

Construção de um sistema de caracterização das propriedades de transporte de filmes finos pelo efeito Hall

(Construction of a system for characterization of transport properties of thin films by Hall effect)

A.J.S. Maurity, F.R. Lunas, C.L. Carvalho¹, V.C.S. Reynoso e H.A. de Aquino

Departamento de Física e Química, Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho', Ilha Solteira, SP, Brasil
Recebido em 22/8/2011; Aceito em 29/8/2011; Publicado em 27/2/2012

Neste trabalho foi montado um sistema para determinar propriedades de transporte, tais como, a resistividade elétrica, a densidade e a mobilidade dos portadores de carga elétrica de filmes finos utilizando o efeito Hall, nas condições de laboratório de ensino, utilizando materiais de fácil aquisição. Filmes finos de SnO₂ dopados com Flúor obtidos por processos químicos de deposição foram caracterizados e apresentaram resultados consistentes com o que existe na literatura.

Palavras-chave: efeito Hall, filmes finos, resistividade, mobilidade, portadores de cargas.

In this work was built a system to determine transport properties such as electrical resistivity, charge carrier density and mobility of thin films using Hall effect in special conditions of undergraduate laboratory using no special materials either instruments. SnO₂ thin films doped with fluor obtained by chemical process were characterized using the developed methodology and presented consistent results those reported in literature.

Keywords: Hall Effect, thin film, resistivity, mobility, charge carriers.

1. Introdução

O objetivo deste trabalho é descrever a montagem experimental e a técnica de determinação de grandezas como a resistividade, a densidade e mobilidade dos portadores de carga de filmes finos utilizando o efeito Hall nas condições de laboratório de ensino, usando materiais de fácil aquisição, procurando sempre realizar medições com boa precisão. É sabido que, em geral, técnicas experimentais para o estudo de semicondutores, nas condições de laboratório de ensino, não são fáceis de serem implementadas, visto que, dentre outras razões, isso envolve um elevado custo dos equipamentos utilizados. Antes do descobrimento do Efeito Hall em 1879 por Edwin H. Hall era possível medir a densidade de portadores de carga e a mobilidade [1-3]. O descobrimento do Efeito Hall permitiu resolver esta dificuldade, e de forma relativamente simples, permitindo a determinação, separadamente, da densidade de portadores de carga e da mobilidade. Desde então, tem-se desenvolvido a técnica de medição das propriedades elétricas dos semicondutores usando este efeito e, atualmente, isso é utilizado de forma rotineira nos laboratórios de pesquisa. A crescente utilização da referida técnica é devido a sua simplicidade, baixo custo e rapidez na obtenção dos resultados e, tem-se tornado indispensável

na indústria de semicondutores [1-3].

Edwin H. Hall descobriu que quando uma corrente elétrica é injetada num material condutor imerso em um campo magnético perpendicular à corrente elétrica, uma voltagem é gerada na direção perpendicular à corrente e ao campo magnético aplicado. Este efeito é resultado da deflexão das cargas elétricas da corrente devido à força do campo magnético [1-4]. Esta força é chamada também de Força de Lorentz. Através da interação entre a intensidade do campo magnético, a corrente elétrica injetada e a voltagem gerada neste efeito, torna-se possível avaliar, de forma experimental, os portadores de carga e a sua mobilidade de forma independente.

Lembrando que os sólidos podem ser classificados pela sua condutividade elétrica σ , todas as substâncias do ponto de vista de suas propriedades elétricas podem ser classificadas como metais (condutores), semicondutores e isolantes [1-4]. As substâncias podem também ser classificadas de acordo com a sua resistividade, ρ , que equivale ao inverso da condutividade, σ . Baseado nas observações experimentais e considerando que a condutividade depende fortemente da densidade de portadores de carga livre, o modelo de condução elétrica por um sólido estabelece que a densidade de corrente

¹E-mail: carvalho@dfq.feis.unesp.br.

(*j*) determina o movimento dos portadores de carga segundo a relação

$$j = en \langle v \rangle = en\mu E. \quad (1)$$

Considerando a lei de Ohm, a condutividade elétrica pode ser definida a partir da razão

$$\sigma = j/E = en\mu, \quad (2)$$

onde, e é a carga do elétron; n é a concentração de portadores de carga, μ a mobilidade dos portadores de carga e E o módulo do campo elétrico aplicado. Esta relação indica claramente que a condutividade está relacionada com a concentração dos portadores de carga (n), (positivos ou negativos) que são responsáveis pela condução. Assim, a relação entre condutividade e resistividade é definida como

$$\rho = 1/\sigma = 1/en\mu. \quad (3)$$

Em certas condições, ao variar a temperatura, existe uma relação intrínseca entre o número de portadores de carga e o valor da sua condutividade. Partindo-se do conhecimento do valor da resistividade ρ , valores da mobilidade μ e a densidade de portadores n podem ser obtidos utilizando-se o método de efeito Hall. Pela Eq. (3) se infere que não é possível medir separadamente a condutividade e a concentração dos portadores de carga. Assim, também há uma necessidade de se usar métodos de medição da resistividade.

