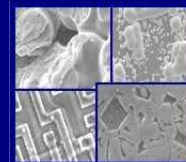




PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE SEMICONDUTORES PELO
MÉTODO DE VAN DER PAUW**

MAURICIO PAZ FRANÇA

ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

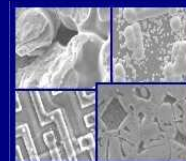
Julho, 2012



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE SEMICONDUTORES PELO MÉTODO DE VAN DER PAUW

MAURICIO PAZ FRANÇA

ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ORIENTADOR: Profa. Dra. Berenice Anina Dedavid

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Julho, 2012**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE SEMICONDUTORES PELO MÉTODO DE VAN DER PAUW

CANDIDATO: MAURÍCIO PAZ FRANÇA

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DRA. BERENICE A. DEDAVID - ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA



DR. RUBEM DA CUNHA REIS - DA ENGENHARIA QUÍMICA - PUCRS



DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3626
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/feng

Dedico esse trabalho ao meu pai, mãe e irmão que sempre estiveram comigo. Pelo grande incentivo em nunca desistir e caminhar cada vez mais alto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a professora Berenice, pela paciência e dedicação. Um exemplo de pessoa e por quem tenho grande admiração. Não é apenas uma orientadora e sim uma grande amiga que vou levar para sempre.

A minha família, pai, mãe e irmão, que sempre me incentivaram nesses novos rumos e caminhadas com apoio e incentivo.

Ao meu grande amigo Pablo pela ajuda nas horas difíceis.

Ao pessoal do CEMM, por todos esses anos que trabalhamos juntos. São pessoas de grande caráter e desejo tudo de melhor a eles.

Ao bolsista Guilherme por sempre estar disposto a me ajudar.

Aos funcionários do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – Ideia, sempre colaborando quando era possível.

A Ana pelo grande incentivo na reta final do trabalho, pelo tempo e atenção dedicados.

Ao professor Carlos Alexandre por ter me acolhido no seu laboratório para terminar a pesquisa e por seus conselhos.

Ao PGETEMA, pela oportunidade de fazer parte desse grande centro de excelência em pesquisa e inovação, que consegue formar grandes profissionais de que o Brasil e o mundo precisam.

Bom, e a todos que de alguma forma contribuíram para desenvolvimento deste trabalho.

SUMARIO

6

Dedicatória.....	3
Agradecimentos	5
LISTA DE FIGURAS	9
LITA DE TABELAS	13
LIST DE QUADROS.....	15
LISTA DE SÍMBOLOS	16
RESUMO	18
ABSTRACT	19
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	23
2.1. Objetivos Gerais	23
2.2. Objetivos Específicos	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1. Semicondutores	24
3.2. Modelo de bandas de energia	25
3.3. Semicondutores Intrínsecos	30
3.4. Semicondutores extrínsecos	30
3.5. Propriedades elétricas dos materiais	31
3.6. Mobilidade.....	34
3.7. Medidas de resistividade e lei de Ohm.....	34
3.8. O Efeito Hall	36
3.8.1. O efeito Hall em metais e semicondutores	40
3.8.2. Medidas Hall	44
3.8.3. Procedimentos recomendados para as medições	46
3.8.4. Cálculos da tensão Hall	47
3.8.5. Equações para a Mobilidade	48
3.9. Métodos experimentais para medidas de resistividade.....	49
3.10. Método Van der Pauw	49
3.10.1. Preparação da amostra	50
3.10.2. Medidas básicas.....	51
3.10.3. Medidas recíprocas.....	52
3.10.4. Medidas de polaridade invertida.....	53
3.10.5. Acurácia na medida	54
3.10.6. Resistência de folha	54

3.11. Passos para o ensaio da medição de resistência elétrica no método Van Der Pauw.....	7 55
3.12. Passos para a medida Hall	55
4 MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1 Características do sistema construído	57
4.2 Características da fonte de corrente	58
4.3 Ímãs.....	58
4.4 Aquecimento e Refrigeração da amostra	59
4.5 Módulos do sistema.....	59
4.5.1 Módulo infraestrutural.....	60
4.5.2 Porta amostra.....	63
4.5.3 Preparação dos semicondutores	65
4.6 <i>Hardware e Software</i>	66
4.6.1 <i>Software</i>	67
4.6.1.1 Bloco 1 – Medidas de Resistividade Van Der Pauw	69
4.6.1.2 Bloco 2 – Cálculos da Resistividade	75
4.6.1.3 Bloco 3 – Controle dos reles.....	76
4.6.1.4 Bloco 4 – Controle das medidas Hall	77
4.6.1.5 Programa placa micro controlada	78
4.7 <i>Hardware</i>	82
4.7.1 Amplificador de potência	83
5 RESULTADOS.....	87
5.1 Resistência pelo método Van der Pauw	88
5.2 Medidas da tensão Hall, cálculos de mobilidade e número de portadores de carga.	91
5.3 Medidas da resistividade pelo método Van der Pauw em diferentes temperaturas.	93
5.4 Medidas da tensão Hall, cálculos de mobilidade e número de portadores de carga com a utilização de temperaturas.	97
5.5 Considerações Finais	98
6 CONCLUSÃO	100
7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	101
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
A. Campo magnético	107
B. Junção PN	111

C. Mecanismos de recombinação e geração.	114⁸
--	------------------------

- Figura 3. 1. (a) Representação esquemática de um átomo de sódio e (b) representação esquemática da rede cristalina do silício enfatizando as ligações covalentes entre os átomos.26
- Figura 3. 2. Representação dos níveis de energia para materiais isolantes, metais e semicondutores [4].26
- Figura 3. 3. Diagrama da banda de energia do (a) silício e do (b) GaSb [8].29
- Figura 3. 4. Dopante tipo-n (elétron) e tipo-p (lacuna) no na rede do silício [8].29
- Figura 3. 5. Representação dos níveis de energia em semicondutores extrínsecos do (a) tipo-n e (b) tipo-p, onde E_d é o nível de energia doador devido o dopante tipo n, E_a o nível de energia aceitador devido ao dopante tipo-p, E_v é o mais alto nível de energia ocupado na banda de valência e E_c é o mais baixo nível de energia desocupado.30
- Figura 3. 6. Esquema de um material condutor [12].35
- Figura 3. 7. Esquema do efeito Hall, onde B é o campo magnético aplicado e V a diferença de potencial estabelecida [14].37
- Figura 3. 8. Efeito Hall, (a) corrente I em um material semiconductor, (b) comportamento dos portadores de carga devido à corrente, (c) acúmulo de elétrons em uma das bordas do semiconductor devido ao campo magnético aplicado e em (d) mostra o campo elétrico resultante devido à da tensão Hall V [16].39
- Figura 3. 9. Esquema de uma amostra montada para o método 4 pontas de Van Der Pauw [17].50
- Figura 3. 10. Possíveis tipos de contatos nas amostras a serem analisadas por efeito Hall, localização dos contatos como mostrado na figura (a) são preferências [13].51
- Figura 3. 11. Orientação dos contatos para a medida da resistência vertical no método Van der Pauw [17].52
- Figura 3. 12. Orientação dos contatos para a medida da resistência horizontal no método Van der Pauw [17].53
- Figura 4. 1. Diagrama de um sistema de caracterização elétrica controlado com um computador.58

Figura 4. 2. Figura da estrutura caixa de suporte.....	10 61
Figura 4. 3. Croqui das câmaras montadas para o sistema.	61
Figura 4. 4. Câmaras montadas em (a). Corte longitudinal das câmaras (b).	62
Figura 4. 5. Câmaras de ensaios do Sistema de caracterização elétrica.	63
Figura 4. 6. Sistema do porta amostra na placa de circuito impresso.	64
Figura 4. 7. Porta- amostra em visão lateral, evidenciado o resistor de potência.	64
Figura 4. 8. Montagem completa do sistema (a). Corte longitudinal do sistema(b) mostra o interior das câmaras.	65
Figura 4. 9. Detalhes do porta amostra desenvolvido.	65
Figura 4. 10. Solda de índio em uma amostra de semicondutor.	66
Figura 4. 11. Painel frontal do software para os comandos do usuário.	68
Figura 4. 12. Caso do software para realizar as medições nas amostras.	71
Figura 4. 13. Configuração da comunicação do computador com a serial conectada a fonte controlável (a). Bloco de configuração dos dados que vão sair da serial em direção à fonte (b).....	72
Figura 4. 14. Comando SYST:RSEN ON é uma string no quadro rosa que coloca a fonte em modo 4 pontas.....	73
Figura 4. 15. Três blocos de <i>measure</i> para ter a opção das 3 medidas possíveis na fonte controlada.....	73
Figura 4. 16. Painel frontal que controla o modo automático ou manual da fonte (a). Painel frontal do bloco configure output (b).	74
Figura 4. 17. Diagrama de blocos que liga a fonte Keithley® para fazer as medidas.	74
Figura 4. 18. Mostra o loop while de medida dos dados da resistência elétrica das amostras.....	75
Figura 4. 19. Diagrama do cálculo da resistividade de Van Der Pauw pelo metodo iterativo.....	76
Figura 4. 20. Escrita na simulação da porta serial para o controle dos reles	77
Figura 4. 21. Sistema de controle do efeito Hall pelo <i>software</i>	78

Figura 4. 22. Comandos da função do programa para controle dos reles.....	11 79
Figura 4. 23. Comandos ativar os níveis dos relés.....	80
Figura 4. 24. Placa de controle ARM7 utilizada no projeto.....	82
Figura 4. 25. Esquema do diagrama elétrico do amplificador de potência.	83
Figura 4. 26. Mostra os testes de acionamento dos reles pelo kit de desenvolvimento.	84
Figura 4. 27. Localização dos componentes na placa de circuito impresso. Hardware utilizado para o controle dos reles.....	84
Figura 4. 28. (a) Diagrama de blocos para a logica do método Van Der Pauw e (b) logica para as	85
Figura 4. 29. Estados lógicos dos relés.....	86
Figura 5. 1. Gráfico mostra o aumento da condutividade em relação ao aumento da temperatura.....	93
Figura 5. 2. Condutividade vs Temperatura para a amostra 8.	94
Figura 5. 3. Condutividade vs Temperatura para a amostra 9.	95
Figura 5. 4. Condutividade vs Temperatura para a amostra 7.	95
Figura 5. 5. Comportamento da resistividade em relação a temperatura negativa e positiva.	96
Figura 5. 6. Comportamento da Condutividade em relação a temperatura negativa e positiva.	97
Figura 5. 7. Número dos portadores de carga para uma amostra de GaSb em temperaturas negativas e positivas.	98
Figura 5. 8. Comportamento da mobilidade dos portadores de carga para diferentes temperaturas em uma amostra de GaSb.	98
Anexo A. 1. Núcleo e entreferro de um eletroímã.	107
Anexo A. 2. Ponto de campo magnético em relação a um fio de condução de corrente elétrica.....	108
Anexo B. 1. Esquema elétrico de um transistor.....	112

Anexo B. 2. Mostra uma junção PN.	113
Anexo C. 1. Recombinação e geração radioativa.	115
Anexo C. 2. Recombinação e geração por níveis discretos de energia.	115
Anexo C. 3. Recombinação e geração Auger.	116
Anexo C. 4. Recombinação e geração superficial.....	116

Tabela 3. 1. Exemplos de materiais isolantes e semicondutores e a largura da banda proibida em E_g [eV] a 300 K.	28
Tabela 3. 3. Condutividade a temperatura ambiente, largura de banda, mobilidade dos elétrons e das lacunas para alguns semicondutores [4].	34
Tabela 4. 1. Medidas de fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes.....	59
Tabela 5. 1. Quadro com a medida de espessura com o relógio comparador de amostras de GaSb.	87
Tabela 5. 2. Medida de espessura utilizando um relógio comparador para amostras GaSb.	88
Tabela 5. 3. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 1.	89
Tabela 5. 4. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 2.	89
Tabela 5. 8. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 3.	89
Tabela 5. 6. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 4.	89
Tabela 5. 7. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 5.	90
Tabela 5. 8. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e fator de Van Der Pauw da amostra 6.	90
Tabela 5. 9. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 7.	90
Tabela 5. 10. Resultados dos cálculos do número e mobilidade dos portadores de carga da amostra 3A de GaSb.....	92
Tabela 5. 12. Resultados dos cálculos do número e mobilidade dos portadores de carga da amostra Itália A de GaSb.	92
Tabela 5. 12. Resultados dos cálculos do número e mobilidade dos portadores de carga da amostra 1 de GaSb.	92

Tabela 5. 13. Variação de resistividade em relação à temperatura.....	14 93
Tabela 5. 14. Variação de resistividade em relação à temperatura.....	94
Tabela 5. 15. Variação de resistividade em relação à temperatura.....	94
Tabela 5. 16. Variação de resistividade em relação à temperatura.....	95
Tabela 5. 17. Resistividade, Resistência e Condutividade em relação a temperatura.	96
Tabela 5. 18. Erro das medidas do sistema	99

Quadro 4. 1. Mostra a lógica implementada nos reles para as medidas de resistência Van Der Pauw.85

Quadro 4. 2. Mostra a lógica implementada nos reles para as medidas de efeito Hall.85

LISTA DE SÍMBOLOS

16

A	Área	m^2
σ	Condutividade elétrica	S
C_a	Número de átomos na superfície do substrato	m^{-3}
T	Temperatura	$^{\circ}C$
E_g	Largura de Banda	eV
K_B	Constante de Boltzmann	J/K
FEM	Força eletromotriz	J/C
ρ	Resistividade	$\Omega.cm$
R	Resistência	Ω
I	Corrente elétrica	A
V	Tensão	V
μ	Mobilidade dos portadores de carga	cm^2/Vs
n_s	Densidade dos portadores de carga	cm^{-3}
V_H	Tensão Hall	V
\vec{F}	Força	N
q	Carga elementar do elétron	C
\vec{E}	Campo elétrico	N/C
\vec{B}	Indução magnética	T
\vec{D}	Vetor deslocamento de campo magnético	mm
\vec{H}	Campo magnético	G
J	Densidade de corrente	A/m
μ	Permeabilidade magnética	N/A
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>	
RISK	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>	
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>	
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>	
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	
VISA	<i>Virtual Instrument Software Architecture</i>	
MAX	<i>Measure e Automation Explorer</i>	
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>	

LED	<i>Light Emitting Diode</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
EPROM	<i>Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
E_a	Nível de energia aceitador devido ao dopante tipo-p
E_v	Nível de energia ocupado na banda de valência
E_c	Nível de energia desocupado

RESUMO

FRANÇA, Mauricio Paz. **Construção de um sistema automatizado para caracterização elétrica de semicondutores pelo método Van Der Pauw.** Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 2012. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Nos materiais semicondutores a condução elétrica ocorre através do movimento de cargas negativas (elétrons) ou positivas (formadas por lacunas deixadas pelos elétrons). Assim, o efeito Hall nos materiais semicondutores poderá informar qual o tipo e a densidade dos portadores de carga na amostra e a mobilidade destas cargas. Além dessas grandezas, outras características do material como a largura da banda proibida e condutividade elétrica podem indicar a qualidade estrutural e a pureza do material. Neste trabalho foi construído um sistema automatizado para medições de resistividade, mobilidade e número de portadores de carga em amostras de materiais semicondutores de dimensões não padronizadas, ou seja, amostras típicas encontradas em laboratórios de pesquisa. Foi utilizado o método de Van der Pauw que despreza o formato superficial da amostra, desde que tenham espessura conhecida. Um sistema criogênico que envolve o porta amostras e assim permite a realização de medidas em temperaturas de -60 até +70 °C. Para a automação das medidas de resistividade, número de portadores de carga e mobilidade foi desenvolvido um programa para o sistema de controle e aquisição de dados. Uma fonte com medidores de corrente e tensão da Keithley® Instruments foi acoplada ao sistema. Medidas realizadas em amostras padrão comprovam que o sistema preenche os requisitos do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) para materiais semicondutores, apresentando erro inferior a 2%.

Palavras-Chaves: Materiais Semicondutores, Efeito Hall, Método Van der Pauw.

ABSTRACT

FRANÇA, Mauricio Paz. **Automated system construction for semiconductors electrical characterization by Van Der Pauw method.** Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 2012. Postgraduate Program in Engineering and Materials Technology, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

In Semiconductor materials the electrical conduction occurs through the movement of negative (electrons) or positive (formed by the holes left by the electrons) charges. Thus, the Hall effect in the semiconductor materials may inform the type and density of charge carriers in the sample and the mobility of these charges. In addition to these quantities, other characteristics of the material as the width of the band gap, and electrical conductivity can indicate the quality and purity of the material structure. In this work, an automated system for resistivity and Hall effect measurement in non-standard dimensions samples of semiconductor materials was build. These kinds of samples are found in typical research laboratories. We used the Van der Pauw method who despises the format of the sample surface, since when the sample thickness is known. A cryogenic system involves the sampler and allows measurements at temperatures of -60 to $+70$ ° C. For automation of the resistivity, number of charge carriers and mobility measurements, a program was developed for system control and data acquisition. A Keithley® Instruments source with voltage and current meters was coupled to the system. The measurements performed on standard samples show that the system meets the requirements of NIST for semiconductor materials, with error less than 2%.

Key-words: Semiconductor Materials, Hall Effect, Van der Pauw method.

1. INTRODUÇÃO

Nossa sociedade hoje necessita de uma gama de novos produtos e serviços que visem à economia de energia e desempenho de produção. Isto exige uma nova era de materiais que tenham a capacidade de atender uma nova demanda de tecnologia. Isso faz com que seja possível produzir novas tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras. Sem esses novos materiais a produção dessas novas tecnologias não seria possível. Portanto, engenheiros e cientistas dos materiais estão cada vez mais conquistando um alto nível de entendimento sobre os conceitos básicos que compõem átomos, moléculas, cristais e arranjos não cristalinos. A forma de trabalho, convivência e interação entre as pessoas está modificando o avanço da eletrônica. Estes avanços dependem particularmente do processamento de novos materiais. Portanto, materiais mais críticos relacionados à tecnologia de informação e projeto de *hardware* são baseados em semicondutores utilizados para desempenhar as funções lógicas e memórias de alta velocidade, porque permitem a transmissão de dados em alta velocidade com baixo custo, baixo consumo de energia e armazenamento [1].

O início da produção local de semicondutores previsto para 2012-2013 e os incentivos fiscais para atrair fabricantes, apoiado pelo governo brasileiro, busca diminuir o elevado déficit comercial em produtos de tecnologia da informação e comunicação no Brasil. Os semicondutores são a matéria-prima dos microprocessadores e peças essenciais para a indústria eletrônica e de informática. O Brasil possui o terceiro maior mercado mundial de computadores pessoais, mas não tira todo o proveito que poderia dessa situação [2].

Swart, J. [2] lembra que estamos em plena sociedade da informação. Nela, a geração, o armazenamento, o tratamento, a transmissão, o uso e o domínio da

informação e do conhecimento constituem a atividade social e econômica predominante. Seus produtos estão baseados no emprego de dispositivos eletrônicos – optoeletrônicos, fotônicos e microssistemas. E, entre eles, o silício é o mais importante e com propriedades que permitem considerá-lo uma dádiva da natureza e com a possibilidade de classificar a sociedade atual como a “idade do silício”, a exemplo de outros materiais que levaram a grandes transformações sociais. Componentes de alto valor agregado constituídos de semicondutores como dispositivos microeletrônicos são trazidos do exterior a preços elevados, pois ainda não há tecnologia para produzi-los no Brasil [2].

Então as propriedades elétricas dos materiais semicondutores definem sua aplicação de destino na indústria eletroeletrônica. A condutividade elétrica de um semicondutor tem a possibilidade de determinar o seu nível de pureza e concentração de dopantes do material. Os métodos utilizados para a obtenção da condutividade através da medida de resistência elétrica não possuem um alto nível de complexidade, mas exigem equipamentos calibrados e contatos de qualidade [3].

Portanto, diante do exposto verifica-se a importância da medição da condutividade, mobilidade e portadores de carga para caracterização dos materiais semicondutores. Existem vários métodos que são utilizados para a caracterização elétrica destes materiais, entre eles cabe destacar o método das quatro pontas e o método de Van der Pauw. A grande vantagem do método de Van der Pauw, para a medição das propriedades elétricas dos materiais, é que permite a utilização de amostras não padronizadas. Ou seja, permite medir a condutividade superficial de lâminas com formato aleatório e de espessura conhecida e uniforme, ideal para caracterização de materiais semicondutores experimentais, fabricados em laboratório, onde as amostras são muitas vezes pequenas e de formato variado.

Sistemas comerciais que utilizam o método Van Der Pauw para a caracterização das propriedades elétricas de materiais semicondutores, que são oriundos da indústria, normalmente são utilizados para o controle de processos de fabricação. As amostras para controle de processos industriais possuem formato padronizado. Portanto, sistemas comerciais seguem o padrão dessas amostras.

Assim, não existem sistemas comerciais que possibilitem o uso em amostras não padronizadas criadas em laboratórios de pesquisa.

Portanto, neste trabalho apresenta-se um sistema para a caracterização elétrica de materiais semicondutores pelo método Van Der Pauw construído com um porta amostra adequado e flexível para amostras típicas de laboratório. O porta amostra desenvolvido assegura um campo magnético uniforme durante as medidas de efeito Hall, para temperaturas de -60 a $+70^{\circ}\text{C}$ devido a um conjunto criogênico onde a amostra é inserida.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Construção de um sistema automatizado para medição de resistividade, mobilidade e número de portadores de carga de materiais semicondutores pelo método Van Der Pauw, em temperaturas variadas.

2.2. Objetivos Específicos

- Construção de um porta amostra compatível com as amostras desenvolvidas em laboratório, com dimensões e espessuras variáveis, que permitam as medições por efeito Hall, em faixas de temperatura de 70 até -60 °C;
- Utilizar a interface do *software LabView®* para desenvolver um programa para gerenciamento de dados e cálculo de resistividade, mobilidade e número de portadores de carga de forma direta e de fácil compreensão;
- Avaliar o desempenho do sistema em função do erro de medição para amostras conhecidas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Semicondutores

O modelo dos elétrons livres explica várias propriedades dos metais, porém falha na explicação das propriedades de isolantes e de semicondutores. Isto porque tendo em vista que nos isolantes e semicondutores os elétrons em geral não estão livres, mas sim presos nas ligações covalentes entre os átomos. É por este motivo que eles apresentam baixíssima condutividade elétrica [2].

Os semicondutores são sólidos cristalinos que possuem resistividade na faixa entre $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ até $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$. Os semicondutores são primordiais para a indústria microeletrônica, utilizados na fabricação de componentes eletrônicos tais como diodos, transistores, microprocessadores e nanocircuitos [4].

O que torna um material semicondutor indicado para indústria de eletrônica e microeletrônica é a sua capacidade de migrar de um isolante a um condutor com a inclusão de impurezas, denominadas dopantes. O modelo de elétrons livres explica a condutividade elétrica e outras propriedades dos metais e isolantes em função da temperatura, mas falha na explicação das propriedades dos semicondutores.

Isto significa que foi necessário criar um modelo alternativo para explicar as propriedades dos materiais semicondutores, sendo que um modelo útil deve ser compreensível, explicar as observações experimentais com razoável precisão e ser válido em uma larga faixa de condições. O conhecimento da teoria de bandas é essencial para o entendimento, do funcionamento de um grande número de dispositivos eletrônicos, opto-eletrônicos e sensores de todo tipo. Os semicondutores dividem-se em:

- Semicondutores intrínsecos ou puros como o Ge e Si;
- Semicondutores extrínsecos ou semicondutores com impurezas (dopantes);
- Semicondutores compostos como GaAs, InP, GaAsSb, InSb, GaAlAsIn e outros;
- Óxidos Semicondutores como o ZnO e SnO₂.

O caráter semicondutor de um material é atribuído aos quatro elétrons da última camada, como no silício e no germânio, que são denominados de semicondutores puros. Quando dois elementos (um com três e outro com cinco elétrons na última camada atômica se ligam compartilhando seus elétrons em uma ligação covalente, também apresentam o caráter semicondutor e são denominados compostos semicondutores III-V. Além disso, muitos outros elementos podem formar compostos semicondutores, como os elementos II - VI, compostos ternários e quaternários, e ainda, vários óxido metálicos como o ZnO e o SnO₂, desde que o caráter tetravalente seja mantido [5].

3.2. Modelo de bandas de energia

Cada átomo no sólido apresenta um número expressivo de níveis discretos de energia que podem ser ocupados pelos elétrons e, normalmente, os elétrons ocupam os estados de mais baixas energias. É possível ocorrer excitação destes estados eletrônicos para níveis mais altos em energia. Somente os elétrons que ocupam originalmente os estados mais altos em energia no átomo, os chamados elétrons de valência, é que participam destes processos de excitação. A figura 3.1a mostra a representação esquemática de um átomo de sódio, assim como a figura 3.1b mostra a representação esquemática da rede cristalina do silício enfatizando as ligações covalentes entre os átomos [5].

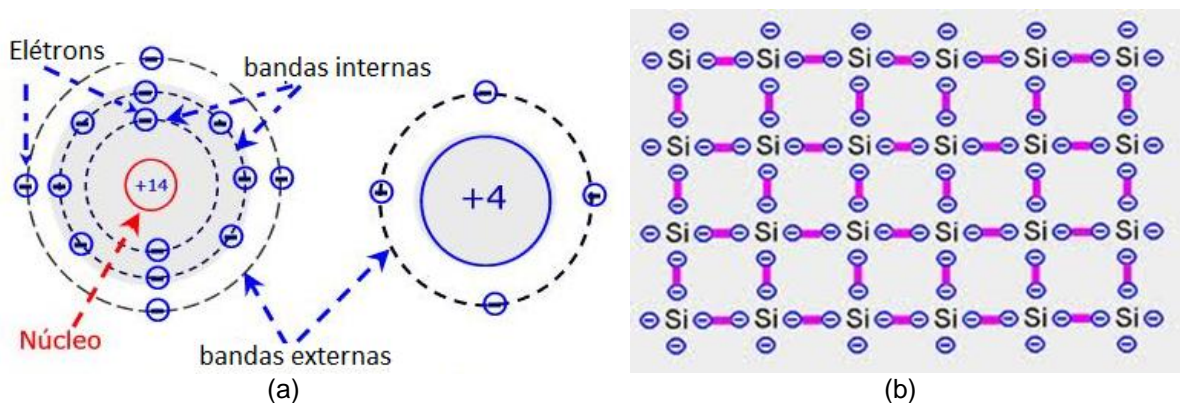


Figura 3. 1. (a) Representação esquemática de um átomo de sódio e (b) representação esquemática da rede cristalina do silício enfatizando as ligações covalentes entre os átomos.

A condutividade dos materiais isolantes e semicondutores, pode ser descrita pela teoria de bandas. Onde os elétrons estão agrupados em bandas permitidas separadas pela banda proibida, também denominada de *gap de energia* ou *band gap*. Uma banda pode estar separada da próxima banda por uma faixa de energia proibida ou *gap* de estados não permitidos (E_g). Os níveis discretos dos vários átomos sofrem acoplamentos, resultando em faixas ou bandas de energias de estados permitidos. A largura desta banda proibida pode variar bastante, dependendo do elemento químico constituinte do sólido, podendo inclusive ser negativo, ou seja, com a sobreposição de duas bandas consecutivas, conforme indica a figura 3.2 [6].

