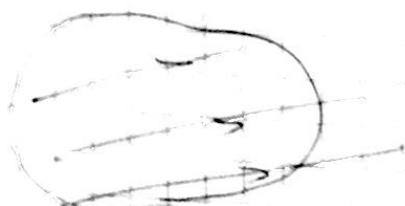
Objetivos:

- Comprobar el efecto Hall en semiconductores tipo n-Ge y p-Ge.

- Medir el voltaje Hall como función de la temperatura y el campo magnético.
- Determinar el signo de los portadores de carga y su densidad en semiconductores tipos n-Ge y p-Ge.
- Caracterizar la relación campo magnético - corriente entre unas bobinas
- Estudiar el fenómeno de magnetoresistencia en un semiconductor.

### Marcos Teórico:

Considere un material sujeto a un campo eléctrico  $\vec{E}$  uniforme. La ley de Ohm



sugiere que  $j = \sigma \vec{E}$  donde  $j$  es la densidad de corriente que surge.

Este comportamiento se puede explicar mediante un modelo de juguete. Suponga que un electrón parte del reposo en el tiempo  $t=0$  y está sujeto al campo  $\vec{E}$  únicamente. Su ecuación de movimiento es entonces

$$m_e \ddot{\vec{v}} = -e \vec{E}.$$

Con esta obtenemos

$$\vec{v}(t) = -\frac{e \vec{E}}{m_e} t.$$

Para modelar los efectos del cristal, suponga que después de un tiempo  $2\tau$  el electrón choca con el retículo y queda en reposo.

Por lo tanto, la velocidad promedio es

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} dt \vec{v}(t) = -\frac{e \vec{E}}{2\tau m_e} \frac{2\tau^2}{2} = -\frac{e \vec{E}}{m_e} \tau$$

La densidad de corriente promedio es entonces

$$\langle \vec{j} \rangle = \langle n e \vec{v} \rangle = \frac{n e^2 \tau \vec{E}}{m}$$

Asumiendo que  $\tau$  es microscópico, al nivel macroscópico estamos midiendo este promedio.

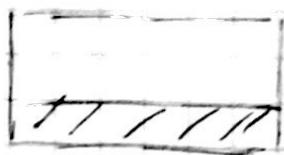
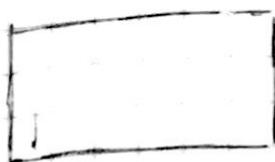
Identificamos la conductividad y la movilidad

$$\sigma = \frac{n e^2 \tau}{m}$$

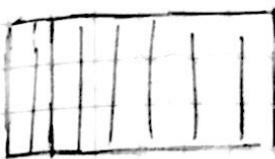
$$\mu = \frac{e \tau}{m}$$

En la vida real la física detrás de los procesos es más complicada.

En este experimento nos enfocaremos en el estudio del semiconductor Ge. Los semiconductores son materiales ~~que~~ con bandas de energía separadas por gaps pequeños. Esto permite que con una o dos bandas de energía que están un poco llenas o vacías. Para entender esto empezamos considerando un semiconductor intrínseco. Esto son materiales ~~tipéricos~~ donde el último nivel de energía no ~~tiene~~ vacío se encuentra completamente lleno a temperatura  $T=0$ . A esta banda se le conoce como la de valencia. ~~se~~ medida que la temperatura aumenta. La siguiente se conoce como la de conducción. En estos materiales, el gap entre estas energías son pequeñas. Por lo tanto con el aumento de la temperatura se pueden excitar electrones de la banda de valencia o la de conducción, produciendo corrientes.



