

Caracterização de Semicondutores e Estudo do Efeito de Hall

João Miguel Inocêncio Brites
Departamento de Física e Astronomia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

29 de Novembro de 2022

Resumo

Estudou-se, para uma amostra de Germânio tipo p, a dependência da tensão de Hall com a corrente aplicada, a intensidade do campo magnético e a temperatura. Analisou-se também o comportamento da tensão na amostra com a variação da corrente na amostra. Obteve-se $(1,3 \pm 0,1)10^{-2} m^3/C$ para o valor do Coeficiente de Hall, $(5,0 \pm 0,4)10^{20} m^{-3}$ para a densidade de lacunas, e ainda, para a mobilidade elétrica um valor de $(73 \pm 6) m^2/Vs$. Estudou-se, com a mudança da temperatura, o perfil de variação da tensão de Hall para temperaturas crescentes e decrescentes, não se tendo verificado contudo a passagem do regime de condução extrínseca para intrínseca. Encontrou-se uma energia de ativação de $(4,3 \pm 0,2)10^{-20} J$.

1 Objetivos do estudo

Deve-se estudar experimentalmente a dependência da tensão de Hall em semicondutores para:

- Quando percorrido por diferentes valores de corrente elétrica;
- Diferentes intensidades do campo magnético externo;
- Face à variação da temperatura

2 Introdução Teórica

Uma maneira de caracterizar e distinguir os diferentes materiais passa pelo estudo da sua condução elétrica. Os materiais podem ser classificados como:

- Condutores
- Semicondutores
- Isoladores

Em termos físicos aquilo que sucede nos condutores é um movimento livre de eletrões, ao passo que no caso dos isoladores os eletrões não se conseguem mover de todo. Já para os semicondutores temos uma mescla destas duas características. Fisicamente, isto deve-se à estrutura de bandas de cada material, como se pode constatar na seguinte figura:

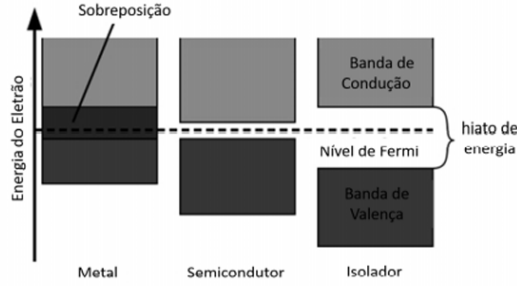


Figura 1: Tipos de Estruturas de Bandas

Esta diferença entre as bandas de energia promove comportamentos diferentes para materiais diferentes, nomeadamente no que toca às suas propriedades elétricas.

2.1 Efeito de Hall

Considerando um condutor que está a ser afetado por um campo magnético, sabe-se que nos seus portadores de carga será exercida uma força causada pelo campo magnético - a força de Lorentz:

$$\vec{F}_B = q \langle \vec{v} \rangle \times \vec{B} \quad (1)$$

O percurso dos portadores vai sendo, por isso alterado: eles vão se fixando nas extremidades do condutor. Ora, ao suceder isto mesmo, vai se gerando um campo elétrico pois como uma das extremidades vai ter portadores de carga - elétrons - e a outra nada, isto gera uma diferença de potencial. Há, portanto, a criação de uma força elétrica que vai, em conjunto com a força de Lorentz, atuar nos portadores de carga.

Se orientarmos bem o nosso campo magnético, podemos ter algo semelhante ao ilustrado na figura seguinte:

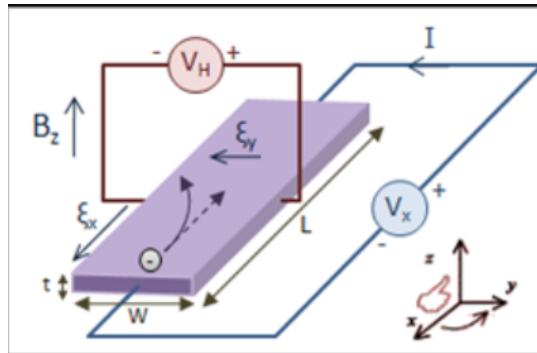


Figura 2: Ilustração do efeito de Hall

Assim, após algum tempo, o nosso sistema entrará em equilíbrio, *i.e.*, $\|\vec{F}_B\| = \|\vec{F}_E\|$.

Como,

$$\|\vec{F}_E\| = q \|\vec{E}\| \quad (2)$$

E,

$$q \langle \vec{v} \rangle \times \vec{B} = q \langle v \rangle B \sin \theta \quad (3)$$

Onde θ é o ângulo entre os vetores campo magnético e velocidade média;

Tem-se então:

$$qE = q \langle v \rangle B \sin \theta \quad (4)$$

A este campo elétrico transversal, E_t , está obviamente associada uma diferença de potencial V_H entre as duas bordas do fio, que, distando d faz com que:

$$U_H = dE_t = d \langle v \rangle B \sin \theta \quad (5)$$

A densidade de corrente é:

$$J = \frac{I}{S} \quad (6)$$

Ou, alternativamente,

$$J = nq \langle v \rangle \quad (7)$$

Onde n é o número de portadores de carga por unidade de volume.