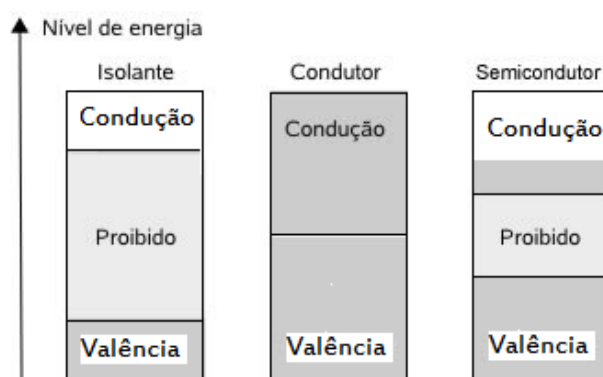


Figura 3. 2. Representação dos níveis de energia para materiais isolantes, metais e semicondutores [4].

O valor *gap* ou da banda de proibida define o quão condutor vai ser um material. Quanto menor o *gap* de energia mais fácil a transição da banda de

valência para a banda de condução (mais fácil de mover um elétron de uma banda a outra e assim melhora a condução) [5].

O material é condutor quando o nível de energia mais alto ocupado no zero absoluto está localizado dentro da banda de valência, então os elétrons podem ser acelerados livremente para os níveis de energia mais altos. Em um condutor os elétrons com mais altas energias se comportam como se fossem livres. Isolantes são materiais que possuem a banda de valência totalmente preenchida, sem sobreposição com a banda de condução, e, além disto, uma banda proibida de valor considerável. Uma banda proibida larga indica a improbabilidade de um elétron da banda de valência passar para a banda de condução. Materiais semicondutores podem ser considerados um caso particular de materiais isolantes, sendo que a única diferença entre eles é a largura da banda proibida (ou a magnitude da energia da banda proibida) [5].

Se a largura da banda proibida for menor ou igual a 3 eV o material é classificado como semicondutor, enquanto que, se for maior que este valor é classificado como isolante. Na temperatura de 0 K, tanto o semicondutor como o material isolante comportam-se como isolantes. Eles não poderão conduzir corrente elétrica, pois na temperatura de 0 K em ambos os casos, a banda de valência encontra-se totalmente preenchida. Acima de 0 K, como na temperatura ambiente, materiais semicondutores, alguns poucos elétrons da banda de valência adquirem calor da rede e saltam para a banda de condução deixando espaços vazios na banda de valência, formando um par elétron lacuna [6].

Portanto, quando um elétron absorve energia suficiente para pular a banda proibida, alcança a banda de condução, gerando uma lacuna na banda de valência, ou seja, forma-se um par elétron-lacuna. Por outro lado, quando um elétron da banda de condução retorna para a banda de valência disse-se que o elétron é capturado por uma lacuna, ocorrendo o que se denomina de recombinação de um par lacuna-elétron. Este tipo de processo ocorre de forma continuada em um semicondutor [7].

Desta forma, os elétrons, tanto da banda de valência (banda não mais totalmente preenchida) como da banda de condução (apenas parcialmente

preenchida), podem conduzir corrente elétrica. A condutividade será, no entanto bem reduzida, tendo em vista o número reduzido de elétrons na banda de condução, bem como uma banda de valência ainda quase preenchida. Esta situação, no entanto, não ocorre em materiais isolantes cuja largura da banda proibida é grande, a não ser que seja elevada muito a temperatura. A Tabela 3.1 apresenta alguns exemplos de materiais isolantes e semicondutores e suas largura da banda proibida em eV.

O modelo de bandas trata as lacunas como partículas de carga positiva, para efeito de cálculo. Porém, a lacuna não existe como partícula ou como entidade isolada ela é uma consequência do movimento de elétrons num potencial periódico. Assim, a lacuna livre não existe, ela representa falta de elétrons. No caso de um cristal tridimensional real, o formato de um diagrama de bandas como o indicado na figura 3.2 se torna bem mais complexo. A figura 3.3 apresenta dois diagramas de bandas reais, indireta (Si) e direta (GaSb), correspondentes a cristais semicondutores de interesse prático.

Tabela 3. 1. Exemplos de materiais isolantes e semicondutores e a largura da banda proibida em E_g [eV] a 300 K.

Material	E_g [eV] a 300 K	Classificação
Ge	0,66	Semicondutor
Si	1,12	Semicondutor
GaAs	1,42	Semicondutor
C (diamante)	5,47	Isolante
SiO ₂	9,0	Isolante
Si ₃ O ₄	5,0	Isolante

As curvas representam os estados permitidos determinados pela solução da equação de Schrödinger independente do tempo, tendo como potencial eletrostático o potencial periódico do cristal. Nos diagramas considerou-se como energia de referência a energia do topo das bandas de valência dos materiais.

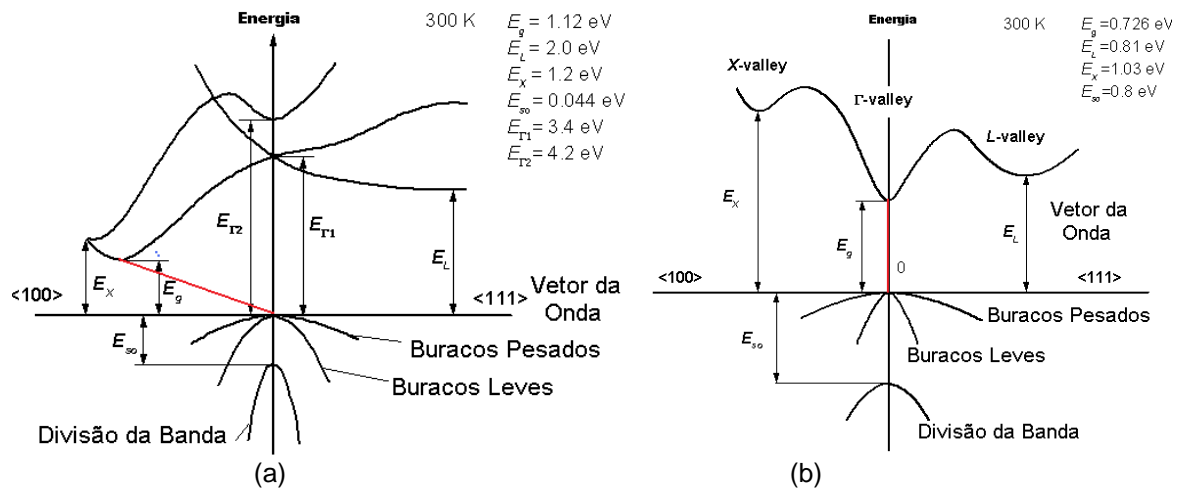


Figura 3. 3. Diagrama da banda de energia do (a) silício e do (b) GaSb [8].

A condutividade elétrica de um semicondutor depende da excitação de uns poucos elétrons da banda de valência para a banda de condução, portanto a quantidade de energia necessária para transferir um elétron entre elas será o que determinará a condutividade do material semicondutor. Pode-se mudar a condutividade de um semicondutor agregando controladamente impurezas a rede (estas impurezas são denominadas dopantes), como por exemplo, fósforo ou arsênio ao silício. O fósforo e arsênio são elementos do grupo V, que possuem cinco elétrons de valência e, assim, têm um elétron extra para a condutividade elétrica contribuir com a condutividade do silício. A figura 3.4 mostra o elétron extra existente em uma dopagem de silício puro. A figura 3.5 mostra o comportamento do dopante tipo-n(elétron) e tipo-p (falta de elétrons ou lacuna) na rede do silício [6].

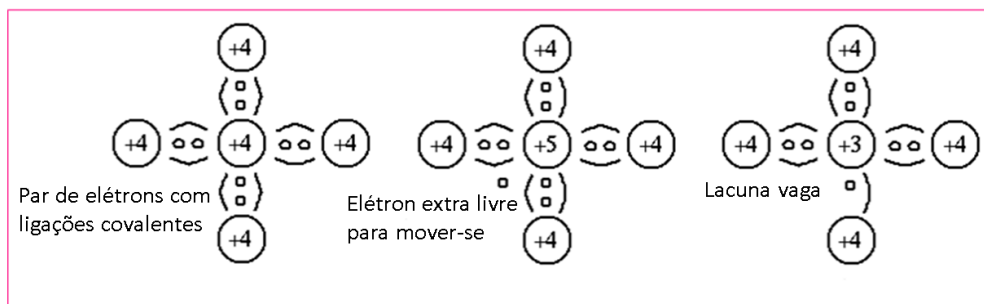


Figura 3. 4. Dopante tipo-n (elétron) e tipo-p (lacuna) na rede do silício [8].

Tais impurezas alteram os níveis de energia (ou a largura da banda proibida) fornecendo novos portadores de carga (corrente). As impurezas em semicondutores podem alterar a condutividade de duas formas: tipo-n e tipo-p. Num semicondutor

do tipo-n as impurezas que introduzem na banda proibida um novo nível de energia E_c , são consideradas impurezas doadoras, enquanto que num semiconductor do tipo-p, as impurezas aceitadoras tipo-p introduzem um novo nível de energia E_d [5].

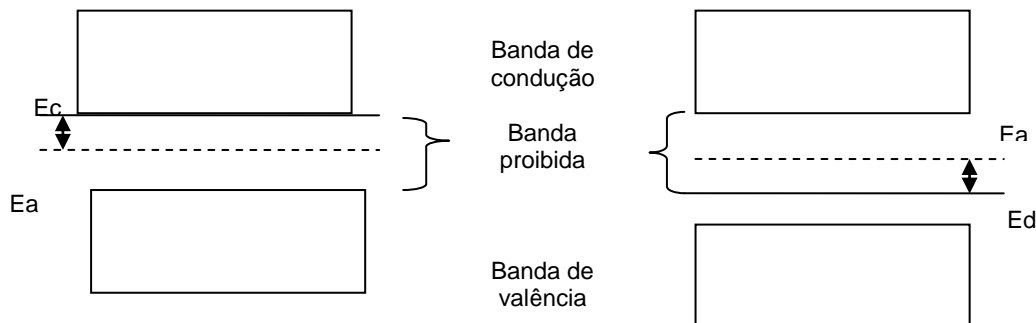


Figura 3. 5. Representação dos níveis de energia em semicondutores extrínsecos do (a) tipo-n e (b) tipo-p, onde E_d é o nível de energia doador devido o dopante tipo n, E_a o nível de energia aceitador devido ao dopante tipo-p, E_v é o mais alto nível de energia ocupado na banda de valência e E_c é o mais baixo nível de energia desocupado.

3.3. Semicondutores Intrínsecos

Os semicondutores intrínsecos são substâncias puras que não contêm qualquer tipo de impureza e possuem uma banda proibida com largura menor que 3 eV quando estão a 0 K , ou seja, está com todos os níveis ocupados na banda de valência e todos os níveis desocupados na banda de condução. Nessa temperatura, comportam-se como isolantes. As bandas proibidas do silício e o germânio são 1,1 eV e 0,7 eV respectivamente, assim sendo exemplos de semicondutores intrínsecos. Isto para uma temperatura de 0 K [9].

3.4. Semicondutores extrínsecos

As propriedades elétricas dos semicondutores como a condutividade pode ser alterada pela adição de pequenas quantidades de outros elementos químicos que são consideradas impurezas. A adição dessas impurezas é chamada de dopagem e este tipo de semiconductor chama-se de extrínsecos. De acordo com o tipo de dopagem, os semicondutores extrínsecos podem ser do tipo n ou do tipo p.

No processo de dopagem, os semicondutores são produzidos a partir de materiais que, inicialmente, possuem pureza extremamente elevada. Portanto, dois semicondutores iguais, mas com graus de impurezas tão mínimos que sequer podem ser detectadas por análise química convencional, podem apresentar condutividades centenas de vezes diferentes [10].

Estes níveis de energia são chamados níveis doadores, já que os elétrons que os ocupam podem ser facilmente excitados para níveis da banda de condução por frações da energia interna do sólido. Por causa do sinal negativo da carga dos portadores de corrente elétrica, o semicondutor extrínseco em questão é chamado de semicondutor tipo n. Além do arsênio, outros átomos de elementos do grupo V da tabela periódica, que têm cinco elétrons de valência, podem atuar como impurezas doadoras [10].

Se uma amostra de silício (ou de germânio) é dopada com um pequeno teor de gálio, os três elétrons de valência de cada átomo de gálio participam de ligações covalentes com três dos quatro átomos de silício (ou de germânio) vizinhos. Correspondentemente ao quarto elétron de valência de cada átomo de silício (ou de germânio), existem níveis de energia um pouco acima da banda de valência. Nessa situação, para completar a quarta ligação covalente, os átomos de silício (ou de germânio) aceitam elétrons da banda de valência excitados por frações da energia interna do sólido. Portanto, existem lacunas nessa banda e esses níveis são chamados de níveis aceitadores [10].

3.5. Propriedades elétricas dos materiais

A capacidade que um material condutor permitir a passagem de fluxo de corrente elétrica devido a diferença de potencial, é chamada de condutância (G). A condutância, assim como a resistência (R) a passagem da corrente elétrica é dada pela equação 3.1, onde (I) é a corrente e (ΔV) a diferença de potencial. A

condutância dada em siemens (S), é o inverso da resistência (R) dada em ohms (Ω) no SI [12].

$$\frac{1}{G} = R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1)$$

onde R é a resistência em Ω , da amostra, para o fluxo de corrente elétrica. A resistência, assim como a condutância, depende do comprimento, do diâmetro do condutor e da resistividade do material (equação 3.2) A resistividade (ρ) é uma propriedade intrínseca de cada material [12].

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (3.2)$$

onde R é a resistência elétrica de uma amostra com a passagem de corrente elétrica que possui área da secção (A) e espessura (l). O inverso da resistividade (ρ) é a condutividade (σ) de acordo com a equação 3.3:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

A resistividade elétrica independente do formato da amostra é uma propriedade intrínseca do material, mas depende da temperatura, porque dela depende a quantidade de energia necessária para que os elétrons vençam a barreira da banda proibida. Nos semicondutores os elétrons e lacunas são chamados de portadores de carga [5].

$$\ln \sigma \cong -\frac{E_g}{2kT} \quad (3.4)$$

onde a largura de banda E_g é dada por eV, k é a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta em K. O número de portadores tipo-p e tipo-n podem ser calculados através das equações 3.5 e 3.6 [6].

$$E_g = -2K \left(\frac{\Delta \ln p}{\Delta T} \right) \quad (3.5)$$

$$E_g = -2K \left(\frac{\Delta \ln n}{\Delta T} \right) \quad (3.6)$$

O movimento dos portadores de carga está relacionado com a corrente elétrica que flui através do material. Esta corrente elétrica gera uma força de Lorentz que faz os mesmos se movimentarem, onde os portadores de carga para lacunas são representados por p e para elétrons n . Com essas equações pode-se avaliar o nível de energia de banda pela quantidade de portadores de carga e a temperatura do material. Os materiais metálicos são considerados bons condutores de corrente e possuem uma grande diversidade entre o tipo de metal. Como por exemplo, a platina e o ouro são excelentes condutores ao contrário do zinco e do chumbo que são maus condutores.

Portanto, a condutividade e a resistividade dependem de diversos fatores como a temperatura do material, do tipo de rede cristalina, composição, pureza e número de defeitos de rede, tanto para semicondutores como para metais. Porém, a principal diferença entre os condutores e semicondutores é o tipo de condução. No caso dos metais a corrente elétrica é conduzida de um ponto a outro pelos elétrons livres, estes responsáveis pelas forças atuantes quando um campo elétrico externo é aplicado. Então a condutividade elétrica aumenta com o aumento de temperatura. No caso de semicondutores como o silício e o germânio a condutividade diminui com o aumento da temperatura, assim a condutividade dos mesmos só pode ser explicada pela teoria de bandas de energia.

Tabela 3. 2. Condutividade a temperatura ambiente, largura de banda, mobilidade dos elétrons e das lacunas para alguns semicondutores [4].

Material	Largura de banda (eV)	Condutividade ($\Omega.m$) ⁻¹	Mobilidade eletrônica (m ² /V.s)	Mobilidade das lacunas (m ² /V.s)
Si	1,11	$4,0 \times 10^{-4}$	0,14	0,050
Ge	0,67	$2,2 \times 10^0$	0,38	0,180
GaP	2,25	-	0,05	0,002
GaAs	1,42	$1,0 \times 10^{-6}$	0,85	0,450
InSb	0,17	$2,0 \times 10^4$	7,70	0,070
CdSe	2,40	-	0,03	-
ZnTe	2,26	-	0,03	0,010

3.6. Mobilidade

Um semicondutor tem transportadores de carga negativos e positivos. Os elétrons são transportadores do tipo negativo e a condutividade que eles produzem depende de sua mobilidade através da banda de condução do semicondutor. As lacunas eletrônicas que são formadas na banda de valência são transportadores do tipo positivo. A condutividade por eles produzida depende da sua mobilidade através da banda de valência do semicondutor [11].

3.7. Medidas de resistividade e lei de Ohm

A resistência elétrica em um condutor é dada pela lei de Ohm segundo a equação 3.1, e a resistividade pela equação 3.2 mostradas na pagina 33, onde R é a resistência elétrica, A a área do material e l a espessura. A resistividade está representada pela unidade de $\Omega.m$. O esquema de um circuito para a medida de corrente elétrica está representado na figura 3.6 [12].

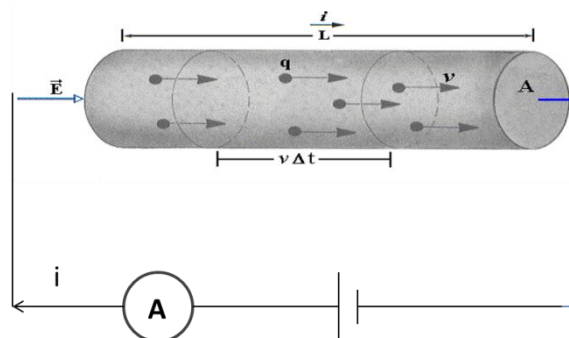


Figura 3. 6. Esquema de um material condutor [12].

Porém, quando se está interessados em estudar fenômenos elétricos localizados em um ponto específico da amostra, deve-se focalizar não na diferença de potencial e na corrente elétrica neste ponto, mas sim, no campo elétrico e na densidade de corrente elétrica no ponto em questão. Isto em um condutor sujeito à ação de um campo elétrico. Assim, os portadores de carga fluem na direção deste campo, e então, pode-se definir a densidade de corrente elétrica na amostra [12].

A densidade de corrente elétrica J no material se relaciona com o campo elétrico E aplicado pela equação 3.7 [12]:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (3.7)$$

onde J é a densidade de corrente, sendo E o campo elétrico na amostra. Com a equação 3.7 pode-se reestruturar a equação 3.8 de condutividade elétrica como [12]:

$$\sigma = \frac{il}{A\Delta V} \quad (3.8)$$

Pela lei do Ohm pode-se escrever a seguinte equação 3.9:

$$\sigma = R \frac{l}{A} \quad (3.9)$$

A equação 3.3 para resistividade do material é válida, porém para materiais semicondutores que a condutividade normalmente está relacionada com a mobilidade dos portadores de carga (lacunas e elétrons) também depende do tipo de dopagem do material e da resistividade como mostra a equação 3.10.

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (3.10)$$

Sendo q a carga elementar do elétron, μ_n e μ_p as mobilidades dos elétrons e lacunas e (ρ) a resistividade. Para os materiais semicondutores utilizados em microeletrônica os níveis de dopagem são utilizados para equilibrar a mobilidade das lacunas e dos elétrons livres e, assim pode-se reescrever a equação 3.10 segundo as equações 3.11, 3.12 e 3.13.

$$\mu_n = \mu_p \quad (3.11)$$

$$\rho \approx \frac{1}{q\mu_n N_D} \quad (3.12)$$

$$\rho \approx \frac{1}{q\mu_p N_p} \quad (3.13)$$

3.8. O Efeito Hall

O pesquisador E. H. Hall (1879) observou pela primeira vez que quando uma corrente elétrica passa através de uma amostra colocada em um campo magnético, um potencial proporcional à corrente e ao campo magnético é desenvolvido em todo o material, em uma direção perpendicular à corrente e ao campo magnético [8].

Esse efeito, conhecido como efeito Hall, é à base de muitas aplicações práticas e de dispositivos tais como medições da densidade de campo magnético, sensores de posição e detectores de movimento. Hall foi capaz de determinar pela primeira vez o sinal de portadores de carga em um condutor. Assim, as medidas, por efeito Hall, acabam se tornando uma ferramenta muito útil na caracterização das propriedades de transporte elétrico de metais e semicondutores [13].

Considere uma placa de um material semicondutor, com comprimento l e largura conhecida e espessura d , como mostrado na figura 3.7.

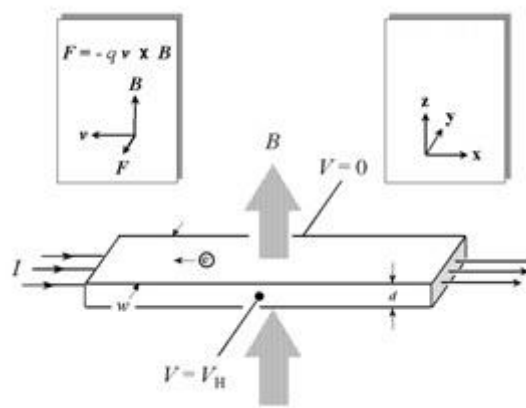


Figura 3. 7. Esquema do efeito Hall, onde B é o campo magnético aplicado e V a diferença de potencial estabelecida [14].

Assume-se que o condutor tenha portadores de carga q , negativas ou positivas, e que a densidade (números de portadores de carga por unidade de volume) seja n , e com velocidade V_x quando uma corrente I_x flui através da direção positiva a dimensão x [8].

A velocidade V_x é uma velocidade média dos portadores de carga sobre o volume do condutor. Cada um dos portadores de carga pode se mover de uma forma aparentemente aleatória dentro do condutor, mas sob a influência do campo magnético aplicado se estabelecerá um fluxo de transporte de portadores ao longo do comprimento do condutor, ou seja, um fluxo de corrente J_x [8].

Portanto, a corrente I_x pode ser escrita como a densidade de corrente multiplicada pela área transversal do condutor Wt . Então, a densidade de corrente J_x

é igual à densidade de carga nq multiplicada pela velocidade V_x e pela temperatura em K (equação 3.14) [8].

$$I_x = J_x W t = nq v_x T \quad (3.14)$$

Por outro lado, sendo a corrente I_x é função do campo elétrico que surge na direção perpendicular ao campo magnético aplicado B_x . No caso em que a corrente é diretamente proporcional ao campo, dizemos que o material obedece à lei de Ohm, que pode ser escrito pela equação 3.15 [8].

$$J_x = \sigma B_x \quad (3.15)$$

onde σ é a condutividade do material do condutor. Ao inserir um condutor em um campo magnético perpendicular, os portadores de carga sofrerão uma força dada pela equação de Lorentz $F = q \vec{v} \times \vec{B}$ que vai desviá-los em direção ao campo B aplicado, ocorrendo, assim, um acúmulo de cargas em um lado da placa, que cria um campo elétrico transversal E_y que neutraliza a força do campo magnético conforme mostra a Figura 3.8 [8].

No estado estacionário não existe fluxo de cargas na direção y , desde que as forças elétricas e magnéticas sobre os portadores de carga estejam equilibradas na direção y . Então na direção x o campo elétrico é proporcional à densidade de campo magnético segundo a equação 3.16.

$$E_x = v_x B_z \quad (3.16)$$

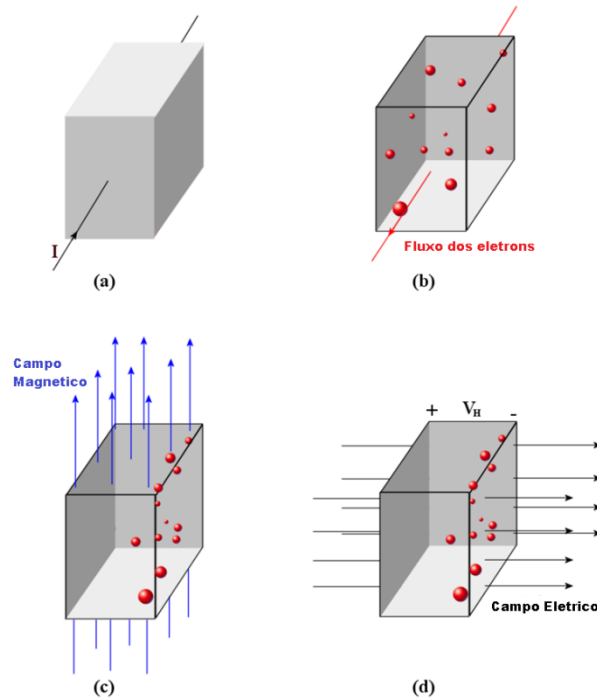


Figura 3. 8. Efeito Hall, (a) corrente I em um material semiconductor, (b) comportamento dos portadores de carga devido à corrente, (c) acúmulo de elétrons em uma das bordas do semiconductor devido ao campo magnético aplicado e em (d) mostra o campo elétrico resultante devido à da tensão Hall V [16].

Sendo E_y a componente do campo elétrico na direção y , chamado de campo Hall, e B_z a componente da densidade magnética na direção z . A diferença de potencial na amostra é dada pela tensão Hall V_H que está relacionada com o campo Hall através da equação 3.17 [16].

$$V_H = - \int_0^W E_y dy = -E_y W \quad (3.17)$$

Assim, a partir das equações 3.14, 3.15 e 3.16 obtêm - se a equação 3.18.

$$V_H = - \left(\frac{1}{nq} \right) \frac{I_x B_z}{T} \quad (3.18)$$

O termo entre parênteses é conhecido como o coeficiente de Hall de acordo com o mostrado na equação 3.19 [16]:

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (3.19)$$

O resultado é positivo se os portadores de carga são positivos, e negativo se os portadores de carga são negativos. Na prática, a polaridade da V_H determina o sinal do portador de carga. A unidade SI do coeficiente Hall são m^3/C ou, mais comumente indicado m^3/As .