Conducción

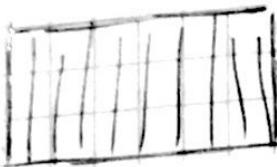


Valencia

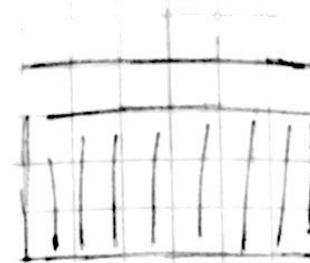
OK

30 K

Por otra parte, a estos materiales se les pueden dopar con otros para cambiar la densidad de portadores. Al incluir materiales con más ~~átomos~~<sup>electrones</sup> de valencia estos, si tienen niveles de energía más cercanos a la banda de conducción, pueden donar electrones. Por otro lado, si hay menos electrones de valencia, y los niveles son cercanos a los de valencia del semiconductor, se pueden aceptar electrones. Esto deja huecos en la banda de valencia que aportan a la conducción.



Donante

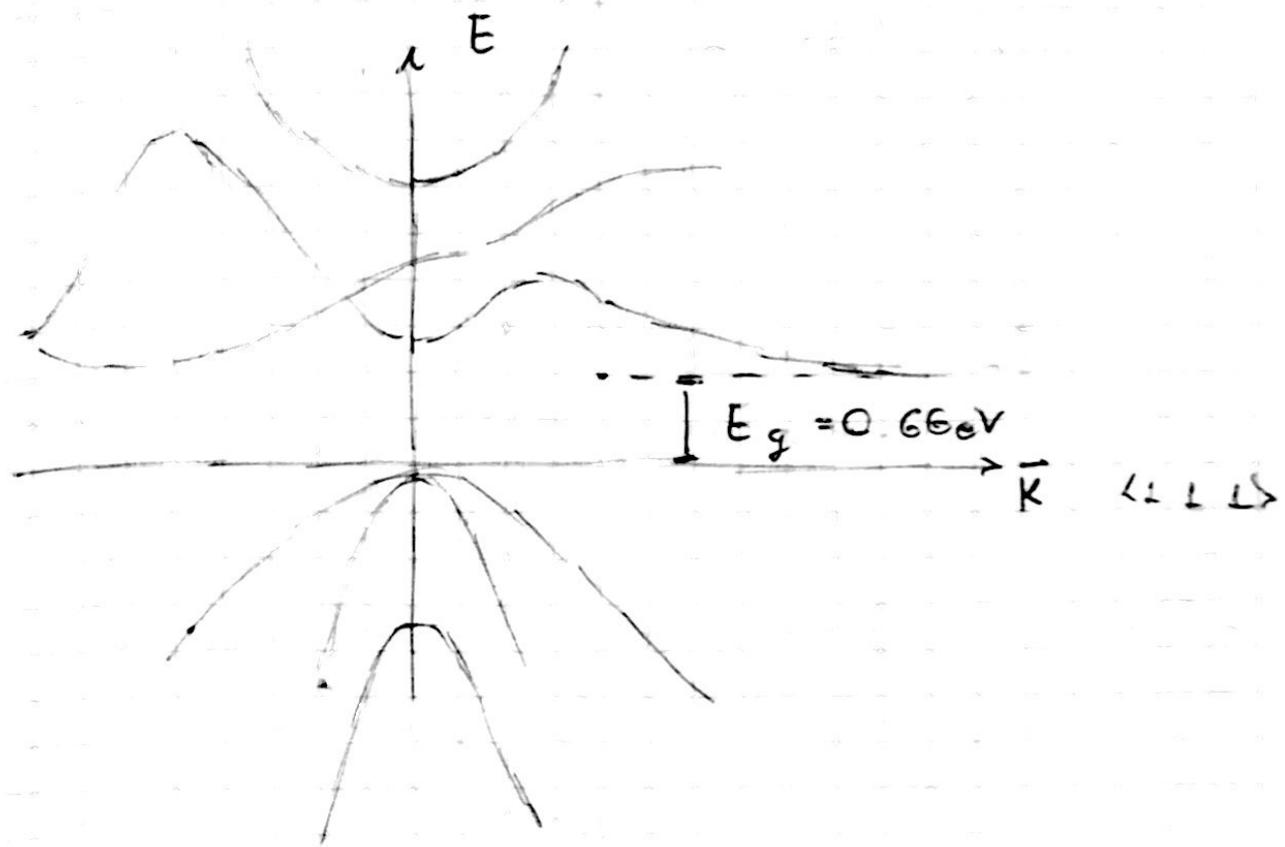


Aceptor

### Ejercicio 1:

• Un método común para dopar Ge es mediante implantación de iones. Estos son acelerados en lineales que hacen incidir rayos de los iones dopantes sobre un placa del semiconductor. Otra forma es mediante la difusión. En esta un gradiente de concentración del dopador produce su implantación en el semiconductor. Esta última parece ser más común para el Ge. Este ultimo se dopa con donantes: As, P, Sb, Bi o Li y aceptores: Al, B, Ga, In o Ti.