1.1. Efeito Hall (medição dos portadores de carga tipo n ou p)

Supondo que um material tenha forma geométrica de uma chapa retangular, conforme mostra a Fig. 1, por onde circula uma densidade de corrente $J(=I/S=I/d.d')$, dada pela relação vetorial

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (4)$$

onde $\sigma=1/\rho$ é a condutividade que equivale ao inverso da resistividade ρ da amostra, observa-se que o vetor densidade de corrente é proporcional ao módulo e possui a mesma direção do vetor campo elétrico E .

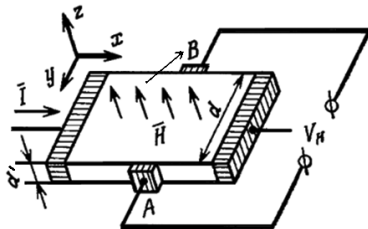


Figura 1 - Modelo para medidas de Efeito Hall [1].

Para um material homogêneo, as superfícies equipotenciais (superfícies de igual potencial elétrico V) são perpendiculares a este campo elétrico, e, portanto, à

densidade de corrente [2,3]. Nesta condição, ao medir a diferença de potencial entre os contatos, pontos A e B, apresentados na Fig. 1, deve-se obter uma tensão nula, $V_H = 0$ Volts. Será considerado agora um arranjo no qual se aplica a corrente I proporcional à densidade J no plano da amostra, na direção como visto na Fig. 1, e simultaneamente se aplica um campo magnético \mathbf{B} com suas linhas perpendiculares, à direção desta corrente e a superfície da amostra. Neste caso, a interação do campo magnético com a carga elétrica e que, se movimenta com velocidade \mathbf{v} pode ser avaliada a partir da força de Lorentz que atua sobre a carga na forma

$$\mathbf{F} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (5)$$

O sentido desta força depende do sinal dos portadores de carga e tem direção perpendicular ao produto vetorial da velocidade das cargas com o campo magnético aplicado. O aparecimento desta força provoca uma separação das cargas elétricas, e aparece um campo elétrico \mathbf{E}_H na direção perpendicular à corrente e ao campo magnético. O tipo de cargas elétricas que se movimentam pode ser negativo (elétrons) ou positivo (buracos). Dessa forma, entre os pontos A e B aparecerá uma diferença de potencial $V_H \neq 0$ Volts, chamada de tensão Hall. Para avaliar esta diferença de potencial, consideramos que no estado estacionário a força de Lorentz sobre a carga elétrica é igual à força devido ao campo \mathbf{E}_H , e para uma densidade de portadores de carga negativos tem-se

$$-eE_H = evB. \quad (6)$$

Levando em conta a espessura da amostra (d) e a diferença de potencial entre os pontos A e B, tem-se que

$$V_H = E_H d = -vBd. \quad (7)$$

Expressando a magnitude da velocidade em termos da média da velocidade dos portadores de carga $\langle \mathbf{v} \rangle$ denominada velocidade de deriva dos elétrons, a densidade de corrente para n elétrons por unidade de volume é escrita como

$$\mathbf{J} = en \langle \mathbf{v} \rangle. \quad (8)$$

A partir desta densidade de corrente, tem-se $v = \frac{J}{en}$.

Quando este valor é colocado na relação da tensão Hall tem-se

$$V_H = -\frac{J}{en} Bd. \quad (9)$$

Definindo o valor $R_H = -\frac{1}{en}$ chamado de coeficiente Hall dos elétrons, a tensão Hall assume a forma

$$V_H = -R_H J B d, \quad (10)$$

para os portadores de carga negativos. Para portadores de carga positivos, ou buracos com concentração

ppor unidade de volume, no equilíbrio térmico tem-se a equação

$$+ eE_H = evB, \quad (11)$$

de onde é obtida a relação $V_H = \frac{J}{ep} Bd = R_H JBd$.

Definindo o valor $R_H = \frac{1}{ep}$, conhecido como coeficiente Hall dos buracos.

Portanto, determinando o coeficiente Hall R_H , é possível determinar a densidade de portadores e seu sinal, o qual pode ser do tipo n ou p .