3.8.1. O efeito Hall em metais e semicondutores

Imagina-se que os portadores de carga se movem em um meio que oferece alguma resistência. Essa resistência deve-se à dispersão entre os portadores e as impurezas no material e as vibrações dos átomos do material. Cada portador de carga é acelerado pelo campo aplicado, mas a cada tantas vezes se dispersa e perde energia. Portanto, assumindo que o tempo médio entre eventos de dispersão é T , então temos, em média, uma força agindo em retardar os portadores de acordo com a equação 3.20 [15].

$$\vec{F}_{retard} = -\frac{m\vec{v}}{\tau} \quad (3.20)$$

onde m é a massa dos portadores. Assim, sob a influência da aplicação de campos elétricos e magnéticos, a segunda lei de Newton se mostra de acordo com a equação 3.21 [15]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) - \frac{m\vec{v}}{\tau} \quad (3.21)$$

onde a velocidade \vec{v} é tida como uma média ao longo de todos os portadores. No estado estacionário, o tempo derivado da velocidade v desaparece. Então com a convenção usual que aponta B ao longo do eixo z , obtém as equações para a

componente v definindo o lado esquerdo da equação 3.21 para zero obtendo as equações 3.22, 3.23 e 3.24 [15]:

$$v_x = \frac{q\tau}{m} E_x + \frac{q\tau}{m} B_z v_y \quad (3.22)$$

$$v_y = \frac{q\tau}{m} E_y + \frac{q\tau}{m} B_z v_x \quad (3.23)$$

$$v_z = \frac{q\tau}{m} E_z \quad (3.24)$$

De acordo com $J_x = nqv_x$ (e correspondendo tanto para os componentes Y e Z). Ao resolver as equações acima para V_x , V_y e V_z em termos de componentes de E - B_z obtém - se as equações 3.25, 3.26 e 3.27:

$$J_x = \frac{\sigma}{1 + w_c \tau} (E_x + w_c \tau E_y) \quad (3.25)$$

$$J_y = \frac{\sigma}{1 + w_c \tau} (E_y + w_c \tau E_x) \quad (3.26)$$

$$J_z = \sigma E_z \quad (3.27)$$

Só são possíveis as equações 3.25, 3.26 e 3.27 quando se utiliza as equações 3.28 e 3.29:

$$\sigma \equiv \frac{nq^2 \tau}{m} \quad (3.28)$$

$$w_c \equiv \frac{qB_z}{m} \quad (3.29)$$

O parâmetro T , chamado de tempo de relaxamento, é amplamente utilizada nos debates de transporte eletrônico em materiais, e pode ser justificada em um contexto da mecânica quântica através da equação de transporte de Boltzmann [18].

A frequência angular W_c é chamada de frequência cíclotron. É a frequência de rotação de uma carga em um campo magnético, e pode ser escrita como uma medida da força do campo. Então a relação $W_c T$ é usada para caracterizar uma situação experimental: se o campo magnético é fraco ou o tempo de relaxação curto, $W_c T \ll 1$, portanto a experiência está no limite de campo fraco, mas, se $W_c T \gg 1$, o experimento está no limite do campo forte. Uma série de materiais apresenta um comportamento muito diferente entre os limites de campo fraco e forte como o alumínio [18].

A teoria clássica do efeito Hall apresentada acima assume que a corrente elétrica é o resultado de muitos portadores de carga que se deslocam independentemente uns dos outros respondendo como partículas clássicas quando aplicado campo magnético. Mas sabe-se que os elétrons são partículas que têm propriedades ondulatórias. Portanto, alterando o modelo clássico de partículas independentes movendo-se livremente para partículas quânticas faz com que pequenas alterações sejam feitas nos resultados até agora obtidos [18].

Elétrons na estrutura sentem o efeito de um potencial periódico em seu movimento. O maior efeito ocorre para os elétrons nos orbitais atômicos externos e especialmente os elétrons de valência, cujo comprimento de onda de Broglie está perto do espaçamento da periodicidade do potencial. Dentro do potencial periódico as energias permitidas para os elétrons de valência são divididos em uma série de bandas de energia com *gaps* de energia entre elas. Então se o número de elétrons de valência por unidade de célula do cristal é exatamente o suficiente para encher uma banda, o sólido será um mau condutor, uma vez que por simetria cada energia será preenchida apontando em direções opostas. Condução só pode ocorrer se um elétron pode saltar um *gap* em um estado desocupado. Mas, se o *gap* é muito grande a energia necessária será muito alta, então o sólido se torna um isolante.

Mas se a o *gap* for pequeno, a energia térmica será suficiente para que o elétron pule o *gap* então tornando-se um semiconductor [18].

Por outro lado, se o número de elétrons de valência por unidade de célula do cristal não é suficiente para encher uma banda, então muitos estados estão vagos, ao alcance fácil de energia, e o sólido é um bom condutor, ou seja, um metal. Em um semiconductor o *gap* da banda é relativamente pequeno assim os elétrons podem ser excitados por uma energia térmica a fim de serem capazes de saltarem o *gap*. Tanto os elétrons livres como as lacunas possuem corrente, porem as lacunas possuem carga positiva. O número desses transportadores de corrente depende da temperatura de uma forma quase que exponencial o número é proporcional ao fator de Boltzmann $e^{-E_g/kT}$, onde E_g é a energia do *gap* [18].

A ideia simultânea entre os elétrons e lacunas produziu um modelo muito útil do efeito Hall chamado “*modelo de duas bandas*”. Então se cada tipo de portador tiver um coeficiente Hall: R_e para elétrons e R_h para lacuna e assumindo a condutividade $\sigma = \sigma_e + \sigma_h$, onde σ_e e σ_h , pode-se derivar uma expressão para o coeficiente Hall total como mostrado na equação 3.30:

$$R_H = \frac{\sigma_e^2 R_h + \sigma_h^2 R_e}{\sigma_e + \sigma_h} \quad (3.30)$$

Então no modelo de duas bandas a condutividade se apresentaria como a equação 3.31:

$$\sigma = \mu_e |q_e| n_e + \mu_h |q_h| n_h \quad (3.31)$$

E o coeficiente Hall de baixo campo como a equação 3.32:

$$R_H = \frac{1}{|q|} \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{n_h \mu_h + n_e \mu_e} \quad (3.32)$$

Assumindo que a carga é de mesma magnitude para os dois tipos de portadores. Para os metais, o valor exato da densidade de portadores de carga e o sinal do coeficiente Hall dependem da estrutura de bandas de energia do metal em particular. Para os metais alcalinos (Li, Na, K,) e alguns dos metais de transição (Cu, Ag, Au), os portadores de carga são elétrons (negativos) e a densidade de portadores de carga é de cerca de um elétron por átomo [8].

Em semicondutores, a estrutura de banda pode ter origem tanto negativa (elétrons) ou positiva (lacunas), a condutividade elétrica é determinada pela densidade e a mobilidade dos dois tipos. É necessário muitas vezes usar as formas mais complexas de R_H , para esses materiais.

Em qualquer caso, à temperatura ambiente, a densidade de portadores de carga de semicondutores é muito menor do que o de metais e, assim, a magnitude da V_{Hall} é muito maior para um determinado I_x , B_z e espessura do filme, t .

Neste caso, a resistência Hall não aumenta linearmente com B_z . A magnitude da resistência Hall em etapas é h/e^2i , onde i é um inteiro. A condutância Hall, e recíproca da resistência Hall, que aumenta em inteiros, e a quantidade dada por e^2/h define a unidade básica de condutância.

3.8.2. Medidas Hall

Quando uma partícula carregada, como um elétron é colocado em um campo magnético, ele experimenta uma força de Lorentz proporcional à força do campo e da velocidade em que ele está viajando com ela. Essa força é mais forte quando a direção do movimento é perpendicular à direção da densidade magnética, neste caso a força é dada pela equação 3.33 [8].

$$F_L = QvB \quad (3.33)$$

Onde Q (C) é a carga na partícula, v (cm/s) a velocidade que está viajando, e B (Wb/cm²) a densidade do campo magnético. O motivo da unidade de indução

magnética ser dada em centímetros se deve ao fato que a indústria utiliza essa medida para o comprimento de semicondutores. Quando se aplica uma corrente elétrica em uma amostra de semicondutor, resulta em um fluxo constante de elétrons através do material. A velocidade dos elétrons viaja de acordo com a equação 3.34, que tem relação com a quantidade de corrente injetada [8]:

$$v = \frac{I}{nAq} \quad (3.34)$$

onde n é a densidade de elétrons, A é a área transversal do material e q a carga elementar ($1,602 \times 10^{-19}$ C). Se um campo magnético externo é então aplicado perpendicularmente ao sentido do fluxo da corrente, então a resultante da força de Lorentz fará com que os elétrons se acumulem em uma borda da amostra de acordo com o mostrado na figura 3.8c. Combinando as duas equações 3.33 e 3.34, e observando que q é a carga de um elétron, resulta em uma equação para a força de Lorentz experimentada pelos elétrons:

$$F_L = \frac{IB}{nA} \quad (3.35)$$

Esta acumulação criará um campo elétrico através do material devido à distribuição desigual da carga, como mostrado da figura 3.8d. Este, por sua vez leva a uma diferença de potencial entre o material, conhecido como a tensão Hall V_H . A corrente, no entanto, apenas continua a fluir ao longo do material o que indica que a força sobre os elétrons devido ao campo elétrico equilibra a força de Lorentz. Desde que a força sobre um elétron de um campo elétrico é ε e $q\varepsilon$, podemos dizer que a força do campo elétrico se mostra de acordo com a equação 3.36 [8]:

$$\varepsilon = \frac{IB}{qnA} \quad (3.36)$$

Finalmente, a magnitude da tensão de Hall é simplesmente a força do campo elétrico multiplicado pela largura do material, de acordo com a equação 3.37:

$$V_H = w\varepsilon = \frac{wIB}{qnA} = \frac{IB}{qnd} \quad (3.37)$$

onde d é a profundidade do material. Uma vez que a densidade n_s da amostra é definida como a densidade de elétrons multiplicada pela profundidade do material, podemos definir a tensão Hall, em termos de densidade da amostra de acordo com a equação 3.38 [8]:

$$V_H = \frac{IB}{qn_s} \quad (3.38)$$

3.8.3. Procedimentos recomendados para as medições

Dois conjuntos de medições de tensão Hall V_H necessitam ser realizadas: uma com um campo magnético na direção positiva z , e outras como o campo magnético na direção oposta, na direção (z negativo). As tensões obtidas com um campo positivo terá um índice P (por exemplo, $V_{13,P}$) e aquelas gravadas com um campo negativo terão um índice N (como o $V_{13,N}$). Para todas as medições, a magnitude da corrente injetada deve ser mantida constante, assim como a magnitude do campo magnético deve ser o mesmo em ambos os sentidos também.

Então, pode-se tirar vantagem do teorema da reciprocidade para realizar uma verificação da veracidade das medições. Invertendo a direção da corrente, $V_{13,P}$ deve ser o mesmo valor que o $V_{31,P}$ dentro de um grau suficientemente pequeno de erro. Tendo concluído as medições, um campo magnético negativo é aplicado no lugar do positivo, e o processo é repetido para obter as medições de tensão $V_{13,N}$, $V_{42,N}$, $V_{31,N}$, $V_{24,N}$ de N [8].

3.8.4. Cálculos da tensão Hall

A diferença entre as tensões positivas e negativas e campos magnéticos devem ser trabalhados de acordo com as equações 3.39-3.42:

$$V_{13} = V_{13,P} - V_{13,N} \quad (3.39)$$

$$V_{24} = V_{24,P} - V_{24,N} \quad (3.40)$$

$$V_{31} = V_{31,P} - V_{31,N} \quad (3.41)$$

$$V_{42} = V_{42,P} - V_{42,N} \quad (3.42)$$

A tensão total Hall é então obtida de acordo com a equação 3.43:

$$V_H = \frac{V_{13} + V_{24} + V_{31} + V_{43}}{8} \quad (3.43)$$

A polaridade da tensão Hall indica o tipo de condutividade da amostra. Se for positivo o material é do tipo-p, e se for negativo o material é tipo-n. A densidade dos portadores de carga pode ser obtida através da equação 3.44 [8].

$$n_s = \frac{IB}{q|V_H|} \quad (3.44)$$

onde a densidade magnética tem que ser inserido na equação com as unidades de Wb/cm². Como a unidade comumente utilizada é de Tesla tem que ser multiplicado por 10⁻⁴ [8].

3.8.5. Equações para a Mobilidade

A resistividade de um semiconductor pode ser mostrada segundo a equação 3.45:

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (3.45)$$

onde n e p são as concentrações de elétrons e lacunas no material, respectivamente, e μ_n e μ_p é a mobilidade dos elétrons e lacunas, respectivamente. Normalmente os materiais são dopados onde não tenham muita diferença entre as concentrações de p e n , portanto a equação pode ser simplificada de acordo com a equação 3.46:

$$\rho = \frac{1}{qn_m\mu_m} \quad (3.46)$$

onde n_m e μ_m são os níveis de dopagem e a mobilidade dos portadores majoritários, respectivamente. Portanto, pode-se observar que a resistência da amostra R_s é a resistividade dividida pela espessura da amostra, e que a densidade n_s é o nível de dopagem multiplicado pela espessura, então pode-se dividir a equação 3.46 pela espessura da amostra e obter a equação 3.47:

$$R_s = \frac{1}{qn_s\mu_m} \quad (3.47)$$

A mobilidade dos portadores majoritários em termos da resistência e da densidade de carga pode ser escrita como a equação 3.48:

$$\mu_m = \frac{1}{qn_s R_s} \quad (3.48)$$

3.9. Métodos experimentais para medidas de resistividade

Existem diversos métodos experimentais que possibilitam a obtenção da resistividade elétrica em materiais sólidos. Cada método fornece a resistividade com valores de precisões distintos.

Os métodos encontrados na literatura utilizam geralmente uma ponte de impedância tipo ponte de Winston, entre eles destacam-se os métodos de pulsos, método sem contato, método duas pontas, método de sonda de quatro pontas, método eletrômetro e método de Van der Pauw. Todos os métodos experimentais quando utilizados para obter o valor de resistividade elétrica necessitam que sejam feitos em amostra com formato e área conhecidos, a não ser o de Van der Pauw. O método de Van der Pauw, que será relatado no item a seguir independe do formato da amostra devido às diversas medidas realizadas com os contatos ôhmicos na amostra. Por esse motivo, é um dos métodos que mais se adéqua para a obtenção da resistividade, densidade e mobilidade de portadores de carga em lâminas de materiais semicondutores.

3.10. Método Van der Pauw

A grande facilidade do método Van der Pauw que sobressai sobre outros métodos é a utilização da resistência da amostra para o cálculo da resistividade elétrica (ρ). Pelo método Van der Pauw pode-se também realizar medidas em temperaturas diversas sem ter que levar em conta a correção l/A (comprimento/área da secção do condutor) devido a expansão térmica do material. Porém, um sistema que utilize diversos níveis de temperatura necessita de equipamentos específicos de aquecimento e resfriamento que normalmente tem custo não tão elevado [17].

Para medições por efeito Hall pelo método Van der Pauw a potência do eletroímã utilizado deve ter a capacidade de fornecer densidade magnética razoável entre 0,2-0,5 T. Outro problema encontrado seria que alguns materiais necessitam diferentes temperaturas para responder ao efeito Hall e assim poder medi-lo.

Com a medição do efeito Hall de um material pode-se obter a resistividade para uma amostra de determinada espessura, o tipo de dopagem do material se n ou p e a densidade dos portadores de carga (o número de portadores de carga por unidade de área). O método Van der Pauw nada mais é que a injeção de um fluxo de corrente de uma borda da amostra até a outra, e assim medir-se a tensão gerada por essa corrente em duas outras bordas da amostra de acordo com a figura 3.9 [17].

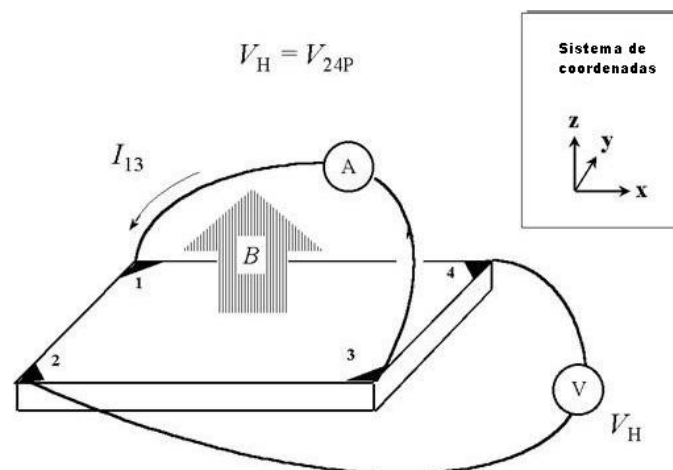


Figura 3. 9. Esquema de uma amostra montada para o método 4 pontas de Van Der Pauw [17].

3.10.1. Preparação da amostra

A fim de utilizar o método de Van der Pauw, a espessura da amostra deve ser muito menor do que a largura e o comprimento da amostra para reduzir os erros nos cálculos, é preferível que a amostra seja simétrica. A espessura da amostra deve ser uniforme com uma variação menor que $\pm 1\%$ [13].

A espessura mínima é considerada por um aparelho de medição capaz de medir a espessura a uma precisão de $\pm 1\%$. Embora as amostras possam ter uma

forma arbitrária é recomendado que as configurações dos pontos de medida seguissem segundo a figura 3.10. A amostra deve ser completamente livre de buracos geométricos. A proporção recomendada de comprimento para o periférico da amostra (L_p) em relação a espessura da amostra (t) é como a equação 3.49 [18].

$$L_p \geq 15t \quad (3.49)$$

Também não deve haver porosidades no interior da amostra. As medições exigem que os quatro contatos ôhmicos sejam colocados sobre a amostra com certos cuidados, afim de formar um excelente contato ôhmico.

Os contatos devem estar no limite da amostra, e ser tão pequenos quanto possível, os erros dados por sua dimensão não-zero será da ordem de D/L , onde D é o diâmetro médio do contato e L é a distância entre eles [17].

As ligações dos contatos, ou as soldas, devem ser do mesmo material para minimizar os efeitos termoelétricos. Os contatos devem ser numerados de 1 a 4, e a corrente injetada em 1 e 2. A tensão V_{34} é a tensão DC entre os contatos 3 e 4 sem a aplicação de um campo magnético externo.

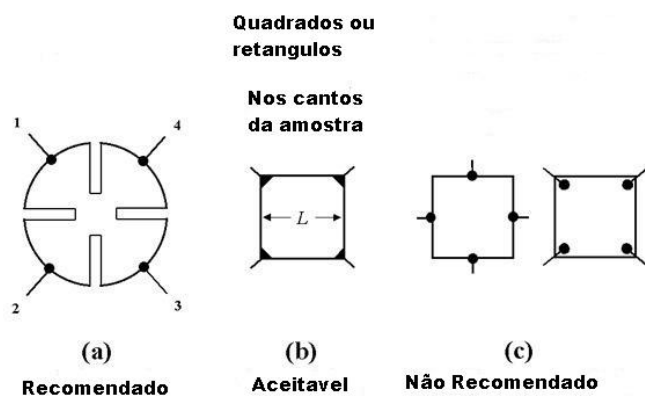


Figura 3. 10. Possíveis tipos de contatos nas amostras a serem analisadas por efeito Hall, localização dos contatos como mostrado na figura (a) são preferências [13].

3.10.2. Medidas básicas

Para efetuar a medição pelo método Van der Pauw necessita-se uma corrente elétrica que flua ao longo da amostra por uma borda até a outra. Assim, a tensão gerada no lado oposto da amostra será a V_{34} . Essas medições serão utilizadas para efetuar o cálculo da resistência elétrica com a lei de Ohm mostrada na equação 3.50 [18].

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (3.50)$$

Van der Pauw desenvolveu a técnica de medição da resistência de folha de amostras com forma arbitrária que pode ser determinada com duas medidas de resistências, uma medida ao longo da borda vertical, como R_{12} e R_{34} . E uma medida ao longo da borda horizontal, R_{23} e R_{41} . Então a resistência para uma amostra de forma arbitrária pode ser obtida através da equação 3.51 de Van der Pauw [17].

$$e^{-\pi R_{12,34}/R_s} + e^{-\pi R_{23,41}/R_s} = 1 \quad (3.51)$$

3.10.3. Medidas recíprocas

Para obter a resistência vertical da amostra os contatos ôhmicos tem que estar de acordo com a figura 3.11, e assim medir as resistências verticais da amostra $R_{12,34}$ e $R_{34,12}$ [17].

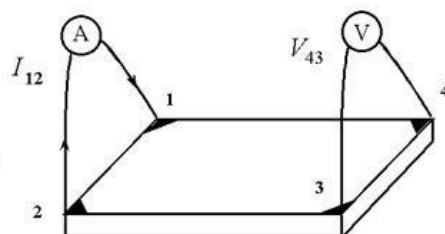


Figura 3. 11. Orientação dos contatos para a medida da resistência vertical no método Van der Pauw [17].

O mesmo procedimento se faz para as resistências horizontais porem tem-se uma estrutura como na figura 3.12, obtendo assim as $R_{23,41}$ e $R_{41,23}$.

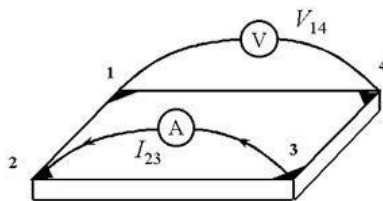


Figura 3. 12. Orientação dos contatos para a medida da resistência horizontal no método Van der Pauw [17].

Com essas resistências e de acordo com o teorema matemático da reciprocidade da equação 3.52 nos diz que:

$$R_{AB,CD} = R_{CD,AB} \quad (3.52)$$

Com isso se pode obter valores mais precisos para as resistências $R_{12,34}$ e $R_{12,34}$ e $R_{23,41}$, fazendo duas medidas adicionais de seus valores recíprocos $R_{34,12}$ e $R_{41,23}$ e média dos resultados. Como mostrado na equação 3.53 e 3.54:

$$R_{vertical} = \frac{R_{12,34} + R_{34,12}}{2} \quad (3.53)$$

$$R_{horizontal} = \frac{R_{23,41} + R_{41,23}}{2} \quad (3.54)$$

Portanto com essas resistências definidas podemos inserir na equação de Van Der Pauw as equações 3.53 e 3.54 ficando com a forma da equação 3.55:

$$e^{-\pi R_{vertical}/R_s} + e^{-\pi R_{horizontal}/R_s} = 1 \quad (3.55)$$

3.10.4. Medidas de polaridade invertida

A melhora na confiabilidade dos valores de resistência pode ser obtida mediante a repetição das medições de resistência após a mudança das polaridades tanto da fonte de corrente como do medidor de tensão. Uma vez que este ainda está medindo a mesma porção da amostra, apenas no sentido oposto, os valores de

$R_{vertical}$ e $R_{horizontal}$ podem ser calculados como a média das medições das polaridades normal e invertida.

A vantagem de fazer isso é que as tensões *offset*, tais como potenciais termelétricos, devido ao efeito *Seebeck*, serão canceladas. Combinando este método com as medidas de reciprocidade obtém – se as equações 3.56 e 3.57:

$$R_{vertical} = \frac{R_{12,34} + R_{34,12} + R_{21,43} + R_{43,21}}{4} \quad (3.56)$$

$$R_{horizontal} = \frac{R_{23,41} + R_{41,23} + R_{32,14} + R_{14,32}}{4} \quad (3.57)$$

3.10.5. Acurácia na medida

Ambos os métodos, da repetitividade e da polaridade invertida, acima descritos testam a confiabilidade as medidas. Se qualquer das medidas feitas com a polaridade invertida não concordar com um grau de precisão (geralmente dentro de 3 %), com a medição da polaridade padrão correspondente, então há provavelmente uma fonte de erro em algum lugar na instalação. O mesmo princípio aplica-se às medidas de reciprocidade.

3.10.6. Resistência de folha

Em geral a equação de Van der Pauw não pode ser calculada sem ajuda computacional pelo método iterativo, onde testa os valores da resistência R_s para os quais seja igual a um. Assim a formula de Van Der Pauw não pode ser rearranjada para fornecer a resistência da amostra em termos de funções conhecidas. A melhor exceção é quando $R_{vertical} = R = R_{horizontal}$, neste cenário, a resistência é dada pela equação 3.58:

$$R_s = \frac{\pi R}{\ln 2} \quad (3.58)$$

3.11. Passos para o ensaio da medição de resistência elétrica no método Van Der Pauw

Para obter-se valores coerentes entre as diversas medições a serem realizadas, deve-se obedecer a diversos fatores como contatos ôhmicos de boa qualidade e de mesmo material assim como uniformidade no formato da amostra. Deve-se obedecer ao máximo de corrente que pode ser injetada na amostra que varia do tipo de material utilizado como no caso do GaSb de até 1A de corrente.

Com isso, deve-se seguir os seguintes passos:

- Aplicar a corrente na resistência que se quer medir;
- Inverter a polaridade e medir a tensão novamente;
- Repetir as medidas restantes a fim de se obter todas as resistências;

São oito medidas a serem realizadas ao total para encontrar a resistência da folha, devem ser todas positivas e com um erro máximo de 3% entre elas. Portanto as ponteiros devem estar colocadas conforme o valor medido seja positivo. A corrente deve manter - se constante, tanto para a medida de resistência horizontal como vertical, e assim medir-se a tensão encontrada. Com as resistências dos contatos procede-se ao calculo das resistências horizontal e vertical. E então utiliza-se as resistências vertical e horizontal na fórmula de Van Der Pauw da equação 3.55. Com isso consegue-se a resistência da folha R_s [13].

3.12. Passos para a medida Hall

As medidas Hall no método Van der Pauw são necessárias para o cálculo do valor da densidade de portadores de carga e, assim, da mobilidade dos mesmos. O problema é que a tensão Hall pode ser muito pequena, na ordem de micro volts para amostras muito dopadas. Outro problema na medida da tensão Hall não está só no fato da mesma ter muito pouca magnitude, mas também de se ter bons contatos ôhmicos e na utilização de um bom equipamento de medição. Os mais graves problemas são o da não simetria nos contatos, a forma da amostra e a temperatura. Muitas vezes é comum a forma de controle para o problema para

adquirir as duas medidas Hall, uma para campo magnético positivo e outra para campo magnético negativo [13].

Os passos para medida Hall então são os seguintes:

- Para I_{13} : corrente CC que entra no contato 1 e sai no contato 3 e assim sucessivamente para I_{31} , I_{24} e I_{42} ;
- O campo magnético constante, uniforme e de densidade entre 2000 a 5000 G, aplicado paralelo ao eixo z de acordo com a figura 3.8. Sendo positivo quando aponta para o eixo Z e negativo quando aponta para o Z negativo;
- Obter a tensão Hall medida entre os contatos 2 e 4 com campo magnético positivo ou negativo para I_{13} . E assim sucessivamente para as tensões V_{42p} , V_{13p} e V_{31p} e para campo negativo (V_{24n} , V_{42n} , V_{13n} e V_{31n});

Com essas medidas de tensão Hall que são oito ($V_{24P}, V_{42P}, V_{13P}, V_{31P}, V_{24N}, V_{42N}, V_{13N}, V_{31N}$) realizam-se os cálculos para a tensão Hall.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Características do sistema construído

O sistema para a caracterização elétrica de materiais pelo método de Van Der Pauw foi construído a partir de uma fonte controlável Keithley® modelo 2400 e um software de controle do sistema de medidas. Foram adaptados ao sistema dois ímãs permanentes de ferrite que fornecem para a amostra aproximadamente 500 Gauss de fluxo magnético. O porta amostra está inserido em uma câmara livre de luz e umidade com um isolamento por vácuo. O isolamento do porta amostra ao ambiente externo se deve a que, a mobilidade e o número de portadores de carga cresce com a incidência de luz em materiais semicondutores. Portanto, os principais componentes do sistema são:

- Ímãs permanentes;
- Fonte chaveada de corrente contínua até 2A;
- Fonte controlável;
- Porta amostra com variação térmica;
- Câmara de isolamento térmico;
- Sistema de controle por computador;

Um esquema do sistema de caracterização desenvolvido é apresentado na figura 4.1.