La estructura de bandas del Ge es



(Mendeléy: Germanium). El gap de energías depende de la concentración de esta manera cualitativamente



En particular

Ge tipo n

$$\Delta E_g = 8.67 (N_d 10^{-18})^{1/3} + 8.14 (N_d 10^{-18})^{1/4} \\ + 4.31 (N_d 10^{-18})^{1/2} \text{ (eV)}$$

Ge tipo P

$$\Delta E_g = 8.21 (N_a 10^{-18})^{1/3} + 9.18 (N_a 10^{-18})^{1/4} \\ + 5.77 (N_a 10^{-18})^{1/2} \text{ (eV)}$$

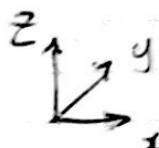
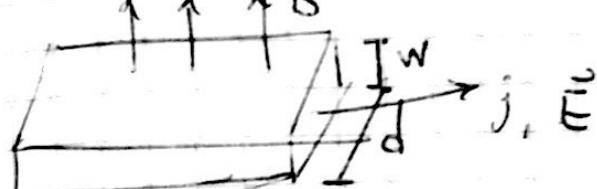
(Jain and Roulston (1991))

- Efecto de Ettingshausen: En mediciones del efecto Hall la acumulación de electrones a un lado de la placa genera un calentamiento que induce un gradiente de temperatura perpendicular a la corriente y al campo magnético aplicados.
- Efecto de Nernst: Es el opuesto al efecto anterior. En presencia de gradientes térmicos aplicados se generan corrientes debidas a los choques entre electrones. En presencia de un campo magnético aplicado, la fuerza de Lorentz genera una corriente perpendicular a este y al gradiente de temperatura.

Efecto de Righi-Leduc: En el contexto anterior el la corriente inducida genera su propio gradiente de temperatura. En un estado estacionario la segunda ley de Newton dicta

$$\frac{m\ddot{\vec{v}}}{\tau} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

para la placa



En componentes y en vista de que

$$\vec{v} = (v, 0, 0) \text{ se tiene}$$

$$v_x = -\frac{eE_x t}{m}$$

$$0 = -eE_y + eBz v_x$$

$$0 = -eE_z.$$

Se concluye que  $E_y = Bz v$  y  $E_z = 0$  y

$$\vec{v} = -\frac{eE_x t}{m}.$$

Esto produce el voltaje de Hall

$$V_H = |E_y|d$$

el coeficiente de Hall

$$R_H = \frac{E_y}{IB} = -\frac{1}{ne}$$

y la movilidad de Hall

$$\mu_H = |R_H| \sigma.$$

Ejercicio 2

- 1. En vista de que  $j = \frac{I}{wd}$  y  $E_y = \frac{V_H}{d}$  se tiene

$$R_H = \frac{V_H w}{IB}$$

- 2. Para los huecos, Esta expresión cambia de signo

$$R_H = -\frac{V_H w}{IB}$$

debido al cambio de signo de  $V_H$ . Esto se debe a que la fuerza magnética que sienten es hacia el otro lado

3.

