

Instrumentação para análise de Efeito Hall

LUCAS DE OLIVEIRA LOPES (119757)

lucaslopes1@gmail.com

Coordenador: Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Urbano

Instituto de Física "Gleb Wataghin" - UNICAMP

13 de julho de 2018

Resumo

O projeto consiste na reabilitação de um equipamento para observar e analisar o Efeito Hall, a partir de equipamentos disponibilizados por laboratórios do IFGW. O aparato ficará disponível no Laboratório de física moderna e será utilizado nos próximos semestres na disciplina F 740. Este trabalho apresenta a teoria envolvida no Efeito Hall, como o aparato instrumental para sua análise, possíveis formas de realizar o experimento e ao final proponho um roteiro experimental. Adianto-me dizendo que tivemos problemas com fornecimento de equipamentos e amostras, por estes motivos o aparato experimental ainda não está totalmente concluído.

I. INTRODUÇÃO

Os processos computacionais conhecidos e largamente utilizados na indústria, em pesquisa e pelo consumidor comum, em seus computadores pessoais, dependem do estudo em semicondutores. Estes estudos permitiram a elaboração e construção de transistores, bem como seu aperfeiçoamento tornando-os melhores e menores[7].

Tendo isso em vista, métodos de caracterização de semicondutores são de grande importância para esse progresso e devem ser conhecidos pelos estudantes de física. Dentre muitos métodos o Efeito Hall foi escolhido pelos professores Ricardo Urbano e Richard Landers para se tornar um experimento didático da disciplina F740. Amplamente usado pela indústria e em pesquisa a análise do Efeito Hall permite determinar densidade de portadores de carga livres, resistividade elétrica e mobilidade de elétrons em uma amostra.

O Efeito Hall pode ser definido como uma diferença de potencial produzida em um condutor elétrico, ou semicondutor, normal a uma corrente elétrica e a um campo magnético aplicado perpendicular à essa corrente. Este efeito observado pela primeira vez por Edwin Hall no fim do século XIX, também pode ser chamado de "Efeito Hall comum" para distingui-lo de outros tipos efeitos Hall que possuem mecanismos físicos distintos, como Efeito Hall de Spin, Efeito Hall quântico, Efeito Hall de Gases Ionizados e Efeito Hall

Anômalo. Este trabalho se dedicou apenas a trabalhar com Efeito Hall comum[5].

II. BALIZAS TEÓRICAS

Como nossa proposta é observar o Efeito Hall em semicondutores devemos primeiramente discutir suas propriedades básicas. Essas propriedades são definidas pelo comportamento dos portadores de carga: elétrons e buracos, portadores de carga negativa e positiva respectivamente. Se nosso semicondutor é um cristal puro, o número de elétrons n é igual ao número de buracos p , pois para cada elétron que passa para a banda de condução, é criado um buraco na banda de valência. Estes são denominados de portadores de carga intrínsecos. Para uso prático de um semicondutor, é feita uma dopagem (inserção de impurezas) de tal forma que seja capaz de doar elétrons para a banda de condução (fazendo com que seja um cristal tipo n) ou de aceitar elétrons da banda de valência, criando buracos (fazendo com que seja um cristal tipo p). As impurezas que produzem este efeito são denominadas de portadores carga extrínsecos. Para os semicondutores extrínsecos o efeito de Hall pode ser analisado da mesma forma de um condutor simples pois é suficiente considerar apenas o movimento dos portadores majoritários sejam do tipo n ou do tipo p [1].

Considerando que a amostra estudada é um semicon-

duto extrínseco podemos analisar o efeito a partir do modelo de Drude para condutores. Entre os contatos nas extremidades do comprimento L faz-se passar uma corrente elétrica de intensidade I . Sem campo de indução magnética B_z , a tensão V_h entre as faces da largura w é igual a zero. Quando se aplica um campo estático B_z , não necessariamente uniforme, aparece uma tensão V_h diferente de zero.

