

1308 – Efeito Hall



Roteiro elaborado com base na documentação que acompanha o conjunto por:
Dra. Marisa Almeida Cavalcante – PUC-SP & Osvaldo Guimarães – PUC-SP

Equipamentos

	127 V	220 V	
Base tripé -PASS-	02002.55	02002.55	1
Haste de suporte -PASS-,quadrada, l 250mm	02025.55	02025.55	1
Grampo de ângulo reto -PASS-	02040.55	02040.55	2
Distribuidor	06024.00	06024.00	1
Caixa de conexão	06030.23	06030.23	1
Ponte de retificação 250 VAC/5 A	06031.11	06031.11	1
Peças pólo,plana,30x30x48mm, 2	06489.00	06489.00	1
Núcleo de ferro, forma de U, laminado	06501.00	06501.00	1
Bobina, 300 voltas	06513.01	06513.01	2
Medidor, 10/30 mV, 200 graus.C	07019.00	07019.00	1
Multímetro digital	07134.00	07134.00	2
Cabo de conexão, 250 mm, vermelho	07360.01	07360.01	1
Cabo de conexão, 250 mm, azul	07360.04	07360.04	1
Cabo de conexão, 500 mm, vermelho	07361.01	07361.01	7
Cabo de conexão, 500 mm, amarelo	07361.02	07361.02	2
Cabo de conexão, 500 mm, azul	07361.04	07361.04	5
Cabo de conexão,1000 mm, amarelo	07363.02	07363.02	2
Cabo de conexão,1000 mm, azul	07363.04	07363.04	2
Efeito Hall ,n-Ge, lâmina condutora E	11802.00	11802.00	1
Efeito Hall,Cu, lâmina condutora E	11803.00	11803.00	1
Efeito Hall,zinc, lâmina condutora E	11804.01	11804.01	1
Efeito Hall,p-ge, lâmina condutora E	11805.00	11805.00	1
Condutor intrínseco Ge, car.b.	11807.00	11807.00	1
Condutor de Cu	11808.00	11808.00	1
Grampo universal	37715.00	37715.00	1
Potenciômetro PEK 560 Ohm lin 4W	39103.18	39103.18	1
Resistor de carbono PEK 1W 5% 180 Ohm	39104.11	39104.11	1
Resistor de carbono PEK 1W 5% 330 Ohm	39104.13	39104.13	1
Capacitor eletrolítico PEK 2000mmF/25V	39113.08	39113.08	1
Fonte de alimentação	13505.98	13505.93	1

1308 – Efeito Hall

Efeito Hall no Germânio – p

Tópicos Relacionados

Semicondutores, teoria de bandas de condução, banda proibida, condutores intrínsecos e extrínsecos, banda de valência, banda de condução, força de Lorentz, relutância magnética, mobilidade de portadores de carga, condutividade, energia de *gap* e coeficiente Hall.

Aviso

Este roteiro inclui a utilização de um gaussímetro como alternativa para mensuração do campo magnético B , embora esse elemento não faça parte do item padrão do projeto do MEC.

Se o laboratório não dispuser desse medidor, a expressão

$$B = 0,06437 \cdot I_M, \text{ onde}$$

I_M é a intensidade da corrente que circula nas espiras pode ser usada, ou ainda, de maneira um pouco mais aprimorada, uma curva de calibração do conjunto bobina-núcleo previamente construída.

Princípios e objetivos

A resistividade e a tensão Hall de uma amostra retangular de Germânio são medidas em função da temperatura e do campo magnético aplicado. A energia de *gap*, a condutância específica (condutividade), o tipo de carga transportada e a mobilidade desses portadores de carga são determinados pelas medidas efetuadas.

1308 – Efeito Hall

Propostas de experimentos

1. Medir a tensão Hall a temperatura ambiente sob campo magnético constante como função da corrente e construir o gráfico (medidas feitas sem a compensação da distorção na tensão sob o condutor). O campo magnético pode ser medido pelo gaussímetro ou obtido a partir da curva de calibração do conjunto bobinas-núcleo de ferro.
2. Medir a tensão entre os terminais da amostra sob temperatura ambiente e corrente constante em função do campo magnético ($\vec{B}$).
3. Medir a tensão entre os terminais da amostra sob corrente constante em função da temperatura. A largura de banda (gap) do Germânio é então calculada usando-se essas medidas.
4. Medir a tensão Hall U_H em função do campo magnético sob temperatura ambiente. O sinal dos portadores de carga e a constante Hall R_H juntamente com a mobilidade Hall μ_H e a concentração de portadores p são obtidas usando-se essas medidas.
5. Medir a tensão Hall em função da temperatura sob campo magnético constante e construir o gráfico usando-se essas medidas.