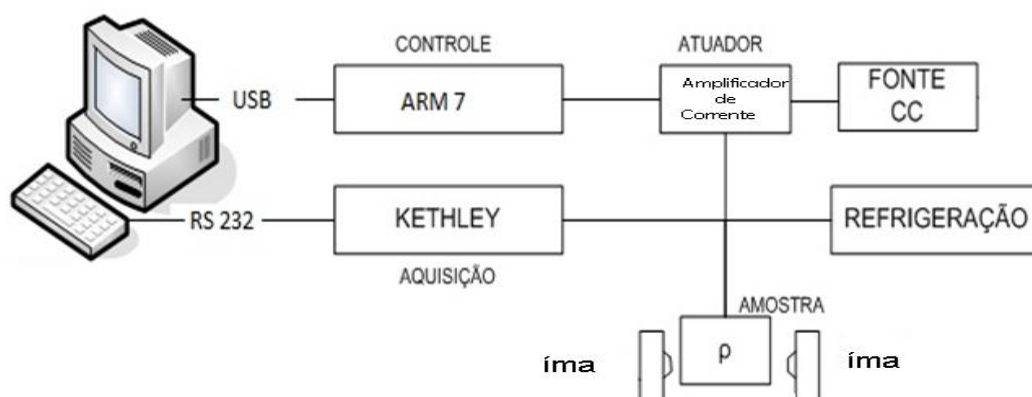


Figura 4. 1. Diagrama de um sistema de caracterização elétrica controlado com um computador.

4.2 Características da fonte de corrente

A fonte Keithley[®] 2400 realiza a medida de tensão e o cálculo de resistência elétrica, a partir da corrente e tensão medidas. Utilizou-se uma comunicação serial para o controle da fonte pelo computador. A fonte 2400 tem a capacidade de medições para um nível mínimo de intensidade de tensão de 200mV até 210V, assim como a faixa de 1 μ A até 1A para o modo de corrente contínua com uma precisão de 0,012% (Keithley[®], 1998).

4.3 Ímãs

Para o campo magnético utilizam-se ímãs permanentes. Foram utilizados quatro ímãs permanentes colocados sobrepostos, isso faz com que o campo magnético seja mais intenso. Também se pode variar o *gap* dos ímãs aumentando ou diminuindo o caminho das linhas de indução magnética utilizando os suportes encontrados na caixa de suporte. Ímãs permanentes tem um campo magnético mais estável que eletroímãs por isso que foram escolhidos. Eletroímãs tem a tendência de flutuar seu campo magnético com a flutuação da fonte de corrente que alimenta suas bobinas.

O campo magnético induz a mobilidade dos elétrons desviando as cargas em um dos cantos da amostra pela força de Lorentz, e assim induzindo uma diferença de potencial na amostra. Foi realizada a medida de densidade de campo magnético

utilizando um Teslameter Phywe[®] calibrado, as medidas são mostradas na tabela 4.1.

Tabela 4. 1. Medidas de fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes

Número de medidas realizadas	N (Gauss)	P (Gauss)
1	456	-562
2	596	-650
3	534	-512
4	501	-634
5	494	-501
Média	516,2	-571,8
Desvio Padrão	52,5	68,3

4.4 Aquecimento e Refrigeração da amostra

A montagem do porta amostra tinha que permitir a realização de medições em diferentes temperaturas. Com isso pode-se obter o gráfico da mobilidade versus temperatura que possibilita visualizar a largura de banda de um semicondutor quando for o caso. O sistema de refrigeração e aquecimento foi desenvolvido com o uso de uma resistência elétrica de potência que possui controle de aquecimento pela intensidade de corrente elétrica. No sistema utiliza-se nitrogênio líquido para o resfriamento das amostras através de uma câmara criogênica.

4.5 Módulos do sistema

O sistema de caracterização elétrica é composto por dois módulos o infraestrutural e o sistema eletrônico controlável. O módulo infraestrutural foi dividido em caixa de suporte, câmara de isolamento térmico, câmara de vácuo e porta amostra. O sistema elétrico controlado se resume em, uma placa de controle micro processada, uma placa eletrônica de potência, um computador de controle e uma fonte controlável. A câmara de vácuo é refrigerada com nitrogênio líquido e possui uma resistência elétrica de potência para o aquecimento, a câmara de isolamento térmico é um cilindro de isopor para manter a temperatura.

O sistema de medida é formado de uma fonte de tensão controlada e adaptada para fornecer corrente até 1A. A própria fonte possui um amperímetro e voltímetro para a medida de resistência elétrica pelos métodos de duas pontas ou quatro pontas. O controle do chaveamento das ponteiras do método Van Der Pauw utiliza uma placa de controle micro processada por uma maquina *RISK* Arm-7. Esse sistema possui uma placa eletrônica que tem como função o acionamento dos reles. Como a corrente da placa é muito baixa necessitou-se a adição de um circuito auxiliar que funciona como amplificador de potência, amplificando a corrente do sistema.

4.5.1 Módulo infraestrutural

Para o equipamento realizar as medidas elétricas necessita-se uma estrutura que compõem e suporta todos os componentes. Para isso realizou-se um módulo composto por quatro estruturas, uma caixa de suporte para todo o sistema, uma câmara para isolamento térmico, uma câmara de vácuo e um porta amostras.

Todos os componentes da estrutura foram desenhados para uma simulação previa em um software CAD (*Computer aided design*). O *Solid Works* foi o software escolhido para esse processo. A estrutura base do sistema é a caixa de suporte, suporta todos os outros componentes do sistema, mostrada na figura 4.2. Como se necessitava de uma variação da distancia entre os ímãs permanentes, a caixa de suporte tem trilhos em três posições de ajuste. O material utilizado na caixa foi madeira MDF que é de fácil acesso e manipulação, e ainda não tem interferência no fluxo magnético.

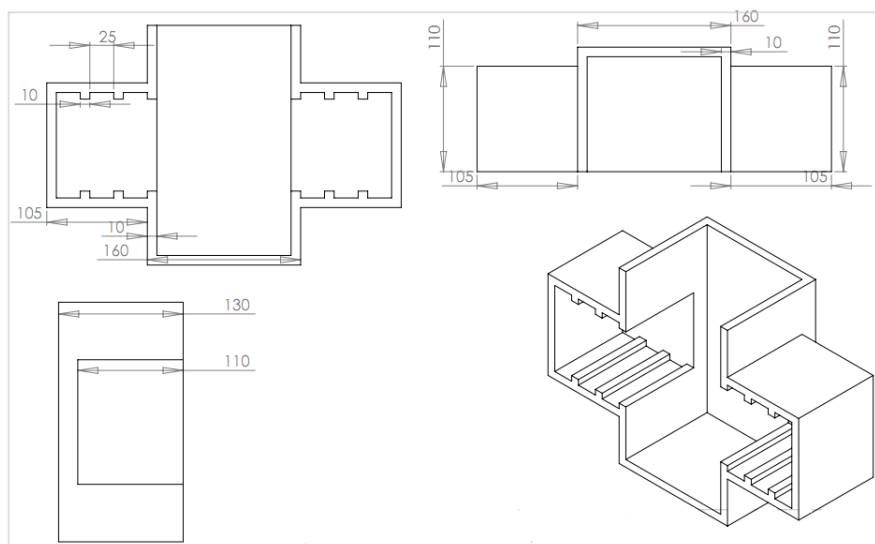


Figura 4. 2. Figura da estrutura caixa de suporte.

Para a câmara de vácuo utilizou-se policloreto de vinila (PVC) que suporta de forma adequada baixas temperaturas. As temperaturas negativas são obtidas através da utilização de nitrogênio líquido. A câmara de isolamento térmico tem como objetivo resfriar e aquecer a câmara de vácuo, isso possibilita a análise das amostras em diversas temperaturas.

A câmara de vácuo é inserida dentro do isolamento térmico que é composta de um tubo de poliestireno (isopor) contendo nitrogênio líquido, o tubo de isopor consegue isolar a troca de calor do sistema com o meio externo. O isopor não atrapalha o fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes do sistema. Na figura 4.3 visualiza-se o sistema em CAD das câmaras. A figura 4.4 mostra as câmaras montadas para o sistema.

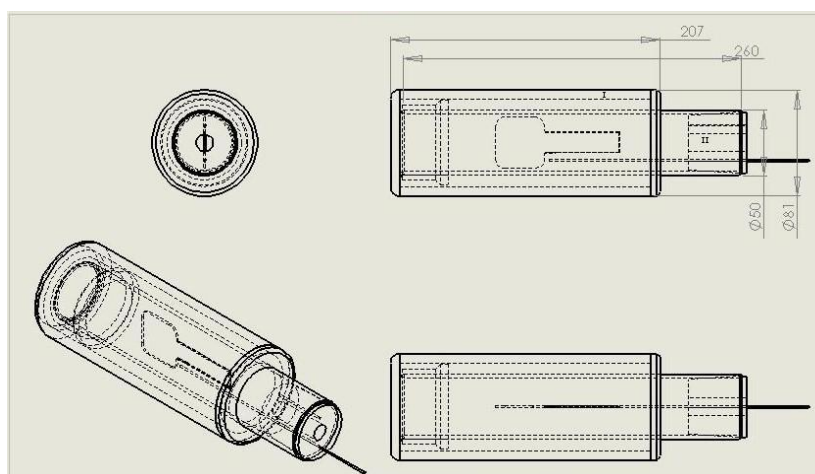


Figura 4. 3. Croqui das câmaras montadas para o sistema.

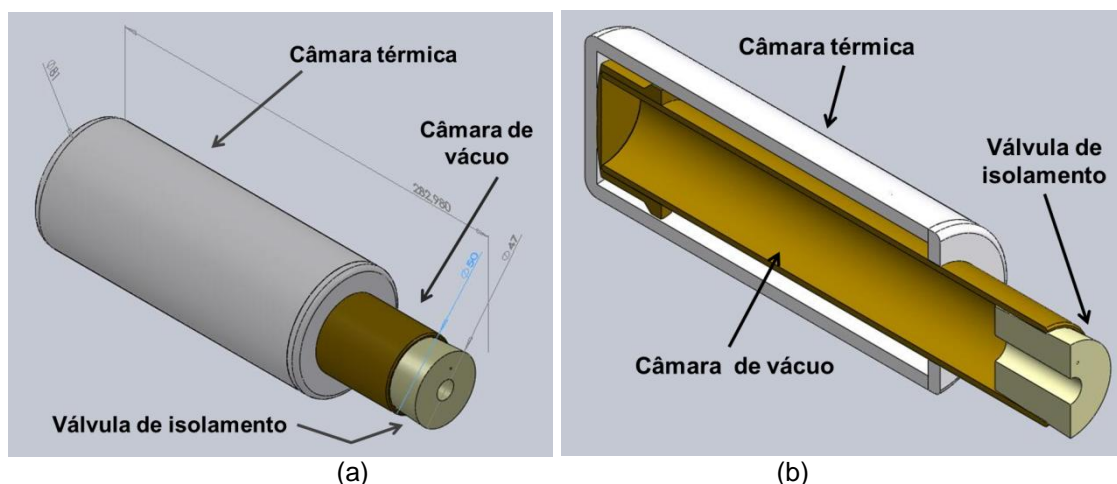


Figura 4. 4. Câmaras montadas em (a). Corte longitudinal das câmaras (b).

Todos os materiais escolhidos para o desenvolvimento e construção do sistema não interferem no fluxo magnético e não atrapalham nas medidas de efeito Hall. No sistema buscou-se a utilização de materiais que não alterassem o fluxo magnético perpendicular. Como o sistema trabalha com uma temperatura muito baixa, isso ocasiona a condensação de água no porta amostra. Para evitar isso, as medidas são realizadas em vácuo. Todo o vácuo necessita de um isolamento com o ar externo, então a câmara de vácuo tem junções de interferência e vedação com *o-rings* embebidos em graxa específica para vácuo.

A entrada e saída da corrente que controla o resistor de potência, assim como as medidas e os dados de temperatura, são coletadas por cabos específicos localizados nas aberturas da tampa superior do sistema. Para o isolamento dessas conexões dos cabos com as aberturas utiliza-se uma cola especial garantindo a vedação e o vácuo. Para a obtenção do vácuo utiliza-se uma bomba mecânica conectada por válvula isoladora. Para a conexão da câmara com a válvula utiliza-se uma rolha química que quando ligado o vácuo se contrai selando as possíveis entradas virtuais de ar. Como o vácuo retira o ar e a umidade contida nele não condensa água no porta amostra. Sílica gel foi colocada no fundo da câmara para ajudar a manter o ambiente seco sem umidade. A sílica absorve parte da umidade do ar que resta no ambiente.

Para o aquecimento do sistema utiliza-se um resistor de potência de cerâmica. A amostra de semicondutor ou outra qualquer fica em contato com a cerâmica do resistor possibilitando a condução de calor e consequente aumento da energia e da temperatura. Conseguiu-se controlar a temperatura atingida pela amostra com o controle da corrente que alimenta o resistor. A faixa de intensidade de corrente é entre 0,5 a 2A. O corpo do sistema é composto de madeira, com estantes para a colocação dos ímãs com distancias pré-definidas. A figura 4.5 mostra o sistema montado com a caixa de suporte em conjunto com as câmaras de vácuo e isolamento térmico.

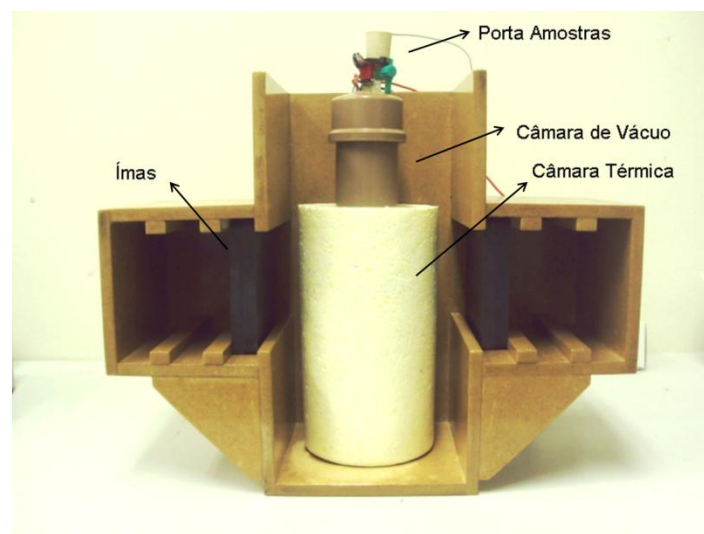


Figura 4. 5. Câmaras de ensaios do Sistema de caracterização elétrica.

4.5.2 Porta amostra

O porta amostra foi desenvolvido de modo que quando inserido em um campo magnético não disperse as linhas de fluxo que atravessarão a amostra. Mas, que ainda assim tivesse a capacidade de condução elétrica de corrente e a possibilidade da medida de tensão. Uma placa de circuito impresso de fibra, com cobre em sua superfície foi utilizada para a implementação do sistema. O diagrama elétrico do porta amostra foi realizado com a ajuda de um *software* para desenvolvimento de circuitos.

O Eagle foi o *software* escolhido para esse fim porque é de fácil acesso e manipulação. Com o diagrama pronto imprimiu-se, com uma impressora laser em papel fotográfico, o desenho para a transferência no cobre. O toner da impressora protege o cobre do ácido perclórico onde passara as trilhas para a condução elétrica. Onde está protegido com o toner o ácido não ataca, assim permanecendo trilhas para condução elétrica. A figura 4.6 mostra o porta amostra em 3D enquanto que na figura 4.7 mostra uma vista lateral.

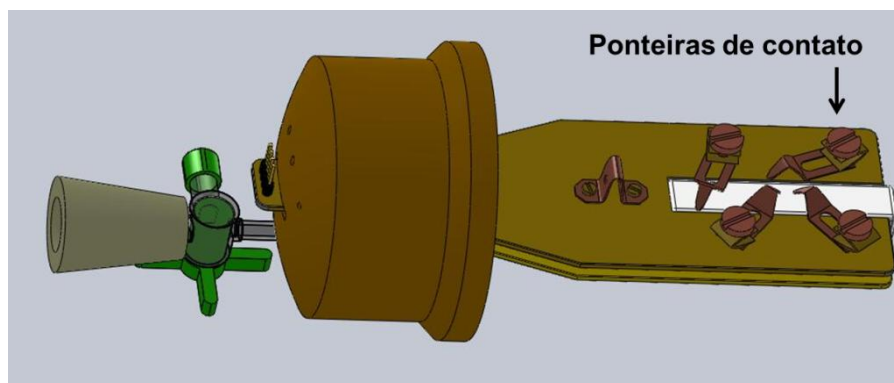


Figura 4. 6. Sistema do porta amostra na placa de circuito impresso.

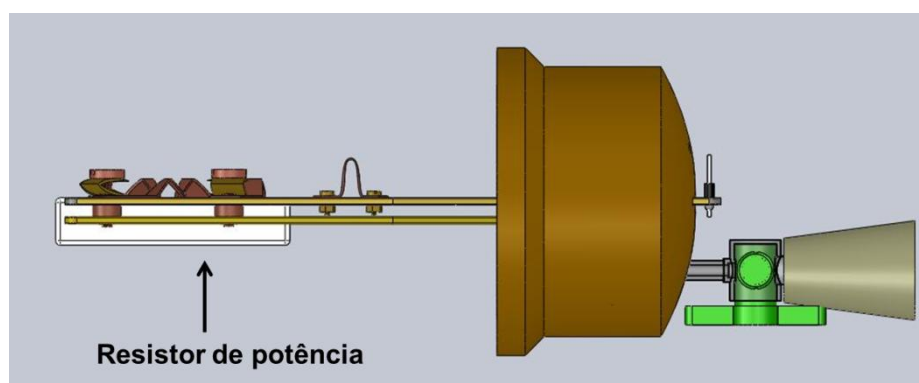


Figura 4. 7. Porta- amostra em visão lateral, evidenciado o resistor de potência.

O porta amostra foi construído para o ensaio de amostras com uma largura máxima de 40 mm com formatos diferentes, isso é possível pela posição e movimentação dos contatos. Os contatos ôhmicos tem um formato que exerce pressão na amostra. Os parafusos, os contatos, as inserções tudo foi feito de cobre para contato elétrico entre as partes e a amostra a ser caracterizada.

Para a medida do número e mobilidade dos portadores de carga o porta amostra tem que ser inserido perpendicular ao campo magnético dos ímãs

permanentes, a pressão das ponteiros dos contatos faz com que a amostra não caia. Os parafusos tem tanto o propósito de fixar os contatos como também permitir a flexibilidade do ensaio de amostras de diferentes dimensões porque permite atrasar e adiantar os contatos. A figura 4.9 mostra um detalhe do porta amostra.

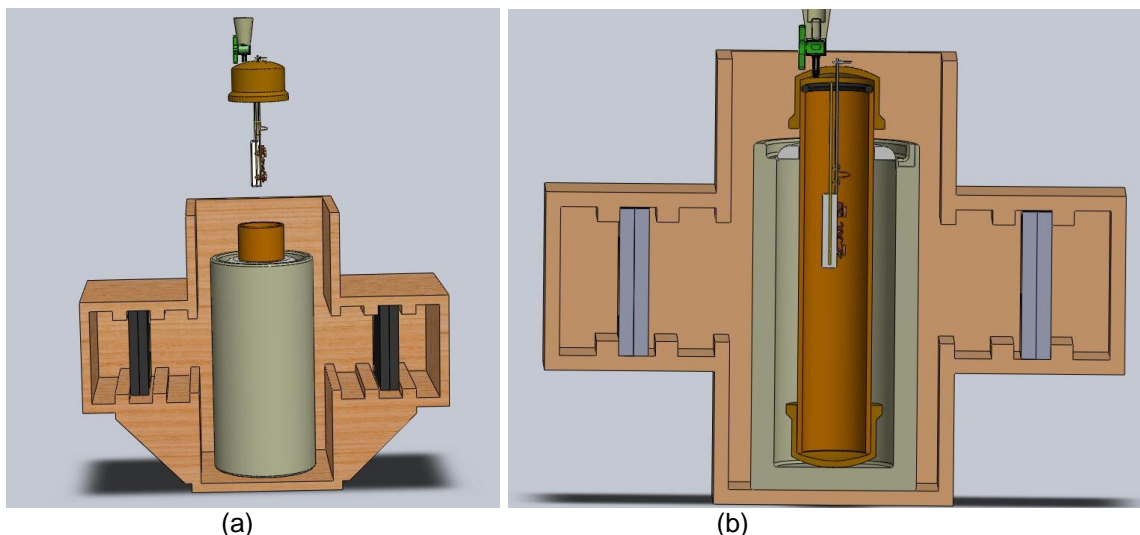


Figura 4. 8. Montagem completa do sistema (a). Corte longitudinal do sistema(b) mostra o interior das câmaras.

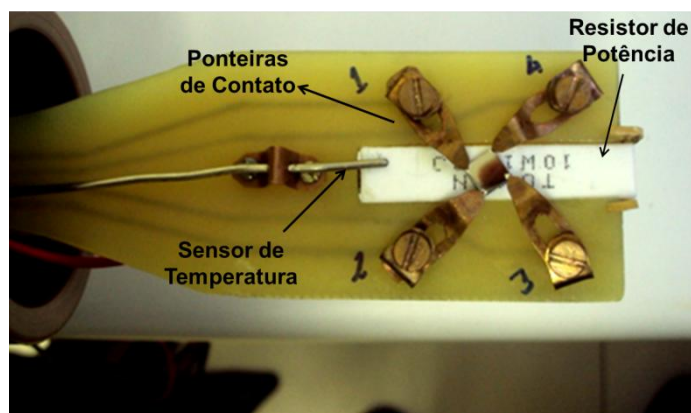


Figura 4. 9. Detalhes do porta amostra desenvolvido.

4.5.3 Preparação dos semicondutores

O método Van Der Pauw necessita de quatro pontas para a medida de resistência elétrica. Duas pontas inserem corrente elétrica enquanto que as outras duas realizam a medida de tensão. Portanto necessita-se realizar quatro conexões da amostra com o sistema para a medida Van Der Pauw. Coloca-se um pouco de índio ou solda fria de gálio/índio nas quatro pontas da amostra selecionada para o

ensaio de acordo com a figura 4.10. Aquece-se a amostra utilizando uma chapa quente para a interação do índio e o semiconductor.

Com um multímetro realiza-se o teste de condutividade entre as ponteiros de medição e a amostra. A amostra está localizada em cima do resistor de potencia para a transferência de calor por condução térmica. O sensor de calor de cromel-alumel fica encostado no resistor para a medida de temperatura.

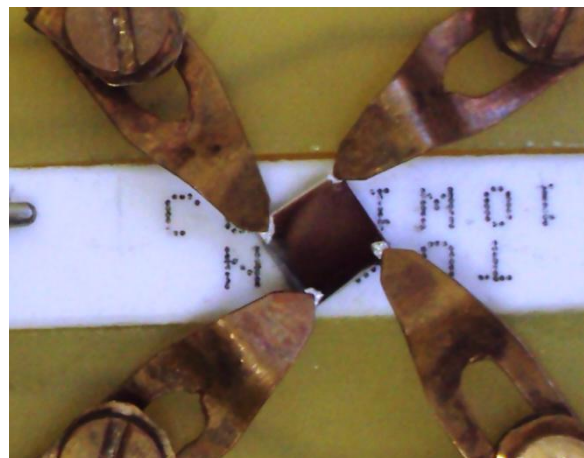


Figura 4. 10. Solda de índio em uma amostra de semiconductor.

Para a transferência de corrente elétrica para o resistor de potência utiliza-se fios de teste com isolamento de cerâmica. Não se utiliza o estanho para o contato entre os fios e o resistor por que o estanho tem um ponto de fusão baixo podendo ocasionar o seu derretimento e assim o descolamento dos contatos com o resistor.

4.6 Hardware e Software

O projeto de eletrônica e controle do sistema foi dividido em cinco partes, uma placa micro processada, uma placa eletrônica de potência, um computador, uma fonte controlável e um software embarcado. O centro de uma placa micro processada é um microprocessador. Ele é o centro de um sistema controlado processa os dados enviados pelos outros componentes ligados a ele e assim reenvia os dados através do sistema. Trata-se de um sistema com tecnologia embarcada. Somente ele consegue realizar diversas funções sem ajuda de outros

componentes não só processa os dados como consegue ler e escrever no sistema. Isso só é possível pelo avanço da tecnologia em materiais semicondutores.

4.6.1 Software

O software do controle do sistema de caracterização elétrica foi desenvolvido na plataforma *LabView*®. O desenvolvedor *LabView*® trabalha com uma programação por blocos que realiza seu processo de forma sequencial, permitindo uma maior versatilidade do sistema, para futuros *upgrades* e concertos. O sistema *LabView*® possui comandos específicos para cada fonte de corrente programável como a Keithley® 2400 utilizada. O software foi desenvolvido com a utilização de quatro blocos. Um bloco para efetuar as medidas de resistividade e tensão Hall, um bloco para os cálculos numéricos pela equação de Van Der Pauw, um bloco para as medidas Hall e o ultimo bloco para o controle da comunicação dos reles. A figura 4.11 mostra o painel dos comandos do usuário do software.

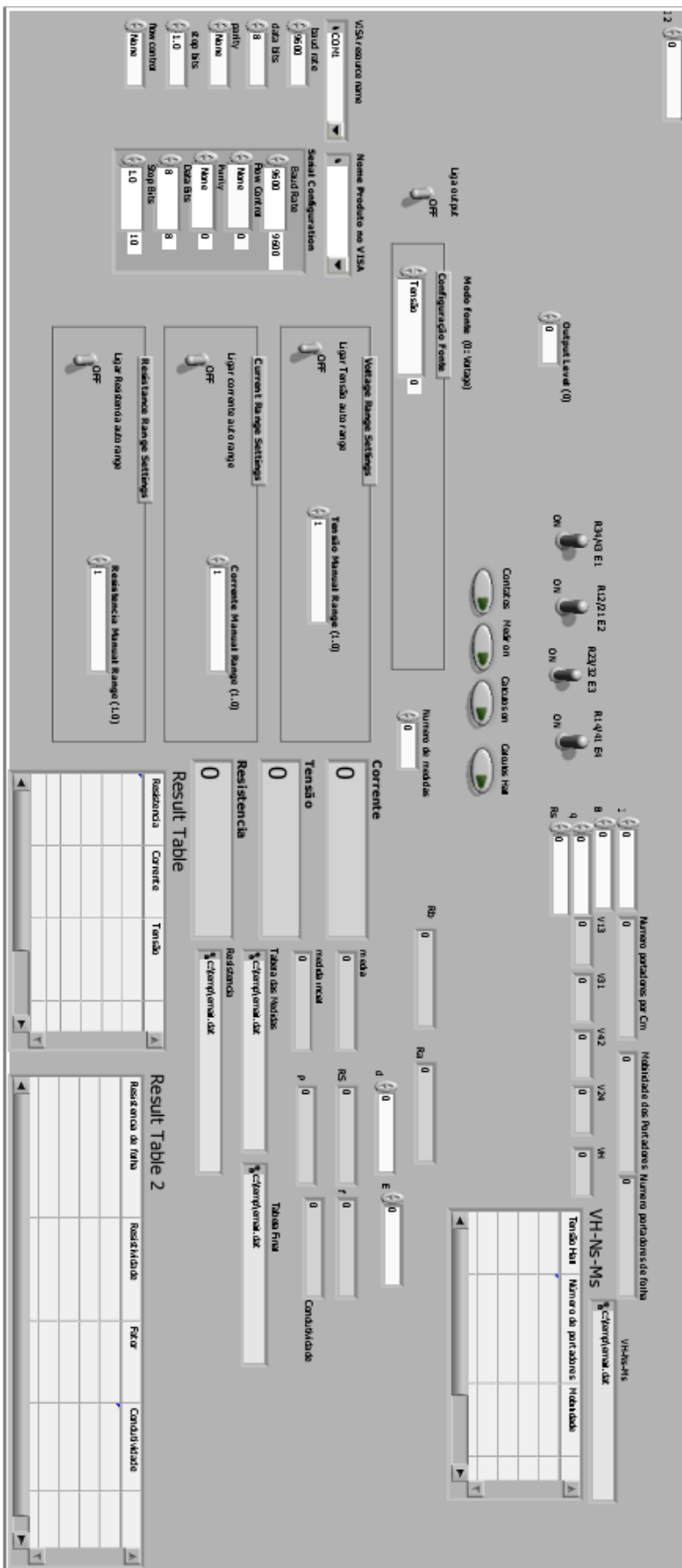


Figura 4. 11. Painel frontal do software para os comandos do usuário.

4.6.1.1 Bloco 1 – Medidas de Resistividade Van Der Pauw

A figura 4.12 mostra o diagrama de blocos do controle de medida do sistema. Os blocos de controle são envolvidos em um controle de ativação se o nível de verificação *for true*. Nesse bloco pode-se controlar a serial que comunica o sistema com o computador, escolhendo o Baud Rate da serial, ou seja, a velocidade de quantos dados pode-se transmitir e receber da serial. Assim como os comandos que cada bloco manda para o computador, como por exemplo, o comando que transforma a medida duas pontas para quatro pontas. Os comandos são enviados pelo VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*), se trata de um padrão para configuração, programação e resolução de problemas nas comunicações dos sistemas com o computador. O VISA fornece a interface de programação entre o *LabView®* e os *hardwares* a ele ligados. Para este tipo de trabalho o VISA utiliza bibliotecas de *software* através do MAX (*measure e automation Explorer*). A utilização do VISA em conjunto com o MAX permite sempre a atualização da comunicação desenvolvida.

Desenvolveu-se um bloco para a configuração da fonte. Assim, se pode trabalhar com a fonte no modo manual de corrente e tensão como no modo automático onde a fonte desenvolve a corrente que passará na amostra dependendo da resistência. A configuração do *output* da fonte se trata de ligar/desligar a medição da fonte no modo quatro pontas. Sem a configuração do *output* não se consegue realizar as medidas. Utiliza-se um bloco de comando para a configuração da serial, onde inserimos os primeiros comandos na fonte de corrente. Esse bloco pode ser visualizado na figura 4.13.

Portanto, cada comando possui o flow control que é o controle de fluxo dos dados enviados e recebidos. A parity se trata da paridade entre os dados. O “Nome Produto VISA” é o nome com o qual a fonte está instalada no PC em relação à placa de comunicação que nesse caso é a placa serial da placa mãe. Assim, a fonte no VISA tem o nome de “com1” que é a placa onde e realizada a transferência dos dados. O bloco de configuração da serial é o serial configuration assim como a

constante da comunicação com o VISA é o nome do produto visa. O bloco initialize se trata de um comando para a inicialização da fonte Keithley.

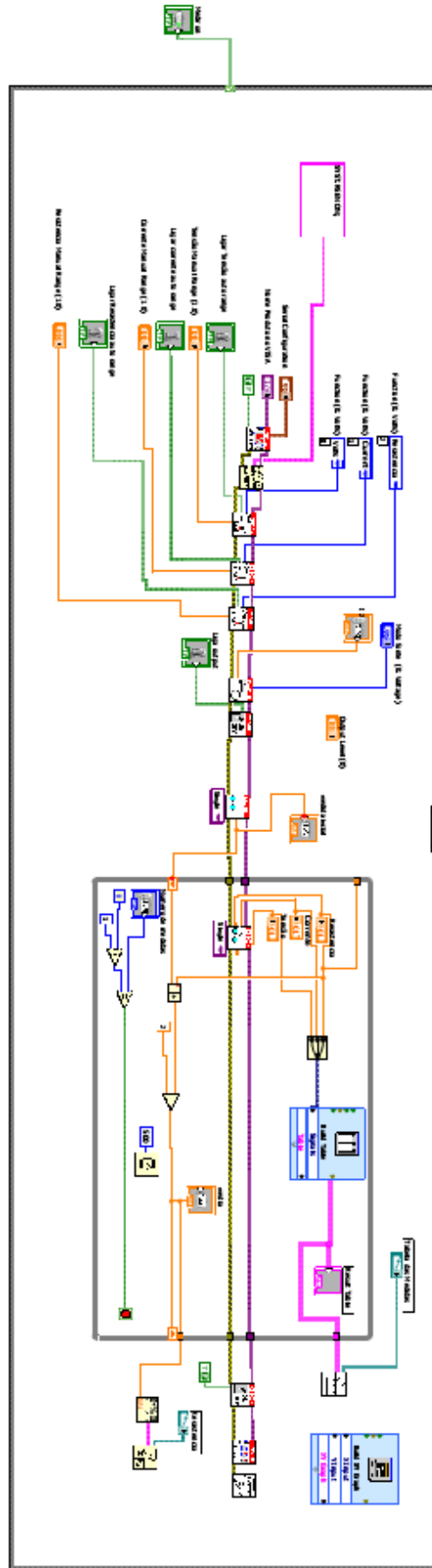


Figura 4. 12. Caso do software para realizar as medições nas amostras.

Esse bloco além de estabelecer a comunicação serial também faz com que exista uma confirmação de que a fonte se trata de uma Keithley® 2400 pelo *ID Query*. Quando o *ID Query* é *false (falso)*, o programa emite um *bit* zero para o *LabView®* avisando que a fonte é desconhecida. O *error in* se trata de uma *string* de erro, se acontecer algum erro na execução do programa essa *string* é armazenada e vai de bloco em bloco em sequência, ou seja, passa por cada bloco executando esse erro. Portanto, essa informação entra no *error in* e sai no *error out* avisando cada bloco que o programa está em *bug*.

Com a fonte Keithley® inicializada o próximo passo é configurar a mesma para trabalhar com a medição quatro pontas. Como o modo *default* da fonte é a configuração de medida 2 pontas necessita-se enviar um comando denominado *SYST:RSEN ON* de acordo com o manual da fonte, como mostrado na figura 4.14. Esse comando é enviado pelo VISA que escreve na serial. A configuração pode ser controlada pelo usuário utilizando o painel de controle mostrado na figura 4.13.

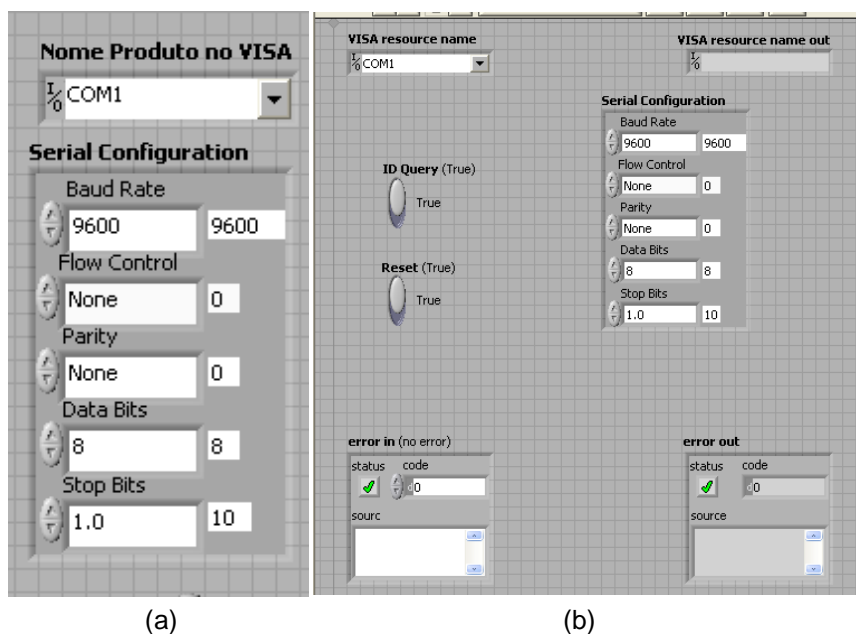


Figura 4. 13. Configuração da comunicação do computador com a serial conectada a fonte controlável (a). Bloco de configuração dos dados que vão sair da serial em direção à fonte (b).

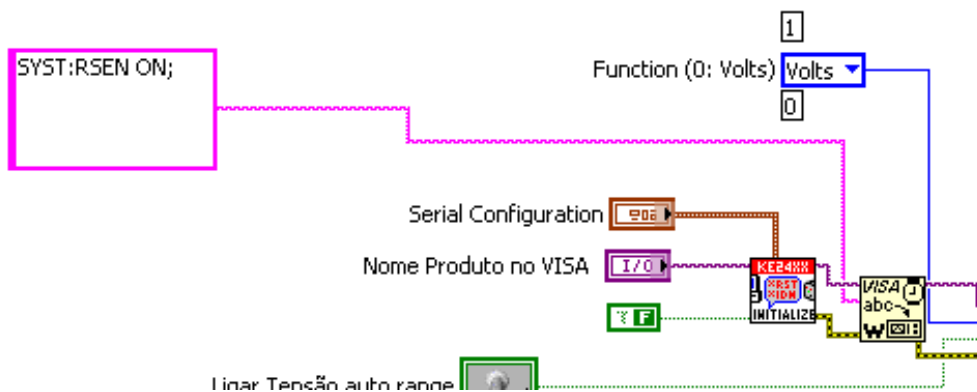


Figura 4. 14. Comando SYST:RSEN ON é uma string no quadro rosa que coloca a fonte em modo 4 pontas.

Com a serial inicializada e a configuração da fonte colocada em quatro pontas, procedemos para a configuração da medição com o bloco *measure*. Com isso pode-se configurar a medição para resistência, tensão ou corrente, como mostrado na figura 4.15.

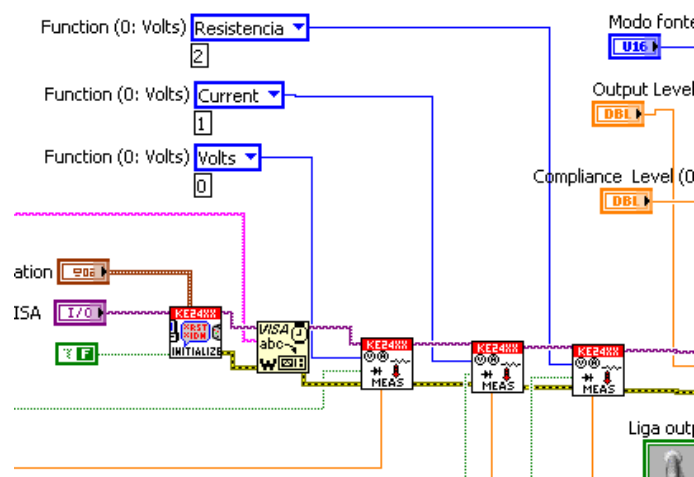


Figura 4. 15. Três blocos de *measure* para ter a opção das 3 medidas possíveis na fonte controlada.

O *pallet function* habilita o tipo de medida a ser realizada. O botão *enable* habilita o modo automático ou manual da fonte. Assim, como todos os blocos da fonte transferem o erro se ele estiver presente. Mostrando assim para o usuário com o painel frontal da figura 4.16. O bloco *configure output* configura a saída da fonte, se ela vai realizar o trabalho de uma fonte de corrente ou o trabalho de uma fonte de tensão. Também configura - se o nível da saída, ou seja, se escolhermos como saída 1 no modo fonte de corrente a Keithley® irá fornecer para o sistema 1A. Com esse bloco configuramos também o *compliance level* que se trata de uma proteção da fonte onde ela não atinge uma tensão limite pela corrente utilizada. Configura - se também o tipo de *output* se *triggers* ou normal.

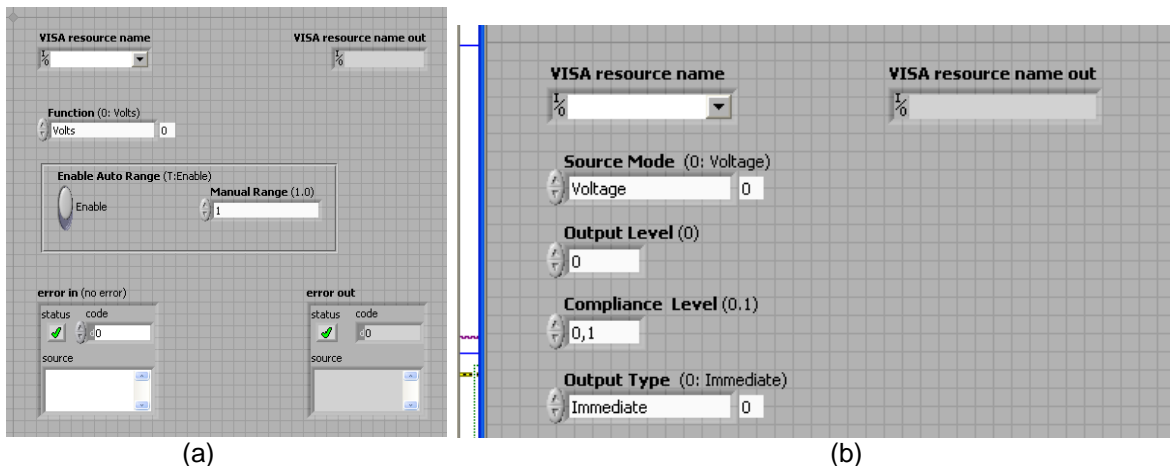


Figura 4. 16. Painel frontal que controla o modo automático ou manual da fonte (a). Painel frontal do bloco configure output (b).

O bloco de *enable output* tem a função de habilitar a saída da fonte para medidas, utiliza-se um botão que gera um sinal de *true* ou *false* no painel frontal para habilitar essa função. As *strings* OUTPUT ON e OUTPUT OFF são as que comandam o liga e desliga na saída de medida da fonte.

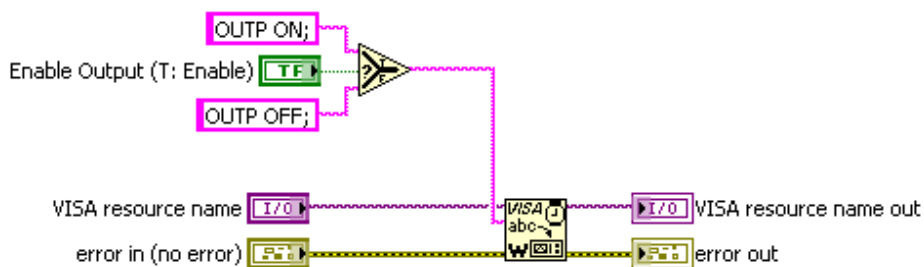


Figura 4. 17. Diagrama de blocos que liga a fonte Keithley® para fazer as medidas.

O diagrama de blocos do sistema mostra uma leitura de múltiplos pontos para tensão, resistência e corrente. Abrindo o sistema do comando de leitura e medida existem 5 tabelas de saídas das medidas uma para tensão, uma para corrente, uma para resistência, uma para tempo e outra para status do programa.

O quadrado cinza engloba todo o sistema de medida em um “while”, como mostrado na figura 4.18. O “while” de medida realiza quantas medidas forem necessárias e configuradas pelo operador no sistema. A lógica de “stop” do “while” funciona da seguinte maneira, cada vez que o while realiza uma medida ele incrementa a variável de contagem “i”, como no *LabView®* a conta começa em 0 resolvi fazer uma lógica um pouco mais enxuta em que o operador não precise

pensar que começa no zero e sim coloque 4 e assim o sistema realize o loop 4 vezes.

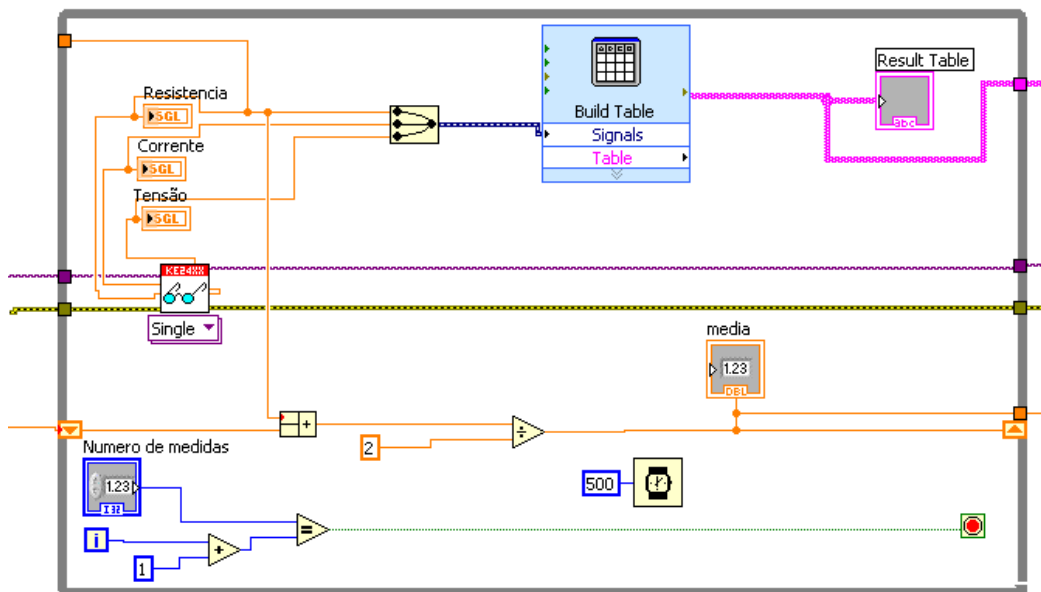


Figura 4. 18. Mostra o loop while de medida dos dados da resistência elétrica das amostras.

Depois de cada medida o loop guarda esses valores em um arquivo de texto com um nome escolhido pelo usuário do sistema. Nesse arquivo tem os valores individuais de cada medida de resistência elétrica e a média total dessas medidas, isso se fez necessário para um maior controle do erro na medida. Sendo que esse erro pode ser causado por mau contato entre as ponteiros e a amostra.

4.6.1.2 Bloco 2 – Cálculos da Resistividade

O segundo Bloco projetado foi o loop para a realização dos cálculos da resistividade da amostra. Depois de se ter realizado as 8 medidas de resistência oriundas das R_{12} , R_{21} , R_{34} , R_{43} , R_{14} , R_{41} , R_{23} e R_{32} . Foi realizada uma média para encontrarmos as resistências horizontal e vertical da amostra.

Com as resistências horizontal e vertical procedeu-se ao cálculo da resistência de Van der Pauw segundo a equação 3.53. Nesse loop podemos decidir quantas medidas vamos utilizar de cada resistência onde o mínimo é quatro. E o erro de Van der Pauw que no mínimo é 0,0005 onde permite um número de interações da equação 3.53 até que igualemos a 1.

Os arquivos de texto com as medidas de resistência são chamados pelo Bloco dois, não necessitando que o usuário coloque os valores numéricos uma a uma no programa. Com isso, todas as casas após a vírgula são levadas em consideração resultando em um valor mais correto. A única entrada do Bloco dois realizada pelo usuário é a da espessura da amostra para o cálculo da resistividade por centímetro e da condutividade da amostra. No final do loop obtém-se um arquivo de texto com os valores de resistividade de folha, resistência e fator de Van Der Pauw. A figura 4.19 mostra o bloco redundante do cálculo Van der Pauw.

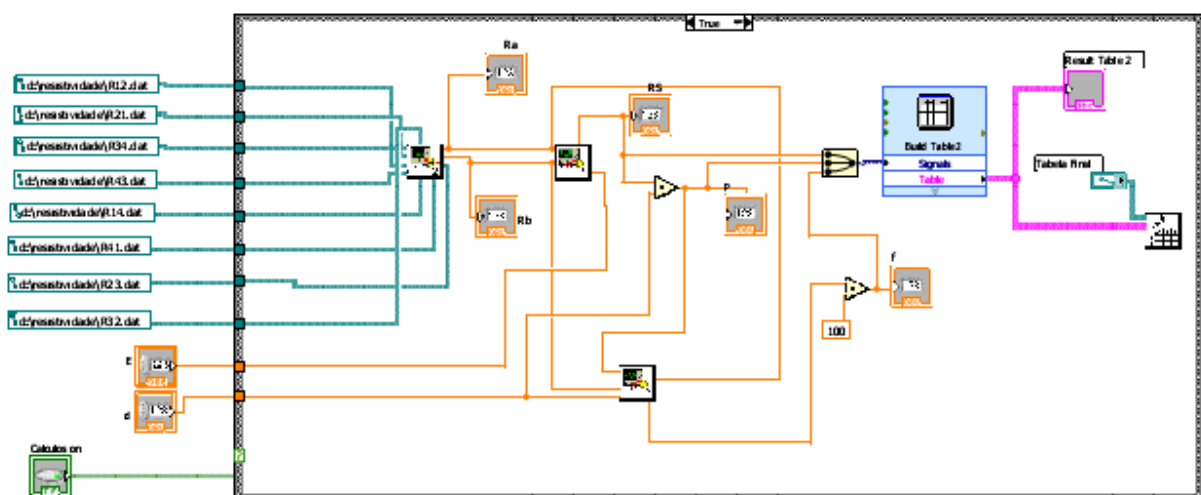


Figura 4. 19. Diagrama do cálculo da resistividade de Van Der Pauw pelo método iterativo

4.6.1.3 Bloco 3 – Controle dos reles

Como o método Van der Pauw exige a medida de resistividade em quatro pontos da amostra, utilizamos um loop de controle dos reles que realizam a troca das ponteiros no porta amostra. O loop envia um número de controle que pode ser 1, 2, 3 e 4, cada número controla um rele. Cada bloco de controle pode ser visualizado na figura 4.20.

Esses comandos são enviados via USB para a placa de aquisição de dados, assim, ela toma a decisão de trocas os reles específicos para cada ponteira. Quando terminamos uma medida no Bloco um ele manda para o Bloco três que está pronto para realizar a troca das ponteiras.

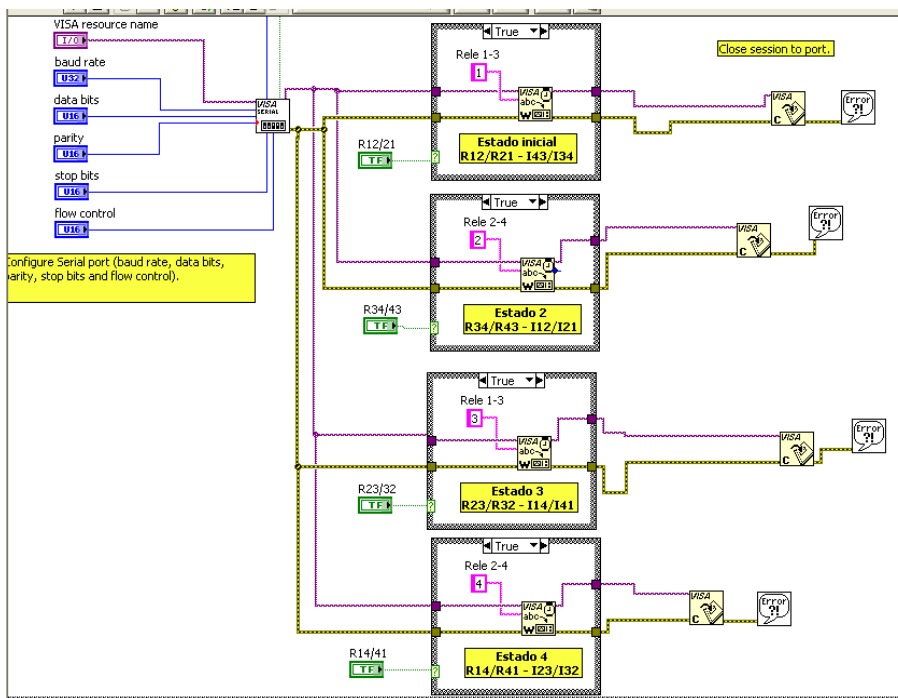


Figura 4. 20. Escrita na simulação da porta serial para o controle dos reles

4.6.1.4 Bloco 4 – Controle das medidas Hall

O bloco quatro controla as medidas Hall para realizar a caracterização dos portadores de carga do sistema. Todo o calculo é realizado pelo software, como visualizado na figura 4.21, sendo gravado em um arquivo de texto para posterior utilização. Nesse bloco temos as entradas de corrente, campo magnético, resistividade e espessura da amostra, que podem variar de acordo com o material utilizado.

Para o controle do sistema de troca das ponteiras e assim dos contatos do sistema Van der Pauw utilizou-se reles que são de fácil utilização e manutenção. Para o controle do sistema dos reles utiliza-se uma placa de desenvolvimento que trabalha com um microprocessador ARM 7 LPC 2873 da Philips. Esse microprocessador tem 32 bits, sendo assim uma maquina RISC muito poderosa. A maquina RISC funciona com qualquer linguagem de programação, para o sistema utilizou-se C++. A linguagem C++ é uma linguagem voltada a objetos e de fácil compreensão. Para a programação do sistema utiliza-se o compilador Keil.

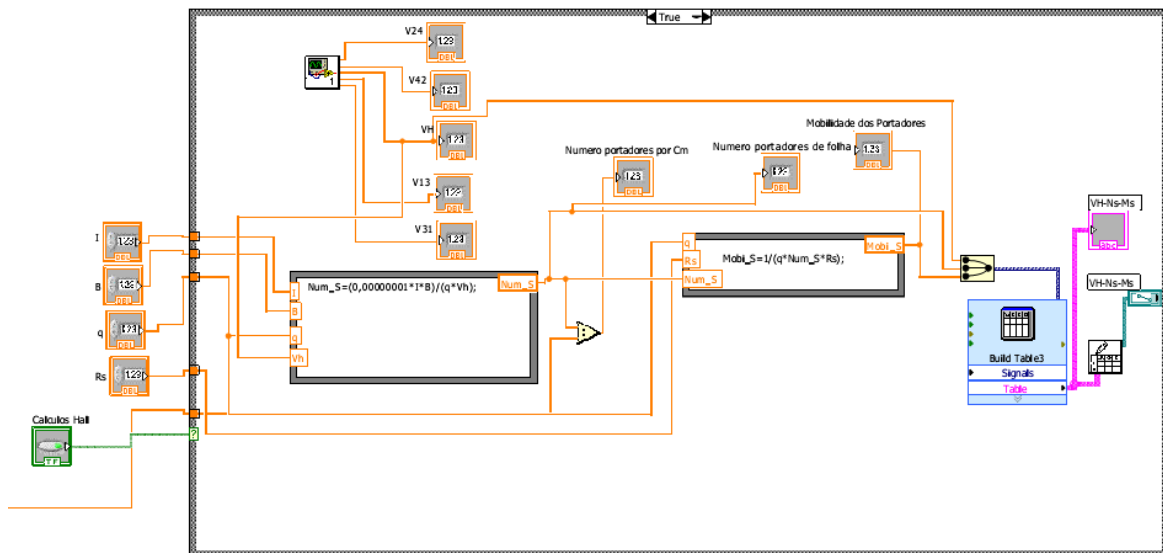


Figura 4. 21. Sistema de controle do efeito Hall pelo software

4.6.1.5 Programa placa micro controlada

As bibliotecas do ARM “lpc23xx.h”, do Studio.h e da string. Stdio.h é uma biblioteca padrão da linguagem C, vem de *standard input-output header*, ou seja, uma entrada e saída padrão. Portanto a studio.h tem as sub-rotinas necessárias para a programação de entrada e saída do sistema, como leitura dos dados que são enviados via computador. Essa biblioteca possui constantes, variáveis e tipos já pré-definidos, assim auxiliando o programador no desenvolvimento do projeto. A biblioteca string.h possui funções, macros e definições padrões para manipulação de cadeia de caracteres e regiões de memória. Pode-se assim trabalhar com caracteres ASCII, que fala para a maquina que número binário cada letra e caractere que ela representa.

A biblioteca lpc23xx.h faz a comunicação do programa em C com o micro controlador. Os define RS e define EM são funções de entrada para os dados de inicialização do LCD, ou seja, RS para o reset do LCD e o EN para colocar o LCD no modo de entrada de dados, coloca-se o binário 1 nos pinos P2.2 e P2.3 que controlam a entrada e saída de dados do display.

Para os *defines* dos LEDs foi definida funções chamadas leds. Nessas funções estão sendo atribuídas binários 1, 1<<2> significa que estamos inserindo o

número 1 no segundo bloco de memória de 32 bits do microprocessador. Isto se chama *shift* no microprocessador é mais fácil que atribuir um valor pronto de memória. Com isso cada vez que acionamos um rele pode-se visualizar o respectivo led acendendo para maior controle e funcionamento do programa. Denominamos uma função *define porta*, que trabalha com a saída e entrada dos dados nos pinos ligados aos reles. Do mesmo jeito que os *leds* estamos inserindo o número binário um nos pinos. Para ser mais exato na porta P4.8, P4.9, P4.10 e P4.11 do microprocessador. Esses valores são controlados pelo código mostrado na figura 4.22

Uma função *Void* não retorna nada, ou retornam parâmetros que são atribuídos nas variáveis definidas dentro dos parênteses. A figura 4.23 mostra como se define funções para iniciar a serial. Como por exemplo, a função `init_serial()`, e a função `Le_serial()`. O que acontece nessas funções, atribui-se valores específicos para os registradores do micro controlador não retornando nada para a função `init_serial()`, porem a função `Le_serial()` retorna algum valor que será atribuído para a variável que está dentro dos parênteses. A função `envia_serial()` envia valores pela serial na variável dado. A comunicação serial que o micro controlador utiliza é pelo cabo USB, o `ft232` transforma os dados seriais em comunicação USB sendo auxiliado pelo micro controlador.

```

044 void serial_string(char buffer[])
045 {
046     int x, i;
047     x = strlen(buffer);
048     for (i=0; i<x;i++)
049         envia_serial(buffer [i]);
050 }
051
052 void init_timer(void) //funcao para inicializar o timer 1.
053 {
054     T1TCR = 0; // Desabilita T1
055     T1PR = 12000000/1000 - 1; // Prescaler para incrementar T1TC a cada milisegundo
056     T1TCR = 2; // Inicializa T1
057     T1TCR = 1; // Habilita T1
058 }
059
060 void espera_1ms(int t) //funcao espera de 1ms.
061 {
062     unsigned int tf;
063     tf = T1TC + t; // tf = Valor futuro do T1TC
064     while(tf != T1TC); // espera ate que x==T1TC
065 }
066
067 void lcd_comando (int comando)
068 {
069     FIO2CLR = RS; //RS=0
070     FIO3CLR = LCD DADOS;//PORTA 3 = 0

```

Figura 4. 22. Comandos da função do programa para controle dos reles.

A função `void serial_string(char buffer[])` essa função está inserindo os valores no formato de string em um vetor chamado `buffer`. A função `init_timer(void)` não retorna nada mas está inserindo valores específicos nos registradores do micro controlador para assim iniciar o relógio. A função `espera_1ms()` faz com que os valores inseridos entre os parênteses se tornem um valor de tempo medido em ms, por exemplo 5000 significa uma espera de 5 segundos.

```

067 void lcd_comando (int comando)
068 {
069     FIO2CLR = RS; //RS=0
070     FIO3CLR = LCD_DADOS; //PORTA 3 = 0
071     FIO3SET = comando;
072     FIO2SET = EN; // EN=1
073     espera_1ms(1);
074     FIO2CLR = EN; //EN = 1
075     espera_1ms(1);
076 }
077
078 void lcd_dado(int dado)
079 {
080     FIO2SET = RS; //RS=1
081     FIO3CLR = LCD_DADOS; //PORTA 3 = 0
082     FIO3SET = dado;
083     FIO2SET = EN; // EN=1
084     espera_1ms(1);
085     FIO2CLR = EN; //EN=0
086     espera_1ms(1);
087 }
088
089 void lcd_init(void)
090 {
091     lcd_comando(0X38);
092     lcd_comando(0X0E);
093     lcd_comando(0X06);

```

Figura 4. 23. Comandos ativar os níveis dos relés.

A função `lcd_comando()` são os comandos necessários inseridos nos registradores do microcontrolador para os comandos do display de lcd. O comando `FIOXXX` manda parâmetros para os pinos das portas da placa microcontrolada. Segundo o mostrado abaixo.

- `FIO2CLR = RS` está zerando os pinos da porta 2, ou seja está zerando os 32 bits da porta 2 do microcontrolador, e assim inseridos na variável `RS`.
- `FIO3CLR = LCD_DADOS` zera a porta 3 e coloca na variável `LCD_DADOS`
- `FIO3SET = comando` coloca 1 no registrador do pino da porta 3 e insere na variável `comando`, cada vez que necessita-se inserir alguma instrução ao display de lcd necessita-se chamar a função `comando`.
- `FIO2SET = EN` faz com que a gente coloque um na variável `EN` enable para colocar o estado de inserir instruções no display.

A função void `lcd_init` inicia a memória RAM do lcd para receber os dados e assim mostrar no lcd. A função void `lcd_goto()`, insere valores nas variáveis inteiras linha e coluna para assim posicionar o cursor do lcd onde é desejado com o intuito de escrever dados no display. Essa função fornece comando para o posicionamento do cursor. A função do tipo void `lcd_string()` é uma função que escreve uma string no display de lcd essa string é armazenada em um vetor chamado buffer auxiliado pela função `lcd_dado()`.

A `int main` é a parte principal do programa onde se começa rodar sequencialmente as funções estabelecidas. É no `main` do programa que acontece o desejado do sistema. Declara-se uma função inteira `int x`, um vetor `char buffer[30]` o valor de 30 significa que é um vetor com 30 caracteres do tipo `char`. Chama-se a função `init_serial()` para inicializar a comunicação serial onde os dados são transferidos pelo cabo usb. A `init_timer()` é a função de inicialização do relógio do microcontrolador.

`FIO2DIR|=RS+EN` é o registrador que configura os pinos da porta como entrada das variáveis RS e EN, faz uma lógica “ou” entre o RS e EN.

`FIO3DIR |=LCD_DADOS` transforma em entrada a função `LCD_DADOS`, assim como o `FIO4DIR` para os leds e o `FIO4DIR` para as portas de entrada e saída.

Chama-se o `lcd_init` para inicializar o display de lcd e a função `espera_1ms` aguarda 1 segundo no programa para a `serial_srting` enviar uma string para a serial interpretada pelo computador e o LabView, com os dizeres entre com o rele. O `while(1)` é o loop infinito do programa que fica lendo infinitamente as instruções dadas, insere-se na variável `x` os dados lidos na serial para entrar no loop `if`. Isso faz que o dado lido pela serial seja 1 e assim entra no primeiro caso do programa que é a porta de saída `porta1`. Quando é enviada pela serial o valor 2 o programa realiza o segundo caso na porta de entrada e saída 2 e aciona o led 2. Assim para as outras portas 3 e 4 de input/output dos reles 3 e 4 de controle. O programa foi desenvolvido para que os valores inseridos na variável `X` pelo LV sejam lidos na placa de desenvolvimento. Isso ocorre antes de entrar no loop de `while`.

4.7 Hardware

O hardware do sistema tem duas placas de circuito impresso para o apoio ao controle de *software*. Para o controle dos relés utiliza-se um kit desenvolvimento micro controlado por um processador ARM7, mostrado na figura 4.24. As saídas do kit de desenvolvimento não possuem corrente suficiente para ativar os relés, portanto foi necessária a construção de uma placa para a amplificação de corrente que irá atuar nos relés.

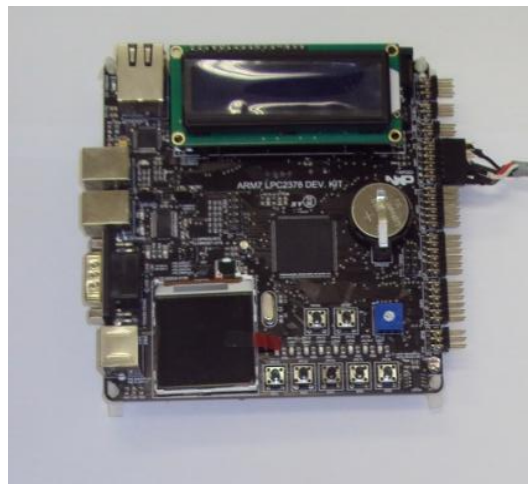


Figura 4. 24. Placa de controle ARM7 utilizada no projeto

Transistores de potência tipo MOSFETs foram utilizados na placa para amplificação de corrente. Uma fonte 12 Volts de corrente contínua foi utilizada para a alimentação do sistema, portanto como os componente eletrônico funcionam com 5 Volts foi necessário a utilização de CIs (circuitos integrados) reguladores de tensão para 5 e 6 Volts que são eles o 7805 e o 7906. Esses componentes fornecem 10 volts para energizar os MOSFETs. Para a proteção de supostas correntes de refluxo que queimariam as entradas da placa utiliza-se opto acopladores.

4.7.1 Amplificador de potência

Para o amplificador de potência utilizou-se o programa para protótipo de circuitos elétricos Eagle[®]. A figura 4.25 mostra o esquemático do hardware do amplificador de potência.

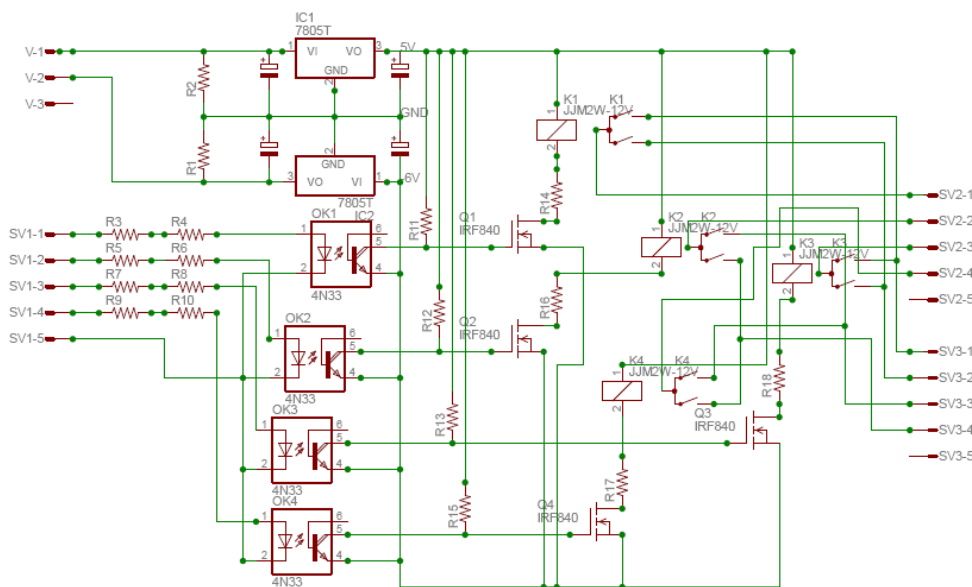


Figura 4. 25. Esquema do diagrama elétrico do amplificador de potência.

As entradas V1 e V2 são conectadas nos pinos 12 Volts e neutro respectivamente que fornecem energia para o funcionamento do circuito. Os pinos Sv1.1, Sv1.2, Sv1.3, Sv1.4 e Sv1.5 são as entradas da placa de controle, cada entrada é conectada em um pino de controle do kit de desenvolvimento. As saídas Sv2.1, Sv2.2, Sv2.3, Sv2.4 são as entradas que vão conectadas na fonte Keithley[®] no sistema e as saídas Sv3.1, Sv3.2, Sv3.3, Sv3.4 são as saídas dos relés para o porta amostra.

Com o projeto simulado no software de desenvolvimento Eagle[®], utilizou-se uma *protoboard* para a simulação real do projeto, antes do projeto final e para a adequação e ajuste dos erros do programa na linguagem C. A figura 4.26 mostra os primeiros testes do controle do software para o acionamento dos relés. Depois do ajuste dos erros das placas de circuito impresso e do software foi realizado o projeto final da placa de amplificação de corrente. A figura 4.27 mostra a localização dos componentes na placa de circuito impresso.

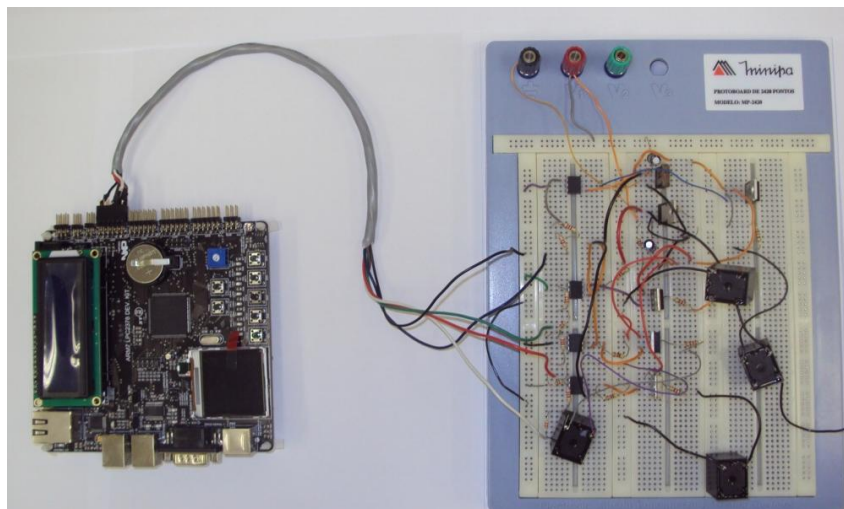


Figura 4. 26. Mostra os testes de acionamento dos reles pelo kit de desenvolvimento.

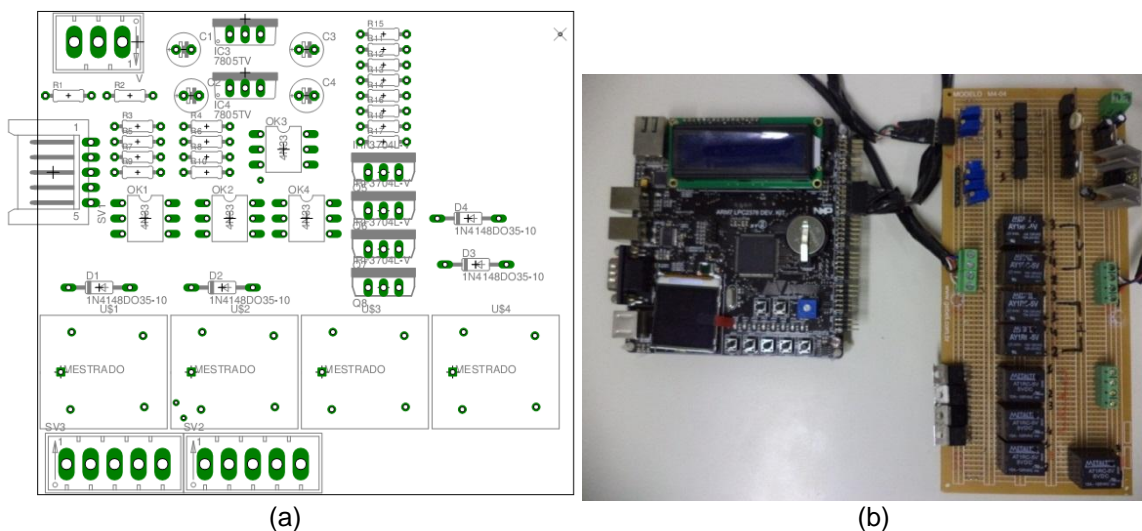


Figura 4. 27. Localização dos componentes na placa de circuito impresso. Hardware utilizado para o controle dos reles

O teste em *protoboards* é um método padrão para o projeto de *hardware* para se ter certeza que o projeto realiza a função programada, e assim evitar o desperdício de tempo e material fazendo varias placas de circuito impresso. Esse primeiro projeto serviu para o teste do código, para os últimos ajustes do código de *firmware* embarcado na placa microcontrolada. O *firmware* são instruções que são programadas diretamente para o *hardware*. Assim sendo armazenado permanentemente em um circuito integrado só sendo possível a troca se apagarmos o código anterior. Essas instruções são gravadas nas memórias *ROM* ou *EPROM* de microcontroladores. A diferença entre *firmware* e *software*, e que um se comunica diretamente com o hardware e o outro tem um sistema operacional como base.

Figura 4.28a mostra o diagrama de blocos e a lógica utilizada para a conexão dos reles nos contatos da amostra para medida 4 pontas pelo método Van der pauw apresentado no quadro 4.1. O quadro 4.2 mostra a lógica para medida da tensão hall definida pela figura 4.28b. Nota-se que o único diferencial entre as medidas é a troca de lógica dos fios do rele onde uma é cruzado e a outra não.

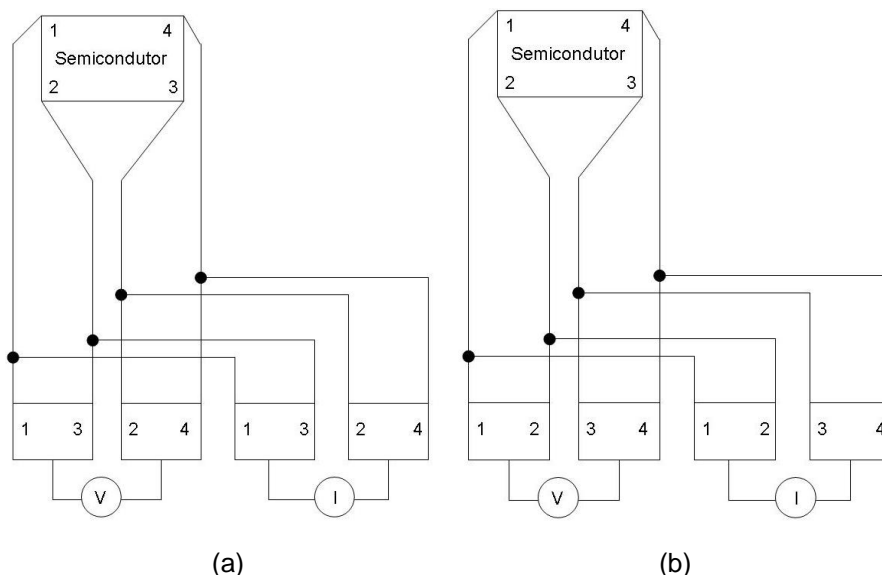


Figura 4. 28. (a) Diagrama de blocos para a logica do método Van Der Pauw e (b) logica para as medidas de efeito Hall.

Quadro 4. 1. Mostra a lógica implementada nos reles para as medidas de resistência Van Der Pauw.

Casos	R13/V	R24/V	R13/I	R24/I
0	0	0	1	1
1	1	1	0	0
2	1	0	0	1
3	0	1	1	0

Quadro 4. 2. Mostra a lógica implementada nos reles para as medidas de efeito Hall.

Casos	V13/V	V24/V	V13/I	V24/I
1	0	0	1	1
2	1	1	0	0

Figura 4.29 mostra o diagrama lógico dos reles nos estados 0, 1, 2 e 3, que são os estados de cada medida das resistências horizontal e vertical e a lógica e os estados dos reles para as medidas de efeito Hall.

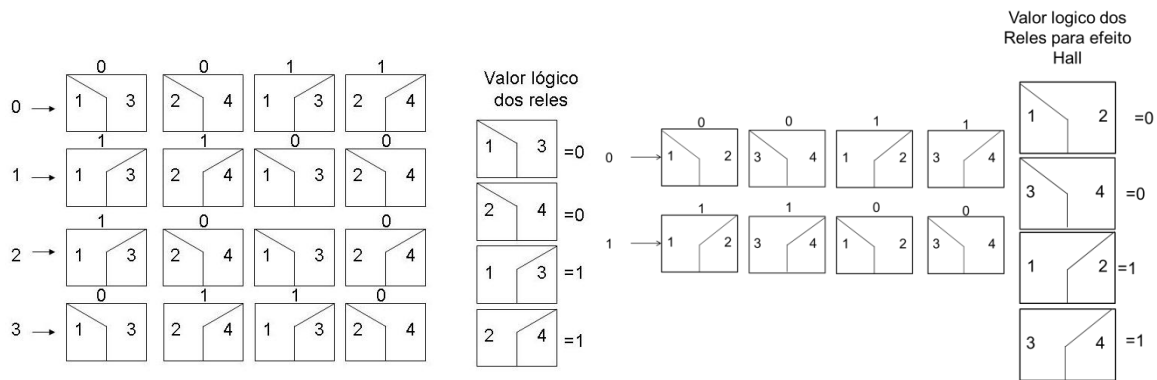


Figura 4. 29. Estados lógicos dos relés.

5 RESULTADOS

As medidas realizadas no sistema para a caracterização elétrica de semicondutores seguiu o padrão do NIST (“National Institute Of Standards and Technology”), conforme as orientações da norma ASTM F76 para medidas de resistividade, número e mobilidade de portadores de carga. A norma ASTM F 76 orienta os passos para a correta caracterização elétrica pelo método Van Der Pauw. O primeiro passo é a medida de resistividade elétrica pelo método quatro pontas, para então realizar as medidas de tensão Hall com a utilização de um campo magnético.

Para o teste do sistema utilizaram-se amostras de GaSb já caracterizadas eletricamente pelo mesmo método Van der Pauw. Pelo método Van der Pauw quanto maior o número de medidas de cada grandeza menor é o desvio padrão e consequentemente o erro, porém isso só é possível quando a diferença entre as medidas de polaridade invertida não for superior a 3%. Outro fator que interfere no nível de erro da medida de resistência é o número de interações necessárias para que o lado esquerdo da equação 3.53 seja igual a um, assim obtendo a resistência R_s . Como no método Van der Pauw necessita-se da espessura da amostra foi realizada medições com um relógio comparador para as amostras utilizadas para a caracterização elétrica de acordo com as tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5. 1. Quadro com a medida de espessura com o relógio comparador de amostras de GaSb.

Medida	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Amostra 4 (mm)
1	1,93	1,41	1,88	1,95
2	1,95	1,39	1,85	1,95
3	1,93	1,4	1,91	1,96
4	1,94	1,37	1,98	1,96
5	1,95	1,41	2	1,94
Média	1,94	1,396	1,924	1,952
Desvio padrão	0,01	0,0167	0,0643	0,00837

Tabela 5. 2. Medida de espessura utilizando um relógio comparador para amostras GaSb.

Medida	Amostra 5 (mm)	Amostra 6 (mm)	Amostra 7 (mm)
1	1,28	1,22	1,41
2	1,27	1,21	1,4
3	1,28	1,22	1,41
4	1,26	1,21	1,4
5	1,28	1,21	1,41
Média	1,274	1,214	1,406
Desvio padrão	0,00894	0,00547	0,00547

5.1 Resistência pelo método Van der Pauw

Para a medida de resistência pelo método Van der Pauw necessita-se realizar as medidas das resistências horizontal (R_{23} , R_{32} , R_{14} e R_{41}) e vertical (R_{12} , R_{21} , R_{12} e R_{34}), sendo que o software realiza os cálculos automaticamente utilizando as equações 3.54 e 3.55.

Com as duas resistências vertical e horizontal obtidas realizou-se o cálculo da resistência de folha segundo a equação de Van der Pauw 3.53. Não é correto utilizar o método de resistências equivalentes porque é complexo obter amostras que tenham as resistências horizontal e vertical idênticas. Portanto o cálculo da resistência de folha necessita da simulação computacional para a relação de modos interativos obtendo-se os valores mais próximos de um. Isso quando as amostras não têm formato quadrático. Sendo o caso, pode-se estabelecer que as resistências horizontal e vertical da amostra são iguais e pode-se utilizar a equação 3.56;

No método Van Der Pauw é necessário conhecer a espessura da amostra. De acordo com a norma F 76 deve-se realizar no mínimo três medidas da espessura utilizando instrumento adequado para a grandeza da espessura da amostra, ou seja, para uma grandeza de diferenciação de 1%. Com as três medidas realiza-se uma média do valor e para as medidas de espessura das amostras foi utilizado um relógio comparador. O software realiza automaticamente as medidas e cálculos obtendo-se os resultados apresentados nas tabelas 5.3-5.9.

Tabela 5. 3. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van der Pauw da amostra 1.

Amostra 1								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32
Resistência (Ω)	0,320	0,319	0,531	0,477	0,070	0,077	0,021	0,024
Erro (%)	1,003		1,112		0,906		0,859	
Resultado Final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	0,7561		0,14669		6,8173		99,981	

Tabela 5. 4. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van Der Pauw da amostra 2.

Amostra 2								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32
Resistência (Ω)	0,096	0,095	0,071	0,068	0,120	0,107	0,068	0,068
Erro (%)	1,012		1,042		1,113		0,997	
Resultado Final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	0,392		0,05473		18,273		100	

Tabela 5. 5. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van der Pauw da amostra 3.

Amostra 3								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32
Resistência (Ω)	0,000215	0,000090	0,000278	0,000030	0,092073	0,092306	0,096962	0,093357
Erro (%)	2,389		9,267		0,997		1,039	
Resultado Final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	0,0608		0,01169		85,521		100	

Tabela 5. 6. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van der Pauw da amostra 4.

Amostra 4								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32

Resistência (Ω)	0,029729	0,033590	0,018483	0,019436	0,379913	0,377896	0,314719	0,376358
Erro (%)	0,885		0,951		1,005		0,836	
Resultado Final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	0,5621		0,07139		14,008		99,998	

Tabela 5. 7. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van der Pauw da amostra 5.

Amostra 5								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32
Resistência (Ω)	0,319	0,384	0,25	0,402	0,247	0,133	0,114	0,14
Erro (%)	0,832		0,621		1,856		0,816	
Resultado final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	0,7586		0,9635		1,0379		99,9164	

Tabela 5. 8. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e fator de Van der Pauw da amostra 6.

Amostra 6								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32
Resistência (Ω)	0,396	2,418	2,808	9,197	0,307	0,238	3,318	2,514
Erro (%)	0,164		0,305		1,289		1,319	
Resultado Final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	1,536		2,153		0,465		94,382	

Tabela 5. 9. Resistência de folha, Resistividade, condutividade e Fator de Van der Pauw da amostra 7.

Amostra 7								
Direção	Resistência Vertical				Resistencia Horizontal			
Contatos	R12	R21	R34	R43	R14	R41	R23	R32
Resistência (Ω)	0,003	0,006	0,006	0,187	0,058	0,061	0,045	0,058
Erro (%)	0,442		0,032		0,944		0,781	
Resultado Final	Resistência de Folha (Ω/\square)		Resistividade ($\Omega.cm$)		Condutividade (S/cm)		Fator de Van Der Pauw	
	0,2402		0,02906		34,413		100	

Considerando que amostras de GaSb, não dopadas, possuem em torno de $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ de resistividade [34]. Nas amostras analisadas conseguiu-se o mesmo nível de grandeza de uma amostra de GaSb pura. Como as amostras analisadas são dopadas com alumínio (Al), cádmio (Cd) e telúrio (Te), possuem uma resistência adequada para essa característica. Então as grandezas de resistência de folha, resistividade e condutividade do sistema são válidas.

Quanto mais distante de 100% for o fator de Van der Pauw pior estado dos contatos com a amostra. Pode-se visualizar nas tabelas das análises de resistividade que o fator de Van Der Pauw sempre se mantém próximo de 100%. O fator de Van der Pauw e o erro entre as análises e fornecem também a informação de que a amostra possui muitas discordâncias geométricas, e assim não está de acordo com a norma F76 para a caracterização elétrica. Principalmente quando o erro entre as medidas de polaridade invertida estão acima ou muito próximas a 3%.

5.2 Medidas da tensão Hall, cálculos de mobilidade e número de portadores de carga.

Com a resistência de folha e resistividade de cada amostra procede-se a obtenção das tensões geradas pela aplicação de um campo magnético e corrente elétrica na amostra, ou seja, as tensões Hall pelo efeito da força de Lorentz. Então para realizar as medidas aplica-se um campo magnético segundo o método Van Der Pauw para medidas Hall como indicado no capítulo 3. Colocou-se a amostra em uma posição entre as peças polares do ímã de modo que o fluxo magnético seja perpendicular às duas faces planas da amostra que estão separadas por sua espessura.

Obtém-se as medidas das tensões Hall V_{13P} , V_{31P} , V_{24P} , V_{42P} , V_{13N} , V_{31N} , V_{24N} e V_{42N} pelo método Van der Pauw, onde N ou P significam a direção do fluxo magnético. O campo magnético não deve variar mais que 1%, por isso utilizou-se ímãs permanentes. Os ímãs permanentes são girados a cada medida de tensão para inverter o campo magnético, e novamente realizar as medições das tensões

Com as tensões realizaram-se os cálculos da tensão Hall (V_H) com a equação 3.42. Se a tensão Hall for positiva a amostra é tipo P se for negativa a amostra é tipo N. Com a grandeza da tensão Hall V_H obteve-se a mobilidade e o número de portadores de carga da amostra a partir das equações 3.43 e 3.47.

Tabela 5. 10. Resultados dos cálculos do número e mobilidade dos portadores de carga da amostra 3A de GaSb

Amostra 7				
V13 (V)		5X10 ⁻⁰²		
V31 (V)		1,4X10 ⁻⁰²		
V24 (V)		6X10 ⁻⁰⁵		
V42 (V)		-7,6X10 ⁻⁰⁵		
Tensão Hall (V)	Número de portadores (elétron/Cm²)	Mobilidade dos portadores (cm²V⁻¹s⁻¹)	Número de portadores (elétron/Cm³)	Mobilidade dos portadores (cm³V⁻¹s⁻¹)
8,00E-03	1,41X10 ⁺¹⁶	1,85X10 ⁺⁰³	1,44X10 ⁺²²	1,53X10 ⁺³

Tabela 5. 11. Resultados dos cálculos do número e mobilidade dos portadores de carga da amostra Itália A de GaSb.

Amostra 8				
V13 (V)		-6X10 ⁻⁰⁶		
V31 (V)		-3 X10 ⁻⁰⁶		
V24 (V)		-2,5 X10 ⁻⁰⁵		
V42 (V)		-3,2 X10 ⁻⁰⁵		
Tensão Hall (V)	Número de portadores (elétron/Cm²)	Mobilidade dos portadores (cm²V⁻¹s⁻¹)	Número de portadores (elétron/Cm³)	Mobilidade dos portadores (cm³V⁻¹s⁻¹)
-8,00E-06	1,36 X10 ⁺¹⁹	7,74 X10 ⁺⁰²	7,93 X10 ⁺¹⁹	4,5 X10 ⁺⁰³

Tabela 5. 12. Resultados dos cálculos do número e mobilidade dos portadores de carga da amostra 1 de GaSb.

Amostra 1				
V13 (V)		4 X10 ⁻⁰⁶		
V31 (V)		3 X10 ⁻⁰⁶		
V24 (V)		-9 X10 ⁻⁰⁶		
V42 (V)		-9 X10 ⁻⁰⁶		
Tensão Hall (V)	Número de portadores (elétron/Cm²)	Mobilidade dos portadores (cm²V⁻¹s⁻¹)	Número de portadores (elétron/Cm³)	Mobilidade dos portadores (cm³V⁻¹s⁻¹)
-1,00E-06	7,3 X10 ⁺¹⁶	1,01 X10 ⁺⁰³	4,76 X10 ⁺¹⁷	5,21 X10 ⁺⁰³

Uma amostra padrão de GaSb do tipo-p tem características elétricas de concentração de portadores 8X10¹⁶cm⁻³ e mobilidade 690 cm²V⁻¹s⁻¹, isso em 300K

[35]. Portanto, as análises das tabelas mostram que o número de portadores de carga e a mobilidade estão na mesma ordem de grandeza de uma amostra pura de GaSb. Como dito anteriormente, essas amostras estão dopadas com Alumínio, cádmio e telúrio e suas propriedades elétricas diferem de amostras puras. Mostrando que o sistema Hall projetado consegue realizar de forma adequada as medidas de portadores de carga.

5.3 Medidas da resistividade pelo método Van der Pauw em diferentes temperaturas.

Como o projeto do sistema permite a aplicação de temperaturas positivas e negativas sob a amostra, utilizou-se esse procedimento para verificar a diferença de resistência em amostras de GaSb. Realizaram-se as medidas de acordo com o procedimento 6.1 utilizando o sistema térmico do projeto, com o resistor de potência e a câmara fria de nitrogênio líquido. Com isso obtiveram-se os dados apresentados nas tabelas 5.13-5.17.

Tabela 5. 13. Variação de resistividade em relação à temperatura.

Amostra 1					
Corrente de controle (A)	Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Fator	Condutividade (S/cm)
0	25	0,756	0,147	99,98	6,817
0,2	27,5	0,748	0,145	99,98	6,886
0,3	30	0,723	0,140	99,98	7,123
0,4	40	0,705	0,137	99,98	7,307
0,5	46,8	0,685	0,133	99,99	7,515
0,6	58,2	0,656	0,127	99,99	7,858
0,7	65,5	0,619	0,120	99,99	8,331

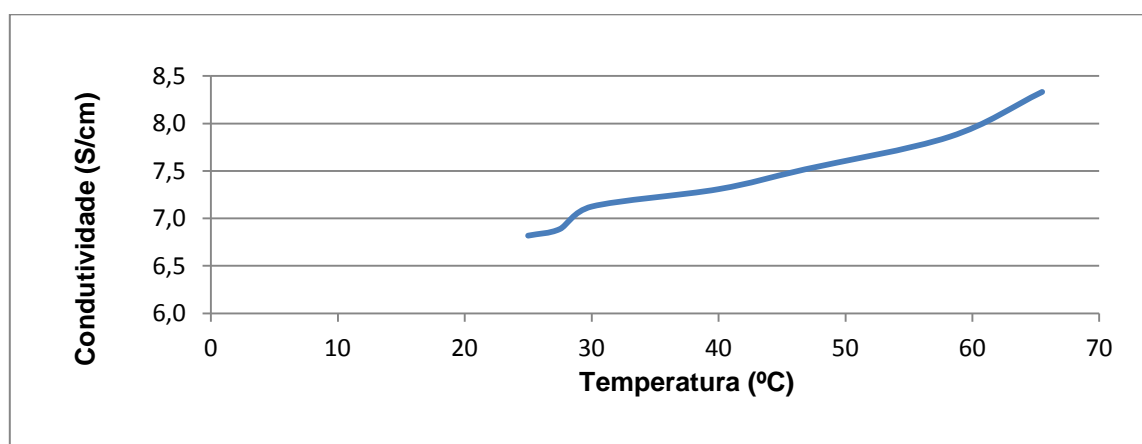


Figura 5. 1. Gráfico mostra o aumento da condutividade em relação ao aumento da temperatura.

Tabela 5. 14. Variação de resistividade em relação à temperatura.

Amostra 8					
Corrente de controle (A)	Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega.cm$)	Fator	Condutividade (S/cm)
0	25	0,1357	0,0233	100	42,8667
0,2	27,5	0,1309	0,0225	100	44,4227
0,3	30	0,1285	0,0221	100	45,2517
0,4	40	0,1279	0,0220	100	45,4599
0,5	46,8	0,1265	0,0218	100	45,9499
0,6	58,2	0,1265	0,0218	100	45,9470
0,7	65,5	0,1214	0,0208	100	47,8811

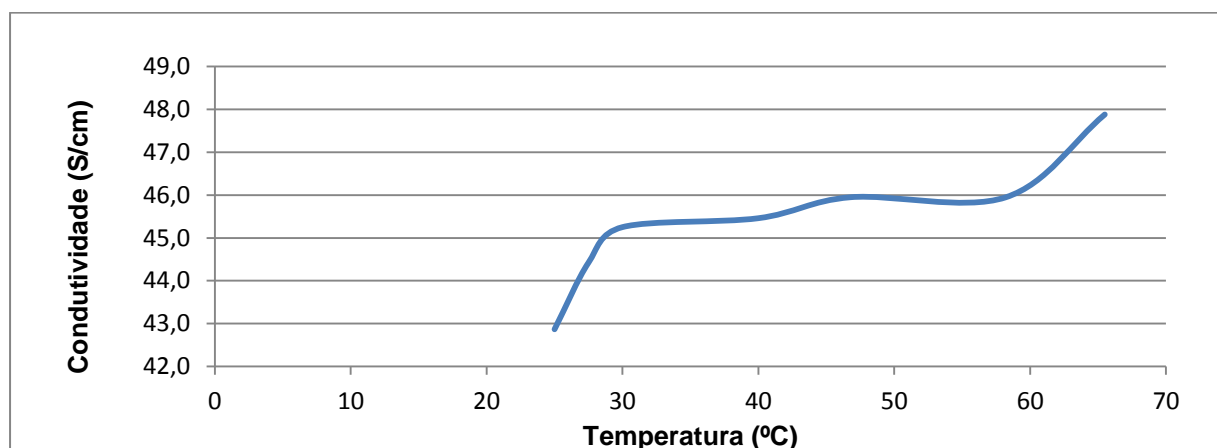


Figura 5. 2. Condutividade vs Temperatura para a amostra 8.

Tabela 5. 15. Variação de resistividade em relação à temperatura.

Amostra 9					
Corrente de controle (A)	Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega.cm$)	Fator	Condutividade (S/cm)
0	25	1,4538	0,1221	99,99	8,1884
0,2	27,5	1,4326	0,1203	99,99	8,3101
0,3	30	1,4194	0,1192	99,99	8,3873
0,4	40	1,3970	0,1173	99,99	8,5213
0,5	46,8	1,3972	0,1173	99,99	8,5203
0,6	58,2	1,4232	0,1195	99,99	8,3646
0,7	65,5	1,1069	0,0929	99,99	10,7550

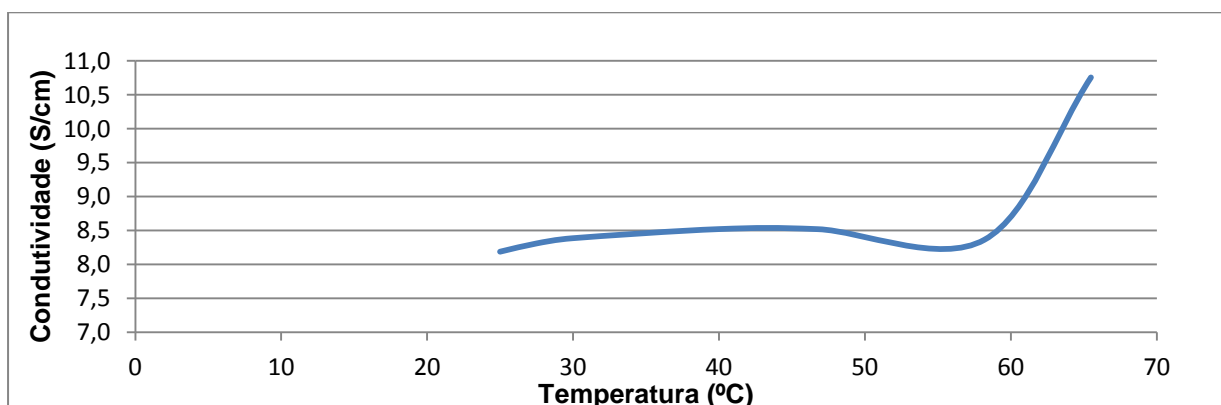


Figura 5. 3. Condutividade vs Temperatura para a amostra 9.

Tabela 5. 16. Variação de resistividade em relação à temperatura.

Amostra 7					
Corrente de controle (A)	Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega.cm$)	Fator	Condutividade (S/cm)
0	25	0,1132	0,0137	100	72,9784
0,2	27,5	0,1120	0,0136	100	73,7673
0,3	30	0,1035	0,0125	100	79,8158
0,4	40	0,1023	0,0124	100	80,7751
0,5	46,8	0,0999	0,0121	100	82,6800
0,6	58,2	0,0974	0,0118	100	84,8767
0,7	65,5	0,0974	0,0118	100	84,8679

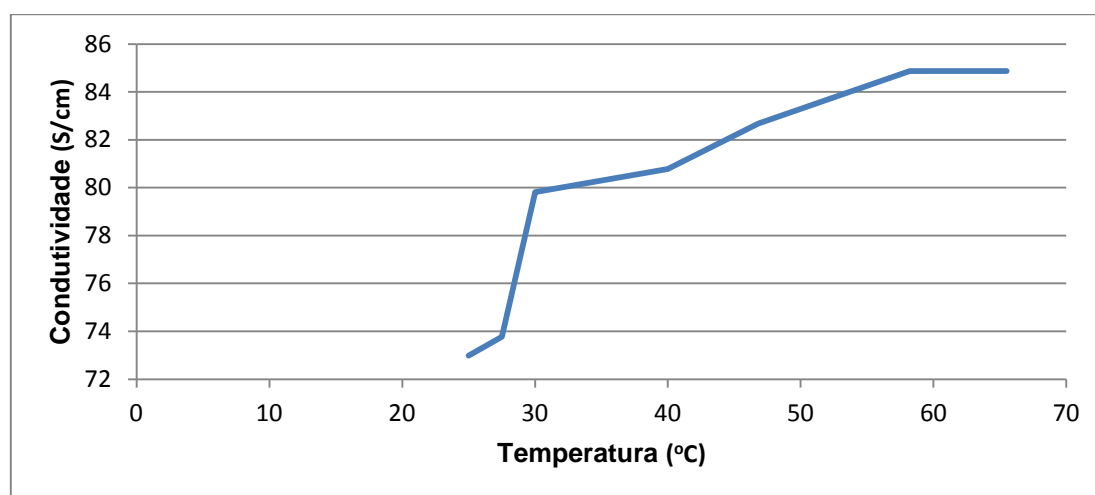


Figura 5. 4. Condutividade vs Temperatura para a amostra 7.

Essas amostras estão dopadas para aplicações fotovoltaicas e termiônicas, então a sua resistividade cai com o aumento da temperatura. Pode-se comprovar essa diminuição da resistividade e aumento da condutividade nas amostras com os gráficos das figuras 5.1-5.4. Essas amostras dopadas tem uma característica

elétrica onde a condutividade e a resistividade se mantêm constantes entre os pontos 30°C até 60°C, ou seja, tem grande aumento de sua condutividade até 30°C onde possui uma grande taxa de aumento de condutividade, depois essa taxa se mantém quase que linear até 60°C onde possui-se outra grande taxa de aumento de temperatura. Está limitado até 80 °C de aquecimento pela estabilidade do sistema do porta amostra e os limites de medida da fonte controlada.

Tabela 5. 17. Resistividade, Resistência e Condutividade em relação a temperatura.

Amostra 7			
Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	Resistividade (Ω.cm)	Condutividade (S/cm)
-60,0	522,99	63,28	0,01580
-50,0	462,12	55,92	0,01788
-40,0	398,13	48,17	0,02076
-30,0	368,82	44,63	0,02241
-20,0	322,44	39,01	0,02563
-10,0	269,02	32,55	0,03072
0,0	268,34	32,47	0,03080
25,0	0,11325	0,01370	72,98
27,5	0,11203	0,01356	73,77
30,0	0,10354	0,01253	79,81
40,0	0,10231	0,01238	80,77
46,8	0,09996	0,01209	82,68
58,2	0,09737	0,01178	84,88
65,5	0,09738	0,01178	84,87

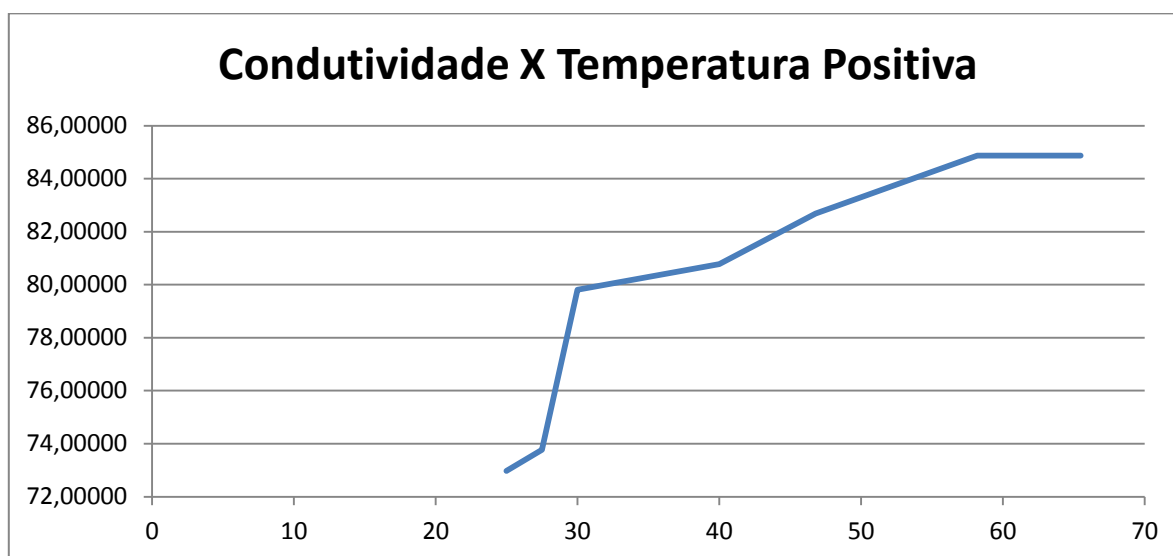


Figura 5. 5. Comportamento da resistividade em relação a temperatura negativa e positiva.

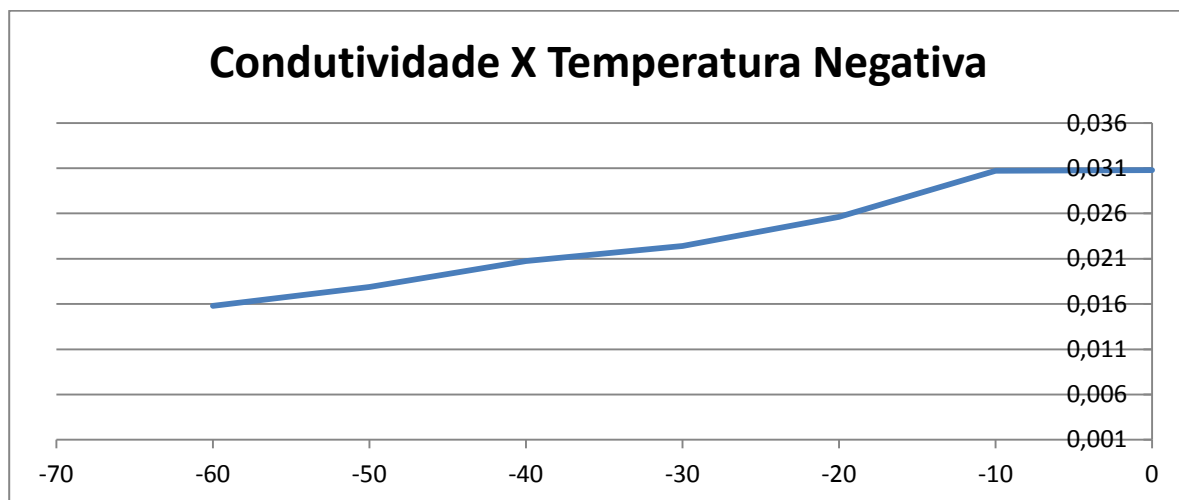


Figura 5. 6. Comportamento da Condutividade em relação a temperatura negativa e positiva.

Nas figuras 5.5 e 5.6 pode-se visualizar que a resistividade do material diminui com o aumento de temperatura, conseqüentemente a condutividade aumenta.

5.4 Medidas da tensão Hall, cálculos de mobilidade e número de portadores de carga com a utilização de temperaturas.

Assim como na resistência das amostras utilizamos o sistema térmico para verificar sua diferença na tensão Hall, mobilidade e número de portadores de carga com a aplicação de diferentes temperaturas. Com a utilização do sistema térmico do projeto e com isso obtiveram-se os dados apresentados nos gráficos 5.7 e 5.8.

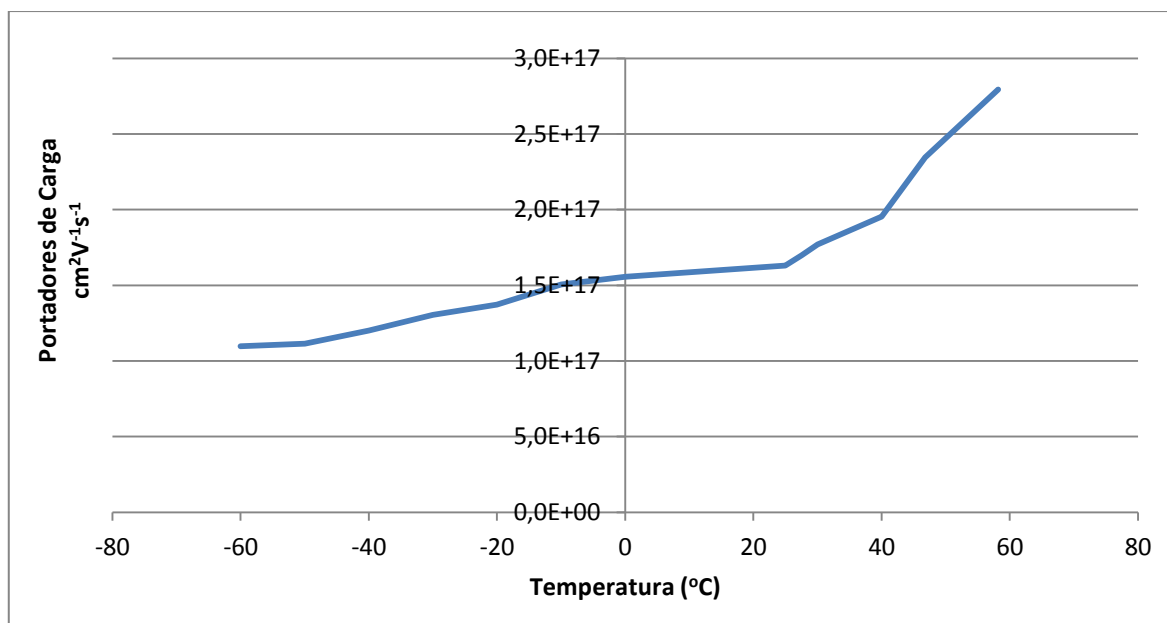


Figura 5. 7. Número dos portadores de carga para uma amostra de GaSb em temperaturas negativas e positivas.

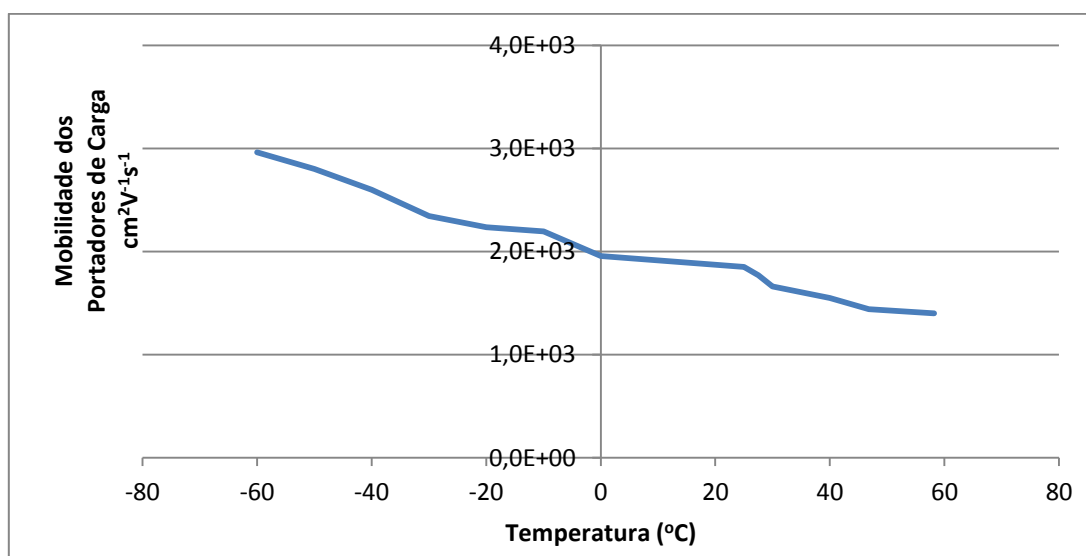


Figura 5. 8. Comportamento da mobilidade dos portadores de carga para diferentes temperaturas em uma amostra de GaSb.

5.5 Considerações Finais

O sistema construído mostrou-se eficaz na medida de resistividade, condutividade, mobilidade e número de portadores de carga pelo método Van Der Pauw em semicondutores. Os valores de resistividade, mobilidade e número de portadores de carga obtido com o sistema apresentam a mesma grandeza de

valores encontrados na literatura e em artigos científicos para amostras de GaSb. Como as amostras analisadas são dopadas, possuem diferença em suas características elétricas.

A cerâmica do resistor de potencia demora em perder e receber calor por ter uma inercia térmica alta, isso dificulta o controle da corrente que alimenta o resistor. A qualidade dos contatos com a amostra é monitorada pelo fator de Van Der Pauw, que é um controle de ajuste de erro do sistema. Quando se utiliza o sistema de vácuo atinge-se uma temperatura mínima de -60°C , isso porque não existe um elemento para a retirada de calor da amostra, que no caso sem utilizar vácuo, seria o ar. Os contatos das ponteiros com a amostra podem ser de índio puro ou uma solda fria de gálio/índio. A solda fria mostrou-se melhor condutora, porém oxida mais rápido. De acordo com a tabela 5.18 se verifica que as diferenças nos fatores medidos é de no máximo 2%. Então o sistema construído possui um desvio de 2% em cada medida realizada.

Tabela 5. 18. Erro das medidas do sistema

Amostras	Fator de Van Der Pauw
1	99,92
2	94,38
3	100,00
4	99,98
5	99,99
6	99,99
7	99,99
8	99,99
Media	99,28
Desvio Padrão	1,98
Erro %	1,99

6 CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido é adequado para a medições de resistividade, número de portadores de carga e mobilidades para semicondutores do grupo III-V (GaSb, GaInSb), no intervalo de temperaturas entre 70 até -60°C, verificado pelo fator de Van der Pauw muito próximo a unidade obtido para as amostras testadas.

O comportamento da resistividade em função da temperatura obtido para as amostras testadas no sistema construído mostraram, comportamento semelhante aos encontrados na literatura.

O porta amostra desenvolvido permite que amostras de várias dimensões de área superficial sejam mensuradas, desde que mantenham uma espessura homogênea de no máximo 5 mm.

O sistema é flexível e de fácil operação. Em um segundo momento, tanto a placa para o chaveamento dos reles como o software Labview podem ser ampliados com a adição de reles e de blocos de controle respectivamente, formado novas configurações com 6 ou 8 pontas para método de Van Der Pauw. O sistema foi construído com peças obtidas no mercado nacional que são de fácil substituição.

7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construir um sistema para obter a condutividade térmica para amostras de semicondutores pelo método Van der Pauw.
- Adaptar o sistema para a medição das propriedades elétricas de acordo com o método Van der Pauw de 6 e 8 contatos de acordo com a norma ASTM F76.
- Adaptar o sistema com uma câmara criogênica para melhor controle da temperatura das amostras.
- Adaptar o sistema para um campo magnético com intensidade e polaridade controlada por computador.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INOHARA, <http://www.amcham.com.br/regionais/amcham-sao-paulo/noticias/2012> acessado em junho de 2011.
- [2] SWART, J., W. **Materiais Elétricos Fundamentos e Semicondutores.** Campinas, São Paulo. 2003.
- [3] SANTOS I. A., GIROTTO E. M.; **Medidas De Resistividade Elétrica DC Em Sólidos: Como Efetua-las Corretamente; Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos.**
- [4] WICHERT, T.;DEICHER, M. Studies of semiconductors. **Nuclear Physics**, v. 693, 2001.
- [5] NEIL W. ASHCROFT AND N. DAVID MERMIN, **SOLID STATE PHYSICS**, Ed. 1976
- [6] KITTEL, C. **Introdução à física do estado solido.** New York: JOHN WILEY & SONS. 2006.
- [7] BLAKEMORE, **J.S. Solid state Physics.** London: Cambridge, 1998.
- [8] SHEEL, H. J.; Historical aspects of crystal growth technology. **Journal of Crystal Growth**, V 211.pp 1-12, 2000.
- [9] MELO Hilton e INTRATOR Edmond. **Dispositivos semicondutores.** Rio de Janeiro (RJ), Brasil: Ao Livro Técnico S.A., 1972.

- [10] RUNYUN, W. R.; WATELSKI, S. B.; HARPER, C. A . **Handbook of materials and processes for electronics**. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [11] E. H. HALL, **On a New Action of the Magnet on Electrical Current**, Amer. J. Math., 287-292 (1879).
- [12] SCHMIDT, V., **Materiais elétricos: condutores e semicondutores** v. 1, São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1979.
- [13] SEILER, D. Hall Effect Measurements. **NIST – National Institute of Standards and Technology**, Estados Unidos: [2004]. Disponível em: <<http://www.eeel.nist.gov>>. Acesso em 03 de novembro 2010.
- [14] WEBSTER, JOHN G. **The measurement, instrumentation, and sensors handbook**. New York: CRC Press LLC. pp. 43-1. (1999)
- [15] Hurd, Colin M., **The Hall Effect in Metals and Alloys**, Plenum Press, New York (1972).
- [16] Ziman, J. M., **Principles of the Theory of Solids**, Cambridge University Press (1969).
- [17] VAN DER PAUW, L. J; A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae arbitrary shape. **Phillips research reports**, v. 13, 1958.
- [18] ASTM. Test Methods for Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single-Crystal Semiconductors, ASTM F76, United States, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 10.04 (2011).
- [19] OLIVER P., RUTHER P., PLATTNER L., BALTES H., Thermal van der Pauw Test Structure, **IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING**, VOL. 13, NO. 2, MAY 2000.

- [20] BARANAUSKAS, V. **Técnicas instrumentais de caracterização de materiais semicondutores**. São Paulo: Unicamp, 1989.
- [21] **Bell Laboratories**. Estados Unidos: [2007]. Disponível em <<http://www.alcatel-lucent.com>>. Acesso em: 20 de junho de 2009.
- [22] FRUETT, F. Introdução aos semicondutores. **Unicamp**, Brasil: 2005. Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano/EE530/PDF/Texto%20-%20F%EDsica%20dos%20Semicondutores.pdf>. Acessado em 24 de julho 2009.
- [23] Magnetic field of single coils / Biot-Savart's law, disponível em: <<http://www.fizika.org/skripte/of-prakt/ofpraktikum.>> html , acessado em 02 de fevereiro de 2009.
- [24] MISHRA, K. U., SINGH, J. **Semiconductor Devices Physics and Design**. USA: Springer, 2008.
- [25] SERWAY, Raymond A. **Física: para cientistas e engenheiros com física moderna**. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC 1996.
- [26] TIPLER, Paul A. **Física 2 Vol.** Rio de Janeiro : Guanabara Dois, 1978.
- [27] W, RUNYAN R. Semiconductor Measurements and Instrumentation. **Tokyo: Texas Instruments Electronics Series**, 1975.
- [28] YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A., **Sears e Zemansky - Física III - Eletromagnetismo**, 10a Edição, Pearson/Addison Wesley, , São Paulo, 2004.
- [29] YU, P. Y.; CARDONA, M. **FUNDAMENTALS OF SEMICONDUCTORS**. 3ªedição. New York: Springer Berlin Heidelberg. 2005.

- [30] SCHRODER D. K, **Semiconductor Material and Device Characterization**, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York (1998).
- [31] R. CHWANG, B. J. SMITH and C. R. CROWELL, Contact Size Effects on the van der Pauw Method for Resistivity and Hall Coefficient Measurement, **Solid-State Electronics** 17, 1217-1227 (1974).
- [32] PUTLEY, E. H., **Hall Effect and Related Phenomena**, Butterworth & Co., Ltd., London, 1960.
- [33] LOOK, D. C., AND FARMER, J. W., Automated, High Resistivity Hall Effect and Photoelectronic Apparatus, **Journal Physics E: Science Instruments**, Vol 14, , pp. 472–477. 1981.
- [34] R. PINO, Y. KO, and P.S. DUTTA, High-Resistivity GaSb Bulk Crystals Grown by the Vertical Bridgman Method, **Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic, Journal of ELECTRONIC MATERIALS**, Vol. 33, No. 9, 2004, Institute, Troy, NY 12180. 2.
- [35] A.G. MILVIDSKAYA, A.Y. POLYAKOV, G.P. Kolchina, A.G. MILNES, A.V. GOVORKOV, N.B. SMIRNOV and I.V. TUNITSKAYA, The properties of heavily compensated high resistivity GaSb crystals, **Materials Science and Engineering**, **B22** 279-282 , Institute of Rare Metals, B. Tolmachevsky 5, Moscow 109017 (Russian Federation) (1994).
- [36] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, **Electric Machinery**. 6nd Edition, McGraw Hill 2003.
- [37] Z. Young e Freedman, **Fisica III Eletromagnetismo**. 12 Edição, Pearson 2011

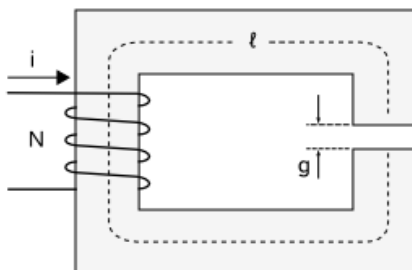
APÊNDICE

A. Campo magnético

O comportamento do campo magnético é explicado pelas equações de Maxwell, complementadas pelas relações de parâmetros dos materiais ocupados pelo campo. O campo magnético sob condições variáveis de tempo são sempre os mesmos sob condições estáticas. E a lei básica que relaciona corrente elétrica e campo magnético e a lei de Ampère [36].

$$\int_S J da = \oint H dl \quad (\text{A.1})$$

onde J é a densidade de corrente por metro quadrado (A/m^2) e H é a intensidade do campo magnético e tem unidade em ampere - espira por metro (A/m). A equação A.1 diz que a integral de H em torno de uma superfície aberta através da qual passa a densidade de corrente J , é igual à corrente total envolvida. E assim aplicada a um núcleo de eletroímã como na figura A.1.



Anexo A. 1. Núcleo e entreferro de um eletroímã.

Um campo magnético funciona da seguinte forma, produz - se por um ímã ou por cargas elétricas em movimento em um condutor elétrico, assim o campo magnético de materiais ferromagnéticos é causado pelo spin de partículas subatômicas. Então como um campo magnético é a influência de cargas elétricas em movimento e ímãs permanentes, pode - se afirmar que as ligações químicas são produtos de desequilíbrios nos campos magnéticos, e não elétricos. Por esse motivo o campo magnético pode ser descrito de acordo com a Lei de Biot-Savart.

A Lei de Biot-Savart descreve o vetor de indução magnética \vec{B} em termos de magnitude e direção de uma fonte de corrente, da distancia da fonte de corrente elétrica e a permeabilidade do meio. Sendo esta utilizada para derivar a lei de ampere e vice versa. Então definimos um elemento de corrente elétrica $i d\vec{l}$ assim obtendo um campo magnético de acordo com a equação A.2 [37].

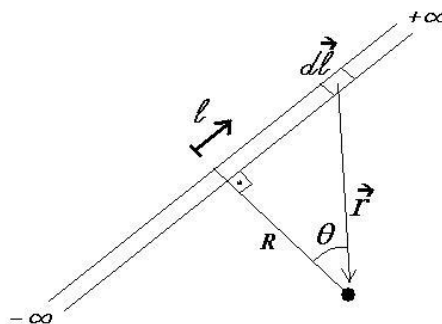
$$dB = \frac{\mu}{4\pi} \frac{i d\vec{l} \times \hat{r}}{|\vec{r}|^2} \quad (\text{A.2})$$

onde μ é a permeabilidade magnética do meio, i é a corrente elétrica medida em ampères, $d\vec{l}$ é o vetor diferencial do comprimento do elemento de corrente, \hat{r} é o vetor unitário que dá a direção e o sentido do vetor que liga o elemento de corrente até o ponto onde se quer calcular o campo e \vec{r} é o vetor que liga o elemento de corrente até o ponto onde se quer calcular o campo.

Portanto a o campo magnético gerado nas mais diversas distribuições de corrente elétrica pode ser descrito com essa lei, um fio retilíneo condutor de corrente gerava um campo magnético de acordo com a equação A.3.

$$|\vec{B}| = \frac{\mu i}{2\pi R} \quad (\text{A.3})$$

Então obtemos essa equação de acordo com o mostrado na figura A.2.



Anexo A. 2. Ponto de campo magnético em relação a um fio de condução de corrente elétrica.

Primeiro, faz-se uma transformação de variáveis:

$$\tan \theta = \frac{l}{R} \quad (\text{A.4})$$

$$dl = \frac{R}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (\text{A.5})$$

$$|d\vec{l} \times \hat{r}| = dl \cdot 1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = dl \cdot \cos\theta = \frac{R}{\cos\theta} d\theta \quad (\text{A.6})$$

$$|\vec{r}|^2 = l^2 + R^2 = R \tan^2 \theta + R^2 = R^2 (\tan^2 \theta + 1) = \frac{R^2}{\cos^2 \theta} \quad (\text{A.7})$$

Assim obtendo-se:

$$|d\vec{B}| = \frac{\mu i}{4\pi} \cdot \frac{|d\vec{l} \times \hat{r}|}{|\vec{r}|^2} = \frac{\mu i}{4\pi} \cdot \frac{\frac{R}{\cos\theta} d\theta}{\frac{R^2}{\cos^2 \theta}} = \frac{\mu i}{4\pi R} \cdot \cos\theta \cdot d\theta \quad (\text{A.8})$$

$$|\vec{B}| = \frac{\mu i}{4\pi R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \cdot d\theta = \frac{\mu i}{2\pi R} \quad (\text{A.9})$$

Então um campo magnético pode ser descrito como mostrado na equação

A.11:

$$\vec{B} = v \times \frac{1}{c^2} \vec{E} \quad (\text{A.10})$$

Ou:

$$B = v \times \mu D \quad (\text{A.11})$$

Onde:

- V é o vetor velocidade da carga elétrica, medido em metros por segundo,
- c é a velocidade da luz no vácuo, medida em metros por segundo,
- E é o vetor campo elétrico medido em newtons por Coulomb ou volts por metro,
- D é o vetor deslocamento elétrico,
- μ é a permeabilidade magnética.

Então uma carga elétrica que se move em um campo magnético uniforme B com velocidade V , a carga fica sujeita à ação de uma força magnética F_m , que tem direção perpendicular a V e a B . A força magnética é proporcional ao campo B , à carga q e à componente da velocidade V na direção perpendicular a B , de acordo com a equação A.12.

$$F_m = B \cdot q \cdot v \sin\theta \quad (\text{A.12})$$

Então o sentido da força magnética F tem sentido de acordo com o sinal da carga elétrica móvel, sendo que a mesma altera a direção da velocidade onde F é perpendicular a velocidade, ou seja, uma força centrípeta, realizando um movimento circular uniforme. Com equipamentos específicos conseguimos realizar a medição do fluxo magnético de acordo com uma diferença de tensão.

Assim um campo magnético gera um fluxo magnético (B) que é o número de linhas de fluxo por unidade de área que permeiam o campo magnético de acordo como mostrado na equação A.13. É uma quantidade vetorial, sendo a sua direção em qualquer ponto do campo magnético a direção do campo naquele ponto. É expressa em webers por metro quadrado (Wb/m^2), sendo chamada de tesla (T), de

modo que: $1 \text{ T} = 1 \text{ wb/m}^2$. Uma unidade antiga de indução magnética, ainda muito usada, é o G; $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$.

$$B = \frac{F}{A} \tag{A.13}$$

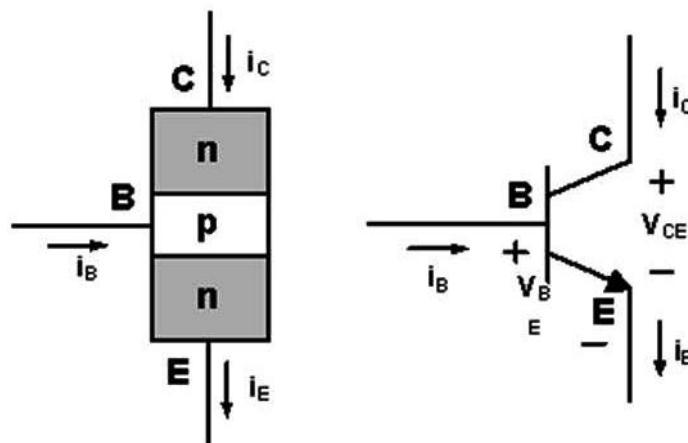
B. Junção PN

Dispositivos semicondutores operam com base no princípio básico de que a condução e propriedades ópticas dos semicondutores podem ser alteradas facilmente e rapidamente. Isso pode ser feito através do uso de junções entre materiais diferentes, essas junções podem ser entre materiais tipo-n e tipo-p. A junção pn é um dos fatores mais importantes na eletrônica de estado sólido. Ela é usada como um dispositivo em aplicações tais como retificadores, formadores de onda, capacitores, lasers, detectores, etc. O ingrediente chave do transistor bipolar, que é um dos mais importantes dispositivos eletrônicos é uma junção PN [5].

O transistor é um componente eletrônico que começou a popularizar-se na década de 1950, tendo sido o principal responsável pela revolução da eletrônica na década de 1960. São utilizados principalmente como amplificadores e interruptores de sinais elétricos. O termo vem de transfer resistor (resistor/resistência de transferência), como era conhecido pelos seus inventores. O processo de transferência de resistência, no caso de um circuito analógico, significa que a impedância característica do componente varia para cima ou para baixo da polarização pré-estabelecida.

Esta variação é feita através da variação de corrente num dos terminais chamados base, o que, conseqüentemente, ocasiona o processo de amplificação de sinal. Os materiais utilizados na fabricação do transistor são principalmente o Silício (Si), o Germânio (Ge), o Gálio (Ga) e alguns óxidos. Na natureza, o silício é um material isolante elétrico, devido à conformação das ligações eletrônicas de seus

átomos, gerando uma rede eletrônica altamente estável. Atualmente, o transistor de germânio não é mais usado, tendo sido substituído pelo de silício, que possui características muito melhores.



Anexo B. 1. Esquema elétrico de um transistor

A concentração de portadores de carga define o tipo de condutividade do material. Quando se possui o cristal em temperatura ambiente praticamente todas as impurezas eletricamente ativas estão ionizadas. A junção pn em um semiconductor trata-se da união de um material dopado p com um material dopado n. Como por exemplo, o Silício de natureza n com o de natureza p assim formando uma barreira interna de potencial. Quando juntamos esses dois cristais obtém - se uma difusão de elétrons do cristal n para o p, portanto têm-se cargas fixas em cada zona da junção juntamente com uma barreira de potencial entre elas.

O acúmulo de íons positivos na zona n e de íons negativos na zona p cria um campo elétrico (E) onde atua sobre os elétrons livres da zona n com uma determinada força de deslocamento, que é contrária a corrente de elétrons e assim deterá os mesmos.

As impurezas n são pentavalentes então quando cede um elétron consequentemente ira existir mais prótons do que elétrons criando assim um íon positivo, do mesmo jeito que as impurezas p trivalentes ganham um elétron carregando-se negativamente. Com isso aparece uma diferença de potencial entre essas duas zonas p e n. Portanto quando introduzimos impurezas doadoras em materiais semicondutores, os elétrons que estão ligados nas impurezas possuem

uma ligação fraca. Então se pode introduzir um número de impurezas adequado assim podendo determinar o número de elétrons no semiconductor a partir do número de impurezas. Para material do tipo n [20].

$$n = N_D \quad (\text{B.1})$$

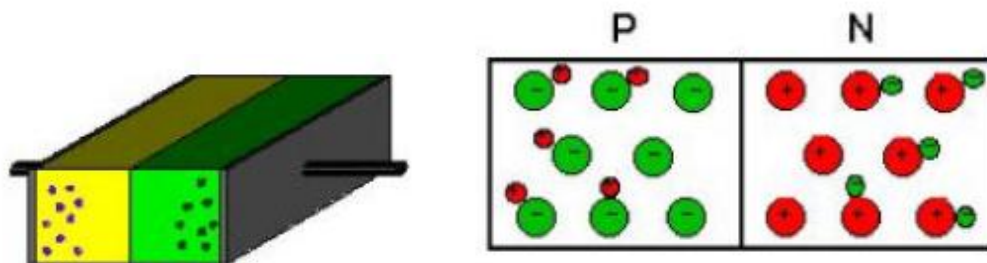
$$p \cong \frac{n_i^2}{N_D} \ll n \quad (\text{B.2})$$

Sendo N_D a concentração de impureza doadora que doa um elétron. Quando em um semiconductor se introduz impurezas aceitadoras, uma ligação covalente fica incompleta formando lacunas sendo assim denominado de semiconductor tipo-p.

$$p = N_A \quad (\text{B.3})$$

$$n \cong \frac{n_i^2}{N_A} \ll p \quad (\text{B.4})$$

Sendo N_A a concentração de impureza receptora que recebe um elétron. Quando forma-se uma junção pn as cargas e lacunas se combinam e eliminam, ou seja, um elétron livre (negativo) se elimina com uma lacuna livre (positiva). A figura B.2 mostra uma junção pn.



Anexo B. 2. Mostra uma junção PN.

Na junção pn forma-se uma barreira interna de potencial ocasionada pela difusão de elétrons entre os cristais n ao p. Com isso aparecem cargas fixas em

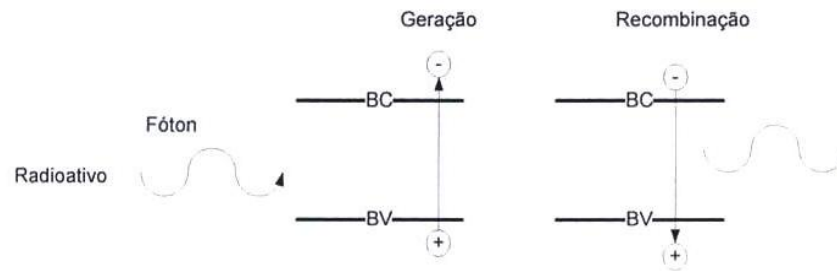
uma zona em ambos os lados da junção chamada de *barreira interna de potencial ou zona de carga especial*. À medida que progride o processo de difusão, a barreira de potencial interna aumenta sua largura nos cristais em ambos os lados da junção, acumulando assim íons positivos na zona n e negativos na zona p onde cria um campo elétrico (E) que vai atuar nos elétrons livres da zona n com uma determinada força de deslocamento, oposta a corrente dos elétrons assim parando os mesmos.

Para polarizar uma junção pn injetamos corrente no cristal de tal forma que o polo positivo da corrente esteja na zona p e o polo negativo na zona n. obtendo assim que o polo negativo consiga repelir os elétrons livres do cristal n dirigindo - se para a junção pn. A região positiva da corrente atrai os elétrons livres de valência do cristal P, ou seja, empurra as lacunas para a junção pn. Quando a diferença de potencial entre a excitação externa de corrente injetada no cristal se torna maior que a diferença de potencial na zona de carga p, os elétrons livres da zona n, adquirem energia suficiente para saltar as lacunas do cristal P que foram deslocadas para a junção pn. Portanto quando um elétron livre salta da zona n para a zona p ele literalmente cai em uma das lacunas disponíveis na zona p assim convertendo-se em um elétron de valência.

C. Mecanismos de recombinação e geração.

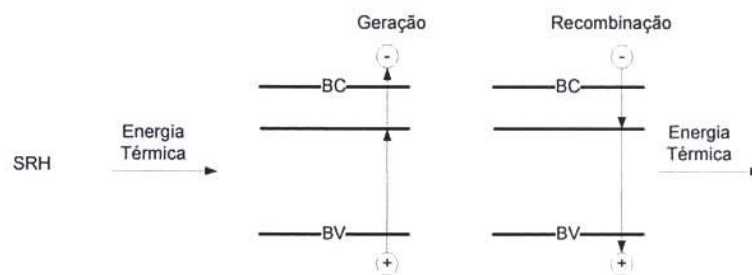
Quando um semiconductor conduz corrente elétrica ele esta ocasionando mecanismos de recombinação e geração entre os elétrons e lacunas. Portanto dependendo do tipo de recombinação ou geração um semiconductor pode possuir diferentes características e assim ter um uso especifico na tecnologia.

LED's e LASER's são do tipo de recombinação radioativa, quando um elétron da banda de condução se recombina com um elétron da banda de valência. O fóton emitido nesse processo possui energia igual à diferença de energia entre os estados do elétron [7].



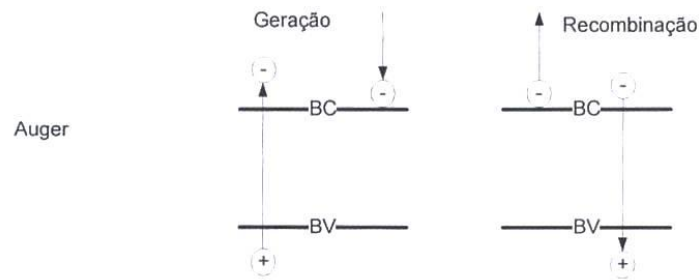
Anexo C. 1. Recombinação e geração radioativa.

As recombinações por níveis discretos (*Shockley-Read-Hall* ou SRH) são pares de elétrons-lacunas assistidos por um ou mais níveis energéticos entre a banda de condução e a banda de valência. Sendo eles produzidos por defeitos na rede cristalina do semiconductor e por impurezas [7].



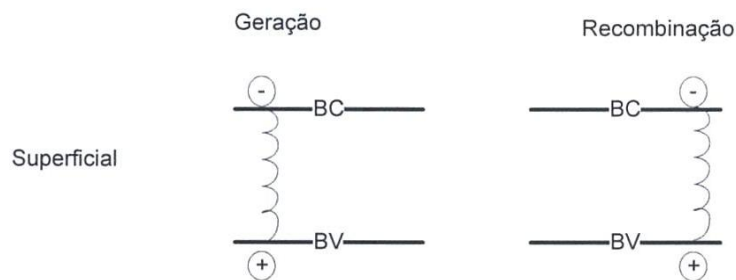
Anexo C. 2. Recombinação e geração por níveis discretos de energia.

A recombinação que envolve três portadores de carga chama-se de recombinação Auger. Um elétron e uma lacuna se recombinam, mas em vez de emitirem energia em forma de fótons, é transferido para um terceiro portador, um elétron na banda de condução. Sendo que este elétron volta ao seu estado original de energia através da emissão de um fônon [7].



Anexo C. 3. Recombinação e geração Auger.

Qualquer defeito ou impureza na superfície do cristal pode causar recombinação, chamado de recombinação em superfície. Como no caso de células solares onde sua superfície é o local de recombinação extremamente elevada. Com isso a alta taxa de recombinação na superfície diminui o número de portadores minoritários [7].



Anexo C. 4. Recombinação e geração superficial.

A unidade da velocidade de recombinação de superfície é em cm/s , quando se tem uma velocidade de recombinação nula à recombinação de superfície e o movimento dos portadores também é zero. Quando se tem uma superfície com recombinação infinita o movimento dos portadores esta limitado no valor máximo da velocidade que eles podem atingir, sendo este valor na ordem de 1×10^7 cm/s .