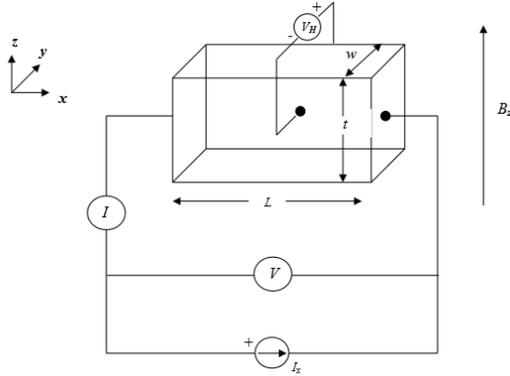


Figura 1: Esquema da montagem e grandezas que podem ser medidas em uma amostra onde ocorre o Efeito Hall

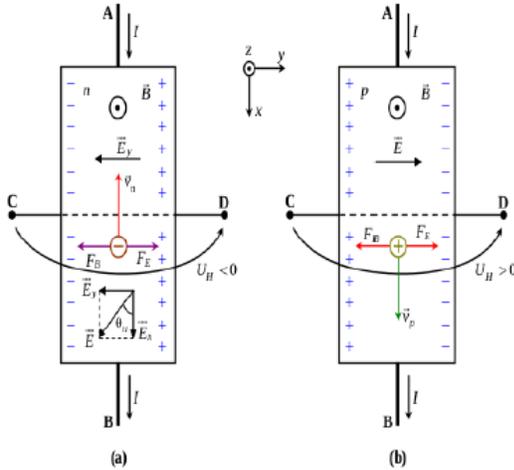


Figura 2: Efeito de Hall em semicondutores: tipo-n (a) e tipo-p (b)

Se existe uma corrente elétrica podemos afirmar portadores de carga uma velocidade média v_x não nula. Uma vez que estes portadores estão inseridos em um campo magnético B ficam submetidos a ação de uma força de natureza magnética dada por:

$$\vec{F}_m = q\vec{v}_x \times \vec{B}_z \quad (1)$$

Para diferentes portadores de carga a força magnética apresentará sentidos diferentes como pode ser observado na figura 2. Essa força cria um acúmulo de

portadores em uma das faces onde estão os terminais C e D (figura2) gerando uma diferença de potencial chamada tensão Hall V_h . Por consequência surge um campo elétrico E_y que fará com que os portadores que se movimentam na amostra fiquem submetidos a uma força elétrica F_e tal que a resultante de Lorentz seja nula, i.e. $\vec{F}_m = -\vec{F}_e$.

No modelo de Drude a densidade de corrente J_x pode ser escrita em função do número da densidade de portadores n , a carga de cada portador q e a velocidade média dos portadores v_x na forma

$$j_x = nqv_x \quad (2)$$

Ou em função da resistividade ρ e do campo elétrico E_y

$$F_e = \rho E_y \quad (3)$$

A componente magnética da força de Lorentz pode ser escrita na forma

$$F_m = J_x B_z \quad (4)$$

Com 3 e 4 podemos escrever

$$\rho E_y = J_x B_z \quad (5)$$

dessa expressão origina-se a definição de coeficiente Hall

$$R_h = \frac{E_y}{J_x B_z} \quad (6)$$

Lembrando que $E_y = \frac{V_h}{w}$ e $j_x = \frac{I}{wt}$ podemos reescrever R_h na forma

$$R_h = \frac{V_h t}{I B_z} \quad (7)$$

Ou ainda

$$R_h = \frac{-1}{qn} \quad (8)$$

Para um campo magnético e corrente fixos, o coeficiente Hall R_h é proporcional a $\frac{1}{n}$. Como consequência a mobilidade Hall μ_h deve ser

$$\mu_h = R_h \sigma \quad (9)$$

Onde R_h e σ são expressos em $[m^3 C^{-1}]$ e $[\Omega^{-1} m^{-1}]$ respectivamente, logo μ_h será expresso em $[m^2 V^{-1} s^{-1}]$

Um ponto importante que pode nos fornecer uma outra perspectiva experimental é que a densidade de

portadores pode ser expressa em função da temperatura.

$$n \propto e^{\frac{-E}{2kT}} \quad (10)$$

Isso nos permite escrever

$$\ln(n) = \frac{-E}{2k} \frac{1}{T} + C \quad (11)$$

III. INSTRUMENTAÇÃO NECESSÁRIA

O dispositivo proposto para o estudo do Efeito Hall dispõe de uma amostra semicondutora, um suporte para a amostra, controles de temperatura, uma fonte de tensão, um voltímetro para medir a tensão Hall, um eletroímã que já faz parte do laboratório de física moderna. Os esquemas simplificados de montagem podem ser vistos nas figuras 3 e 4.