Combinando (6) e (7) é trivial concluir que:

$$\langle v \rangle = \frac{I}{nqS} \quad (8)$$

Substituindo (8) em (5) surge:

$$U_H = \frac{IdB \sin \theta}{nqS} \quad (9)$$

definindo

$$R_H \equiv \frac{1}{nq} \quad (10)$$

Esta grandeza é designada de coeficiente de Hall. Deixando o pó assentar chega-se então a:

$$U_H = R_H \cdot \frac{IdB \sin \theta}{S} \quad (11)$$

Adicionalmente introduz-se ainda o conceito de mobilidade elétrica, μ que é dada por:

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E} \quad (12)$$

2.2 Tipos e Classificação de Semicondutores

Pode-se classificar os diferentes semicondutores conforme as densidades de lacunas e eletrões na banda de condução.

Quando o cristal é puro, ou seja, o número de eletrões iguala o número de lacunas, estamos perante um semicondutor intrínseco.

Quando este mesmo material é dopado com impurezas, este aspeto de uma lacuna para um eletrão é alterado. Assim, para baixas temperaturas, a condução passa a ser designada de extrínseca.

Repare-se contudo no uso da expressão "para baixas temperaturas". Isto já que o aumento da temperatura promove, por excitação térmica, a transferência de portadores de carga entre a banda de valência e a banda de condução. Ou seja, para este regime de temperaturas reina novamente a condução intrínseca.

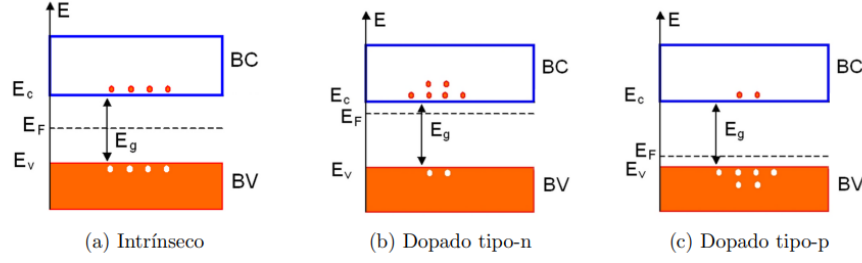


Figura 3: Ilustração da estrutura genérica das bandas dos 3 tipos de semicondutores. Aqui, BV e BC designam, respetivamente, "banda de valência" e "Banda de condução", estando-lhes associadas as energias E_v e E_c . Por sua vez, E_g corresponde à energia de ativação e E_F é a energia do nível de Fermi. Finalmente, os círculos brancos representam lacunas e os círculos vermelhos eletrões.

Para o caso de um semicondutor intrínseco, a condutividade é dada por:

$$\sigma(T) = \sigma_c \exp\left(\frac{-E_g}{2k_b T}\right) \quad (13)$$

Onde: T é a temperatura; σ_c é uma constante; k_b é a constante de Boltzmann; E_g é a energia de ativação *i.e.*, é a energia necessária para transitar entre as bandas;

Como $V_p \propto \frac{1}{\sigma}$, fazendo o logaritmo em ambos os lados de (13) faz surgir:

$$\ln(V_p) = \frac{E_g \beta}{2} + C, C \in R \quad (14)$$

Onde se usou o facto:

$$\beta \equiv \frac{1}{k_b T} \quad (15)$$

3 Método e Procedimento Experimental

3.1 Material

- Eletromagnete e respetiva fonte de alimentação da Phywe;
- Placa de amostra: Semicondutor p-Ge;
- Sonda de Hall de Teslameter;
- kit Phywe de efeito de Hall;
- multímetros para medição de corrente elétrica nas bobinas, queda de tensão na amostra e tensão de Hall;

3.2 Calibração do Campo Magnético

Começou-se o estudo por calibrar o campo magnético. Para esta parte utilizou-se a montagem que se encontra na seguinte figura, seguindo-se o previsto protocolarmente (vide referências [1]):



Figura 4: Fotografia capturada em laboratório para a parte da calibração do campo magnético;

3.3 Variação da Tensão de Hall e na amostra

Esta parte da experiência consiste em primeiramente, utilizar a expressão (11) derivada na introdução teórica, e estudar a variação da tensão de Hall com a variação da corrente na amostra (o declive do gráfico será o que resta em (11)), mantendo o campo magnético constante. E de seguida observar qual a variação da tensão de Hall com a variação do campo magnético, isto para uma corrente na amostra constante. Vide referências ([1]) para uma explicação mais detalhada.

Finalmente, estuda-se qual a variação da tensão na amostra com a variação da temperatura e, através da expressão (14) tenta-se obter um valor para a energia de ativação.