1.2. Resistividade ρ

A resistividade elétrica de um material de certas dimensões pode ser avaliada a partir da relação amplamente conhecida

$$\rho = R \frac{A}{d'}, \quad (12)$$

onde ρ é a resistividade; R é a resistência da amostra; A é a área da seção transversal por onde circula a corrente e d' a espessura da amostra. A área e a espessura da amostra podem ser determinadas com certa precisão, mas a avaliação da resistência R da amostra é mais difícil, pois devido à geometria da mesma pode introduzir erros na sua medida direta, ainda que as amostras sejam preparadas cuidadosamente, portanto, isso exige métodos mais específicos de medição para se ter maior precisão [2-4].

1.3. Medida da resistividade pelo método de Van der Pauw [5-7]

Neste trabalho, para determinar a resistividade dos materiais na forma de filmes finos foi escolhido o método de van der Pauw, o qual é o mais adequado e por ser amplamente utilizado na indústria de semicondutores. Para determinar a resistividade de amostras de diferentes formas geométricas, inclusive na forma de filmes finos Van der Pauw, deduziu uma expressão que permite implementar uma técnica de medição para amostras de forma arbitrária que tenha certa espessura uniforme d' . A Fig. 2 ilustra uma amostra com um contorno arbitrário com contatos elétricos nos pontos ABCD.

A expressão deduzida por Van der Pauw é dada por

$$\text{Exp}(-\pi d' \sigma R_{AB,DC}) + \text{Exp}(-\pi d' \sigma R_{BC,AD}) = 1,$$

onde

$$R_{AB,DC} = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \text{ e } R_{BC,AD} = \frac{V_{AD}}{I_{BC}}$$

São chamadas resistências de transferências e definidas como relações da diferença de potencial entre os pontos C e D e a corrente aplicada entre os pontos A e B da Fig. 2.

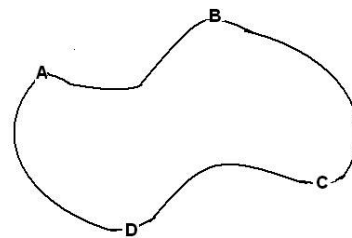


Figura 2 - Contorno de uma amostra de forma arbitrária com os quatro contatos elétricos ABCD [7].

A corrente é aplicada na amostra pelo contato A sendo coletada pelo contato B. A condutividade e o efeito Hall podem ser determinados desde que o contorno da amostra onde estão localizados os pontos A, B, C e D tenha forma arbitrária e satisfaça as seguintes condições:

- a) Os contatos devem ser ôhmicos e localizados no contorno da amostra;
- b) Os contatos devem ser suficientemente pequenos, com o propósito de evitar interferência na medida pelo efeito dos contatos;
- c) A amostra deve ser homogênea e possuir espessura uniforme.

Num caso geral, nem sempre é possível determinar a resistividade utilizando diretamente a equação deduzida por van der Pauw. Uma forma alternativa é utilizar a relação

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{\pi d'}{\ln(2)} \frac{R_{AB,CD} + R_{BC,AD}}{2} f, \quad (13)$$

onde

$$f = \frac{R_{AB,CD}}{R_{BC,AD}}$$

Como o valor de f depende da razão entre as resistências de transferência, estas podem ter valores entre (0-1). A determinação destes valores e a discrepância com valores das amostras padrão podem ajudar a encontrar diferenças nos valores determinados.

Uma relação simplificada pode ser deduzida a partir da equação de van der Pauw como um caso particular. A obtenção desta relação é obtida quando se tem uma amostra homogênea, que tenha simetria geométrica e seus contatos sejam feitos mantendo esta simetria (Fig. 3).

Assim, as resistências medidas serão dadas por

$$R_{AB,DC} = R_{BC,AD}, \quad (14)$$

e para a resistividade

$$\rho = \frac{\pi d'}{\ln(2)} R_{AB,DC}. \quad (15)$$

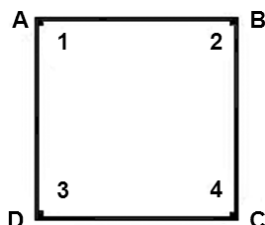


Figura 3 - Contorno de uma amostra homogênea e de forma geométrica simétrica que tem os quatro contatos ABCD [7].

2. Implementação experimental

2.1. Magneto

Para produzir o campo magnético constante, foi montado um magneto utilizando dois ímãs permanentes semelhantes em forma de discos e de uma liga de ferro-neodímio, cada um com 4,0 cm de diâmetro por 1,5 cm de espessura. Os suportes e posicionamento dos ímãs foram desenhados e construídos de latão (material não magnético) na oficina mecânica do Departamento de Física e Química da FEIS-UNESP. Os desenhos técnicos das partes do magneto podem ser vistos

na Fig. 4. (O desenho técnico do magneto, para efeitos de construção pode ser fornecido solicitando-o aos autores). O sistema do magneto é feito de tal forma que os ímãs permaneçam com as faces paralelas, separadas por determinada distância com os pólos dispostos na direção norte-sul. Assim, é criado um intenso campo magnético uniforme entre estes pólos N-S ao longo da distância de separação. Os suportes dos magnetos se deslocam simetricamente, aproximando-se ou afastando-se das faces norte-sul dos ímãs mantendo o paralelismo. O campo magnético medido no centro da distância de separação entre os magnetos e pode ser variado deslocando-se as faces dos magnetos até uma distância máxima de 5 cm. Assim, é possível obter diferentes valores de intensidade do campo magnético, em função da distância de separação entre os mesmos, sendo tanto mais intenso quanto maior a proximidade entre os magnetos.

Na Fig. 5 pode-se ver uma fotografia do sistema de movimentação dos ímãs para controlar a intensidade do campo magnético juntamente com o porta-amostra já posicionado na parte central do sistema.

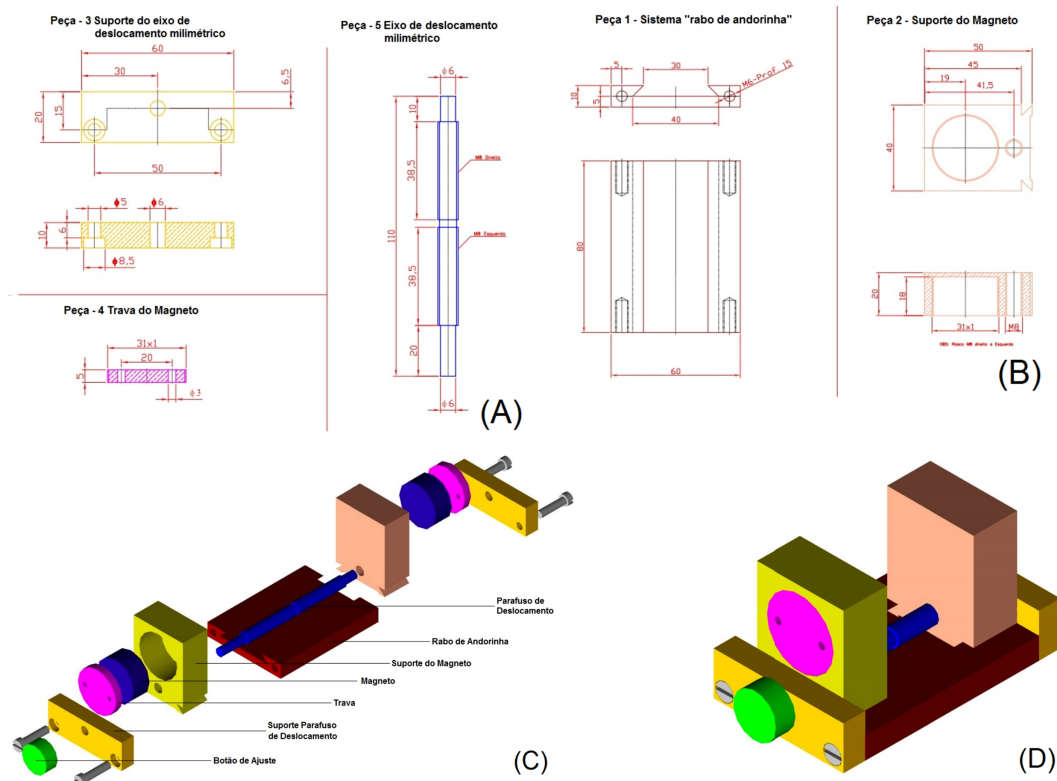


Figura 4 - Vistas em diferentes cortes da base de movimentação dos magnetos (A), vistas em diferentes cortes do suporte dos magnetos (B), vista em explosão das partes do sistema (C) e vista global do sistema (D).

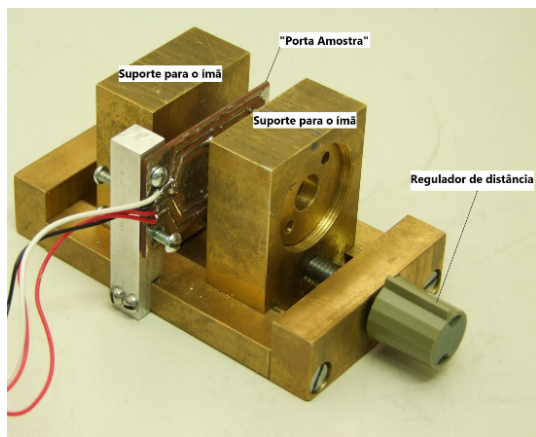


Figura 5 - Fotografia do sistema completo com o magneto montado e com o porta-amostra no lugar.