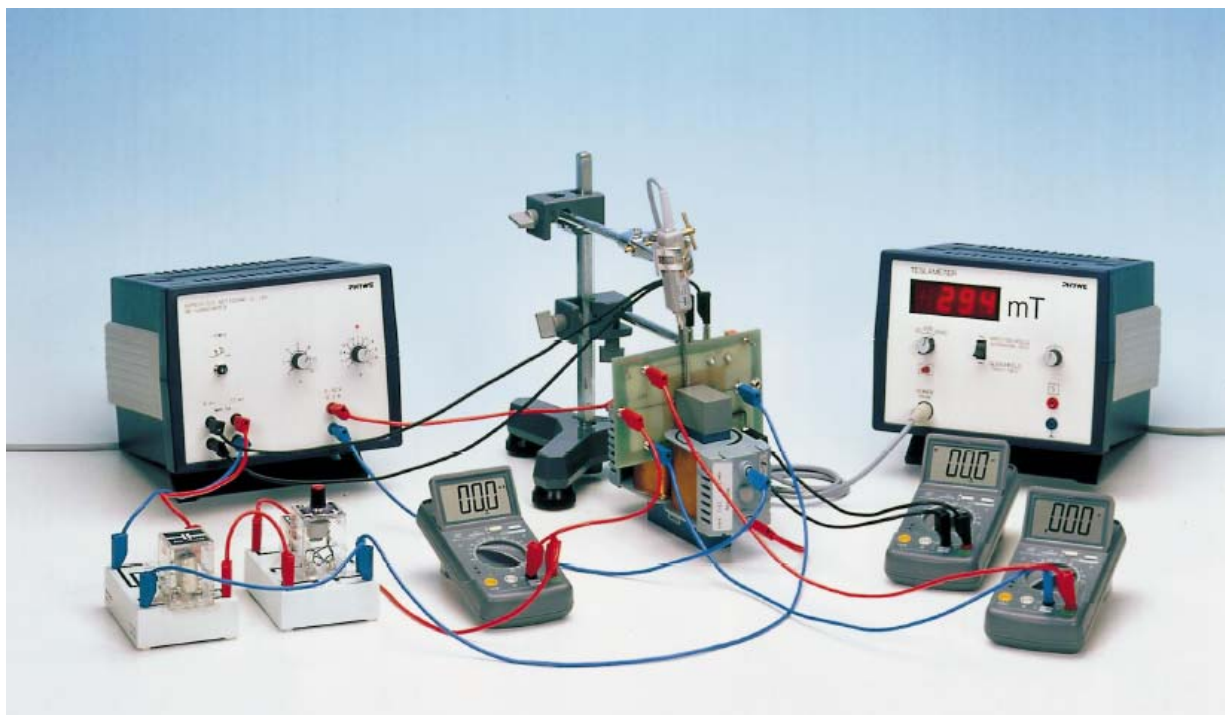


Fig. 1 - Montagem do experimento para medidas do efeito Hall usando-se o gaussímetro (acessório não incluso).

1308 – Efeito Hall

Montagem e procedimentos

A montagem do experimento, com a inclusão do gaussímetro, está apresentada na figura 1.

A placa que contém o elemento em que vai ser analisado o efeito Hall deve ser colocada cuidadosamente entre os polos do ímã para evitar arranhões nos circuitos impressos. Em particular, deve-se também evitar torsões ou dobras para não danificar o cristal.

1. A corrente monitorada provém de uma fonte de corrente alternada que é transformada em contínua por um retificador de ponte. Para tanto, o retificador é conectado à fonte de alimentação conforme indica a figura 2.

Um capacitor eletrolítico é conectado à saída da ponte retificadora a fim de estabilizar a tensão (observe bem a polaridade de conexão).

A corrente monitorada é ajustada com a utilização do potenciômetro.

