

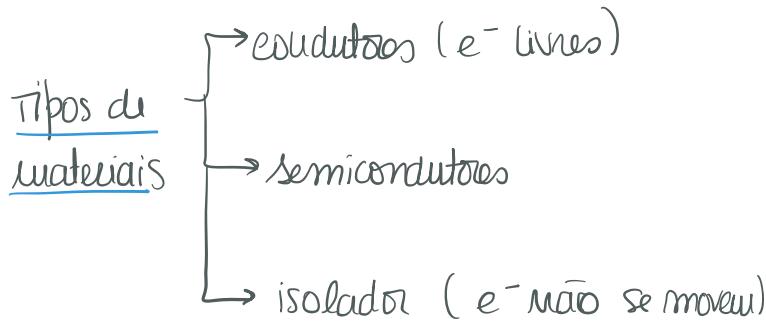
Caracterização de semicondutores e estudo do efeito de Hall

Objetivos

14 de novembro

- Estudar o efeito de Hall num semicondutor;
- Analisar a dependência da resistividade com a temperatura (semicondutor);

Introdução Teórica



Efeito de Hall

- Corrente estacionária a percorre um material (ex.: semicondutor)
- Aplica-se $B \perp$ direção da corrente (surgem uma tensão de Hall);

→ Corrente estacionária → Força resultante
Existe uma força \leftarrow nula

elétrica = força magnética

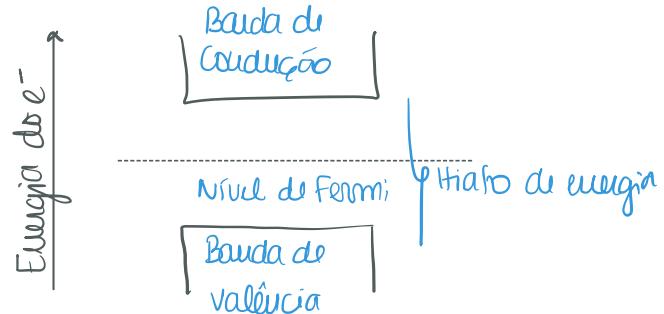
→ A tensão de Hall é dada por:

coeficiente de Hall

$$(1) \quad U_H = \frac{d}{S} \frac{1}{mq} IB$$

Efeito da temperatura

- Um semicondutor possui a seguinte banda de energia:

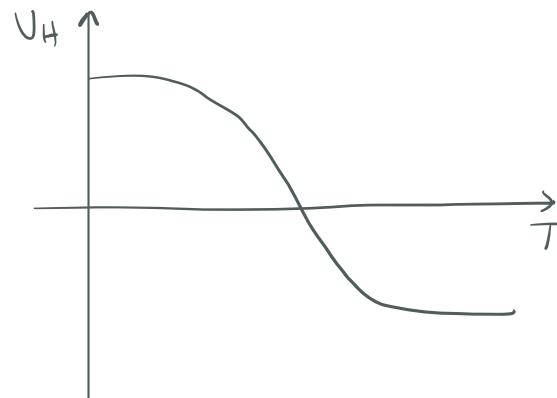


▷ Portadores iumtumsecos: elétrons da amostra;

▷ Portadores extrínsecos: impurezas (e^- passam para a banda de condução - tipo n - ou e saltam da banda de valéncia - tipo p).

→ Quando aplicamos uma Tensão de Hall e aumentamos a sua temperatura, o tipo de portadores muda (tipo n \leftrightarrow tipo p), o que leva à mudança de sinal de V_H . (pergunta 2)

(sinal esperado para uma amostra do tipo p)



Determinação do Hiato de Energia

- A E_g de um semicondutor varia com a temperatura:

$$(2) V(T) = V_0 e^{-\frac{E_g}{2k_b T}}$$

Hiato da energia

Como $V \propto \frac{1}{V_p}$ (V_p - tensão na amostra),

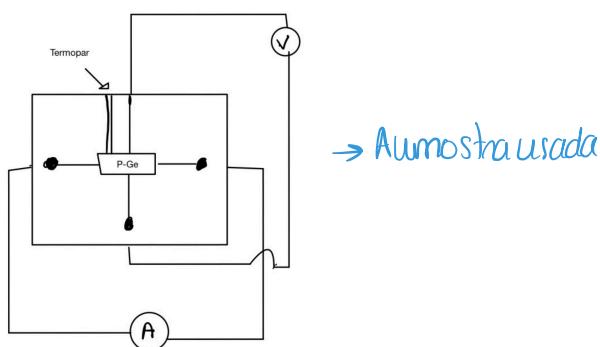
então, vamos ter:

$$V_p(T) = V_0 \exp\left(\frac{E_g}{2k_b T}\right) (=)$$

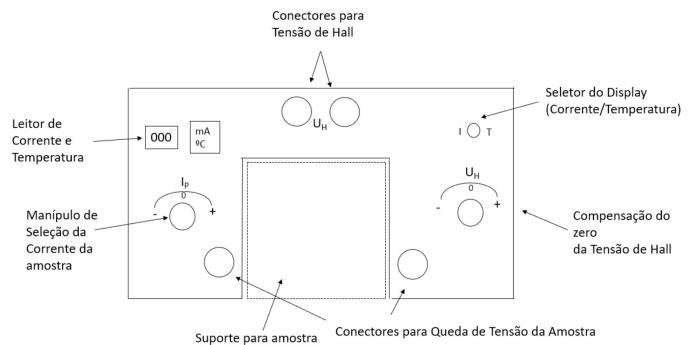
$$(3) (=) \ln(V_p) = \ln V_0 + \frac{E_g}{2k_b T} \quad (=)$$

Montagem experimental

- Círcuito usado:



- Esta amostra é colocada num dispositivo da marca Phywe, que funciona da seguinte maneira:



- Este dispositivo é colocado, perpendicularmente, a um circuito de elétromagnete, composto por duas bobinas e um eletrofeno para a criação de campo magnético uniforme a atravessar a amostra.

Procedimento experimental

Calibração do campo magnético: (seu a placa Phywe)

- Determine o campo luminescente (quando a corrente a passar na bobina é nula);
- Variar a corrente na bobina e obter a curva de $B(I)$, para a obtenção dos dados.

Medido no Tesla medidor

$$(4) B = mI + b;$$

$$(5) u(B) = \sqrt{I^2 u^2(m) + m^2 u^2(I) + u^2(b)}$$

Tensão de Hall para campo magnético constante

- Colocar a placa Phywe no suporte;
- Ajustar a "condição zero";
- Fixar a corrente nas bobinas; (1A)

④ Determinar o número de portadores e o seu tipo.

$$U_H = \frac{m}{S} \frac{1}{mg} B \quad \text{distribuído}$$

$$\Delta m = \frac{d}{S} \frac{1}{g} \frac{B}{m} ;$$

$1,00 \times 10^{-2} \mu$
 $2,00 \times 10^{-5} \mu^2$

m de portadores

$$\Delta u(m) = \frac{d}{Sg} \sqrt{u^2(B) + \left(\frac{B}{m}\right)^2 u^2(g)} \quad (7)$$

⑤ Determinar o coeficiente de Hall:

$$(8) R_H = \frac{1}{mq} ; \mu(R_H) = \frac{u(m)}{g m^2}$$

▷ Tensão de Hall em função do campo magnético

- ① Verificar a condição zero;
- ② Fixar $I_p \sim 15-20 \mu A$;
- ③ Variar I_B , registar U_H e U_P .
- ④ Representar $U_H(B)$ e determinar o m de portadores:

$$\Delta U_H = m B ; m = \frac{d}{S} \frac{1}{mg} I \quad \begin{array}{l} \text{judados} \\ \text{na} \\ \text{amostra} \end{array}$$

$$\Delta m = \frac{d}{S} \frac{1}{g} \frac{I}{m} \quad (9)$$

$$\Delta u(m) = \frac{d}{Sg} \sqrt{u^2(I) + \left(\frac{I}{m}\right)^2 u^2(g)} \quad (10)$$

⑤ Determinar R_H através de (8).