Foi efetuada uma calibração do sistema com o intuito de analisar a intensidade do campo magnético em função da distância de separação dos ímãs ($\pm 0,1$ cm), utilizando um Gaussímetro digital com precisão de $\pm 2\%$ da leitura (GAUSS METER – MG 2000, Magnetos Gerais e Acessórios Ltda), com sensor Hall. Realizou-se o mapeamento posicionando o sensor Hall exatamente no ponto central da distância de separação e no centro geométrico dos ímãs e tomando como referência o tamanho da amostra a ser medida. O resultado dos valores do campo magnético nesse ponto é ilustrado no gráfico da Fig. 6, e podemos observar que a intensidade do campo depende de forma exponencial com a distância entre os ímãs conforme mostra a equação

$$Y = 26,92 + 6874,7 \exp(-x/2,047), \quad (16)$$

onde Y (gauss) é o valor do campo magnético e x (cm) é a distância entre os ímãs, essa equação foi obtida usando-se o programa Origin6.0.

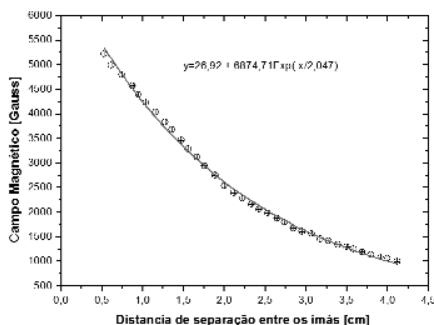


Figura 6 - Mapeamento do campo magnético em função da distância de separação dos ímãs.

2.2. Porta-amostra

O porta-amostra foi feito utilizando-se uma placa de circuito impresso de Fiberglass®, e é um acessório muito importante, pois com a geometria adotada permite posicionar corretamente as amostras na região de campo

magnético uniforme e efetuar as conexões elétricas conforme o método a ser utilizado descrito acima, ou seja, determinar a resistividade ou fazer a medida do efeito Hall. Além disso, o mesmo pode ser reposicionado para fazer a inversão na orientação do campo magnético aplicado. A Fig. 7 apresenta uma fotografia do porta-amostra contendo uma amostra (quadrado claro com eletrodos nos vértices) pronta para fazer medições.

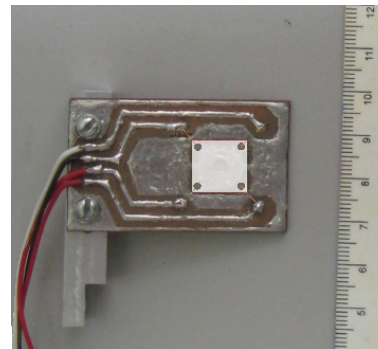


Figura 7 - Fotografia do porta-amostra indicando o correto posicionamento da mesma.

2.3. Fonte de corrente

A fonte de corrente foi construída baseada no CI LM317 que pode ser configurado para fornecer correntes até 1000 mA. Quando em operação o LM317 desenvolve e mantém uma tensão de referência de $V_{ref} = 1,25$ Volts entre a sua saída e o terminal de ajuste. Esta voltagem de referência é convertida em uma corrente constante, programável pelo resistor R_1 e que pode ser injetada através da amostra ligado a terra. A configuração apresentada na Fig. 8 permite a estabilidade de corrente da ordem de 20 ppm/°C [8]. Para evitar os ruídos externos é importante fazer uma boa blindagem da montagem final do circuito numa caixa de alumínio e ligá-lo ao terra local. Observamos que a corrente final pode ser ajustada utilizando a relação $I_{out} = \frac{1,25V}{R_1}$, dependendo do valor do resistor R_1 podemos ajustar a corrente desde 10 mA até 1000 mA. No nosso caso, utilizamos um resistor de fio de 2Ω com precisão de 1% ligado em série com um potenciômetro multi-volta de fio de precisão 1%. Esta configuração permite ajustar a corrente desde 10 mA até 625 mA. Este intervalo de corrente é o suficiente para se efetuar as medidas.

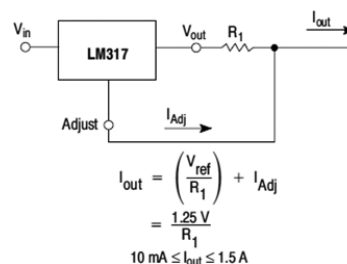


Figura 8 - Circuito básico da fonte de corrente de precisão [8].