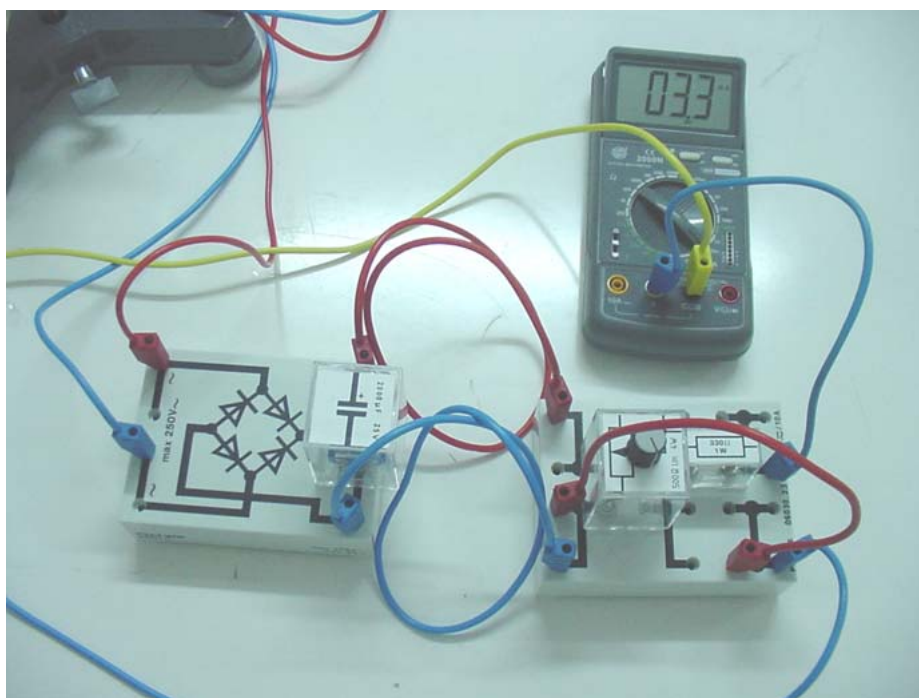


Fig. 2b – Montagem da ponte retificadora com capacitor para estabilizar a tensão.