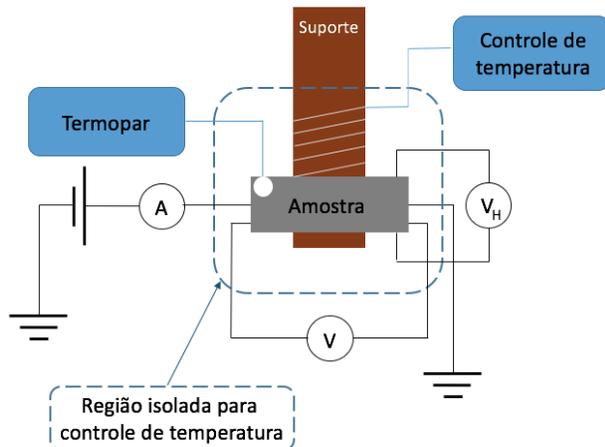


Figura 3: Esquema da montagem do equipamento (vista frontal). Onde V_h mede a tensão hall, V mede a tensão aplicada na amostra, A mede a corrente que passa pela amostra.[3]

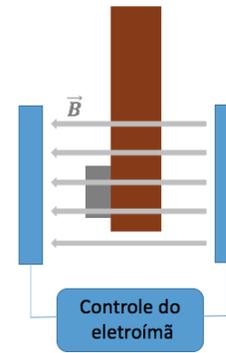


Figura 4: Esquema da montagem do equipamento (vista lateral). O campo é aplicado perpendicular à corrente para que os alunos tenham menos problemas experimentais.[4]

i. Suporte

A amostra é fixada em um dedo frio 5 cedido pelo laboratório de criogenia. Isso permite fazer medidas em temperatura ambiente e baixas temperaturas, possibilitando trabalhar com diferentes materiais e utilizar a mesma montagem para observar transição supercondutora (experimento que futuramente será disponibilizado para a disciplina F740). Foram identificados os diferentes fios que pode ser visto em 5 e um termopar que estava danificado foi recuperado.



Figura 5: Imagem do suporte utilizado. foto : arquivo pessoal

ii. Controladores

O suporte veio acompanhado de controladores da Air Products.

- Um controlador de temperatura que permite aquecer a amostra. Aparentemente funciona bem 6;



Figura 6: Controlador de temperatura Air Products. foto : arquivo pessoal

- Um termômetro 8 que trabalha com um termopar, mas que não funciona corretamente. Por isso o Professor Urbano emprestou outro 8 para utilizarmos no projeto.



Figura 7: Termômetro Air Products. Apresentou defeito e não será usado. foto : arquivo pessoal



Figura 8: Termômetro Digi – Sense emprestado pelo Prof. Urbano foto : arquivo pessoal

- Um Voltímetro 9 cedido pelo Prof. Gustavo Wiederhecker.

derhecker.



Figura 9: Voltímetro cedido pelo Prof. Wiederhecker foto : arquivo pessoal

iii. Eletroímã

O Laboratório de Física Moderna possui eletroímã adequado para esse experimento. A intensidade de campo magnético gerada por ele em função da distância do centro das bobinas pode ser observada na figura 10. O equipamento, capaz de gerar até 16kG está com um pequeno problema de sobreaquecimento, talvez seja necessário desentupir o sistema de refrigeração para seu melhor funcionamento.