2.4. Metodologia de Medição

Antes de se efetuar a medição é preciso “zerar” a contribuição de campos elétricos residuais, desta forma aplica-se uma corrente utilizando o circuito descrito na Fig. 9, cujo ajuste é feito através do potenciômetro e sem aplicação do campo magnético.

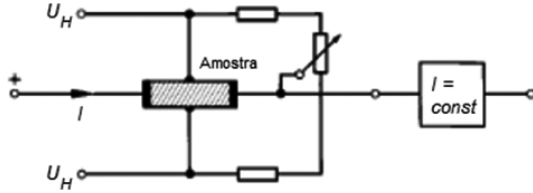


Figura 9 - Circuito de compensação da tensão Hall e estabilizador de corrente [9].

A calibragem do campo magnético foi feita, com o valor de 0,428 T, que corresponde ao ponto central da distância entre os ímãs, local de posicionamento do porta-amostra. Nas medidas de Efeito Hall, utilizamos $I = 40$ mA e, conhecendo-se a resistividade ρ que pode ser medida previamente utilizando o método de van der Pauw, primeiramente avaliou-se a tensão Hall (V_H). Em seguida, foram obtidos valores do coeficiente de Hall (R_H), parâmetro necessário para calcular a densidade de portadores (n) e mobilidade de Hall (μ), uma vez que se conhece a carga do elétron. A Fig. 10 ilustra o sistema utilizado para tal medida.

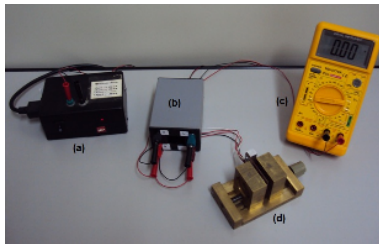


Figura 10 - Fotografia do sistema de medidas Efeito Hall, sendo a fonte de corrente (a), conexões elétricas (b), multímetro (c) e o magneto com o porta-amostra posicionado (d) [7].

Para aplicar adequadamente a fórmula do efeito Hall e avaliar os seus parâmetros, sugere-se a realização de uma sequência de medidas. O ponto importante é avaliar a tensão Hall (V_H). Para determinar este valor é preciso efetuar as medidas orientadas nas direções norte – sul e sul – norte do campo magnético para anular o efeito do campo magnético terrestre. A Fig. 3 descrita anteriormente auxilia o entendimento da sequência das medidas; utilizamos a notação $V_{AC,BD}$ que significa injetar a corrente entre os contatos AC e medir a tensão entre os contatos BD. Partindo da notação assinalada acima, a seguinte metodologia é utilizada para determinar a tensão. Para a amostra posicionada com a face perpendicular ao campo magnético e este orientado no sentido norte – sul, são efetuadas quatro medidas das tensões, como segue

$$V_{14,23}, V_{41,32}, V_{23,41}, V_{32,41}. \quad (17)$$

Considerando o mesmo procedimento anterior com a inversão no sentido do campo magnético (sul – norte), é medida a mesma sequência

$$V_{14,23}, V_{41,32}, V_{23,41}, V_{32,41}. \quad (18)$$

Dessa forma, calculam-se quatro tensões na forma

$$V_A = \frac{1}{2} \left[(V_{14,23})_{norte-sul} - (V_{14,23})_{sul-norte} \right], \quad (19)$$

$$V_B = \frac{1}{2} \left[(V_{41,32})_{norte-sul} - (V_{41,32})_{sul-norte} \right], \quad (20)$$

$$V_C = \frac{1}{2} \left[(V_{23,42})_{norte-sul} - (V_{23,41})_{sul-norte} \right], \quad (21)$$

$$V_D = \frac{1}{2} \left[(V_{32,41})_{norte-sul} - (V_{32,41})_{sul-norte} \right]. \quad (22)$$

A média dessas tensões fornece a tensão Hall, dada na forma

$$V_H = \frac{1}{4} (V_A + V_B + V_C + V_D). \quad (23)$$

Com os dados já conhecidos, como a corrente (I), a intensidade do campo magnético (B) e a espessura da amostra (d) [7], a resistência Hall é avaliada com

$$R_H = V_H \frac{d}{IB}. \quad (24)$$

Este dado é fundamental na determinação da densidade e mobilidade dos portadores de carga elétrica. É importante ressaltar, que a diferença das medições com campo magnético direto ou invertido pode dar um valor positivo ou negativo o qual vai indicar a polaridade dos portadores de carga. Isto requer prestar atenção na polaridade da corrente aplicada e na leitura da tensão [5,6].