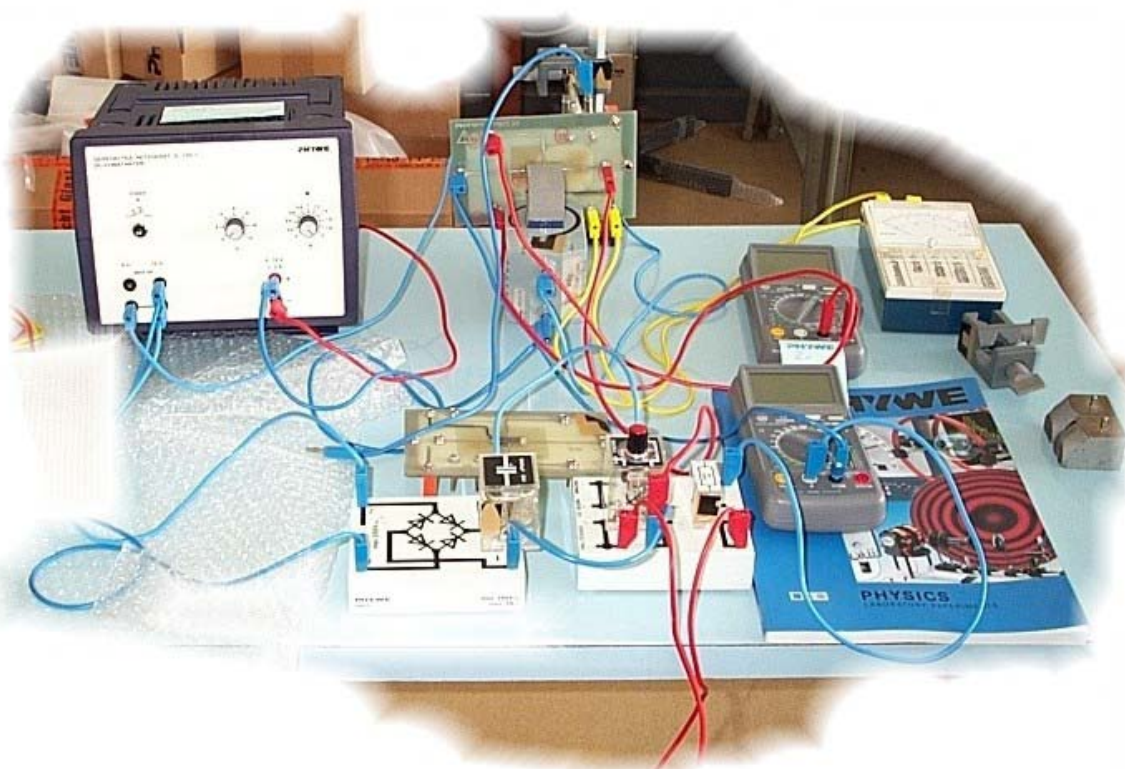
1308 – Efeito Hall

Fig. 2d- Montagem do experimento - UFRJ

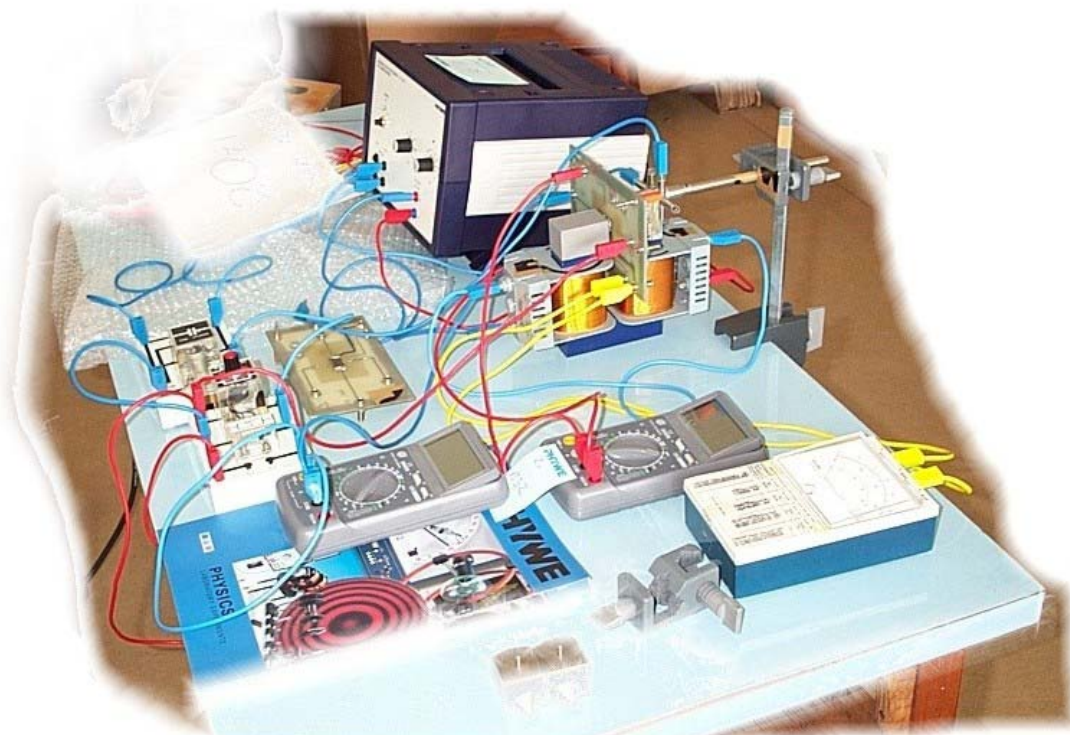


Fig. 2d- Montagem do experimento - UFRJ

1308 – Efeito Hall

Um resistor de $330\ \Omega$ é conectado em série com a intenção de limitar a intensidade da corrente e prevenir sobrecargas além do máximo recomendado para o elemento ($50\ \text{mA}$). Nessas medidas, o cristal é conectado diretamente (terminais A e B, como na fig.2).

Nesse ponto do experimento a fonte de corrente constante e a compensação de distorção na voltagem estão inativas.

O campo magnético é produzido por duas bobinas conectadas em série alimentadas pela saída DC da fonte de alimentação. É recomendável para esse processo ajustar a tensão para o valor máximo da fonte para em seguida ir ajustando a corrente para o valor desejado usando-se o controle de corrente da fonte. Dessa forma, a fonte de alimentação funciona como fonte de corrente constante e estabilizada, assegurando que a variação de resistência do elemento com a temperatura não tenha efeito sobre a intensidade da corrente e, em decorrência, do campo magnético.

O campo magnético pode ser medido com o gaussímetro, colocando-se a sonda na região central do campo (depois que o conjunto for montado) e girando-a até que se obtenha um máximo, ou obtido a partir da curva de calibração do conjunto bobinas-núcleo de ferro.

A tensão Hall é medida pelo multímetro digital de alta impedância.

2. A fonte de alimentação da corrente monitorada é agora conectada aos terminais externos A e C (fig. 2) de forma que se torne operante. O potenciômetro de $560\ \Omega$ é ajustado para a tensão máxima. A fonte de corrente pode agora ser colocada em torno de $30\ \text{mA}$ (o ajuste fino suplementar pode ser usado). A tensão entre os terminais A e B da amostra é medida usando-se o multímetro digital.

A resistência da amostra na ausência do campo magnético, R_0 , é calculada e a variação de resistência $\frac{R_B - R_0}{R_0}$ é plotada em um gráfico em função do campo de indução magnética B .

3. A amostra é aquecida a temperaturas acima de $175\ ^\circ\text{C}$ usando-se a serpentina de aquecimento já agregada à placa. A corrente elétrica requerida para o aquecimento é obtida a partir da saída $6\ \text{V AC}$ da fonte de alimentação. A temperatura da amostra T pode ser obtida medindo-se a tensão no termopar Cu/CuNi (agregado à placa) com o voltímetro apropriado. Ele já apresenta em sua parte inferior uma escala em que se lê diretamente a temperatura considerando-se uma temperatura ambiente de $27\ ^\circ\text{C}$.

A escala é baseada na expressão:

$$T = \frac{U_T}{\alpha} + T_0, \text{ onde}$$

U_T = tensão no termopar;

$\alpha = 40\ \mu\text{V/K}$;

T_0 = temperatura ambiente

CAUTION: A temperatura da amostra não deve exceder $190\ ^\circ\text{C}$.