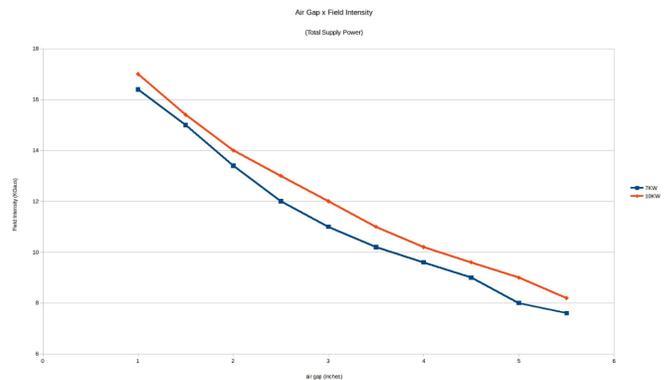


Figura 10: Campo gerando em kG em função do air gap em polegadas. Agradecimento : Eng. Costa

iv. Amostra

Ainda não determinamos qual será de fato a amostra a ser utilizada no experimento. Pensamos em trabalhar com grafite, mas isso traria uma série de complicações experimentais; o gemânio dopado é o mais utilizado em kits didáticos, porém, é pouco utilizado em pesquisa e por isso não encontramos nenhum professor que possa nos fornecer uma amostra. Provavelmente utilizaremos Arsenieto de gálio (GaAs) pois é mais fácil de ser encontrado.

É necessário que a amostra semicondutora seja fina e possua uma geometria adequada para evitar problemas experimentais. Os diâmetros médios D dos contatos e a espessura da amostra t devem ser muito menores que a distância entre os contatos L . A posição dos contatos também é de extrema importância para garantir medidas confiáveis como pode ser visto na figura 11

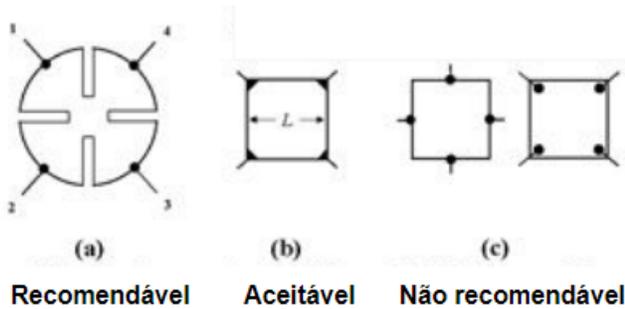


Figura 11: Possíveis formas de amostras e posições dos contatos. Usaremos provavelmente a opção (b) pois reduz o custo de fabricação. [7]

IV. PROPOSTA DE ROTEIRO EXPERIMENTAL

Aqui apresentarei uma proposta de sequência experimental que pode ser realizada pelos alunos. Apresentarei a "técnica van der Pauw" que permite a análise desconsiderando a geometria da amostra. A ideia é que desta sequência seja produzida uma pequena apostila que será utilizada na disciplina.

i. Determinação do tipo portadores de carga

Medir a tensão Hall a temperatura ambiente sob campo magnético constante como função da corrente e construir o gráfico da figura 12 (medidas feitas sem a compensação da distorção na tensão sob o condutor). Assim é possível observar e discutir a relação linear entre a tensão Hall e a corrente ($V_h = \alpha I$) além de determinar o tipo dos portadores de carga. Esse portador de carga que constitui o fluxo de corrente pode ser determinado analisando a polaridade da tensão Hall U_h , conhecendo-se o sentido da corrente e do campo magnético figura 2.

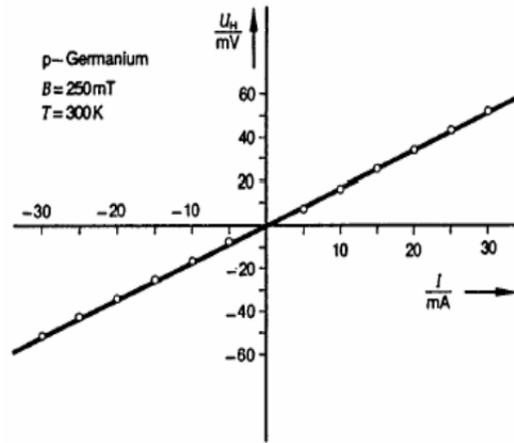


Figura 12: Gráfico de tensão Hall em função da corrente elétrica na em uma amostra de germânio tipo p a temperatura ambiente.[6]