Efeito da Temperatura

- ① Fixar $I_B (1A)$ e $I_p (\sim 18 \mu A)$;
- ② Testar o efeito da variação da temperatura (registar o método nas notas de aula);
- ③ Ajustar a condição "zero";
- ④ Representar $U_H(T_p)$ e $U_P(T_p)$ (a temperatura deve variar entre 10 - 120°C);
- ⑤ Com $U_H(T_p)$ - explicar mudança decimal;
- ⑥ Determinar o fator de energia através de (3) (com $U_P(T_p)$):

$$(3) \ln(U_P(T)) = m \frac{1}{T} + b ; m = \frac{E_g}{2k_b}$$

$$(11) E_g = m 2k_b ;$$

$$(12) U(E_g) = 2k_b u(m)$$

Notas da aula:

- Na última parte da experiência, só existia um semicondutor, apenas variavam a temperatura entre [0, 100]°C, mas muito devagar (clicavam no botão 1x e outra vez seguida) → porque a temperatura aumentava exponencialmente.

- Tiramos os dados para temperaturas crescentes e decrescentes.

Análise dos Dados

- Calibração do campo magnético

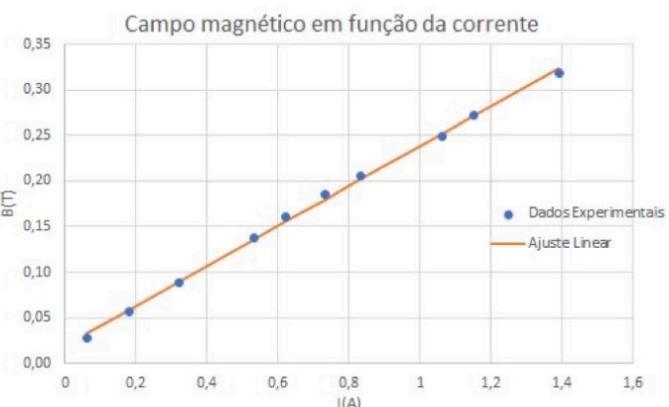
Como indicado no procedimento, começou-se pela calibração do campo magnético, registando os valores de I_B e B (lidos no Teslameter).

Deste modo, foram retirados os seguintes dados e foi feita a respetiva matriz de projeção linear:

I(A)	B(T)	B(T) - Ajuste Linear
0,01	1	
0,06	2,76E-02	3,29E-02
0,18	5,63E-02	5,91E-02
0,32	8,91E-02	8,98E-02
0,53	1,38E-01	1,36E-01
0,62	1,60E-01	1,55E-01
0,73	1,85E-01	1,80E-01
0,83	2,06E-01	2,01E-01
1,06	2,49E-01	2,52E-01
1,15	2,72E-01	2,72E-01
1,39	3,18E-01	3,24E-01

m	0,219	0,020	b
sm	0,003	0,003	sb
0,22	0,998	0,004	0,04

- Assim, foi gerado o gráfico do campo magnético em função da corrente:



Notas: Para $I = 0$, o campo magnético não é nulo. A este valor chamamos de campo remanescente que, por definição, é a magnetização que permanece num material ferromagnético, tal como o utilizado durante a atividade, após um campo magnético externo ser removido.

- O ajuste linear é dado por:

$$B(I) = (0,219I + 0,020)\text{T}$$

, com

um $R^2 = 0,998$. Vai ser usado nas

seguintes partes.

- Amostra com campo magnético fixo e variação da corrente

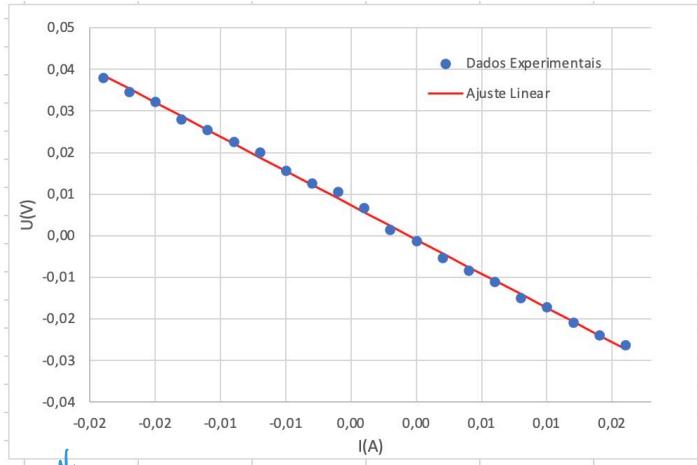
Fixamos a corrente das bobinas em $I_B = (1,01 \pm 0,01) \text{ A}$ e, usando a expressão de calibração determinada anteriormente obtivemos $B = 0,24 \text{ T}$.