En este caso

$$j_y = p e v_{hy} - n e v_{ey} = 0.$$

Luego

$$p e v_{hy} = n e v_{ey}.$$

La expresión  $v_y$  dada

$$v_y = \frac{e \tau_h E_y}{m_h} + \frac{e B \tau_h}{m_h} v_{hx}$$

$$v_{ey} = -\frac{e \tau_e E_y}{m_e} + \frac{e B \tau_e}{m_e} v_{ex}$$

Para  $v_x$  por otro lado se tiene

$$v_{hx} = \frac{e \tau_h E_x}{m_h} + \frac{e B \tau_h}{m_h} v_{hy}$$

$$v_{ex} = -\frac{e \tau_e E_x}{m_e} - \frac{e B \tau_e}{m_e} v_{ey}$$

Finalmente se tiene

$$j_x = \sigma E_x$$

con

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h = (n \mu_e + p \mu_h) e$$

Multiplicando por  $p e$  y  $n e$  y restando se obtiene

$$\frac{e\mu_h E_y}{m_h} + \frac{e\mu_e E_y}{m_e} = \frac{eB_p I_h V_{h_x}}{m_h} + \frac{eB_n c_e v_{e_x}}{m_e} e \cancel{E_x}$$

$$(\mu_h p + \mu_e n) E_y = (\mu_h p V_{h_x} + \mu_e n v_{e_x}) B$$

~~$$\frac{p}{\mu_h} V_{h_x} + \frac{n}{\mu_e} V_{e_x} = P_E - n E_x = (p_s n) E_x$$~~

$$\frac{\sigma E_y}{e} = (\mu_h^2 p + \mu_e^2 n) E_x B$$

Concluimos que

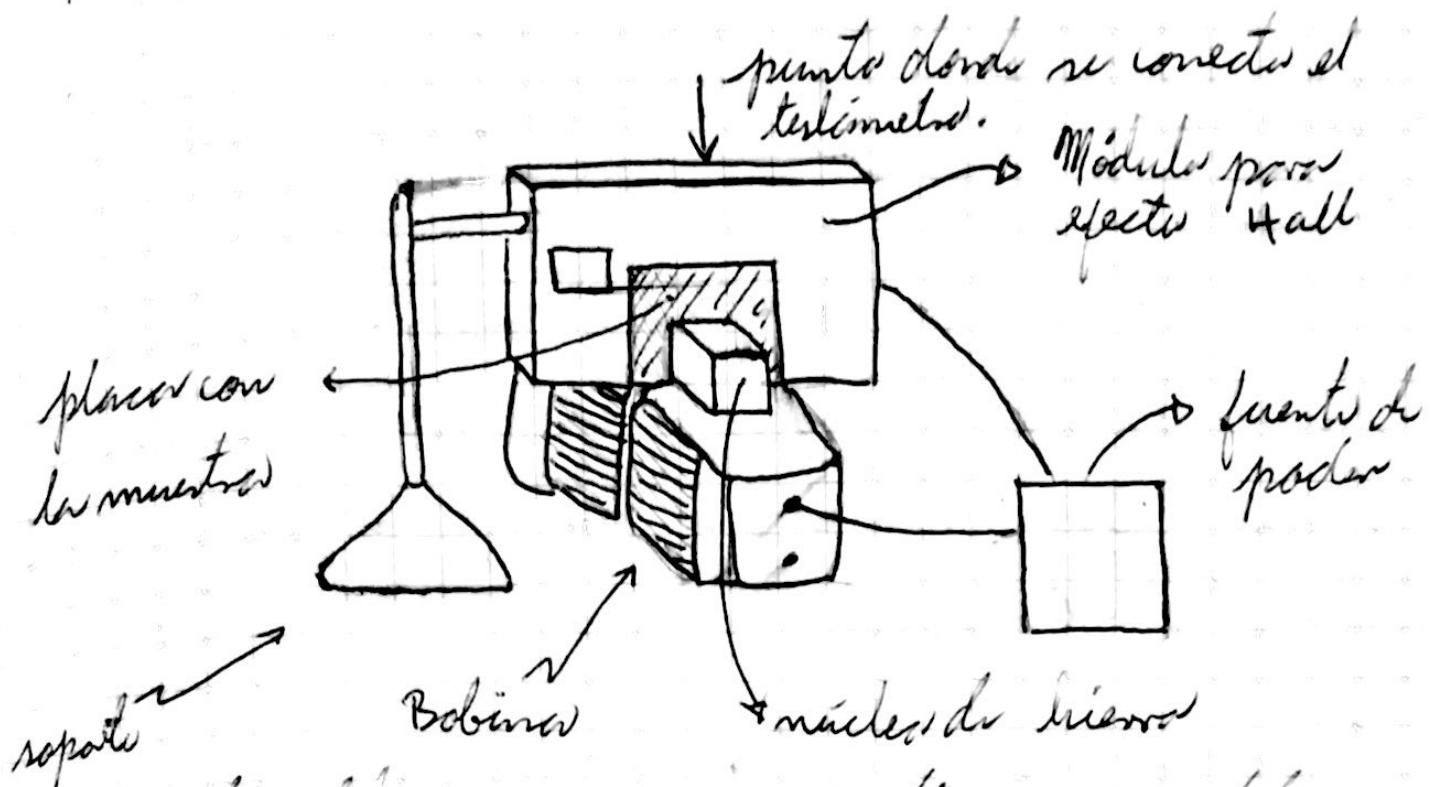
$$R_H = \frac{E_y}{j B} = \frac{e E_x B}{\sigma^2 E_x B} = (\mu_h^2 p + \mu_e^2 n)$$