1308 – Efeito Hall

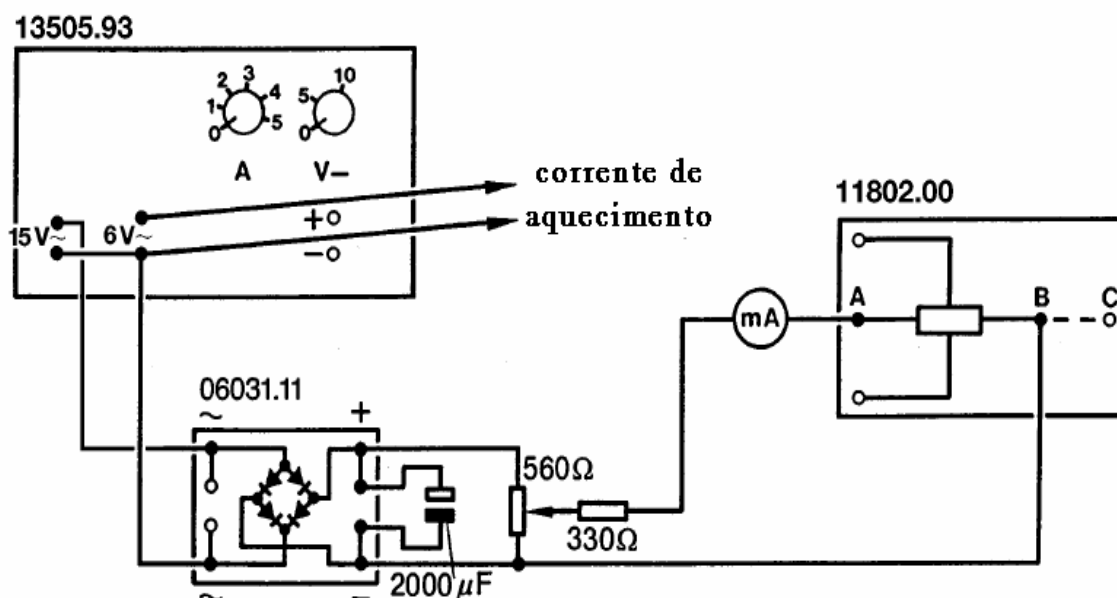


Fig. 2 – Diagrama do circuito da fonte de corrente monitorada.

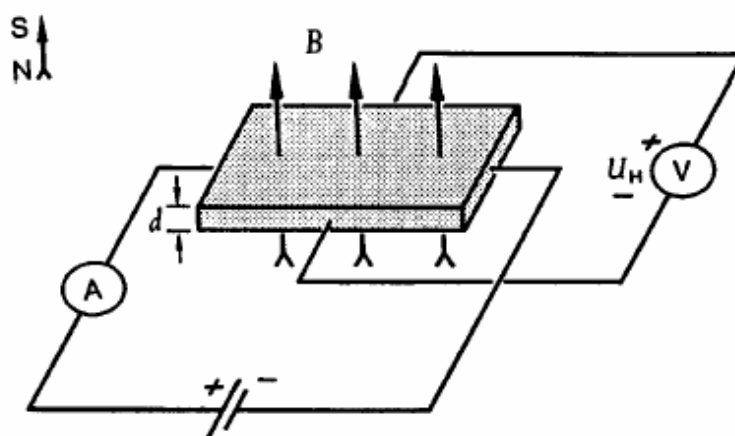


Fig. 3 – Efeito Hall em uma amostra de secção retangular. A polaridade da tensão Hall do esquema corresponde a uma situação em que os portadores de carga são negativos.

4. Com a fonte campo magnético desligada e os blocos terminais do núcleo de ferro removidos (magnetismo remanescente), liga-se a corrente monitorada (terminais A e C – fig.2) e ajusta-se o zero da tensão Hall no potenciômetro de compensação. Repõe-se os blocos terminais do núcleo de ferro, liga-se a fonte

1308 – Efeito Hall

do campo magnético e a tensão Hall é medida em função do campo magnético nos dois sentidos.

5. Com o campo magnético constante, a temperatura da amostra é lentamente aumentada até o máximo tolerado e a tensão Hall é medida. Caso o campo magnético esteja sendo medido com o gaussímetro, a sonda desse aparelho deve ser removida durante o processo de aquecimento.

Teoria e Análise

Se uma corrente I flui através de uma lâmina condutora retangular e se a lâmina está imersa em um campo magnético normal à sua superfície, uma tensão – a chamada tensão Hall – é produzida entre as laterais opostas da lâmina.

Este fenômeno provém da força de Lorentz: os portadores de carga que constituem a corrente elétrica através da amostra são defletidos pela ação da força magnética conforme o sinal de carga que têm e conforme suas velocidades $\vec{v}$:

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad , \quad \text{onde}$$

F = força que age nos portadores de carga

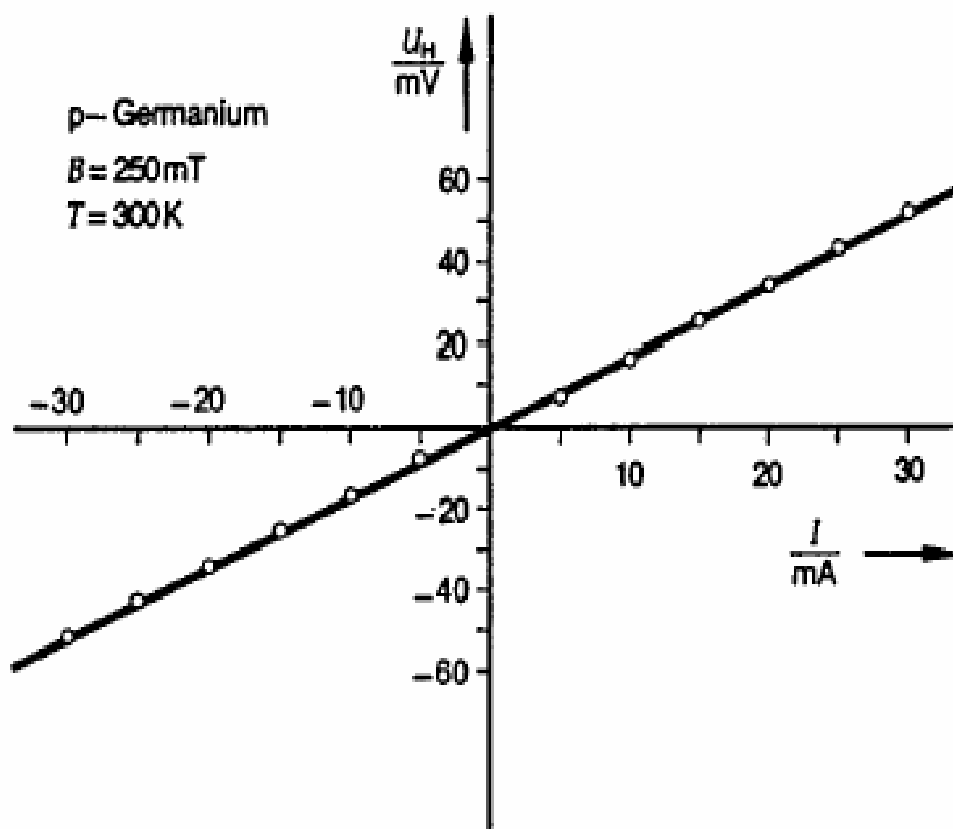


Fig. 4 – Tensão Hall em função da Intensidade da corrente.

Uma vez que nos semi-condutores os portadores de carga negativos e positivos se movem em direções opostas, eles são defletidos no mesmo sentido.

O tipo de portador de carga que constitui o fluxo de corrente pode então ser determinado pela polaridade da tensão Hall, conhecendo-se o sentido da corrente e do campo magnético.

1. A figura 4 mostra que há uma relação linear entre a intensidade da corrente elétrica I e a tensão Hall U_H :

$$U_H = \alpha I, \text{ onde } \alpha = \text{constante de proporcionalidade.}$$

1308 – Efeito Hall

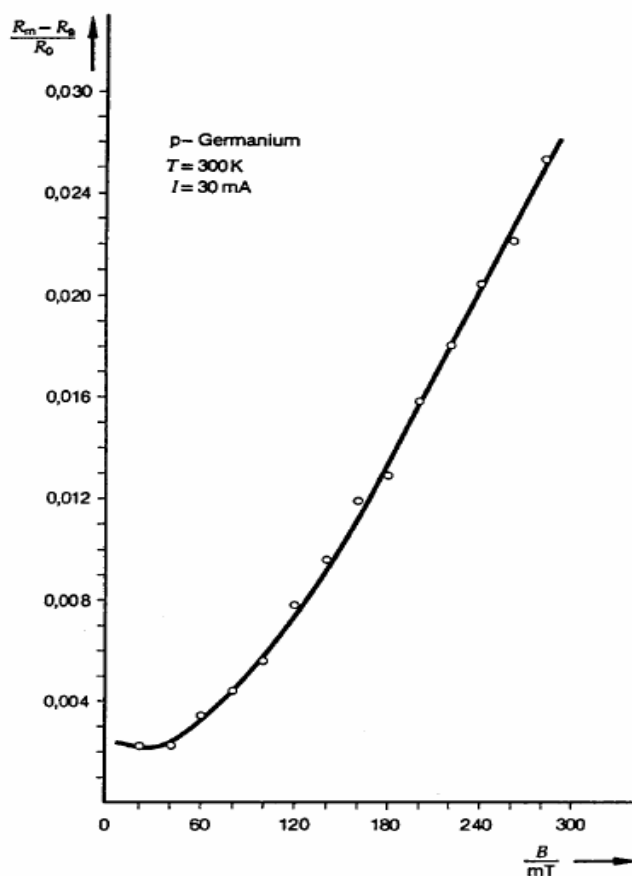


Fig. 5 – Comportamento da resistência elétrica em função do campo magnético aplicado.

2. A variação na resistência elétrica da amostra devido ao campo magnético está associada à redução do livre percurso médio dos portadores de carga. A figura 5 mostra que a relação entre essas grandezas não é linear e sim uma função quadrática.