ii. Determinação do coeficiente Hall e da densidade de portadores

Medir a tensão Hall V_h em função do campo magnético B_z sob temperatura ambiente mantendo a corrente I invariável. A constante Hall R_h juntamente com a concentração de portadores n são obtidas usando-se essas medidas. Ao construir o gráfico $V_h \times B_z$ nota-se uma relação linear entre a tensão Hall e o campo magnético aplicado, na forma

$$V_h = V_o + cB_z \quad (12)$$

Onde $c = \frac{V_h}{B_z}$. Com o valor c , conhecendo as dimensões da amostra e a corrente, pode-se usar a equação 7 para determinar o coeficiente Hall.

Conhecendo o coeficiente Hall é possível calcular a densidade de portadores considerando a equação 8 na forma

$$n = \frac{1}{|e|R_h} \quad (13)$$

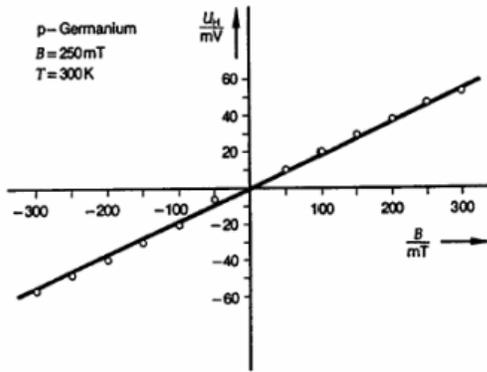


Figura 13: Gráfico de tensão Hall em função do campo magnético aplicado na amostra de germânio tipo p a temperatura ambiente [6]

iii. Determinação da mobilidade Hall

A mobilidade Hall μ_h é dada pela equação 9, logo, é função da condutividade elétrica σ a temperatura ambiente. Mede-se então, também a temperatura ambiente e sem a ação do campo magnético, a resistência R_o da amostra e conhecendo suas dimensões e R_h já determinado anteriormente, podemos escrever

$$\sigma_o = \frac{L}{R_o wt} \quad (14)$$

Logo a mobilidade Hall pode ser dada por

$$\mu_h = \frac{R_h L}{R_o wt} \quad (15)$$

iv. Relação entre variação de resistência da amostra e campo magnético aplicado

Medir a tensão V entre os terminais da amostra sob temperatura ambiente e corrente constante em função do campo magnético. Isso nos permite calcular a $R(B)$ e analisar como se dá a variação da resistência $\frac{R(B)-R_o}{R_o}$ em função do campo magnético aplicado. O aluno deve notar que não é linear, mas quadrática.

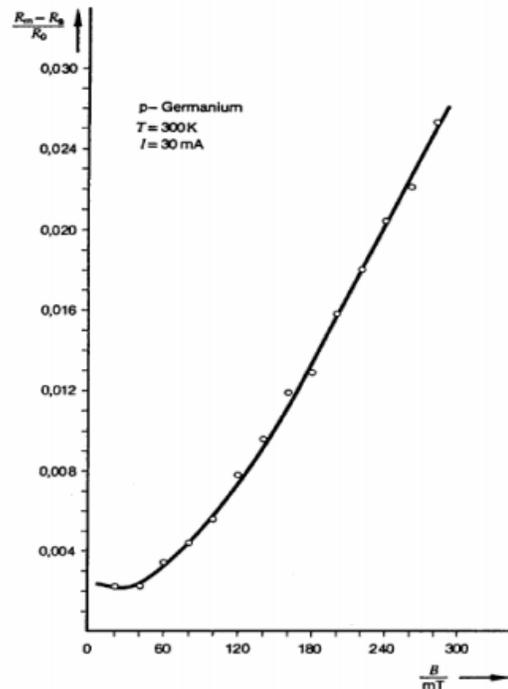


Figura 14: Gráfico da variação da resistência da amostra de germânio em função do campo magnético aplicado germânio tipo p a temperatura ambiente. [6]

v. Determinação da energia de gap

Medir a tensão V entre os terminais da amostra sob corrente constante em função da temperatura.