Para realizar o descrito anteriormente utilizou-se montagem que consta da seguinte fotografia: (Segue adicionalmente uma representação esquemática da nossa montagem experimental;)



Figura 5: Fotografia capturada em laboratório para as restantes partes;

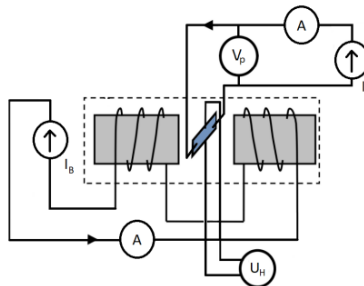


Figura 6: Representação esquemática: Amostra destacada a azul. I_p e V_p são a corrente e tensão na amostra, respetivamente. I_B é a corrente nas bobinas e U_H é a tensão de Hall;

4 Análise de Dados

A montagem utilizada para este estudo, nomeadamente a placa-amostra, teve um problema externo ao controlo do experimentalista. Assim, a parte experimental da calibração do campo magnético pôde ser realizada com sucesso. As restantes, contudo, por dependerem desta componente da montagem não o foram.

Posto isto, a docente deu a instrução da utilização de dados de colegas para as restantes partes da experiência. Utilizou-se os dados da colega Cheila Bhuralal (vide anexos).

Foram registados os dados e resultados referentes à parte da tensão de Hall para campo magnético constante. Fez-se isto meramente para demonstrar os problemas e adversidades defrontados no decorrer da experiência. Estes dados e o correspondente gráfico estão disponíveis em anexo; juntamente com estes dados, pode-se atentar na figura 5, onde se observa uma fotografia que regista, para uma corrente na amostra de 0mA uma tensão de Hall absurda: na ordem dos -1,3V. Esta serve não só para demonstrar, tal como referido anteriormente, a montagem experimental adotada, como também para reiterar os problemas supramencionados.

4.1 Calibração do Campo Magnético

Para esta parte, como o problema no circuito da tensão não tem qualquer impacto nos resultados, pode-se comparar os dados e resultados obtidos experimentalmente com os obtidos pelos colegas.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

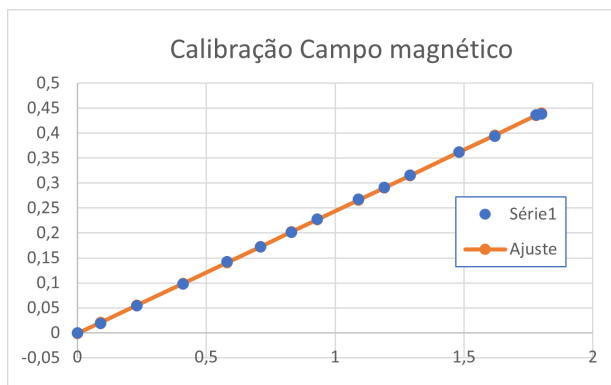


Figura 7: Gráfico com os pontos da calibração obtidos experimentalmente e o respetivo ajuste linear

	Ajuste calibração		
m	0,2452	-0,0015	b
sm	0,0006	0,0007	sb
r^2	0,99991	0,001	sy

Figura 8: matriz do ajuste linear da calibração do campo magnético

Já os resultados obtidos pelos colegas foram:

.

.

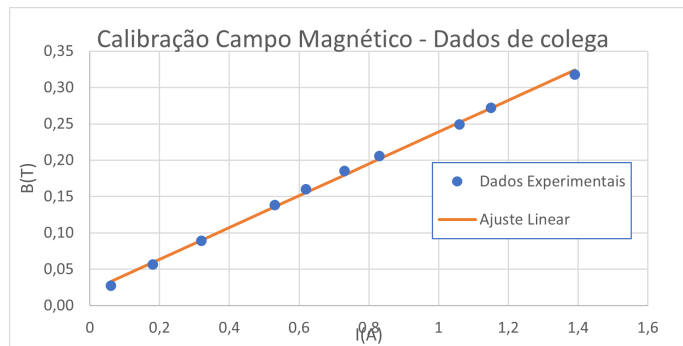


Figura 9: Gráfico com os pontos da calibração obtidos experimentalmente e o respetivo ajuste linear

	Ajuste Calibração		
m	0,219	0,020	b
sm	0,003	0,003	sb
r^2	0,998	0,004	sy

Figura 10: matriz do ajuste linear da calibração do campo magnético

Assim, experimentalmente obteve-se:

$$B(I) = (0,2452I - 0,0015)T \quad (16)$$

E já no caso dos dados retirados por colegas:

$$B(I) = (0,219I - 0,020)T \quad (17)$$

São resultados muito próximos, como era aliás de esperar já que o material é o mesmo, só mudando o desgaste deste e eventualmente a temperatura ambiente.

Como na análise que se segue serão usados os dados dos colegas (vide anexo), terá que ser utilizada a sua expressão para a calibração do campo magnético.

4.2 Tensão de Hall para campo magnético constante: variação da corrente na amostra

4.2.1 Determinação da Densidade de Lacunas e do Coeficiente de Hall

Designe-se desde já:

- I_B como a corrente nas bobines;
- I_p como a corrente na amostra;
- U_H como a tensão de Hall

Fixou-se I_B como sendo: $I_B = (1,01 \pm 0,01)A$

Assim conclui-se, através de (17) que também o campo magnético foi fixado como sendo: $B = B(1,01) = 0,24T$

Variando-se então I_p , a corrente na placa-amostra, numa gama tal que $I_p \in [-20, 20] mA$, registou-se os valores da tensão de Hall, U_H em função de I_p ; (Vide anexo).