$$= \frac{p \mu_h^2 + n \mu_e^2}{e(n \mu_e + p \mu_h)^2}$$

### \* Montaje Experimental:

Para el montaje experimental usaremos un módulo para efecto Hall diseñado por Physwe, este incluye una fuente para alimentarlo y unos multímetros que nos permitirán medir los voltajes longitudinales y transversales de Hall. La otra parte del montaje experimental incluye unas bobinas con núcleos de hierro, que nos permitirán generar un campo

magnéticos que aplicaremos sobre las muestras.



En este dibujo se ve un diagrama del montaje experimental.

Los bobinas tienen que estar conectadas en serie con el núcleo de fierro, ya que a su vez también tienen que estar conectados en serie con las fuentes DC. Luego de hacer las conexiones hay que asegurarse de que el campo magnético aumente al aumentar la corriente.

Hay que tener cuidado con las tarjetas con las muestras para el efecto Hall, estas se pueden calentar mucho durante el experimento.

## Procedimiento experimental.

- \* Para las actividad 3 necesitamos hacer un gráfico de campo magnético en función de la corriente que pasa por los bobinados. La regresión lineal para este gráfico nos servirá para calcular los valores de campo magnético para las otras actividades.

Para medir el campo magnético utilizaremos el terómetro y lo vamos a introducir en el módulo para el efecto Hall, en el punto distante para el, lo que tiene cuidado, y evitar que la ronda del terómetro no toque el níquel de fierro.

Entonces conectaremos las muestras con germanio en el módulo, teniendo cuidado al manipular las tabletas con la muestra, ya que éstas son frágiles y podríamos dañar la muestra, por ello, siempre hay que tocar la tarjeta en los extremos.

Cuando ya esté conectado la tarjeta con la muestra vamos a alimentar al módulo para efecto Hall

con una diferencia de potencial de 12 V y una corriente de 5A con una fuente AC.

Después colocaremos el módulo entre el núcleo de hierro de manera tal que el campo magnético producido pase por la muestra. Antes de colocar el módulo en el núcleo de hierro, hay que desconectar las partes móviles de este para ajustar el montaje bien, luego, cuando volvamos a conectar las partes móviles del núcleo, debemos evitar que éstas toquen los tapetes con las muestras. Debemos conectar los multímetros para medir el voltaje de Hall y el voltaje longitudinal.

\* Para la actividad 3 :

- Primero mediremos el voltaje de Hall  $V_H$  en función de la corriente  $I_p$  (desde -30 mA a 30 mA), manteniendo el campo magnético aplicado constante y a temperatura ambiente. Deberemos tomar varias series de datos para campos magnéticos distintos.

De los gráficos realizados para cada tanda de datos debemos hallar el coeficiente de Hall  $R_H$ .

Tomando como grava de los muestra  $w = 1 \times 10^{-3}$

- Luego, mediremos el voltaje de Hall en función del campo magnético  $B_z$  (hasta  $350 \text{ mT}$  aproximadamente) manteniendo la corriente  $I_p$  constante y a temperatura ambiente.

Deberemos tomar varias series de datos para distintos valores de  $I_p$  y de los gráficos, deberemos determinar  $R_H$ .

- Despues deberemos tomar una serie de datos con  $I_p = 30 \text{ mA}$ , luego invertir el campo magnético y comparar los resultados.
- Deberemos repetir las mediciones anteriores para un semiconductor del otro tipo.

\* Para la actividad 3:

- Primero mediremos el voltaje longitudinal en función de la corriente  $I_p$  manteniendo el campo magnético ~~constante~~ en cero y a temperatura ambiente. Deberemos determinar la resistencia longitudinal  $R_o$  y la conductividad eléctrica usando la ley de Ohm.

- Luego debemos aumentar el campo magnético y medir nuevamente el voltaje longitudinal y la corriente  $I_p$  para determinar la resistencia  $R_m$  en función del campo magnético.
- Debemos graficar  $\frac{(R_m - R_0)}{R_0}$  en función de  $B^2$ .
- Debemos realizar las mismas mediciones para los tapetes de otro tipo n. p.
- Para la actividad 4:
- Debemos medir el voltaje longitudinal a una corriente  $I_p = 30 \text{ mA}$  cambiando la temperatura y manteniendo el campo magnético en cero.
- Luego calcularemos ~~el campo~~ la conductividad y realizaremos un gráfico de este en función del inverso de la temperatura  $1/T$ .

José Rodríguez

## Práctica experimental:

Conectamos las ~~dos~~ bobinas en serie, y vamos a medir el corriente que pasa a través de estas, y haciendo uso del Teslametro mediremos el campo magnético que generaran estas sobre la muestra.

### Actividad 1:

Corriente  
en las bobinas

$$(A) \pm 0,005$$

0,005

0

0,20

0,40

0,60

0,80

1

1,20

1,40

1,60

1,80

2,00

2,20

2,40

2,60

B  
en las bobinas  
(mT)

0

- 30,5 ± 0,5

- 60 ± 2

- 95 ± 2

- 128,5 ± 1,5

- 160 ± 2

- 192 ± 1

- 227 ± 5

- 254 ± 1

- 295 ± 5

- 330 ± 10

- 360 ± 10

- 396 ± 10

- 425 ± 5

Haciendo un cálculo rápido determinamos que  
la pendiente es  $\approx 160 \text{ mV/A}$

Actividad 2:

$I_p$ (mA) <del><math>\pm 0,5</math></del> $\pm 1$	$V_H(0,6A)$ (mV) <del><math>\pm 0,005</math></del>	$V_L(0,6A)$ (V) <del>0,005</del>
-30	$31 \pm 0,05$	$1,65 \pm 0,005$
-27	25,9	1,45
-24	23,2	1,27
-21	20,7	1,12
-18	19,6	0,98
-15 $\pm 1$	17,6	0,83
-12	15,0	0,64
-9	12,8	0,52
-6	10,6	0,37
-3 $\pm 1$	8,4	0,22
0	5,8	0,04
3	3,4	-0,11
6	1,4	-0,23
10	-1,9	-0,45
12	-3,4	-0,54
15	-6,0	- - -

$I_p(0,0)$	$V_H(0,0)$	$V_L(0,0)$
18	- 8,5	- 0,98
21	- 11,2	- 1,16
24	- 14,1	- 1,37
27	- 16,4	- 1,54
30	- 18,9	- 1,85

$I_p(1A)$ (mA) $\pm 1$	$V_H(1A)$ (mV)	$V_L(1A)$ (V) $\pm 0,1$
-30	45,0	2,4 $\pm 0,1$
-27	39,8	1,7
-24	37,4	1,47
-20	31,2	1,80
-18	29,7	1,24
-14	24,4	0,97
-10	20,0	0,66
-6	14,7	0,43
-2	10,6	0,25
0	7,7	0,13
4	1,2	-0,19
6	-0,8	-0,32
10	-6,1	-0,56