✓ Com estes valores variamos a corrente percorrida na amostra, $I_p \in [-20,20] \text{ mA}$, e obtivemos os dados apresentados na tabela seguinte.

✓ Além disso, também representamos a tensão de Hall em função da corrente na amostra e fizemos o respetivo ajuste linear.

I_p (A)	U_H (V)	U_H (V) - Ajuste Linear
0,01	0,01E-2	
-0,02	3,80E-02	0,0386
-0,018	3,46E-02	0,0353
-0,016	3,23E-02	0,0320
-0,014	2,81E-02	0,0287
-0,012	2,55E-02	0,0255
-0,010	2,27E-02	0,0222
-0,008	2,01E-02	0,0189
-0,006	1,57E-02	0,0156
-0,004	1,27E-02	0,0123
-0,002	1,06E-02	0,0090
0,000	6,67E-03	0,0057
0,002	1,56E-03	0,0024
0,004	-1,22E-03	-0,0009
0,006	-5,24E-03	-0,0042
0,008	-8,26E-03	-0,0075
0,010	-1,10E-02	-0,0108
0,012	-1,49E-02	-0,0140
0,014	-1,71E-02	-0,0173
0,016	-2,08E-02	-0,0206
0,018	-2,39E-02	-0,0239
0,020	-2,63E-02	-0,0272

Tabela dos dados



Representação gráfica de $U_H(I)$.

- A região linear obtida com um $R^2 = 0,9986$ é dada por:

$$U_H = (-1,64I + 0,0057)V,$$

tal que $a(m) = 0,01(\Omega)$
 $a(b) = 0,0002(V)$

- Teúdo em conta que o valor da Ondulação na origem é cerca de 10^{-1} inferior aos valores da tensão de Hall retirados, então podemos usar as eq (6) e (7) para determinar o número de portadores:

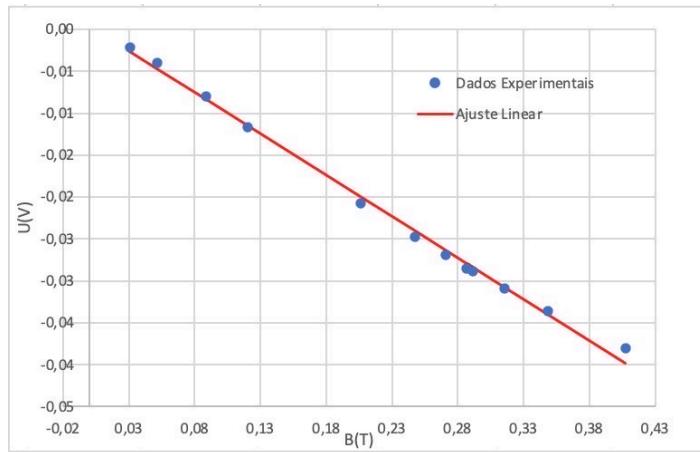
$$m = (4,6 \pm 0,2) \times 10^{20} (\mu^{-3})$$

- Além disso, através da eq (8) e da sua incerteza obtivemos o coeficiente de Hall:

$$R_H = (1,37 \pm 0,02) \times 10^{-2} \frac{\mu}{C}$$

4.5.3. Amostra com corrente fixa, variação da tensão de Hall em função do campo magnético

- Fixando a corrente da amostra em $(17 \pm 1) mA$, variamos a corrente das bobinas com $I_B \in [0; 1,8] A$ e registramos os valores da tensão de Hall e da tensão da amostra. O seguinte gráfico dá-nos a relação entre a tensão de Hall e o campo magnético aplicado:



Resultados finais:

- Como não tínhamos valores de comparação de m e R_H , determinamos o valor médio e respectivo desvio padrão:

$$\bar{R}_H = (1,3 \pm 0,1) \times 10^{-2} \frac{\mu}{C}$$

$$\bar{m} = (5,0 \times 10^{20} \pm 0,4 \times 10^{20}) \mu^{-3}$$

- O ajuste linear, com um $R^2 = 0,996$, é dado por:

$$U_H = (-0,099B + 0,0004)V$$

- Os parâmetros de ajuste estão na seguinte tabela:

m	-0,099	0,0004	b
sm	0,002	0,0005	sb
r^2	0,996	0,001	sy

- Usando a eq. (9) e (10) e os parâmetros da própria material (na tabela seguinte):