Fazendo-se o gráfico de U_H em função de I_p , bem como a respetiva matriz de ajuste e gráfico de ajuste, obteve-se o seguinte:

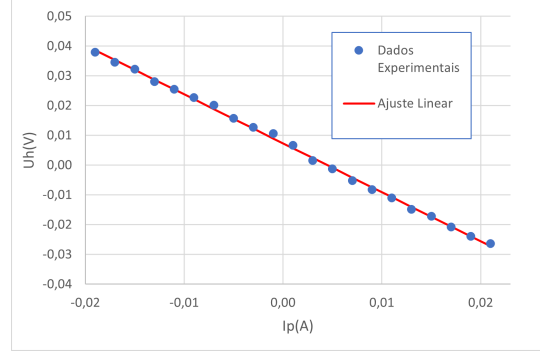


Figura 11: Gráfico de U_H em função de I_p e o respetivo ajuste

	Ajuste UH(Ip)		
m	-1,646	0,0057	b
sm	0,014	0,0002	sb
r^2	0,9986	0,001	sy

Figura 12: matriz do ajuste linear de U_H em função de I_p

Como se pode constatar pela matriz de ajuste obteve-se a seguinte relação:

$$U_H = (-1,65I + 0,0057)V \quad (18)$$

Como se pode observar, a ordenada na origem é muito próxima de zero, tal que se pode mesmo considerar uma equação do tipo $U_H = mI$.

Assim, e aplicando a expressão (11) para $\theta = 90$ surge:

$$U_H = \frac{dB}{Snq} I \quad (19)$$

Ou seja $\frac{dB}{Snq}$ é o supramencionado m , que é neste caso o declive da matriz de ajuste.

Assim determina-se n , o número de portadores como sendo dado por:

$$n = \frac{dB}{Sqm} \quad (20)$$

Com o valor do número de portadores, pela expressão (10) pode-se retirar logo o valor do coeficiente de Hall.

Está portanto tudo determinado.

Para o cálculo de incertezas usar-se-ão as seguintes expressões:

$$\mu(n) = \frac{d}{sqm} \sqrt{(\mu(B))^2 + \left(\frac{B}{m}\right)^2 (\mu(m))^2} \quad (21)$$

E,

$$\mu(R_H) = \frac{\mu(n)}{qn^2} \quad (22)$$

Fazendo-se os cálculos, obtém-se o seguinte, para o caso do número de portadores:

$$n = (4,6 \pm 0,2) \times 10^{20} m^{-3} \quad (23)$$

E para o coeficiente de Hall:

$$R_H = (1,37 \pm 0,02) \times 10^{-2} m^3/C \quad (24)$$

4.2.2 Mobilidade Elétrica

Combinando (8) e (12) surge:

$$V_p = R_H \frac{L}{wd} \frac{1}{\mu} I_p \quad (25)$$

Onde L, d são as dimensões da amostra, w é a espessura do condutor (vide referências); Assim sendo, fazendo-se um gráfico de $V_p(I_p)$, o seu declive, m , deverá ser tal que:

$$|m| = R_H \frac{L}{wd} \frac{1}{\mu} \quad (26)$$

Onde $R_H = (1,3 \pm 0,1) \frac{m^3}{C}$ - a motivação para este valor surge em 4.4, na expressão (38); $L = 2cm$, $d = 1cm$, $w = 2,12mm$;

Nesta parte era suposto variar a corrente na amostra mantendo o campo magnético constante, contudo, os colegas não chegaram a registar os valores da tensão na amostra.

Isto, que à partida parece um problema, torna-se na verdade uma oportunidade: pode-se tentar apurar onde estaria o erro na placa-amostra usada aquando da realização experimental.

Como nesta parte não se usa a medida da tensão de Hall, pode-se tentar usar os dados de V_p registados em laboratório para o varrimento de I_p , que se assumem *a priori* serem válidos, apenas difere a calibração do campo magnético (que nem sequer aparece na expressão da mobilidade). Obteve-se o seguinte:

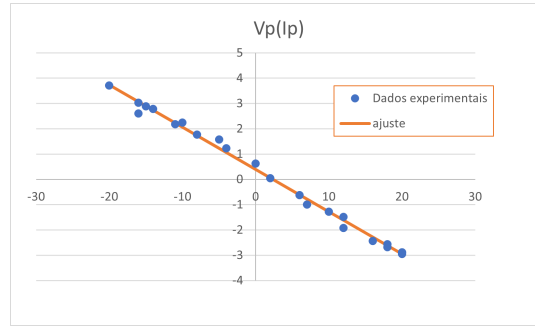


Figura 13: Gráfico de V_p em função de I_p

	ajuste $V_p(I_p)$		
m	-0,167	0,39	b
sm	0,003	0,04	sb
r^2	0,994	0,2	sy

Figura 14: matriz do ajuste linear de V_p em função de I_p

Usando:

$$\mu = \frac{R_H L}{wd} \frac{1}{|m|} \quad (27)$$

E, para a sua incerteza:

$$\mu(\mu) = \frac{R_H L}{wd} \frac{1}{|m|} \sqrt{\left(\frac{\mu(R_H)}{R_H}\right)^2 + \left(\frac{\mu(m)}{m}\right)^2} \quad (28)$$