3. Na região de condutividade intrínseca, temos:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \text{ em que}$$

σ = condutividade, E_g = energia do *gap*, k = constante de Boltzman e T = temperatura absoluta.

Se construirmos o gráfico do logaritmo da condutividade em função do recíproco da temperatura (T^{-1}), obtemos uma reta, cujo coeficiente angular é:

$$b = -\frac{E_g}{2k}, \text{ por onde podemos obter } E_g.$$

Dos valores medidos usados na figura 6, obtemos por regressão linear a reta:

1308 – Efeito Hall

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} \cdot T^{-1},$$

isto é $b = -\frac{E_g}{2k} = -3,62 \cdot 10^3 \text{ K}$, com desvio padrão $s_b = \pm 0,09 \cdot 10^3 \text{ K}$.

Como $k = 8,625 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$, obtemos $E_g = b \cdot 2k \Rightarrow E_g = (0,62 \pm 0,02) \text{ eV}$

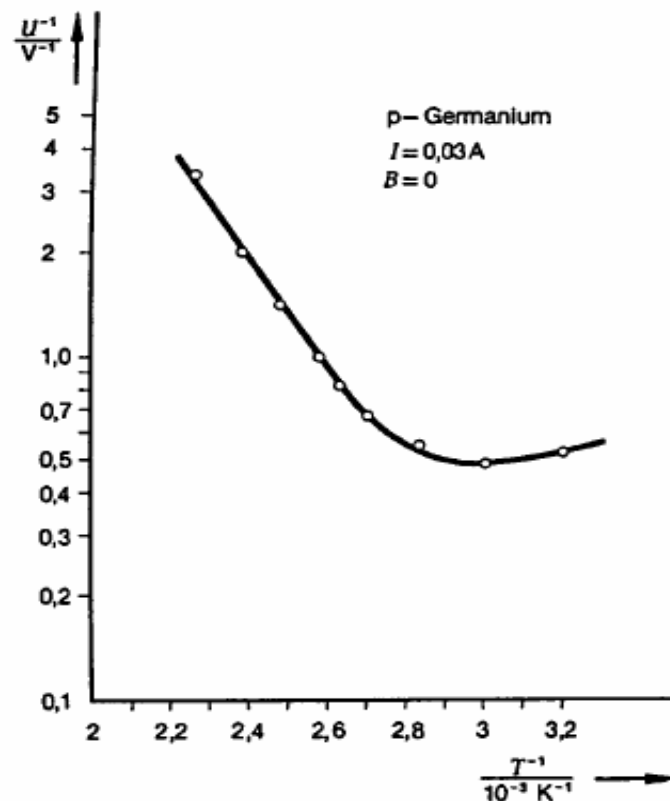


Figura 6. Recíproco da tensão aplicada na amostra em função do recíproco da temperatura absoluta. Como I era constante durante as medidas, $U^{-1} \sim \sigma$ e o gráfico é portanto semelhante ao da condutividade em função do recíproco da temperatura.

4. Tendo-se o sentido da corrente monitorada e do campo magnético mostrados na figura 3, o fluxo dos portadores de carga que resultam na corrente elétrica na amostra é defletido. Portanto, se elétrons são os portadores de carga predominantes (amostra n-dopada), a extremidade dianteira da figura fica com excesso de cargas negativas, e, se tivermos condução de lacunas (amostra p-dopada), positiva.

A condutividade σ_0 , a mobilidade dos portadores de carga μ_H , e a concentração de portadores p estão relacionadas com a constante de Hall R_H pelas expressões:

1308 – Efeito Hall

$$R_H = \frac{U_H}{B} \cdot \frac{d}{I}, \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma_0 \quad \text{e} \quad p = \frac{1}{e \cdot R_H}$$

A figura 7 nos mostra uma relação linear entre a tensão Hall e o campo B . Com os valores usados na figura 7, a regressão linear juntamente com a fórmula

$$U_H = U_0 + b \cdot B$$

tem como inclinação $b = 0,191 \text{ VT}^{-1}$, com desvio padrão $s_b = \pm 0,002 \text{ VT}^{-1}$. A constante Hall R_H , portanto, vem a ser:

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

onde a espessura da amostra é $d = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ e $I = 0,030 \text{ A}$.