Na região de condutividade intrínseca, temos:

$$\sigma = \sigma_o e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (16)$$

Onde E_g é a energia de gap, k a constante de Boltzman e T a temperatura absoluta. Linearizando a equação temos

$$\ln(\sigma) = \ln(\sigma_o) - \frac{E_g}{2K} T^{-1} \quad (17)$$

Não há como medir diretamente a condutividade em função da temperatura mas "como I era constante durante as medidas, $V^{-1} \sim \sigma$ e o gráfico é portanto semelhante ao da condutividade em função do recíproco da temperatura.

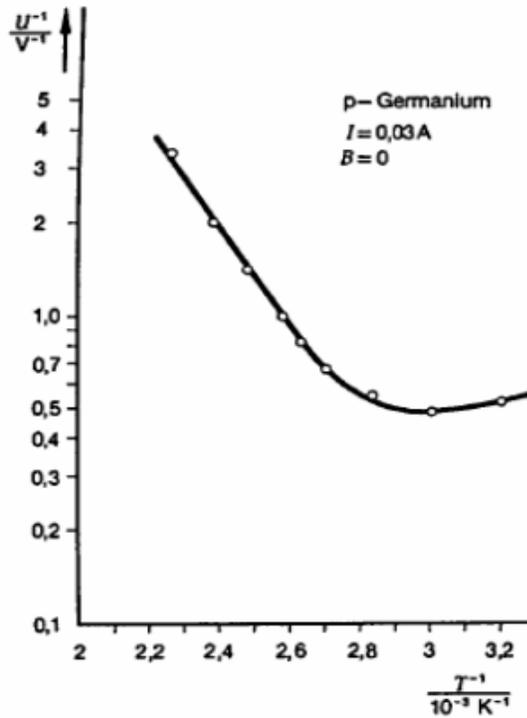


Figura 15: V^{-1} aplicada em função de T^{-1} em uma amostra de germânio tipo p sem a presença de campo magnético. [6]

vi. Análise da tensão Hall em função da temperatura

Medir a tensão Hall em função da temperatura sob campo magnético constante e construir o gráfico usando essas medidas. Neste gráfico há uma queda 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 (mudança da condução extrínseca para a intrínseca) e a redução na velocidade de 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 semiconductor é formada por dois tipos de portadores: elétrons livres e buracos

$$I = wt \cdot e(v_{\text{eletrons}}n_{\text{eletrons}} + v_{\text{buracos}}n_{\text{buracos}}) \quad (18)$$

Se a faixa de velocidades de concentração de buracos e de elétrons sejam aproximadamente iguais, cessa a

contribuição total para o efeito Hall.

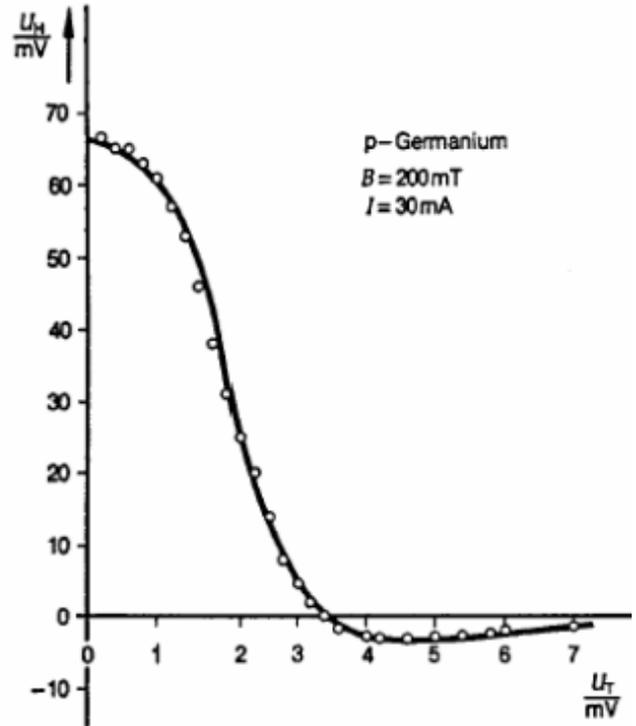


Figura 16: Tensão Hall em função da temperatura, expressa por uma tensão V_t de um termopar, em uma amostra de germânio tipo p. [6]