Tem-se:

$$\mu = (73 \pm 6)m^2/Vs \quad (29)$$

4.3 Tensão de Hall para Corrente Constante: Campo Magnético variável

Varia-se agora o campo magnético, B com a variação da corrente nas bobinas, I_B , sendo que se tem $I_B \in [0; 1,8] A$. Isto fixada a corrente na placa-amostra, I_p , em $I_p = (17 \pm 1)mA$.

Registou-se os dados e efetuou-se o ajuste da tensão de Hall em função do campo magnético. Os resultados obtidos são os que se seguem, note-se que os dados estão em anexo.

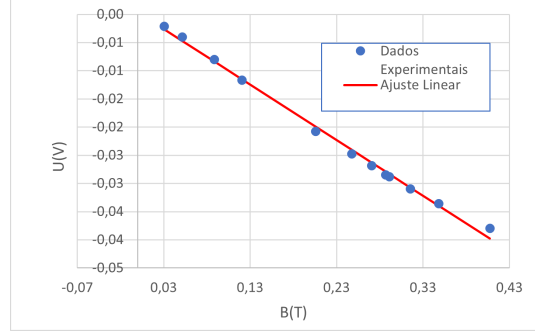


Figura 15: Gráfico de U_H em função de B

	Ajuste U(B)		
m	-0,099	0,0004	b
sm	0,002	0,0005	sb
r^2	0,996	0,001	sy

Figura 16: matriz do ajuste linear de U_H em função de B

Como se pode constatar pela matriz de ajuste obteve-se a seguinte relação:

$$U_H = (-0,099B + 0,0004)V \quad (30)$$

Como se pode observar, a ordenada na origem é novamente muito próxima de zero, pelo que se pode mesmo considerar uma equação do tipo $U_H = mI$.

Assim sendo, podemos usar novamente a expressão (11) para $\theta = 90$, fazendo novamente surgir a expressão (19); desta feita, m , o declive que se observa na matriz de ajuste será tal que $m = \frac{dI}{snq}$, pelo que se pode retirar facilmente n , o número de portadores através da expressão:

$$n = \frac{dI}{smq} \quad (31)$$

Com o valor do número de portadores, pela expressão (10), pode-se novamente retirar o valor do coeficiente de Hall, sendo a sua incerteza dada por (22).

Por sua vez, a incerteza de n será dada por:

$$\mu(n) = \frac{d}{sqm} \sqrt{(\mu(I))^2 + \left(\frac{I}{m}\right)^2 (\mu(m))^2} \quad (32)$$

Está portanto tudo determinado. Fazendo-se os cálculos obtém-se:

Para o caso do número de portadores:

$$n = (5,5 \pm 0,3) \times 10^{20} m^{-3} \quad (33)$$

E para o coeficiente de Hall:

$$R_H = (1,16 \pm 0,07) \times 10^{-2} m^3/C \quad (34)$$

4.4 Aprimoração de resultados

Como se tem valores de n e de R_H obtidos por dois métodos experimentais distintos e igualmente válidos, pode-se combina-los para que se obtenham resultados melhores.

Através das expressões:

$$\langle X \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad (35)$$

E,

$$\mu(\langle X \rangle) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2} \quad (36)$$

Onde X é uma determinada grandeza com N medidas X_i cada uma com uma incerteza de σ_i ;
Aplicando (35) e (36) às grandezas pretendidas, n e R_H obtém-se o seguinte:

Para o caso do número de portadores por unidade de volume:

$$n \equiv \langle n \rangle = (5,0 \pm 0,4) \times 10^{20} m^{-3} \quad (37)$$

E para o coeficiente de Hall:

$$R_H \equiv \langle R_H \rangle = (1,3 \pm 0,1) \times 10^{-2} m^3/C \quad (38)$$

Nota: pode-se afirmar que os resultados obtidos são concordantes, tal é a sua proximidade.

4.5 Variação da Tensão de Hall e da Tensão da Amostra com a Temperatura

Pretendendo-se estudar o efeito da temperatura, devem-se fixar as restantes variáveis.

Assim, fixou-se $I_B = (0,99 \pm 0,01)A$ e $I_p = (18 \pm 1)mA$.