$IP(1A)$   $V_H(1A)$   $V_L(1A)$

	-10,0	-0,77
13	-13,1	-0,89
16	-15,2	-0,99
17	-20,3	-1,34
21	-22,7	-1,28
24	-21,0	-1,82
28	-23,6	-2,08
30		

$IP(1,6A)$   $V_H(1,6A)$   $V_L(1,6A)$   
 $(mA)$   $(mV)$   $(V) \pm 0,1$

-30	<del>6,8</del> 53,2	1,90
-26	48,1	1,80
-22	42,5	1,49
-21	39,7	1,44
-18	38,7	1,27
-14	34,3	1,49
-10	27,3	1,21
-7	21,4	0,94
-3	15,6	0,67
0	8,2	0,14
4	-0,1	0,24

$I_p(1,6)$     $V_H(1,6)$     $V_L(1,6)$

6	-3,9	-0,31
9	-10,7	-0,59
12	-15,2	-0,87
15	-21,3	-0,86
18	-25,1	-0,97
21	-31,9	-1,20
24	-36,3	-1,32
26	-41,3	-1,50
30	-44,2	-1,90

$I_p(2A)$     $V_H(2A)$     $V_L(2A)$   
(mA)            (mV)            (V)  $\pm 0,5$

30	-54,6	-2
27	-51,5	-1,63
24	-44,1	-1,40
21	-38,6	-1,27
17	-30,4	-1,10
14	-24,3	-0,90
12	-16,5	-0,83
8	-10,7	-0,49
6	-5,7	-0,27
3	+0,3	-0,12

$I_P(2A)$	$V_H(2A)$	$V_L$
0	6,2	0,02
-3	25,2	0,25
-6	22,4	0,46
-9	28,5	0,63
-12	35,2	0,80
-15	42,3	0,99
-18	50,1	1,44
-22	56,9	1,57
-24	59,7	1,59
-26	64,9	1,87
-30	75,2	2,36
$I_P(2,4A)$ (mA)	$V_H(2,4A)$ (mV)	$V_L(2,4A)$ V
-30	85,1	2,99
-26	75,9	1,60
-24	70,0	1,48
-21	63,4	1,34
-19	56,8	1,19
-14	44,8	0,89
-12	38,1	0,77
-9	31,0	0,61

$I_P (2,4)$	$V_H (2,4)$	$V_L (2,4)$
-6	23,9	0,46
-3	17,3	0,30
0	11,2	0,15
4	-2,9	-0,42
6	-5,9	-0,37
10	-15,4	-0,88
12	-21,4	-0,71
15	-28,2	-1,02
18	-32,9	-1,32
22	-44,2	-1,38
26	-54,9	-1,77
30	-61,5	-1,87

\*  $I_P = 30 \text{ mA}$

$I_b$ (A) $\pm 0,005 \text{ mA}$	$V_H$ $\pm 0,05$	$I_b$	$V_H$
2	-57,1	0,79	-23,7
1,9	-52,9	0,61	-17,8
1,6	-47,8	0,40	-10,5
1,41	-43,0	0,19	-3,0
1,20	-36,9	0	3,8

TB	VH	I <sub>B</sub>	VH
-0,21	12,1	-1,21	46,2
-0,43	19,3	-1,43	51,4
-0,57	24,7	-1,60	56,4
-0,82	32	-1,84	62,0
-0,99	39,2	-2	69,7
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -

\* I<sub>P</sub> = 14

TB	VH	I <sub>B</sub>	VH
-2	33,3	0,62	-3,6
-1,83	<del>33</del> 31,8	0,77	-5,7
-1,63	29,8	01,05	-9,9
-1,41	27,2	1,21	-12,2
-1,20	24,6	1,37	-14,3
-1,02	22,2	1,59	-17,2
-0,8	19,8	1,82	-19,9
-0,71	17,6	6,2	-21,9
-0,61	16,1	- - - - -	- - - - -
-0,39	12,5		
-0,23	10,0		
0	6,2		
0,2	2,5		
0,42	-0,6		