V. TÉCNICA DE VAN DER PAUW

Já vimos que para determinar a mobilidade μ e a densidade de portadores n , é necessária uma combinação de uma medição de resistencia R_h (coeficiente Hall) e uma medição de tensão Hall V_h . Para se trabalhar com esta técnica é necessário que a amostra seja fina com os contatos ôhmicos muito pequenos colocados nas extremidades da amostra como na figura 11(b). Existem duas resistências características R_A e R_B , associadas aos terminais mostrados na figura 17, elas estão relacionados com R_h através da equação de van der Pauw[7].

$$e^{-\frac{\pi R_A}{R_h}} + e^{-\frac{\pi R_B}{R_h}} = 1 \quad (19)$$

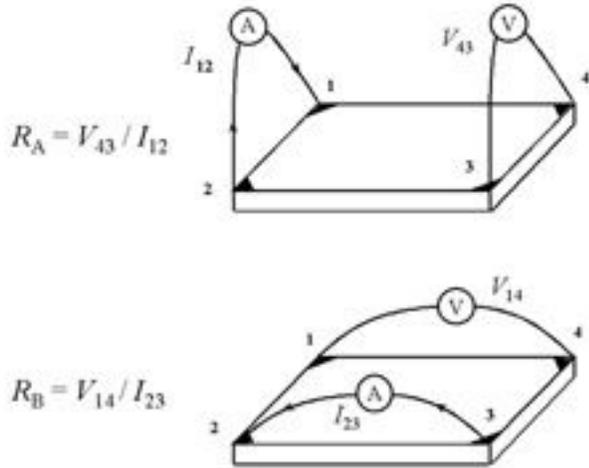


Figura 17: Montagem de van der Pauw com R_A e R_B demarcados [7]

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho foi desde o início montar o experimento com equipamentos disponíveis no instituto o que a princípio apresenta-se como uma tarefa trivial. Porém, mostrou-se muito mais complicado: encontramos equipamentos antigos, muitos em mal funcionamento; a dependência de técnicos que hora estavam de férias, hora de greve; por fim a dificuldade de encontrar uma amostra razoável para a finalidade do experimento foram fatores que não nos permitiram concluir a total montagem do experimento até o momento, porém, falta pouco. Eu e o Professor Urbano planejamos termina-lo para que possa ser usado até o fim do próximo semestre. Com o instrumental teórico e proposta de roteiro apresentados neste trabalho é possível fazer a análise dos fatores mais importantes do efeito Hall em um semiconductor: calcula-se coeficiente R_H , a mobilidade μ_h , a densidade de portadores n e identifica-se o tipo de portador de carga (elétron ou buraco). Caso a proposta de estudo seja um pouco mais aprofundada é possível, também, discutir a variação de resistência da amostra em função do campo magnético aplicado, bem como analisar a condutividade da amostra e tensão Hall em função de temperatura.

REFERÊNCIAS

[1] Halliday, Resnick, Fundamentos da Física III, 2011, 9ed;

[2] Melissinos, Adrian C., Napolitano, Jim, Experiments in Modern Physics, Academic Press;

[3] Ferreira, Arantes, Efeito Hall em Germânio tipo p e n, Relatório experimental, Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, 2016;

[4] Guedes, Humberto, Torres, Silva, Efeito Hall em Germânio tipo p e n, Relatório experimental, Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, 2016;

[5] SiuLi, Condutividade Elétrica e Efeito Hall em Semicondutores, Roteiro de ensino, Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, Laboratório Avançado de Física, 2003;

[6] Cavalcante, Guimarães, Efeito Hall, Manual Phywe - 1308, PUC-SP;

[7] www.nist.gov/pml/engineering-physics-division/popular-links/hall-effect