Variando-se então a temperatura,(vide dados em anexo), obteve-se o seguinte:

Para temperaturas decrescentes:

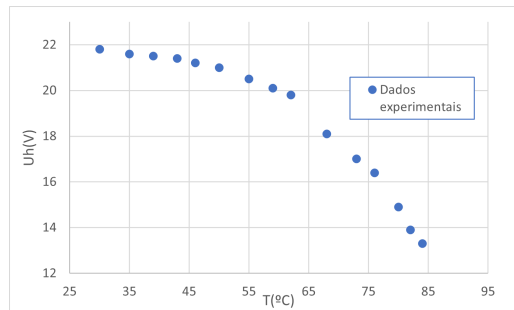


Figura 17: Gráfico da tensão de Hall em função da temperatura para temperaturas decrescentes

Para temperaturas crescentes:

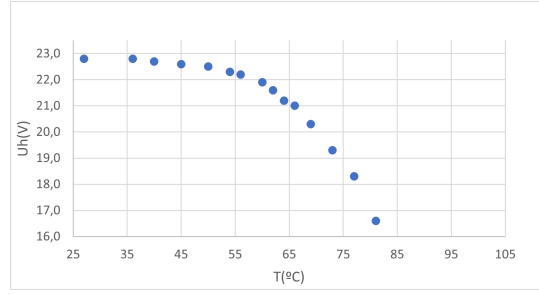


Figura 18: Gráfico da tensão de Hall em função da temperatura para temperaturas crescentes

Observa-se primeiramente que a tensão de Hall é positiva, tal como se esperava dado que se trata de uma amostra do tipo p.

Esperava-se uma mudança de comportamento para temperaturas mais elevadas. Contudo os colegas apenas determinaram a curva a curva experimentalmente até 95°C.

4.5.1 Hiato de Energia

Faz-se agora, para altas temperaturas, o estudo de $\log(V_p)$ em função de $\frac{1}{T}$, para se utilizar a expressão (14) para determinar o valor do Hiato de Energia, E_g através do declive desse mesmo gráfico.

Note-se bem que representar graficamente os dados e o respetivo ajuste linear em função da temperatura ou do seu inverso é equivalente. Assim, optou-se por representar graficamente $\log(V_p)$ em função da temperatura e não do seu inverso, isto por ser muito mais intuitivo, até porque é o que se faz experimentalmente. Não obstante, o ajuste é feito em função do inverso da temperatura, para que se utilize a expressão (14) tal como supramencionado.

Os resultados obtidos foram os que se seguem:

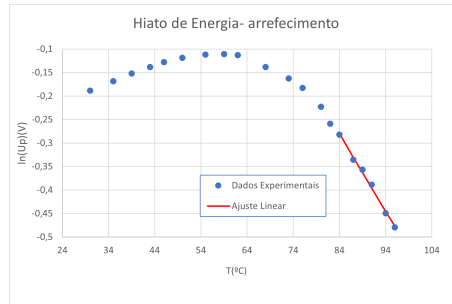


Figura 19: Gráfico de $\log(V_p)$ em função da temperatura e ajuste linear: temperaturas decrescentes

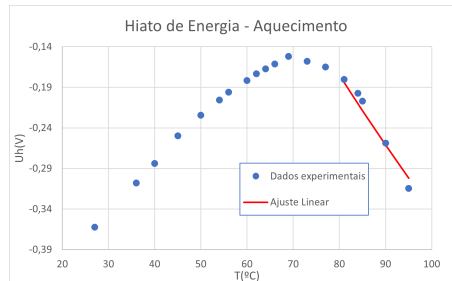


Figura 20: Gráfico de $\log(V_p)$ em função da temperatura e ajuste linear: temperaturas crescentes

Já as matrizes de ajuste obtidas foram as que se seguem:

	Matriz ajuste $\ln(V_p)$ em função de $1/T$		
m	2168	-6,3	b
sm	86	0,2	sb
r^2	0,994	0,006	sy

Figura 21: matriz do ajuste linear de $\log(V_p)$ em função do inverso da temperatura: temperatura decrescente

	Matriz ajuste $\ln(V_p)$ em função de $1/T$		
m	1104	-3,3	b
sm	123	0,3	sb
r^2	0,95	0,01	sy

Figura 22: matriz do ajuste linear de $\log(V_p)$ em função do inverso da temperatura: temperatura crescente

Atentando-se novamente na expressão (14) e tal como referido anteriormente, pode-se obter a energia de ativação, E_g , através da expressão:

$$E_g = 2k_b m \quad (39)$$

E portanto a sua incerteza pode ser obtida através de:

$$\mu(E_g) = 2k_b \mu(m) \quad (40)$$

Através de (39) e (40), e claro, dos valores que se podem constatar nas matrizes de ajuste, conclui-se o seguinte:

Para o arrefecimento:

$$E_g = (5,6 \pm 0,2) \times 10^{-20} J \quad (41)$$

Para o aquecimento:

$$E_g = (2,9 \pm 0,3) \times 10^{-20} J \quad (42)$$

E claro, usando novamente (35) e (36) para aprimorar os dados conclui-se que:

$$E_g \equiv \langle E_g \rangle = (4,3 \pm 0,2) \times 10^{-20} J \quad (43)$$

Nota: Neste caso não se pode propriamente afirmar que os resultados foram concordantes. Muito provavelmente os colegas também terão tido problemas ao efetuar esta parte da experiência, dado o afastamento destes dois valores.