3. Resultados e discussão

3.1. Determinação da densidade de portadores de carga pelo Efeito Hall

Para efetuar estas medidas se utiliza a mesma configuração de contatos e porta amostras do método de van der Pauw. O que difere é a sequência de medidas entre os contatos. Para determinar corretamente o sinal dos portadores de carga e minimizar os erros se faz medidas com o campo no sentido N – S, onde as linhas de força se posicionam perpendicularmente a face da amostra. Posteriormente, estas linhas são invertidas para o sentido S – N. Em cada posição do campo tem-se uma sequência de 4 medidas. A Tabela 1 mostra esta sequência para duas amostras de um filme de SnO_2 , uma sem e outra com dopagem (Flúor - 10at%), com os campos nos dois sentidos) [7]. A tensão Hall é

obtida fazendo-se uma média da diferença desses valores, considerando a direção do campo magnético direto e invertido (Eq. (23)).

Adotando o mesmo procedimento descrito acima para as amostras com as outras concentrações e efetuando todos os cálculos, podemos ver na Tabela 2 os resultados para a tensão Hall, a resistência Hall, densidade e mobilidade dos portadores de carga elétrica para todos os filmes de SnO₂:F (0 – 40 at%).

A Fig. 11 mostra o comportamento da densidade de portadores de cargas e da mobilidade dos mesmos em função da concentração de dopante nos filmes. Pode-se notar que, enquanto a densidade de portadores passa por um máximo, a mobilidade passa por um mínimo, ambas em torno de 30 at% de dopante, o que pode ser entendido em termos do livre caminho médio, ou seja, quanto maior for a densidade de portadores de cargas menor devere ser o livre caminho médio percorrido pelos portadores dificultando a mobilidade dos mesmos.

Uma vez determinados alguns dos parâmetros citados no início deste trabalho, procurou-se determinar também a resistividade e a resistência dos filmes de SnO₂. Desta forma, apresentamos na Tabela 3 os resultados obtidos em termos de espessura, resistividade e resistência superficial em função das concentrações estudadas. Pode-se notar que, tanto a resistividade como a resistência apresenta uma dependência não linear decrescente com a concentração de dopante e isso fica muito mais evidente na Fig. 12. Esse tipo de comportamento também foi verificado nos trabalhos desen-

volvidos por Fantini com o mesmo tipo de material, embora tenha sido obtidos filmes de SnO₂:F por outro outra técnica de deposição [11].

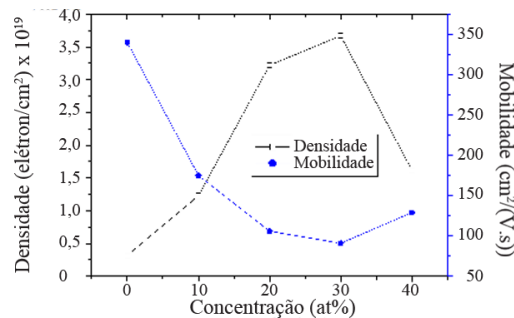


Figura 11 - Densidade e mobilidade de cargas/portadores em função da concentração de F(at%).

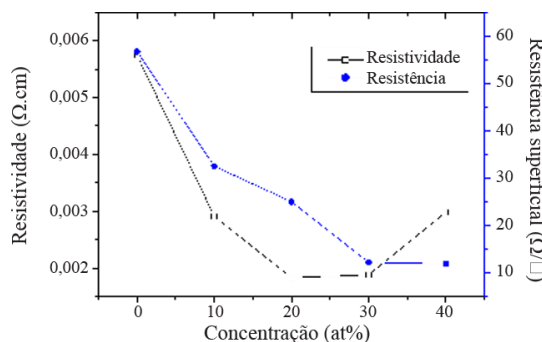


Figura 12 - Resistividade elétrica e resistência superficial em função da composição do filme de SnO dopado com F (at%).

Tabela 1 - Medidas aplicando o campo magnético para duas amostras de SnO sem dopar e dopada SnO:F (10at%).