$I_P = 22$

$I_b$	$V_H$
2	-41,6
1,79	-38,4
1,61	-35,3
1,39	-31,1
1,18	-26,8
1	-22,7
0,8	-18,0
0,62	-13,4
0,36	-6,7
0,18	-1,2
0	3,6
-0,19	9,1
-0,40	14,2
-0,59	19,3
-0,80	24,4
-1,02	29,8
-1,19	33,6
-1,39	38,1
-1,59	42,2

$I_b$	$V_H$
-1,82	46,5
-2	49,8

$I_P = 22 \text{ mA}$

$I_b$	$V_H$	$I_b$	$V_H$
-2	-26,5	1,01	18,4
-1,8	-24,7	1,2	22,5
-1,61	-22,6	1,41	26,8
-1,43	-20,4	1,62	29,7
-1,19	-17,2	1,83	32,3
-1	-14,7	2,01	34,4
-0,83	-12,2		
-0,62	-8,9		
-0,41	-5,4		
-0,18	-1,5		
0	1,5		
0,23	5,5		
0,40	8,4		
0,59	11,6		
0,79	16,7		

$$I_P = -12A - 20$$

$I_B$	$V_H$
2,01	52,7
1,77	48,8
1,63	46,5
1,42	42,6
1,19	37,9
1	33,83
0,82	28,8
0,62	23,9
0,54	22,1
0,41	18,2
0,22	13,2
0	7,2
-0,19	2,4
-0,40	-3,1
-0,57	-7,6
-0,79	-12,9
-0,98	-17,6
-1,18	-22,3
-1,38	-26,3

$I_B$	$V_H$
<del>-1,38</del>	
-1,62	-30,8
-1,8	-34,4
<u>-2,02</u>	<u>-38,1</u>

### Actividad 3

•  $B = 0$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
-30	1,96
-16	1,05
-0	0,1
15	-0,87
28	-1,75

•  $I_B = 0,32 A$

$I_P$ (mA)	$V_{AL}$ (V)
28	-1,74
14	-0,9
0	0,15
-14	1,04

$$\bullet I_B = 0,32 A$$

$I_P$	$V_L$
30	192

$$\bullet I_B = 0,82 A$$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
-29	1,9
-16	1,04
0	0,01
16	<del>-0,3</del> - 0,93
32	-1,78

$$\bullet I_D = 1,20 A$$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
32	-1,77
15	-0,81
0	0,05
-14	1,49
-30	2,18

$$\bullet I_B = 1,4 A$$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
-30	2,2 ± 0,2
-13	0,84
0	0,1
15	-1,04
29	-1,94 ± 0,07

•  $I_B = 1,8 \text{ A}$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
30	-1,94
16	-0,96
0	0,02
-15	1,32
-31	2,38

•  $I_B = 2,2 \text{ A}$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
-30	2,36
-16	1,23
0	0,12
16	-1,06
30	-1,93

•  $I_B = 2,6$

$I_P$ (mA)	$V_L$ (V)
+30	-2,19
14	-1,29
-2	0,28
-14	1,32
-29	2,49

Jose R. Mijia

#### Actividad 4:

Tuvimos problemas con el montaje experimental, <sup>sacamos</sup> los tableros y los volvimos a conectar y el <sup>sacamos</sup> montaje comenzó a funcionar sin problemas.

• Hacemos un video para registrar las mediciones ya que las temperaturas varían rápidamente.

Al aumentar las temperaturas el voltaje longitudinal aumenta bruscamente, por lo que hacemos las mediciones cuando se está ~~está~~ enfriando los tableros. Hay un salto a 11,7 V, este medida puede corresponder al voltaje que le estás suministrado a la sonda Hall.

- Necesitamos una corriente de 1.87 A en la bobina y mediremos el voltaje de Hall.
- La temperatura no baja de 81°C, esto puede deberse al campo magnético!

Joe R. Mijic