No entanto tal é compreensível, dado que a subida de temperatura é exponencial, tornando difícil a tarefa do registo de dados.

Não obstante, continuam a estar bastante afastados do valor teórico esperado de $9,654 \times 10^{-20} J$ (vide referências: [5]).

Pode-se portanto concluir que os colegas deverão ter tido algum problema ou cometido algum erro.

5 Discussão

O resultado para a mobilidade elétrica não foi bom. Isto pode sugerir um erro na placa-amostra mais generalizado que apenas na componente de medição de U_H . O comportamento de $U_H(T)$ verificado é o expectável. A energia térmica fornecida à amostra permite que os eletrões de valência sejam energéticos

o suficiente para conseguirem passar o hiato de energia, transitando assim para a banda de condução. Deste modo, a tensão de Hall diminui e dar-se-à a transição de condução em regime extrínseco para intrínseco.

As divergências dos resultados obtidos em aquecimento e arrefecimento podem dever-se à diferença de velocidade dos processos - mas podem também dever-se a alguma histerese térmica do germânio.

6 Conclusão

Estudou-se o efeito de Hall para uma amostra de germânio do tipo p, tal como previsto protocolarmente [1].

Verificou-se a relação de linearidade da tensão de Hall com a variação da corrente na amostra.

Verificou-se também a relação de linearidade da tensão de Hall e do campo magnético aplicado.

Caracterizou-se o material através de diversos parâmetros: o coeficiente de Hall, $R_H = (1,3 \pm 0,1) \times 10^{-2} m^3/C$; a densidade de lacunas, $n = (5,0 \pm 0,4) \times 10^{20} m^{-3}$; e, ainda que erroneamente, a mobilidade elétrica, $\mu = (73 \pm 6) m^2/Vs$;

Relativamente a efeitos térmicos, não se conseguiu mostrar que o tipo de portadores varia com a temperatura, já que a gama estudada pelos colegas não foi a mais adequada. Consequentemente, os valores para a energia de hiato não foram os mais satisfatórios $E_g = (4,3 \pm 0,2) \times 10^{-20} J$.

7 Anexos

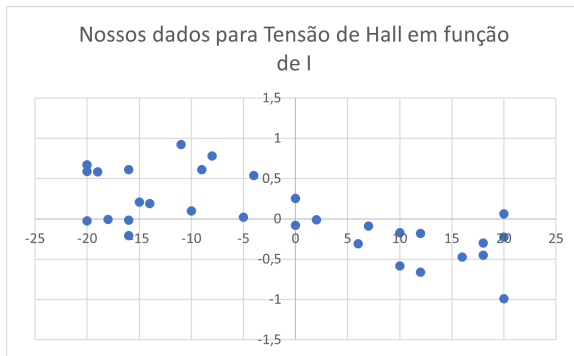
Calibração Obtida Experimentalmente			
I(A) +/- 0,001	B(mT) +/- 1	B(T) +/- 0,001	B(T) ajuste
0	0	0	-0,001
0,09	19	0,019	0,021
0,23	54	0,054	0,055
0,41	98	0,098	0,099
0,58	142	0,142	0,141
0,71	172	0,172	0,173
0,83	201	0,201	0,202
0,93	228	0,228	0,227
1,09	268	0,268	0,266
1,19	291	0,291	0,290
1,29	316	0,316	0,315
1,48	362	0,362	0,362
1,62	394	0,394	0,396
1,78	436	0,436	0,435
1,8	438	0,438	0,440

Calibração: Dados de colega		
I(A)	B(mT)	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

Dados obtidos experimentalmente			
Ip(mA) +/- 1	U _H (V) +/- 0,001	V ₀ (V) +/- 0,01	
-20	0,6691	2,96	
-19	0,585	2,82	
-16	0,51	2,6	
-11	0,5232	2,18	
-8	0,7784	1,77	
-4	0,5392	1,23	
0	0,2565	0,62	
2	-0,0123	0,05	
6	-0,3094	-0,62	
10	-0,5813	-1,28	
12	-0,6623	-1,48	
16	-0,4725	-2,43	
18	-0,449	-2,56	
20	-0,991	-2,95	
20	-0,226	-2,89	
10	-0,173		
-20	0,59	3,71	
-15	0,21	2,89	
-9	0,61		
-14	0,19	2,78	
-10	0,1	2,25	
-5	0,02	1,57	
0	-0,08		
7	-0,09	-0,99	
12	-0,179	-1,92	
18	-0,3	-2,68	
20	0,062	-2,88	
-16	-0,016	3,03	
-18	-0,005		
-16	-0,207	2,25	
-20	-0,027	3,09	

I _x (A)	U _H (V)	U _H (V) - Ajuste Linear
-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

Figura 23: [a]:Registo de dados para a calibração realizada experimentalmente; [b]:Registo de dados para a calibração realizada experimentalmente por colegas; [c]: Registo de dados para a parte da variação da corrente na amostra realizada experimentalmente; [d]: Registo de dados para a parte da variação da corrente realizada experimentalmente por colegas.