Campo magnético (0,428 T). Filme: SnO ₂				Campo magnético (0,428 T) SnO ₂ :F 10 at%			
Direção N - S		Direção S -N		Direção N - S		Direção S - N	
I(1,4)	V(2,3) = -0,930	I(1,4)	V(2,3) = -0,830	I(1,4)	V(2,3) = -1,189	I(1,4)	V(2,3) = -1,165
I(4,1)	V(3,2) = -0,942	I(4,1)	V(3,2) = -0,837	I(4,1)	V(3,2) = -1,103	I(4,1)	V(3,2) = -1,122
I(2,3)	V(1,4) = -1,023	I(2,3)	V(1,4) = -0,912	I(2,3)	V(1,4) = -2,350	I(2,3)	V(1,4) = -2,270
I(3,2)	V(4,1) = -1,088	I(3,2)	V(4,1) = -0,940	I(3,2)	V(4,1) = -2,260	I(3,2)	V(4,1) = -2,180

Tabela 2 - Resultados da avaliação das medições do efeito Hall para as amostras dos filmes SnO₂:F.

Amostra	T: 400 °C	Conc. dop. (at%)	V _H (Volts)	R _H (cm ³ /C)	n (elec/cm ³)	μ (cm ² /V.s)
SnO ₂ puro		0	-0,116	-0,20 x 10 ⁻¹	0,32 x 10 ¹⁹	3,40 x 10 ²
		10	-0,041	-5,08 x 10 ⁻¹	1,23 x 10 ¹⁹	1,75 x 10 ²
F		20	-0,028	-1,94 x 10 ⁻¹	3,22 x 10 ¹⁹	1,06 x 10 ²
		30	-0,008	-1,70 x 10 ⁻¹	3,67 x 10 ¹⁹	0,91 x 10 ²
		40	-0,020	-3,85 x 10 ⁻¹	1,62 x 10 ¹⁹	1,29 x 10 ²

Tabela 3 - Dados da concentração de dopante (Flúor - F), espessura, resistividade e resistência superficial dos filmes de SnO₂ [7,10].

Material/filme SnO ₂ : F	Espessura t [nm]	Resistividade ρ (Ohm.cm)	Resistência superficial (R) [Ω/]
0 % at. de F	288,008	5,74 x 10 ⁻³	56,7
10 % at. de F	121,027	2,91 x 10 ⁻³	32,5
20 % at. de F	120,595	1,83 x 10 ⁻³	25,0
30 % at. de F	319,557	1,88 x 10 ⁻³	12,2
40 % at. de F	362,363	2,98 x 10 ⁻³	11,9

4. Conclusões

O sistema desenvolvido para controlar o campo magnético na região entre os magnéticos indicou que campo é uniforme e varia de forma exponencial com a distância entre os mesmos. Medidas das propriedades de transporte de filmes finos de SnO com e sem dopagem de flúor foram estudados usando o sistema desenvolvido e indicaram uma dependência não linear da resistividade e da resistência superficial dos filmes com a concentração de dopante diminuindo com o aumento da mesma. Além disso, observou-se também que tanto a densidade como a mobilidade de portadores dependem da concentração de dopante, sendo que, enquanto a densidade aumenta com a concentração de dopante a mobilidade diminui, apresentando um valor máximo e um mínimo, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados por Fantini [11].

Agradecimentos

Os autores são gratos à CAPES, FAPESP, CNPq e a FUNDUNESP pelo suporte financeiro.

Referências

- [1] K.V. Shalímová, *Física de los Semiconductores* (Editoria Mir, Moscou, 1975) p. 24-32.
 [2] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de*

- Física*, (LTC, Rio de Janeiro, 1993), 4^a ed., v. 3 e 4, p. 113-123, p. 163-166 e p. 228-238.
 [3] P.A. Tipler, *Física* (LTC, Rio de Janeiro, 1995), v. 3, 3^a ed., p. 193-197.
 [4] R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica* (Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979), p. 572-578.
 [5] L.J. van der Pauw, *Philips Research Reports* **13**, 1 (1958).
 [6] L.J. van der Pauw, *Philips Technical Review* **20**, 220 (1958).
 [7] F.R. Lunas, *Caracterização de Filmes Finos de ZnO Dopados com Al e Mn Depositados em Substrato Vítreo pelo Método de Spray Pirólise*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Física e Química, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (2009).
 [8] Datasheet LM317-Thomsom - <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009063.PDF>, acesso em 26/5/2011.
 [9] Jair C. C. Freitas, Laboratório de Estrutura da Matéria II - Condutividade Elétrica e Efeito Hall, disponível em http://www.cce.ufes.br/jair/web/rot_efhall.pdf.
 [10] M.M. Sant'Anna, Resistividade e Resistência de Folha: medidas 2009, disponível em http://omnis.if.ufrj.br/~mms/cursopos/Aula3_ResistenciaDeFolha.pdf.
 [11] M.C.A. Fantini, *Estudos das Propriedades Ópticas, Elétricas e Estruturais de Filmes Vaporizados de SnO₂ : F*. Tese de Doutorado, Instituto de Física "Gleb Wataghin", Unicamp (1985).