Assim, $R_H = 6,37 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$, com desvio padrão $s_{RH} = 0,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$

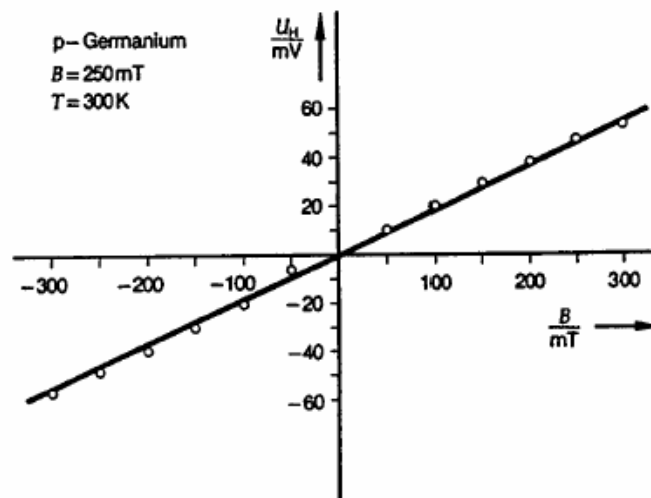


Fig. 7 – Tensão Hall em função do campo magnético

A condutividade sob temperatura ambiente é calculada a partir do comprimento da amostra ℓ , da área secção transversal A e da resistência R_0

(fig. 2), como segue: $\sigma_0 = \frac{\ell}{RA}$.

Com os valores medidos, temos : $\ell = 0,02 \text{ m}$, $R_0 = 45,0 \Omega$ e $A = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, obtemos $\sigma_0 = 44,4 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

A mobilidade Hall dos portadores de carga pode agora ser determinada por:

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma_0$$

1308 – Efeito Hall

Usando as medidas dadas acima, temos:

$$\mu_H = (0,283 \pm 0,003) \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$$

A concentração das lacunas p da amostra p-dopada é calculada por:

$$p = \frac{1}{eR_H}$$

Usando $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A.s}$, temos: $p = 9,7 \cdot 10^{-20} \text{ m}^{-3}$.

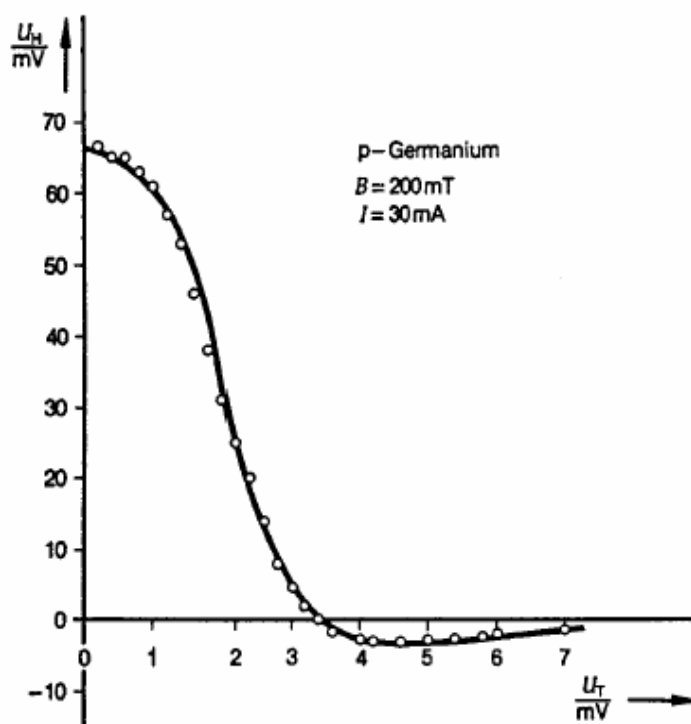


Fig. 8 – Tensão Hall em função da temperatura.

5. A figura 8 mostra que, inicialmente, há um decréscimo da tensão Hall com o aumento da temperatura. Uma vez que as medidas foram feitas sob corrente constante, podemos assumir que esse fato como atribuído a crescimento do número de portadores de carga (transição da condução extrínseca para a intrínseca) e a redução na velocidade de arrastamento (deriva), pois iguais intensidades de corrente com o crescimento do número de portadores de carga significam redução na velocidade de deriva. A velocidade de deriva, por sua vez, está relacionada com a tensão Hall pela da força de Lorentz.

A corrente no cristal é constituída de dois tipos de portadores: elétrons livres e lacunas: $I = A \cdot e (\nu_n \cdot n + \nu_p \cdot p)$.

1308 – Efeito Hall

Desde que a faixa de velocidades de concentração de lacunas p e de elétrons n sejam aproximadamente iguais, cessa a contribuição total para o efeito Hall, quando temos então a maior velocidade dos portadores, ou (desde que $v = \mu \cdot E$), a máxima mobilidade.

A figura 8 mostra uma curva típica da inversão no sentido da tensão Hall para um material p-dopado, em uma determinada temperatura.

Intensidade do campo magnético

A intensidade do campo magnético no interior de um solenóide é dada por:

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{nI}{\ell}, \text{ onde}$$

μ_r = permeabilidade relativa, μ_0 = permeabilidade do vácuo, n = número de espiras, I = intensidade da corrente elétrica e ℓ = comprimento da bobina. Vemos então que a intensidade do campo magnético é proporcional à intensidade da corrente nas espiras. Pelas medidas feitas com esse conjunto, a constante de proporcionalidade é 0,06437 T/A. Medindo-se a intensidade da corrente I_M que circula nas bobinas, obtemos a intensidade do campo magnético por:

$$B = 0,06437 \cdot I_M$$