Grandeza	Valor	Incerteza
I_B (A)	1,70E-02	1,00E-03
d	1,00E-02	
S	2,00E-05	

Determinamos m :

$$m = (5,49 \pm 0,3) \times 10^{20} (\mu^{-3})$$

- Com isto, temos que o coeficiente de Hall, $R_H = \frac{1}{mq}$ é igual a:

$$R_H = (1,16 \pm 0,07) \times 10^{-2} \left(\frac{\mu}{C} \right)$$

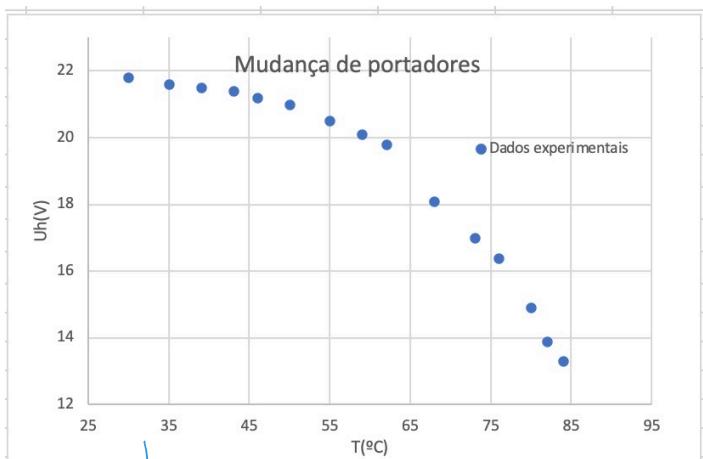
- Apesar de ser uma fraca avaliação dos resultados, podemos ver que os métodos usados foram bons visto que os valores de ambas as medidas são muito próximos.

4.5.4. Variação da tensão de Hall

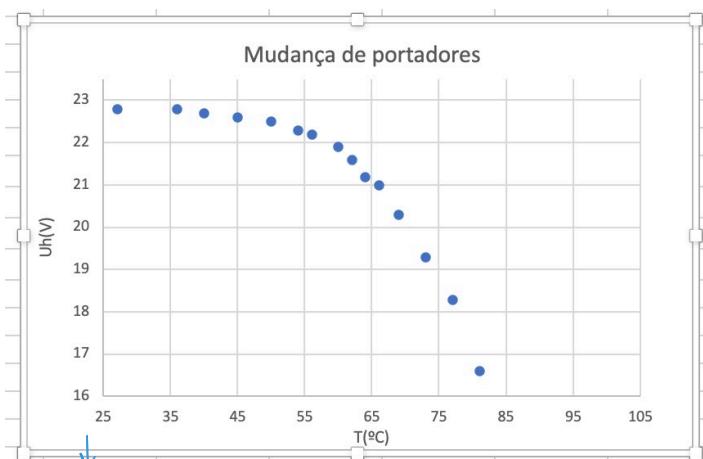
e da tensão na amostra em função da temperatura

- Fixando a corrente das bobinas em $I_B = (0,99 \pm 0,01)$ A e a corrente da amostra em $I_p = (18 \pm 1)$ mA fizemos variações de temperatura da amostra. (usamos uma amostra do tipo - p).

- A representação da tensão de Hall em função da temperatura está no seguinte gráfico:



↓ Temperaturas crescentes

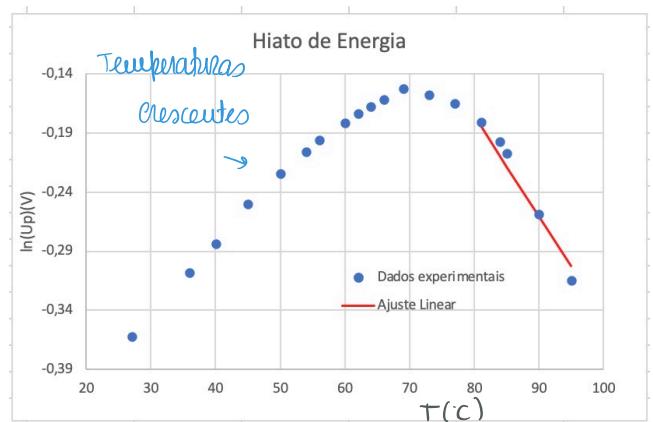
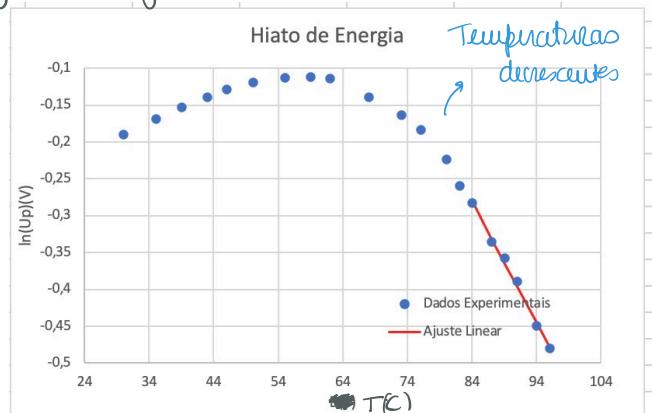


↓ Temperaturas crescentes

- A tensão de H_{211} é positiva, tal como era de esperar visto que é uma amostra do tipo p.

- No entanto, estávamos à espera que o tipo de portadores mudasse para temperaturas elevadas. Normalmente, tal acontece para 105°C (em comparação com os meus colegas), como apenas estudamos uma gama até aproximadamente 95°C , não chegamos à alteração de comportamento.

• A representação da tensão da amostra em função da temperatura (para temperaturas decrescentes e crescentes, respetivamente) estão nas seguintes gráficos:



↓ Representações de $\ln(U+)$ em função da temperatura

- Usando apenas os dados para as temperaturas superiores, fizemos o ajuste linear de $\ln(U+)$ em função de $1/T(\text{K})$. As malotes de ajuste linear estão apresentadas a seguir:

m	2168	-6,3	b
sm	86	0,2	sb
r^2	0,994	0,006	sy

→ Aquecimento

m	1103,74	-3,3	b
sm	123	0,3	sb
r^2	0,95	0,01	sy

→ Aquecimento

- Usando as eq. (11) e (12), determinamos Eg:

$$Eg = (5,6 \pm 0,2) \times 10^{-20} \text{ J}$$

aumento

$$Eg = (2,9 \pm 0,3) \times 10^{-20} \text{ J}$$

aumento

→ Os valores obtidos não estão próximos um do outro, tal pode ter-se devido a erros na leitura dos dados durante o aquecimento da amostra, visto que a subida da temperatura é exponencial e a leitura dos dados é muito difícil.

→ No entanto, verificamos que os mesmos dados foram afetados por um erro já que nenhum dos dois deu próximo de 0,60 eV ($9,654 \times 10^{-19} \text{ J}$). Podeu ter sido erros na leitura dos dados (variações muito rápidas) e a gama que melhor permitia a determinação de Eg seria na mudança de comportamento - gama essa que não estudamos.

Conclusões

- Neste trabalho estudou-se o efeito de Hall em semicondutores:

→ Variou-se o campo magnético e a corrente constante que atravessava a amostra (separadamente).

→ Estudou-se os efeitos térmicos na amostra.

- Verificouse que $V_H(I)$ apresenta uma relação linear e com base nisso determinou-se o módulo de portadores e o coeficiente de Hall:

$$\bar{R}_H = (1,3 \pm 0,1) \times 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$$

$$\bar{m} = (5,0 \times 10^{20} \pm 0,4 \times 10^{20}) \text{ m}^{-3}$$

- Em relação aos efeitos térmicos, não conseguimos mostrar que o tipo de portadores varia com a temperatura, porque não estudamos a gama adequada. Como consequência, também não obtivemos bons valores para as energias de Hooke:

$$Eg = (5,6 \pm 0,2) \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$Eg = (2,9 \pm 0,3) \times 10^{-20} \text{ J}, \text{ em}$$

Comparação com o $9,654 \times 10^{-19} \text{ J}$ esperados.