I_p (A)	$8(T)$	U_H (V)	U_P (V)	U_H (V) - Ajuste Linear
0,05	0,0307	-2,12E-03		-0,003
0,145	0,0515	-4,05E-03		-0,005
0,315	0,0887	-8,02E-03		-0,008
0,46	0,1204	-1,17E-02		-0,012
0,85	0,2059	-2,07E-02		-0,020
1,04	0,2475	-2,48E-02		-0,024
1,145	0,2705	-2,69E-02		-0,026
1,24	0,2913	-2,88E-02		-0,028
1,22	0,2869	-2,85E-02		-0,028
1,35	0,3154	-3,09E-02		-0,031
1,5	0,3482	-3,36E-02		-0,034
1,77	0,4073	-3,80E-02		-0,040

T (°C)	$1/T$ (K)	U_H (V)	U_P (V)	$\ln(U_P)$ (V)	$\ln(U_P)$ - Ajuste Linear
1		0,001		0,001	
30	0,0032987	21,8	0,828	-0,188742125	
35	0,00324517	21,6	0,845	-0,168418652	
39	0,00320359	21,5	0,859	-0,151986357	
43	0,00316306	21,4	0,871	-0,138113302	
46	0,00313332	21,2	0,88	-0,127833372	
50	0,00309454	21	0,888	-0,118783536	
55	0,00304739	20,5	0,894	-0,112049504	
59	0,00301069	20,1	0,895	-0,110931561	
62	0,00298374	19,8	0,893	-0,113168698	
68	0,00293126	18,1	0,871	-0,138113302	
73	0,00288892	17	0,85	-0,162518929	
76	0,0028641	16,4	0,833	-0,182721637	
80	0,00283166	14,9	0,8	-0,223143551	
82	0,00281571	13,9	0,772	-0,258770729	
84	0,00279994	13,3	0,754	-0,282362911	-0,279751215
87	0,00277662	12	0,715	-0,335472736	-0,330312048
89	0,00276129	11,5	0,7	-0,356674944	-0,363553893
91	0,00274612	11	0,678	-0,388607991	-0,396430593
94	0,00272368	9,8	0,638	-0,449416996	-0,445074051
96	0,00270893	9,2	0,619	-0,479650006	-0,477063785

T (°C)	$1/T$ (K)	U_H (V)	U_P (V)	$\ln(U_P)$ (V)	$\ln(U_P)$ - Ajuste Linear
1		0,001		0,001	
27	0,00333167	22,8	0,696	-0,362405619	
36	0,00323468	22,8	0,735	-0,30788478	
40	0,00319336	22,7	0,753	-0,283690051	
45	0,00314317	22,6	0,779	-0,249744233	
50	0,00309454	22,5	0,799	-0,224394333	
54	0,0030567	22,3	0,814	-0,205794913	
56	0,00303813	22,2	0,822	-0,196014884	
60	0,00300165	21,9	0,834	-0,181521877	
62	0,00298374	21,6	0,841	-0,173163619	
64	0,00296604	21,2	0,846	-0,167235919	
66	0,00294855	21	0,851	-0,16134315	
69	0,00292269	20,3	0,859	-0,151986357	
73	0,00288892	19,3	0,854	-0,157824085	
77	0,00285592	18,3	0,848	-0,164874643	
81	0,00282366	16,6	0,835	-0,180323554	-0,183632742
84	0,00279994	15,6	0,821	-0,19723217	-0,209811511
85	0,00279213	15	0,813	-0,207024169	-0,218440308
90	0,00275368	12,6	0,772	-0,258770729	-0,260871464
95	0,00271628	10,9	0,73	-0,314710745	-0,302150069

Figura 24: [a]: Gráfico de U_H em função de I_p obtido experimentalmente: demonstra os erros obtidos; [b]: Registo de dados para a parte da variação do campo magnético realizada experimentalmente por colegas; [c]: Registo de dados para a parte da variação da temperatura - para temperaturas decrescentes - realizada experimentalmente por colegas; [d]: Registo de dados para a parte da variação da temperatura - para temperaturas crescentes - realizada experimentalmente por colegas;

Todos os gráficos de resíduos encontram-se disponíveis em [3]; Por norma, os resíduos apresentaram distribuições pontuais aleatórias e com $\mu(y) \equiv 2s(y)$ sempre a superar o seu módulo.

Para além disso, em todas as matrizes de ajuste r^2 foi muito próximo de 1.

Por estas razões, pode-se afirmar que os ajustes feitos foram satisfatórios.

Referências

- [1] Protocolos de laboratório de física iii
- [2] Guia experimental phywe. <https://www.phywe.com/equipment-accessories/measurement-devices/>
- [3] João Brites. Logbook Laboratório de Física iii, 2022.
- [4] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/Hall_Effect_Measurement_Setup_for_Electrons.png
- [5] <https://semicondutores.wixsite.com/materiais/germnia>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect