

GABRIEL VINÍCIUS DE OLIVEIRA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO TRANSPORTE DE SPIN EM TRANSISTORES DE
BASE METÁLICA ELETRODEPOSITADOS PARA APLICAÇÃO EM
SENSORES MAGNÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Campus Viçosa

T

S586i
2017
Silva, Gabriel Vinícius de Oliveira, 1990-
Investigação do transporte de spin em transistores de base
metálica eletrodepositados para aplicação em sensores magnéticos /
Gabriel Vinícius de Oliveira Silva. - Viçosa, MG, 2017.
xiii, 62f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.59-62.

1. Transistores. 2. Sensores. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Física. Programa de Pós-graduação em Física
Aplicada. II. Título.

CDD 22 ed. 539.72112

GABRIEL VINÍCIUS DE OLIVEIRA SILVA

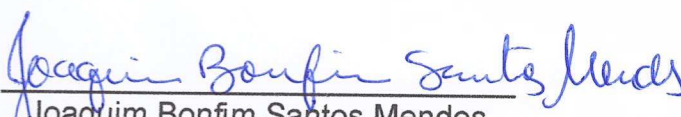
INVESTIGAÇÃO DO TRANSPORTE DE SPIN EM TRANSISTORES DE BASE METÁLICA ELETRODEPOSITADOS PARA APLICAÇÃO EM SENSORES MAGNÉTICOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 17 de julho de 2017.



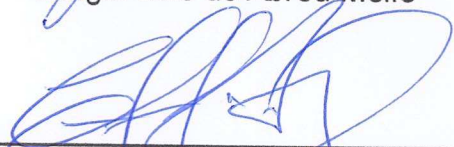
Alex Aparecido Ferreira



Joaquim Bonfim Santos Mendes



Sérgio Luis de Abreu Mello



Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo
(Orientador)

Dedico esta dissertação à minha família, pais e irmã, pela fonte inesgotável de paciência e amor, pela força, incentivo e amizade. Não poderia deixar de dedicar também, se não àquela que se tornou, ao longo desses últimos meses, uma das pessoas mais importante da minha vida, Mariane Santana. Sem essas pessoas nada disto seria possível.

In memoriam Maria das Graças Lopes de Oliveira.

"When you pass through the waters, I will be with you; and when you pass through the rivers, they will not sweep over you. When you walk through the fire, you will not be burned; the flames will not set you ablaze".

(Isaiah 43:2)

Agradecimentos

Os agradecimentos não virão em ordem de relevância, exceto para o primeiro.

A **Deus** pela longanimidade e benevolência para comigo. Pela força que tem me dado para suportar os momentos difíceis e por manter a fé sempre viva. Por me guiar pelo caminho do bem dando-me perseverança e paciência.

A minha super **mãe** *Ednéia*, pelo conforto diário e apoio incondicional. Pela amizade, confiança e respeito. Por me emprestar seus ouvidos em todos os momentos. Pelas virtuosas orações pedindo por proteção, bênçãos e etc. Por me ensinar o caminho do bem e mais uma vez, pela sábia criação. Por sempre estar apta e disposta a me ajudar, independentemente do meu merecimento. Sou imensamente grato (embora falho) a todos os seus ensinamentos. Obrigado por sempre acreditar em mim. Te amo.

Ao meu **pai** *C. Roberto*, pelo exemplo de homem. Por me ensinar o valor do trabalho. Agradeço também pelas conversas, pela satisfação demonstrada ao saber que estou indo pra casa. Pelo apoio financeiro durante a maior parte da minha vida estudantil. Tenho orgulho de você, meu pai. Espero poder retribuir tudo que já fizestes por mim. Perdoa-me se as vezes sou falho contigo. Te amo.

A minha **irmã** *Beatriz*, simplesmente por ser a minha irmã. Por me encher de orgulho. A mais nova universitária da família. Sua dedicação é *invejável*. Te admiro muito e sempre que precisar, estarei aqui pra de alguma forma te ajudar. Te amo.

A minha **namorada** e futura esposa *Mariane Santana*, pelo amor, companheirismo e amizade. Por compartilhar seus sonhos e ouvir meus temores. Pelo bom convívio e por me proporcionar sensações inéditas. Os benefícios do nosso relacionamento são notórios e fundamentais para mim. Te amo.

Ao meu **orientador** *Clodoaldo*, pela orientação desde a graduação até aqui. Pelos ensinamentos acadêmicos e sociais transmitidos. Pelo sempre otimismo e bom humor. Pela amizade e respeito. Um exemplo de pai, amigo e profissional.

Ao **amigo** *Bruno Públio*, pela parceria e amizade de longa data. Por sempre ser um bom amigo, fico feliz em saber que a parceria será estendida por mais 4 anos. Doutorado na UFMG, nos aguarda.

A **CAPES** pelo suporte financeiro. Pelo respeito e consideração, não atrasando o pagamento das bolsas.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Resumo	xii
Abstract	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica.	3
2.1 Introdução aos semicondutores.	3
2.2 Junção PN.	4
2.3 Heterojunção.	6
2.4 Barreira Schottky.	7
2.5 Magnetorresistência.	8
2.5.1 Magnetorresistência Ordinária.	8
2.5.2 Magnetorresistência Anisotrópica.	10
2.6 Transistor de base metálica.	13
2.7 Materiais ferromagnéticos	17
2.7.1 Ligas de FeNi	17
2.8 Óxidos Semicondutores	18
2.8.1 Óxido de Zinco - ZnO	18
3 Procedimentos e técnicas experimentais.	21
3.1 Eletrodeposição	21
3.1.1 Eletroquímica	21
3.1.2 Transporte de massa	23
3.1.3 Transporte de carga	25
3.2 Evaporação térmica	27

3.3	Caracterização morfológica	28
3.3.1	Difração de raio X - DRX	28
3.4	Caracterização topográfica	30
3.4.1	Microscopia de força atômica - AFM	30
3.5	Caracterização elétrica	31
3.5.1	Curvas i x V	31
3.6	Caracterização magnética	32
3.6.1	<i>Setup</i> MR - Magnetômetro de efeito Kerr	32
3.7	Curvas de transistor	34
3.7.1	Base-comum	35
3.7.2	Emissor-comum	35
4	Resultados e discussões.	36
4.1	Construção e caracterização da base - FeNi	36
4.1.1	Voltametria e eletrodeposição	36
4.1.2	Medidas elétricas	38
4.1.3	Medidas magnéticas	39
4.1.4	Difração de raio X - DRX	42
4.1.5	Microscopia de força atômica - AFM	43
4.2	Construção e caracterização do emissor - ZnO	44
4.2.1	Eletrodeposição	44
4.2.2	Difração de raio X - DRX	45
4.2.3	Microscopia de força atômica - AFM	46
4.2.4	Perfilometria óptica	47
4.3	Curvas de diodo: Si-n/FeNi - FeNi/ZnO	48
4.4	Curvas de transistor - ZnO/FeNi/Si-n	50
4.4.1	Medidas de base-comum	50
4.4.2	Medidas de emissor-comum	55
5	Considerações finais e perspectivas.	57
	Referências Bibliográficas	59

Lista de Figuras

2.1	<i>Condutividade de uma variedade de materiais a temperatura ambiente [1].</i>	3
2.2	<i>Dopagem com boro, elemento trivalente - semiconductor tipo P. Dopagem com fósforo, elemento pentavalente - semiconductor tipo N.</i>	4
2.3	<i>(a) Surgimento do Campo elétrico na Junção. (b) Elétrons sendo acelerados do lado P para o lado N. (c) Geração da corrente de buracos para o lado P. (d) Elétrons que recombinaem com buracos do lado P e decaem para banda de valência.</i>	5
2.4	<i>(a) Representação da função trabalho no diagrama de energia de um metal. (b) Representação da função trabalho e da afinidade eletrônica no diagrama de energia de um semiconductor.</i>	6
2.5	<i>Diagrama de energia de junção metal-semiconductor em equilíbrio/Semiconductor Tipo-n com $\Phi_m > \Phi_s$.</i>	7
2.6	<i>Modelo para ilustrar o fenômeno de Magnetorresistência Ordinária.</i>	9
2.7	<i>Curva típica de Magnetorresistência Ordinária</i>	10
2.8	<i>Curvas características de AMR em ligas de FeNi; Nas configurações Longitudinal e Transversal.</i>	11
2.9	<i>Espalhamento de elétrons do orbital "s" para os estados "d" desocupados, devido as diferentes densidades no orbital "d".</i>	12
2.10	<i>Representação gráfica das densidades de estados desocupados 3d mostrando as direções do Momento Angular L, da densidade de corrente J e da Magnetização M.</i>	12
2.11	<i>Estrutura lateral de um transistor de base metálica.</i>	13
2.12	<i>Diagrama de Energia de um TBM representando as perdas pelos mecanismos na base.</i>	15
2.13	<i>(a) Estrutura lateral de um TBM simétrico. (b) Diagrama de energia de um TBM simétrico.</i>	16

2.14	(a) Estrutura lateral de um TBM assimétrico (b) Diagrama de energia de um TBM assimétrico.	16
2.15	Fases cristalinas das ligas de FeNi, onde os átomos de Ni são representados por esferas verdes e átomos de Fe representados por esferas marrons: (a) cúbica de face centrada; (b) cúbica de corpo centrado.	18
2.16	Estrutura hexagonal do tipo wurtzita do ZnO. As esferas laranjas representam os átomos de O e as esferas pretas os átomos de Zn. Os parâmetros de rede são descritos como a, b e c com $a = b \neq c$ [29].	19
2.17	Outras estruturas possíveis do ZnO. (a) Estrutura cristalina do NaCl e (b) blenda de zinco. Os átomos de O são representados pelas esferas laranjas, e os átomos de Zn estão representados pelas esferas pretas [29].	20
3.1	Representação esquemática de uma célula eletroquímica.	22
3.2	(a)Esquema da célula eletroquímica com potenciostato e eletrodo de referência (b)Curva característica da técnica de voltametria.	23
3.3	Representação da camada difusa.	24
3.4	Modelo de crescimento de eletrodepósitos.	24
3.5	Processo de preparação do eletrodo de trabalho.	26
3.6	Principais componentes de um sistema de evaporação térmica.	28
3.7	Difração de raio-X pelos planos cristalinos P_1 e P_2	29
3.8	Representação esquemática do aparato experimental.	30
3.9	(a)Representação da força em cada modo de operação do AFM. (b)Esquema de funcionamento do AFM e seus principais componentes.	31
3.10	Curva característica de um Diodo Schottky.	32
3.11	Setup de MR destacando o criostato e o eletroímã, LabSpin - UFV.	33
3.12	Montagem do magnetômetro na mesa óptica. Na imagem segue o laser utilizado, um polarizador e o chopper, LabSpin - UFV	34
3.13	Curva característica de histerese magnética em materiais ferromagnéticos.	34
3.14	(a)Vista lateral de um transistor em base-comum. (b)Diagrama de energia ilustrando a configuração base-comum.	35
3.15	(a)Vista lateral de um transistor em emissor-comum. (b)Diagrama de energia ilustrando a configuração emissor-comum.	35
4.1	(a)Voltamograma com início em -0,27V vs SCE variando entre 1.5V e -2.0V. (b)Transiente de potencial das amostras eletrodepositadas com tempos entre 5 e 100s e corrente -2.26mA.	37

4.2	<i>Espessura das deposição de 5 a 100s variando num intervalo entre 12,5 a 250nm.</i>	37
4.3	<i>Curva $V \times I$ para a estrutura de FeNi/Si-n para diferentes tempos de deposição.</i>	38
4.4	<i>Modelo ilustrando a corrente passando por diferentes amostras. (a)Amostra de 10s; (b)Amostra de 15s; e (c)Amostra de 50s. Relação entre as resistências, $R_a > R_b > R_c$.</i>	39
4.5	<i>Curva de Percolação apresentando a intersecção das retas assintóticas em 12s.</i>	39
4.6	<i>AMR longitudinal em liga de FeNi sobre Si-n, amostra de 15s de deposição.</i>	40
4.7	<i>AMR Transversal em liga de FeNi sobre Si-n, amostra de 15s de deposição.</i>	41
4.8	<i>Magnetometria da amostra de 15 segundos de deposição.</i>	42
4.9	<i>Difratograma de raio-X do filme de FeNi com picos em concordância com a literatura [34,35].</i>	42
4.10	<i>Composição do Fe e Ni em função do tempo de deposição extraído da referência [23].</i>	43
4.11	<i>Figura 1 (a)Imagem de AFM em 2D da amostra de 15s. (b)Imagem de perfil mostrando a presença de pin holes. (c)Imagem de AFM em 2D da amostra de 50s. (d)Imagem de perfil evidenciando a diminuição de pin holes.</i>	44
4.12	<i>Transiente de corrente referente a deposição de ZnO.</i>	45
4.13	<i>Difratograma de raio-x de filmes de ZnO que estão em concordância com a literatura[40 – 42]</i>	46
4.14	<i>(a)Imagem de AFM em 2D da amostra de ZnO. (b)3D do item a.</i>	47
4.15	<i>Espessura média do filme de ZnO sobre Si-n, obtida através da técnica de perfilometria óptica</i>	47
4.16	<i>Curva $I \times V$ obtida nas interfaces (a)Si/FeNi e (b)FeNi/ZnO, ambas preparadas por eletrodeposição.</i>	48
4.17	<i>Curvas de diodo das interfaces (a)Si/FeNi e (b)FeNi/ZnO em escala logarítmica. A intersecção com o eixo “y”indica o valor da corrente de saturação, i_0, e o coeficiente angular o fator de idealidade, n.</i>	49
4.18	<i>Representação das alturas de barreira das interfaces ZnO/FeNi 0.58eV e FeNi/Si 0.57eV.</i>	50
4.19	<i>(a)Curva de transistor em base-comum do dispositivo a $T=300K$. (b)Ganho do dispositivo a $T=300K$ (c)Curva de transistor em base-comum do dispositivo a $T=50K$ (d)Ganho do dispositivo a $T=50K$.</i>	51

4.20	<i>Modelo de circuito equivalente para mostrar a influência dos pin holes nas correntes do dispositivo, nas temperaturas de (a) $T=300K$ (b) $T=50K$.</i>	52
4.21	<i>Influência da corrente de emissor no efeito da magnetização (a) $T=300K$, (b) $T=50K$.</i>	53
4.22	<i>Variação da corrente de coletor em função do campo magnético aplicado para $I_E = 60\mu A$ (a) $T=300K$ (b) $T=50K$.</i>	53
4.23	<i>Variação da corrente de coletor em função do campo magnético aplicado, potencial fixado em $1.0V$.</i>	54
4.24	<i>(a) Curva de transistor em emissor-comum do dispositivo a $T=300K$. (b) Ganho do dispositivo a $T=300K$.</i>	55

Resumo

OLIVEIRA SILVA, Gabriel Vinícius, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2017. **Investigação do transporte de spin em transistores de base metálica eletrodepositados para aplicação em sensores magnéticos.** Orientador: Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo.

Os transistores são dispositivos de três terminais com propriedades bem definidas, capaz de chavear ou amplificar sinais elétricos. Esses dispositivos representam uma das revoluções científico-tecnológicas de maior impacto sobre a sociedade moderna. Existem vários tipos de transistores, porém nesta dissertação daremos destaque ao transistor de base metálica (TBM). Os TBM's são constituídos por uma camada metálica ultrafina, conhecida como base, posicionada entre duas camadas semicondutoras conhecidas como emissor e coletor. Os TBM's são largamente utilizados em circuitos de alta frequência por não necessitarem de tempo para recombinação dos portadores minoritários, uma vez que estes não apresentam papel fundamental nas junções do tipo Schottky [1,8]. Neste trabalho serão estudados os TBM's, porém a base será composta por um metal ferromagnético, material que apresenta magnetorresistência do tipo anisotrópica (AMR) [5]. Esses transistores são conhecidos como transistores de base metálica magnéticos. Sendo assim, as características elétricas do dispositivo dependerão do campo magnético ao qual está submetido, tornando-o promissor para aplicações tecnológicas, como, por exemplo, sensores magnéticos. Foi utilizada a eletrodeposição como principal técnica para produzir filmes finos de ligas de FeNi e ZnO. Antes da confecção dos dispositivos, os filmes de FeNi e ZnO foram caracterizados morfológicamente, topologicamente, eletricamente e magneticamente, afim de certificar a qualidade do dispositivo final. Os filmes de FeNi apresentaram boa aderência ao substrato utilizado, foi escolhido um filme acima do tempo de percolação e observou-se uma AMR de 0.13% na configuração longitudinal e 0.31% na configuração transversal. Além disso, um campo coercivo de $\sim 70Oe$. Foram realizadas curvas de Transistor a temperatura ambiente e a 50K, na ausência e na presença de campo magnético. O dispositivo apresentou um ganho de $\alpha = 0.96\%$ e $\alpha = 0.10\%$ na configuração de base-comum (CBC) para $T=300K$ e $T=50K$, respectivamente. As caracterizações magnéticas apontaram variações em torno de 1% na corrente de coletor na CBC, sendo portanto, um aumento de $\sim 10x$ em relação a AMR da liga FeNi.

Abstract

OLIVEIRA SILVA, Gabriel Vinícius, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2017. **Investigation of spin transport in metal base transistors for application in magnetic sensors.** Adviser: Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo.

Transistors are three-terminal devices with well-defined properties, capable of switching or amplifying electrical signals. These devices represent one of the scientific-technological revolutions that have the greatest impact on a modern society. There are several types of transistors, however in this dissertation we will highlight the metallic base transistor (TBM). The TBMs consist of an ultra thin metallic layer, known as a base, placed between two semiconductor layers known as emitter and collector. The TBMs are widely used in high frequency circuits because they do not require time for the reconfiguration of minority carriers, since these do not play a fundamental role in the Schottky-type junctions [1,8]. In this work to be studied the MBT's, but the metal base will be composed of a ferromagnetic, layer that has magnetoresistance of the anisotropic type (AMR) [5]. These transistors are known as magnetic metal base transistor. Thus, electrical characteristics of the device will depend on the magnetic field, to which it is subjected, making it promising for technological applications, such as magnetic sensors. Electrodeposition was used as the main technique for producing thin alloy layers of FeNi and ZnO. Before devices confection, the layers of FeNi e ZnO were by characterized morphologically, topologically, electrically and magnetically, in order to certify the quality of the final device. The layers of FeNi has a good adhesion to the substrate used, a layer above the percolation time was chosen and was observed one AMR of 0,13% in the longitudinal configuration and 0,31% in the transversal configuration. In addition, a coercive field of $\sim 70\text{Oe}$. Transistor curves were realized at room temperature and at 50K. The device showed a gain of $\alpha = 0.96$ and $\alpha = 0.10$ in the common-base configuration (CBC) for $T=300\text{K}$ and $T=50\text{K}$, respectively. The magnetic characterizations they point out are around 1% in the collector current in the CBC, thus, an increase of $\sim 10\text{x}$ in relation to the AMR of the FeNi alloy.

Capítulo 1

Introdução

O transistor proporcionou sem dúvida, o mais importante avanço científico-tecnológico do século XX. Os transistores estão por toda parte, nos computadores, smartphones, televisores, automóveis e etc. Os transistores foram desenvolvidos quando cientistas norte-americanos desenvolveram um cristal de semicondutores com dois tipos de junções capazes de realizar amplificações semelhantes as obtidas com as válvulas, utilizadas amplamente para este fim até então. Após a segunda guerra mundial, a Bell Labs começou a fazer elevados investimentos na tecnologia, resultando neste item básico da construção de circuitos lógicos.

A nova tecnologia não contém partes móveis, o que favorece a redução de suas dimensões. Esta redução possibilitou uma imensa integração de componentes e drástica redução do tamanho dos equipamentos eletrônicos até a portabilidade observada nos dias de hoje. Os dispositivos eletrônicos portáteis contam com processadores que possuem bilhões de transistores interligados, capazes de realizar tarefas simples ou extremamente complexas. O transistor é utilizado para controlar o fluxo de eletricidade e consequentemente o fluxo de dados que trafega pelos circuitos. Tudo isso realizado de forma muito mais rápida e eficiente, podendo ter informações interrompidas e restabelecidas cerca de bilhões de vezes em apenas um segundo.

O transistor é o sucessor da válvula eletrônica, ou pode-se dizer, o transistor é uma válvula, porém de estado sólido. O mesmo apresenta inúmeras vantagens como, dimensões reduzidas, mais leve, não precisa de filamento, mais resistente, não necessita de tempo de aquecimento e utiliza menores tensões de alimentação fazendo com que seja dissipado

menos energia, aumentando assim sua durabilidade. O primeiro objetivo deste trabalho tem como foco produzir um transistor de base metálica magnética, através de uma técnica conhecida e largamente utilizada pelas indústrias, a eletrodeposição. Através dessa técnica foi realizado o crescimento de estruturas de materiais ferromagnéticos e de óxidos semicondutores, FeNi e ZnO, respectivamente, sobre um substrato de silício dopado com impurezas tipo n.

Em cada parte do processo de produção foi realizado um estudo de caracterização afim de se verificar a viabilidade na aplicação do dispositivo final. Foram realizadas medidas de raio-x para investigar a morfologia da amostra. Através da técnica de AFM foi possível ter conhecimento da topografia. Com base nas medidas elétricas, várias informações puderam ser obtidas como, tempo de percolação, curvas de diodo e as alturas de barreira das junções Schottky. Como a base do dispositivo é composta por um material ferromagnético, se fez necessário conhecer as propriedades magnéticas do mesmo. Para isso, foram utilizadas técnicas como magnetometria de efeito Kerr e medidas de magnetorresistência (MR).

A segunda parte deste trabalho consiste em caracterizar o dispositivo final, ou seja, fazer um estudo em nível fundamental das propriedades de transporte em função da temperatura e na presença de campo magnético. Foram realizadas medidas de transistor para as temperaturas, $T=300\text{K}$ e $T=50\text{K}$ na configuração base-comum, com e sem campo magnético. Na configuração emissor-comum foram realizadas medidas de transistor à temperatura ambiente. Sendo assim, foi possível investigar a influência dos materiais e estrutura do dispositivo híbrido investigado na injeção de corrente spin polarizada e na amplificação. A motivação desta dissertação vem da possibilidade de se obter transistores que podem ser potencialmente utilizados como sensores magnéticos de forma relativamente simples e de baixo custo de produção.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica.

2.1 Introdução aos semicondutores.

Semicondutores são materiais caracterizados em $T = 0\text{K}$ por uma banda de valência cheia e uma banda de condução vazia, separadas por um gap de energia relativamente pequeno da ordem de $E_g = 2\text{eV}$. A temperatura ambiente o número de elétrons na banda de condução é apreciável, devido a excitações térmicas, embora expressivamente menor que o número de elétrons livres em metais. Esse comportamento resulta numa condutividade intermediária entre a condutividade dos isolantes e a dos metais [1]. Por essa razão o nome semicondutores. A Figura 2.1 ilustra a relação de condutividade desses materiais.

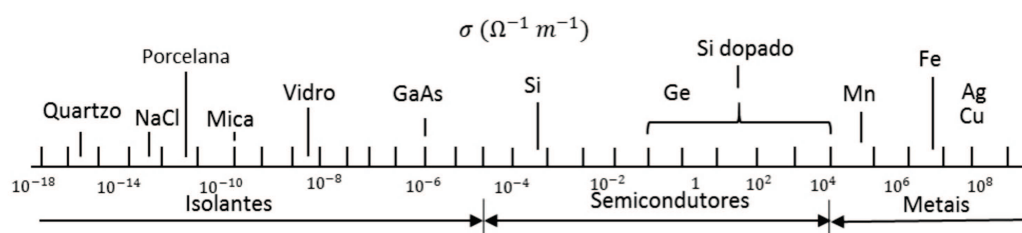


Figura 2.1: Condutividade de uma variedade de materiais a temperatura ambiente [1].

Em semicondutores puros a densidade de elétrons na banda de condução varia exponencialmente com a temperatura, por essa razão, semicondutores puros, ou semicondutores intrínsecos, são pouco utilizados na construção de dispositivos uma vez que sua condutividade é um função exponencial da temperatura. A condutividade dos semicondutores pode ser significativamente alterada com a inserção de impurezas, i.e átomos

diferentes dos que compõe o semiconductor puro. Esse processo de adicionar impurezas no cristal semiconductor é chamado dopagem. Semicondutores dopados são chamados de extrínsecos [2].

Essas impurezas podem ser do tipo doadoras, ou do tipo receptoras, tornando o semiconductor tipo N ou tipo P, respectivamente. A Figura 2.2 ilustra os dois tipos possíveis de dopagem.

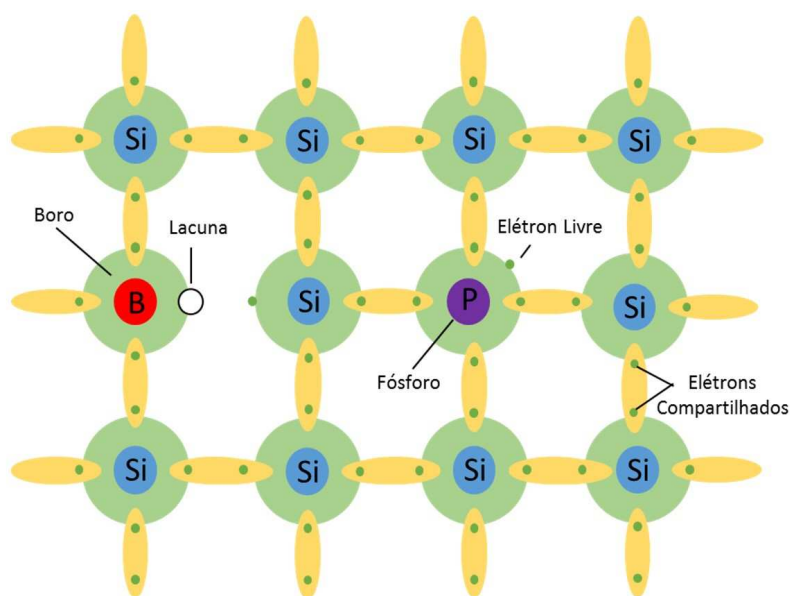


Figura 2.2: *Dopagem com boro, elemento trivalente - semiconductor tipo P. Dopagem com fósforo, elemento pentavalente - semiconductor tipo N.*

2.2 Junção PN.

A junção PN desempenha um papel importante tanto nas aplicações eletrônicas modernas quanto para entendimento de dispositivos semicondutores. É amplamente utilizado na retificação, comutação e outras operações em circuitos. A junção consiste na união de um semiconductor tipo P com outro tipo N. Quando esses dois semicondutores são unidos ocorre um fluxo de cargas entre os materiais semicondutores [3].

O excesso de elétrons existente no lado N migra para o outro lado, atingindo a região P. Nessa região existe um excesso de buracos que são então ocupados pelos elétrons, fechando ligações covalentes que estavam incompletas. Um elétron no lado P deixa uma carga líquida negativa na região onde se encontra, já que a região possui $Z - 1$ prótons

e fica com Z elétrons nessa região. Por outro lado, os elétrons que foram para o lado P deixam impurezas com $Z + 1$ prótons, i.e regiões com densidade de cargas positivas. Esse processo de difusão dos elétrons vai polarizando a junção, formando-se na região da junção uma barreira de depleção onde inexistem portadores de cargas, sendo assim uma região de alta resistência elétrica.

A polarização na junção faz surgir um campo elétrico E_k que aponta do lado n para o lado P como mostra a Figura 2.3(a), opondo-se ao fluxo de elétrons de N para P. Portanto, à medida que esse campo aumenta, menos elétrons conseguirão atravessar a junção para atingir o lado P. O fluxo de elétrons nunca se interrompe, o que ocorre é um equilíbrio dinâmico entre correntes que fluem do lado P para N e do lado N para P [3].

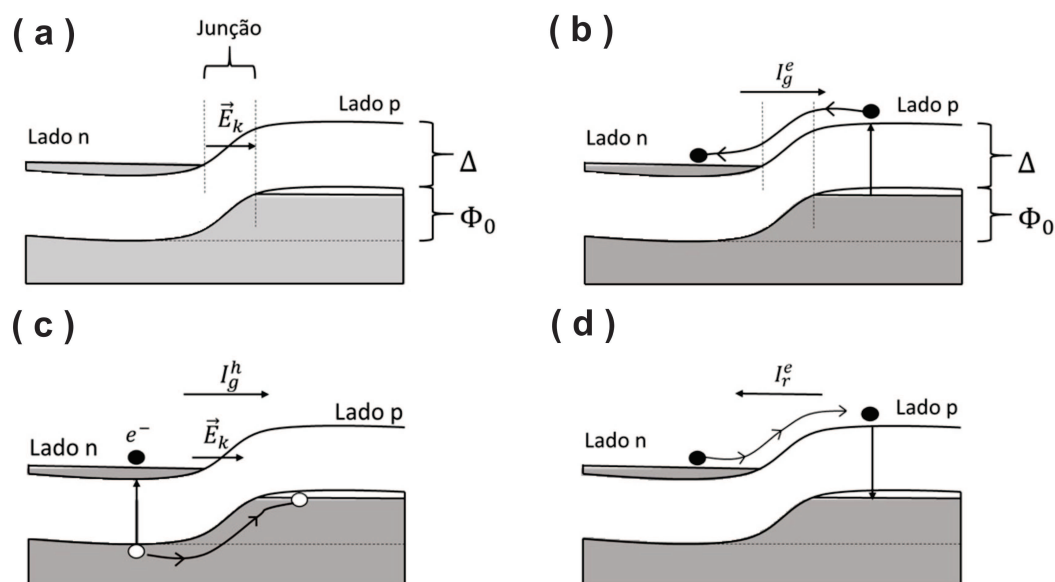


Figura 2.3: (a) Surgimento do Campo elétrico na Junção. (b) Elétrons sendo acelerados do lado P para o lado N. (c) Geração da corrente de buracos para o lado P. (d) Elétrons que recombinaem com buracos do lado P e decaem para banda de valência.

Alguns elétrons que estão na banda de valência do lado P conseguem vencer o gap Δ e vão para banda de condução. Esses elétrons ao entrarem na região da junção são acelerados pelo campo elétrico E_k e atingem o lado N [3]. Esse processo dá origem à corrente I_g^e , como ilustra a Figura 2.3(b). Existem elétrons no lado N que estão na banda de valência e conseguem atingir a banda de condução, deixando um buraco na banda de valência.

Esse movimento coletivo de elétrons na banda de valência é equivalente ao movimento de buracos em direção ao lado P, dando origem a corrente I_g^h como mostra a Figura 2.3(c) [3]. O campo elétrico E_k acelera os buracos que entram na região da junção do lado N para o lado P. Os elétrons próximos da junção que estão na banda de condução do lado N, conseguem vencer a diferença de energia Φ_0 , chegam na banda de condução no lado P, recombinam-se com os buracos ali existentes e decaem para banda de valência do lado P [3], como ilustra a Figura 2.3(d).

2.3 Heterojunção.

A união de dois materiais intrinsecamente distintos, dá origem a uma junção chamada heterojunção. Por exemplo, uma junção metal-semicondutor. Essas junções são úteis na confecção de dispositivos de alta frequência que apresentam chaveamento rápido. As características de uma heterojunção é dependente da função trabalho W_0 dos materiais. Essa função é definida como a energia mínima necessária para retirar um elétron do interior do material e levá-lo para fora da superfície do material [1].

Nos metais os elétrons mais energéticos estão no nível de Fermi, então a função trabalho nos metais é dada por $W_0 \equiv E_0 - E_F$, onde E_0 é a energia do elétron no vácuo e E_F é a energia do elétron no nível de Fermi, como ilustra a Figura 2.4(a).

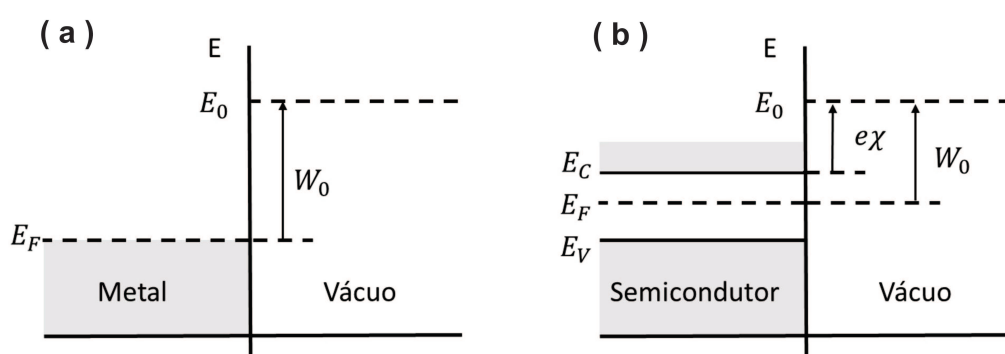


Figura 2.4: (a) Representação da função trabalho no diagrama de energia de um metal. (b) Representação da função trabalho e da afinidade eletrônica no diagrama de energia de um semicondutor.

Nos semicondutores a função trabalho também é definida como $W_0 \equiv E_0 - E_F$. Porém

metal-semicondutor, a corrente é dominada por portadores majoritários. Esse processo envolve a emissão de elétrons do metal, semelhante ao que ocorre em uma válvula a vácuo, onde elétrons são emitidos de um catodo quente. Tal processo é conhecido como emissão termiônica [1].

2.5 Magnetorresistência.

A presença de um campo magnético externo pode causar a alteração da resistência ao transporte de carga em certos materiais. Esse efeito é conhecido como magnetorresistência. Existem vários tipos de magnetorresistência, nesta seção serão abordados a magnetorresistência ordinária e a magnetorresistência anisotrópica.

2.5.1 Magnetorresistência Ordinária.

Quando um condutor elétrico que transporta uma corrente é colocado perpendicularmente na presença de um campo magnético, uma diferença de potencial transversal surge no condutor. Esse fenômeno, descoberto em 1879 por Edwin Hall ficou conhecido como Efeito Hall [6]. Esse efeito desvia os portadores de carga da sua trajetória original, pois a presença do campo magnético externo sobre o material, faz surgir a força de Lorentz dada pela seguinte equação,

$$\mathbf{F} = \mu_0 q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.0)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, q a carga dos portadores, \mathbf{v} a velocidade dos portadores e \mathbf{B} o campo magnético externo. Essa força atua sobre os portadores de carga fazendo-os orbitar em torno do campo magnético em órbitas circulares, até que sofram espalhamentos para em seguida entrarem novamente em outra órbita circular, como mostra a Figura 2.6.

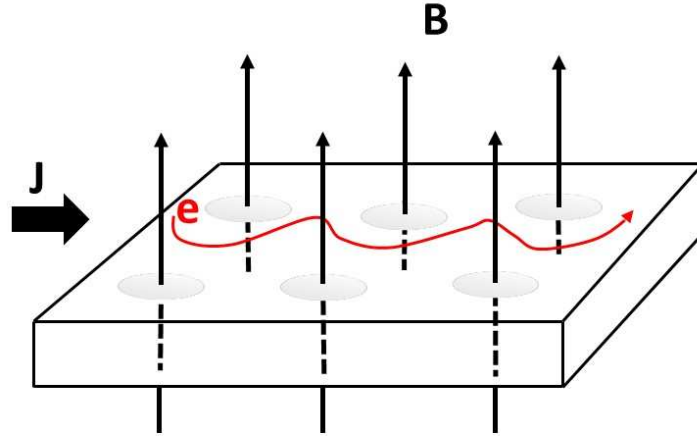


Figura 2.6: Modelo para ilustrar o fenômeno de Magnetorresistência Ordinária.

Esse processo acontece continuamente enquanto o campo externo estiver atuando, diminuindo o tempo de relaxação e consequentemente aumentando a resistividade elétrica do material, pois a resistividade ρ do material é dada por [5],

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (2.0)$$

onde n é a densidade de elétrons que compõe a corrente elétrica, e é a carga desses elétrons e τ o tempo de relaxação, isto é, o tempo médio entre os espalhamentos. Para descrever analiticamente a alteração da resistividade ρ sob influência de um campo externo \mathbf{B} , Kohler apresentou a equação 2.5.1 [5], que ficou conhecida como a regra de Kohler. Onde $\Delta\rho$ é a diferença entre a resistividade na ausência de campo e a resistividade na presença de campo magnético. Uma curva típica da magnetorresistência ordinária é ilustrada na Figura 2.7.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \propto \left(\frac{B}{\rho}\right)^2 \quad (2.0)$$

O físico estadunidense Frederick Seitz propôs em 1950 uma equação para a magnetorresistência ordinária em cristais [7], tal equação mostra que a magnetorresistência varia com o quadrado do campo magnético, como mostrado por Kohler e depende de propriedades do cristal como orientação dos planos atômicos, tempo de relaxação, direção de aplicação da corrente e do campo magnético, por essa razão a curva típica apresenta um comportamento simétrico para campos positivos e negativos.

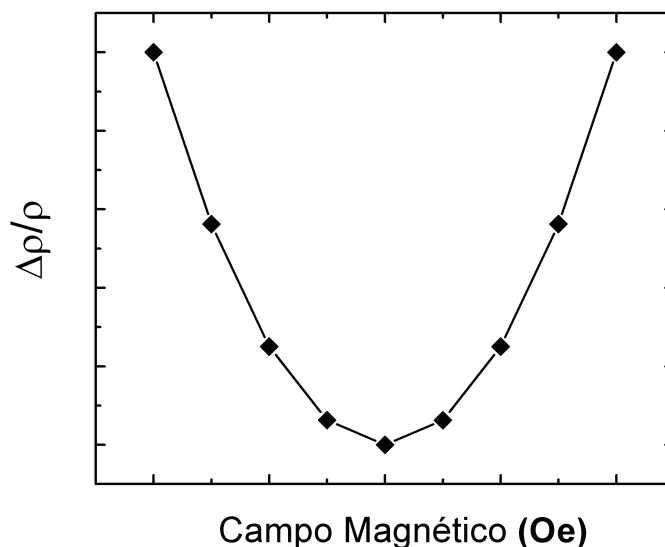


Figura 2.7: *Curva típica de Magnetorresistência Ordinária*

2.5.2 Magnetorresistência Anisotrópica.

Em física o termo anisotropia é comumente utilizado para descrever efeitos que tem dependência assimétrica com a direção da medida. O fenômeno de Magnetorresistência anisotrópica (AMR) é comum a todos materiais ferromagnéticos e mostra a dependência da resistência elétrica com a orientação do campo magnético e direção de aplicação da corrente [5].

Para orientação longitudinal, isto é, campo aplicado paralelo a corrente, a resistência do material aumenta com o aumento do campo. Para orientação transversal, ou seja, campo aplicado perpendicular à corrente (no plano da amostra), a resistência do material diminui com o aumento do campo, a Figura 2.8 mostra duas curvas características de AMR, na configuração longitudinal e transversal.

A separação entre os picos mostrados na Figura 2.8, origina-se da coercividade do material [5]. Ao aplicar um campo externo, os domínios magnéticos do material ferromagnético tendem a se alinhar com o campo. A medida que o campo cresce, mais domínios magnéticos se alinham, até atingir a saturação. Momento em que todos os domínios se agrupam formando um monodomínio alinhado com o campo. Quando a saturação é atingida, a resistência do material atinge um valor constante, como mostra a Figura 2.8.

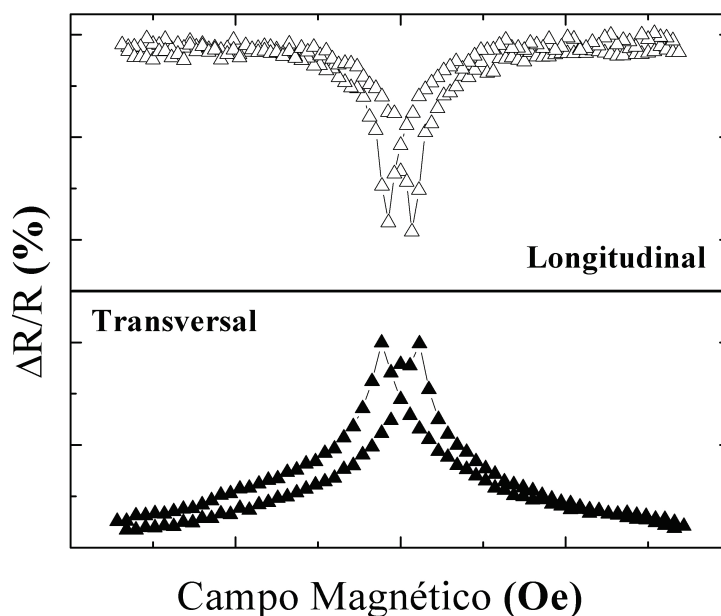


Figura 2.8: *Curvas características de AMR em ligas de FeNi; Nas configurações Longitudinal e Transversal.*

Após a saturação, ao diminuir o campo magnético externo, os domínios do material tendem a se desalinhar, até que para um certo campo, ocorre a inversão da magnetização, esse campo é chamado de campo coercivo. O valor do campo coercivo é obtido no pico da AMR da Figura 2.8. A coercividade é uma propriedade intrínseca dos metais ferromagnéticos e está intimamente associado com a sua dureza magnética dos metais. Materiais magneticamente duros necessitam de campos magnéticos maiores para inverter a magnetização, isto é, os campos coercivos apresentam valores mais altos. Materiais magneticamente macios necessitam de campos magnéticos menores para inverter a magnetização, isto é, os campos coercivos apresentam valores mais baixos.

A lei de Kohler é generalizada para campos mais intensos, onde a magnetização é saturada e aparece a contribuição da MR ordinária que varia com B^2 , essa generalização é feita pela equação 2.5.2 [5]. O primeiro termo da equação é devido a MR ordinária e o segundo termo devido a magnetorresistência anisotrópica. Nos materiais ferromagnéticos as densidades de spin Up e spin Down no nível de Fermi são diferentes, como ilustra a Figura 2.9. A energia média dos elétrons que participam do transporte de carga é

representada pelo nível de Fermi [5].

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \propto \left(\frac{B}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{M}{\rho}\right)^2 \quad (2.0)$$

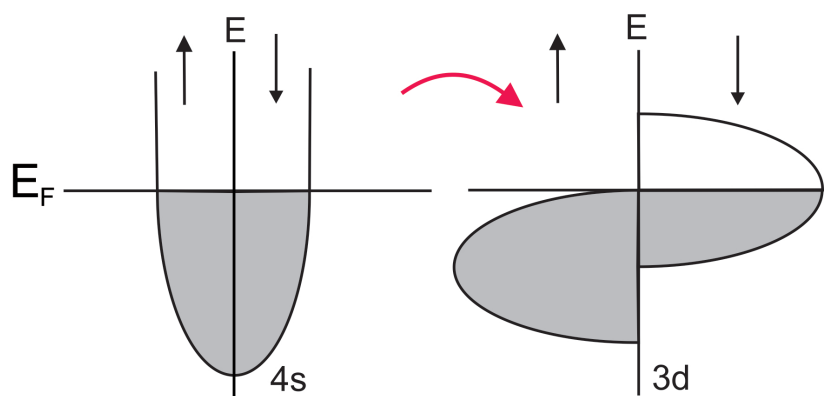


Figura 2.9: *Espalhamento de elétrons do orbital "s" para os estados "d" desocupados, devido as diferentes densidades no orbital "d".*

A probabilidade de espalhamentos dos elétrons livres para os estados "d" aumenta quando a densidade desses estados é alta. O surgimento desses espalhamentos diminui o tempo de relaxação e com isso aumenta a resistividade. O ângulo formado entre a direção da densidade de corrente \mathbf{J} e a magnetização \mathbf{M} , devido a presença do campo externo aplicado, influencia na ocorrência de espalhamentos s-d [5]. Essa influência é ilustrada através da representação gráfica das densidades de estado 3d na Figura 2.10

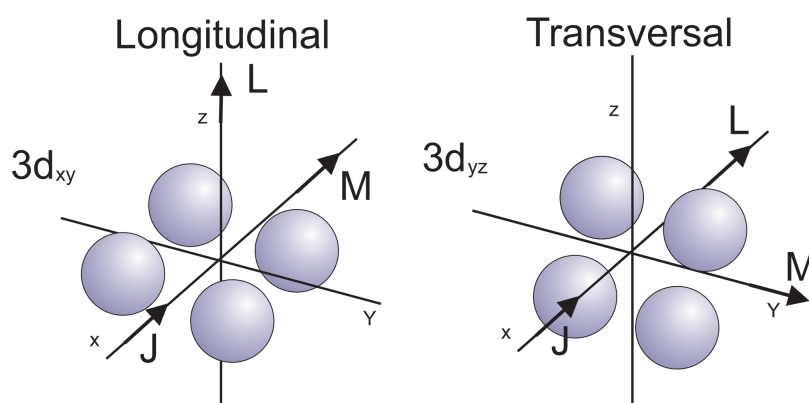


Figura 2.10: *Representação gráfica das densidades de estados desocupados 3d mostrando as direções do Momento Angular L , da densidade de corrente J e da Magnetização M .*

Na configuração longitudinal, a densidade de corrente \mathbf{J} e a magnetização \mathbf{M} são perpendiculares ao momento angular \mathbf{L} . Os estados desocupados estão no plano xy que é o

mesmo plano de \mathbf{J} , portanto os espalhamentos s-d aumentam. Na configuração transversal, a densidade de corrente \mathbf{J} é paralela ao momento angular \mathbf{L} . Os estados “d” desocupados estão no plano yz, perpendicular a \mathbf{J} . Como os estados desocupados estão em um plano perpendicular ao plano que contém \mathbf{J} , a seção de choque é menor e os espalhamentos s-d diminuem [5]. Por essa razão, a resistência do material aumenta na presença de um campo externo na configuração longitudinal e diminui quando a configuração é transversal.

2.6 Transistor de base metálica.

O transistor de base metálica (TBM) é um dispositivo de três terminais conhecidos como emissor, base e coletor [8]. Esses terminais são compostos por dois materiais semicondutores separados por um metal, como ilustra a Figura 2.11. Foi o primeiro transistor de elétrons quentes, associado a corrente de emissão termiônica, semelhante ao que acontece com um cátodo quente de uma válvula a vácuo.

Nesse dispositivo desenvolvido por Atalla, Kahng e Geppert em 1962, a corrente é injetada pelo emissor, alcançando o coletor, passando pela base por tunelamento. Devido as heterojunções existentes, o TBM contém duas barreiras Schottky [8]. Uma barreira na junção emissor-base e a outra na junção base-coletor. A fundamental limitação desses dispositivos são os baixos valores de ganho de corrente, consequência de fenômenos como espalhamentos na base, reflexão na junção base-coletor de origem quanto-mecânica e a interação com fônons no coletor.

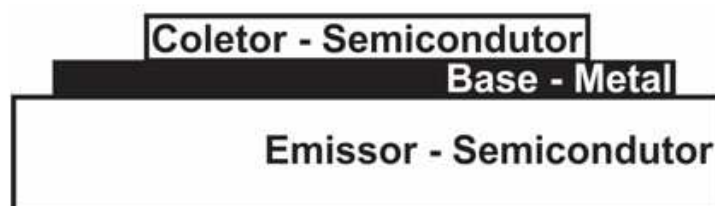


Figura 2.11: *Estrutura lateral de um transistor de base metálica.*

Em condições normais de operação, o TBM é diretamente polarizado na junção emissor-base, enquanto na junção base-coletor é reversamente polarizado. A corrente direta através da barreira Schottky é devido à emissão termiônica dos portadores majoritários

[8]. A densidade de corrente é dada pela equação 2.6, onde A é a constante de Richardson, T a temperatura, K a constante de Boltzmann e ϕ_{bE} o potencial da junção base-emissor. O primeiro termo da equação 2.6 representa o valor da densidade corrente em um dos sentidos no equilíbrio termodinâmico, sendo conhecida como j_0 e está expressado na equação 2.6.

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bE}}{KT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_{bE}}{KT}\right) - 1 \right] \quad (2.0)$$

$$j_0 = AT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bE}}{KT}\right) \quad (2.0)$$

As equações 2.6 e 2.6 descrevem o comportamento de uma junção Schottky ideal e não levam em consideração alguns mecanismos como [45]: altura de barreira dependente do potencial, oxidação da interface, recombinação na região de depleção, existência de estados de superfície no semicondutor e variações da altura da barreira Schottky [46].

Como as equações descrevem uma situação ideal, para ajustar os dados experimentais com a teoria, é introduzido o fator de idealidade, representado pela letra “ n ”, que computa o desvio das medidas em relação à teoria [3,8,45]. Sendo assim a equação 2.6 se torna a equação 2.6. Para os casos em que a teoria termiônica explica o transporte de carga, o fator de idealidade “ n ” é igual a 1. A corrente de difusão dos portadores minoritários J_{pE} é desprezível. Os elétrons que dão origem à corrente direta sofrem inúmeros mecanismos de perda que estão representados pela equação 2.6.

$$J = j_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{bE}}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2.0)$$

$$J_{nC} = \alpha_T J_{nE} = \alpha_B \alpha_{BC} \alpha_C J_{nE} \quad (2.0)$$

Onde $\alpha_T = \alpha_B \alpha_{BC} \alpha_C$ é o fator de transporte na base dos elétrons que possuem energia maior que a altura de barreira, i.e dos elétrons quentes. A Figura 2.12 ilustra o diagrama de energia de um TBM, mostrando a contribuição dos coeficientes para as perdas na base. O coeficiente α_B computa o espalhamento dos elétrons na base metálica do TBM, sendo mostrado na equação 2.6 [8,9], onde l_{mB} é o livre caminho médio dos portadores na base metálica e x_B é a espessura física da base do TBM. Por essa equação nota-se a necessidade de pequenas espessuras para a base, a fim de minimizar os espalhamentos na mesma.

$$\alpha_B = \exp\left(\frac{-x_B}{l_{mB}}\right) \quad (2.0)$$

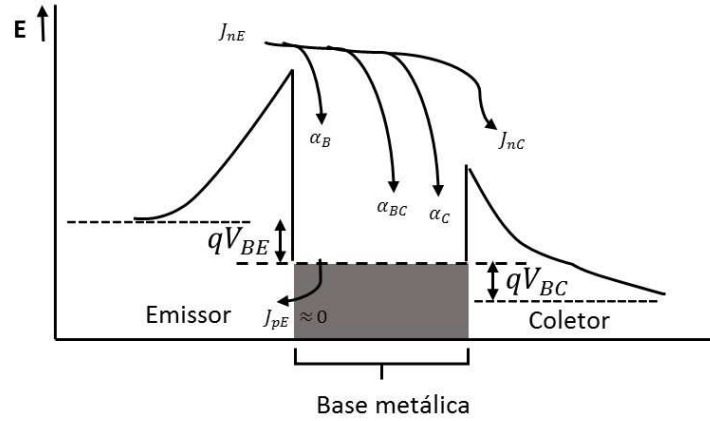


Figura 2.12: Diagrama de Energia de um TBM representando as perdas pelos mecanismos na base.

O coeficiente α_{BC} é devido às reflexões quanto-mecânicas que ocorrem na interface da junção base-coletor, sendo expressa pela equação 2.6 [8], onde E é a energia dos elétrons que se encontram no nível de Fermi do metal, que em primeira aproximação é igual à altura de barreira do emissor-base, $q\phi_{bE}$.

$$\alpha_{BC} \approx 1 - \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{q\phi_{BC}}{E}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{q\phi_{BC}}{E}}} \right)^2 \quad (2.0)$$

Para um dispositivo simétrico, ou seja, um dispositivo que tenha os mesmos materiais semicondutores, como ilustra a Figura 2.13(a), $E \approx q\phi_{bE} \approx q\phi_{BC}$ como é mostrado na Figura 2.13(b), fazendo com que, pela equação 2.6 $\alpha_{BC} \approx 0$. Sendo $\alpha_{BC} \approx 0$, nenhum elétron alcançará o coletor, como pode ser visto pela equação 2.6.

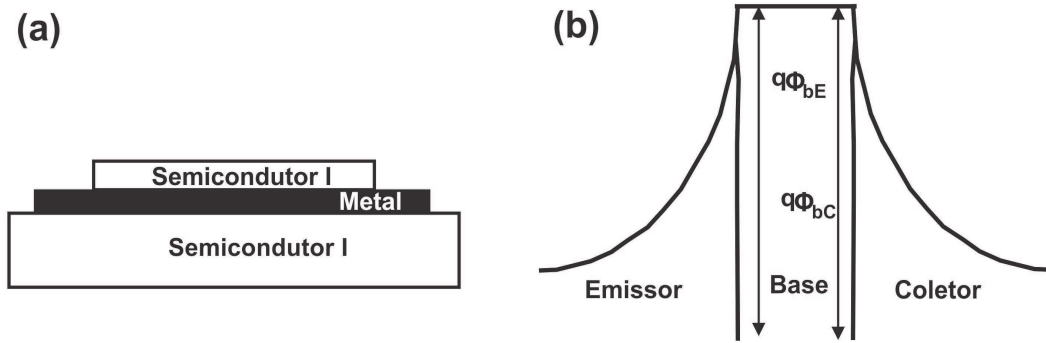


Figura 2.13: (a) Estrutura lateral de um TBM simétrico. (b) Diagrama de energia de um TBM simétrico.

Portanto é desejável um dispositivo assimétrico como ilustra a Figura 2.14(a)(b), com $q\phi_{bE} > q\phi_{bC}$ afim de $\alpha_{BC} \neq 0$. Sendo esse coeficiente diferente de zero então os elétrons agora poderão atingir o coletor, uma vez que possuem uma energia superior à altura de barreira $q\phi_{bE}$.

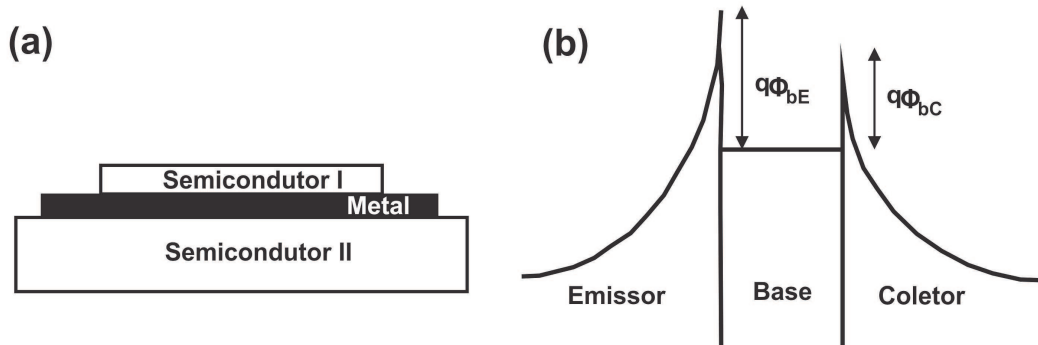


Figura 2.14: (a) Estrutura lateral de um TBM assimétrico (b) Diagrama de energia de um TBM assimétrico.

A eficiência do coletor α_C depende do espalhamento dos elétrons que estão dentro da região x_m , e do livre caminho médio l_{mC} , e é dada pela equação 2.6 [8,9], sendo que a região x_m representa o valor de profundidade do coletor e é dependente da intensidade do campo elétrico na região de depleção, diminuindo para altos valores de campo [8].

$$\alpha_C = \exp\left(\frac{-x_m}{l_{mC}}\right) \quad (2.0)$$

Os TBM's podem ser utilizados na configuração base comum e emissor comum. Na configuração base comum, o ganho de corrente α é definido como,

$$\alpha = \frac{J_C}{J_E} \quad (2.0)$$

onde J_c e J_E são a densidade de corrente no coletor e no emissor, respectivamente. Se considerarmos somente a contribuição dos portadores majoritários na corrente, que é uma aproximação real, pois J_{pE} é desprezível, o valor de ganho é equivalente ao fator α_T discutido anteriormente. Na configuração de emissor comum, o ganho de corrente β é definido como,

$$\beta = \frac{J_C}{J_B} \quad (2.0)$$

onde J_B é a densidade de corrente injetada na base. Existe uma relação entre α e β que pode ser encontrada explorando as condições de contorno com o transistor polarizado nas duas configurações. Essa relação está expressa na equação 2.6, a parte dentro do parênteses expõe uma complicada dependência de aspectos relacionados ao transporte nas duas interfaces.

$$\beta = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left\{ 1 + \frac{\frac{\partial I_C}{\partial V_{BC}}}{\frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}}} \right\} \quad (2.0)$$

Essa relação pode ser simplificada com excelente reprodutibilidade para transistores bipolares com junções de alta qualidade, baseados em junção pn na equação 2.6. Para esses casos, a corrente I_C (corrente de coletor) não varia com o potencial V_{BC} aplicado entre a base e o coletor.

$$\beta = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (2.0)$$

2.7 Materiais ferromagnéticos

2.7.1 Ligas de FeNi

A composição ferro e níquel (FeNi) da origem a um grande número de ligas com propriedades térmicas e magnéticas especiais, chamando a atenção de vários pesquisadores em torno do mundo. Na verdade, essas ligas ferromagnéticas apresentam comportamentos anômalos no volume atômico, no módulo de elasticidade, na capacidade de calor, na magnetização e na temperatura Curie [24]. Existem duas fases cristalinas para as ligas

de FeNi, cúbica de face centrada (FCC) quando a liga possui uma concentração maior de níquel (Ni) e cúbica de corpo centrado (BCC) quando a liga possui uma concentração maior de ferro (Fe) e ambas fases coexistem para concentrações intermediárias. A Figura 2.15 ilustra a rede cristalina das ligas de FeNi nas duas fases.

De todas ligas possíveis de FeNi, destaca-se a liga de composição $Ni_{1-x}Fe_x$, $x \sim 19\%$ conhecida como permalloy. É uma liga com grande permeabilidade, baixa coercividade e baixa anisotropia magnética [28,31,32]. O Permalloy, especificamente, foi proposto na década de 20 e tem sido estudado desde lá, tanto do ponto de vista acadêmico quanto do ponto de vista industrial. Vem sendo utilizado na construção de dispositivos eletrônicos como, sensores magnéticos e cabeças leitoras de discos rígidos [28,31,33].

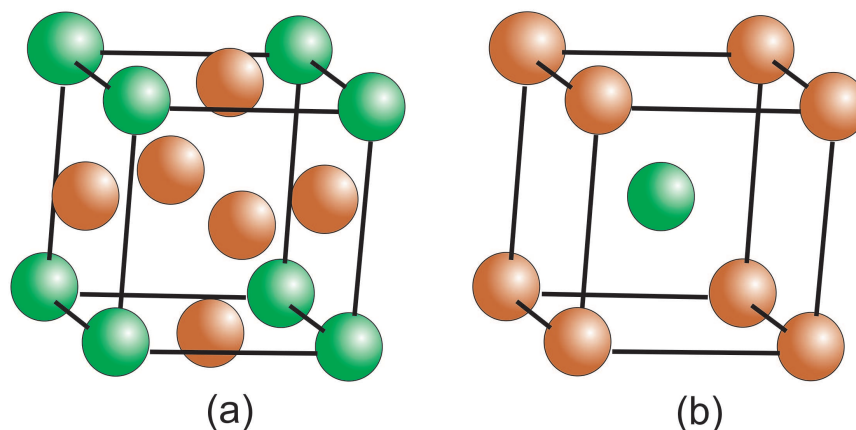


Figura 2.15: Fases cristalinas das ligas de FeNi, onde os átomos de Ni são representados por esferas verdes e átomos de Fe representados por esferas marrons: (a) cúbica de face centrada; (b) cúbica de corpo centrado.

2.8 Óxidos Semicondutores

2.8.1 Óxido de Zinco - ZnO

Há algumas décadas os setores da indústria e da pesquisa despertaram interesse em filmes de óxidos condutores e transparentes. Esses materiais começaram a ser investigados por apresentarem um potencial para utilização em aplicação tecnológicas relacionadas a dispositivos optoeletrônicos [9]. O óxido de zinco (ZnO) é um óxido semicondutor que possui um gap direto de 3,37eV à 300K e alta estabilidade química. Outro fator que aumenta a atratividade do ZnO é a variedade de técnicas na qual ele pode ser sintetizado,

como evaporação por feixe de elétrons, sputtering, pulverização catódica, eletrodeposição etc. [15].

As características intrínsecas como propriedades eletrônicas e estruturais, são importantes em aplicações tecnológicas como células solares, diodos de emissão UV, etc. Com o avanço da tecnologia o ZnO tornou-se mais popular na composição de nanopartículas, nanotubos entre outros [8,25,27]. O ZnO também apresenta propriedades mecânicas de grande importância, como por exemplo, dureza, rigidez, piezoelectricidade, etc. [15,25,26,27]. Além disso, o Zinco incorpora-se na estrutura cristalina do ZnO como átomo intersticial, isto é, ocupa um local na estrutura cristalina em que geralmente não há um átomo. E o oxigênio incorpora-se como vacância.

A posição do zinco gera uma espécie de defeito cristalográfico que ionizam e doam elétrons para banda de condução, tornando o ZnO intrinsecamente do tipo-n [29]. A wurtzita é a forma cristalizada do ZnO à temperatura e pressão ambiente e apresenta uma simetria hexagonal como ilustra a Figura 2.16.

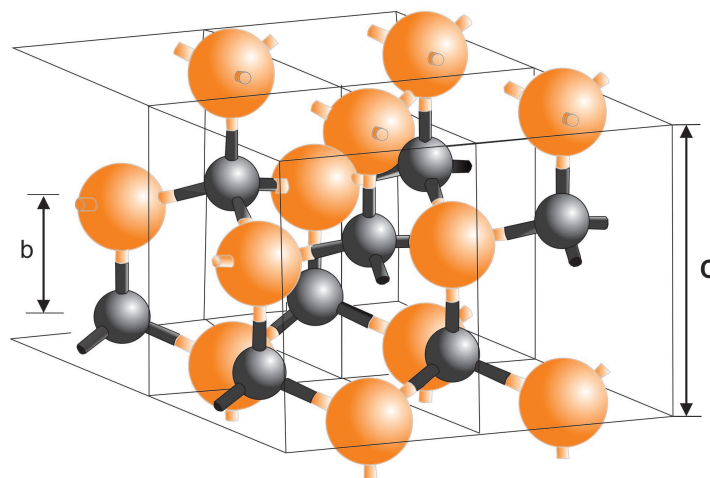


Figura 2.16: *Estrutura hexagonal do tipo wurtzita do ZnO. As esferas laranjas representam os átomos de O e as esferas pretas os átomos de Zn. Os parâmetros de rede são descritos como a , b e c com $a = b \neq c$ [29].*

A wurtzita é formada por 4 átomos, dois de oxigênio e dois de zinco. A mesma apresenta duas sub-redes de Zn^{2+} e O^{2-} , onde cada íon de Zn está rodeado por íons de oxigênio, num arranjo tetraédrico. Esse arranjo produz uma simetria polar ao longo do eixo-c da sua estrutura hexagonal [14,25,26,29]. A Figura 2.17 ilustra outras formas de cristalização do ZnO.

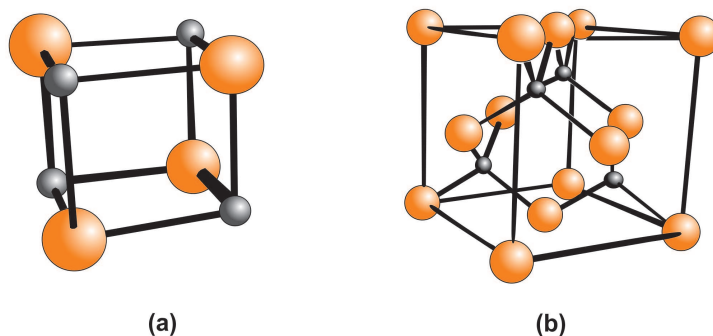


Figura 2.17: Outras estruturas possíveis do ZnO. (a) Estrutura cristalina do NaCl e (b) blenda de zinco. Os átomos de O são representados pelas esferas laranjas, e os átomos de Zn estão representados pelas esferas pretas [29].

Na faixa de comprimentos de onda de 300nm à 1200nm os filmes finos de ZnO são transparentes, dependendo da concentração de portadores, que depende do processo de dopagem [29,30]. As propriedades elétricas dos filmes de ZnO são variáveis, pois elas dependem do processo de síntese e/ou crescimento do mesmo [29].

Capítulo 3

Procedimentos e técnicas experimentais.

3.1 Eletrodeposição

3.1.1 Eletroquímica

Uma reação eletroquímica é um processo que envolve interfaces sólido/solução, portanto é um processo químico heterogêneo, onde ocorre transferências de cargas que levam à formação de eletrodepósitos. Essa transferência de cargas ocorre em uma célula eletroquímica composta por dois eletrodos condutores imersos em um eletrólito [10].

As reações de oxi-redução ocorrem nos eletrodos. No eletrodo de trabalho ocorrem as reações de redução de íons levando a formação de depósitos, tal eletrodo possui polarização negativa, sendo o cátodo do circuito. No contra-eletrodo, ocorrem as reações de oxidação. Este possui polarização positiva, sendo o ânodo do circuito.

O eletrólito é um condutor elétrico de natureza líquida que contém íons positivos e negativos resultante da dissociação de sais metálicos. O transporte de cargas ocorre por meio desses íons. Uma voltagem externa é aplicada entre os eletrodos, fazendo surgir uma corrente elétrica por difusão ou migração de espécies carregadas presentes no eletrólito. A Figura 3.1 ilustra um esboço representativo de uma célula eletroquímica e seus principais componentes.

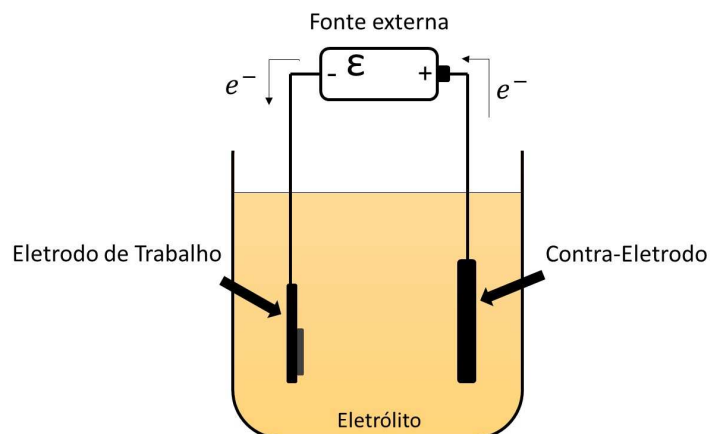


Figura 3.1: *Representação esquemática de uma célula eletroquímica.*

No eletrodo de trabalho ocorrem as reações mais importantes, como por exemplo, a reação $Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu^0$, onde íons metálicos de cobre sofrem redução com o recebimento de dois elétrons doados pelo eletrodo de trabalho [11]. A reação mais provável que ocorre no contra-eletródo, para um eletrodo inerte em meio aquoso é a eletrólise da água, que através da reação $H_2O \rightarrow 2H + \frac{1}{2}O_2 + 2e$ formam H^+ e O_2 . Na eletrólise elétrons são doados para o contra-eletródo fechando o circuito na célula eletroquímica.

Nos eletrólitos, todo potencial aplicado na célula aparece numa região carregada próxima aos eletrodos, chamada de dupla camada. A medição da queda de potencial nestas regiões é monitorada com o auxílio de um eletrodo de referência. Em geral são utilizados eletrodos de calomelano Hg/Hg_2Cl_2 . O uso do eletrodo de referência possibilita a medida do potencial em cada eletrodo isoladamente [10]. A Figura 3.2(a) ilustra uma célula eletroquímica com um eletrodo de referência entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletródo, e um potenciostato.

Para controlar a diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletródo, o potenciostato mantém uma diferença de potencial aplicada entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência. Este modo de deposição, com potencial constante é chamado potenciostática. O potenciostato também é empregado para técnica de voltametria, que consiste na aplicação de uma rampa de potencial no eletrodo de trabalho e na medida de resposta da corrente elétrica na célula. Uma curva característica dessa técnica é chamada de voltamograma. A Figura 3.2(b) ilustra um voltamograma típico de um processo de

redução de um metal.

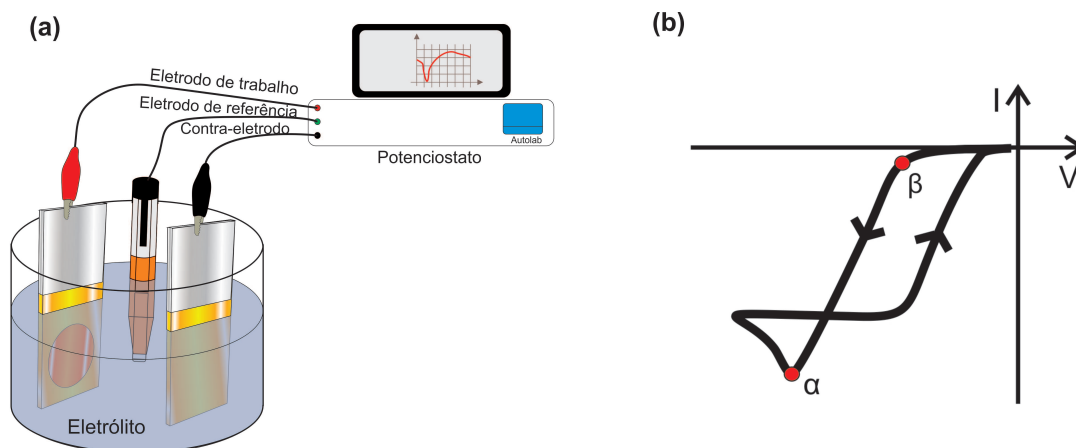


Figura 3.2: (a) Esquema da célula eletroquímica com potenciostato e eletrodo de referência (b) Curva característica da técnica de voltametria.

O ponto β na Figura 3.2(b) mostra o potencial mínimo no cátodo para ocorrência da reação de redução. O ponto α , chamado de pico de redução, corresponde à máxima corrente obtida para uma dada faixa de variação de potencial. A taxa de varredura do potencial influencia na intensidade do pico e estabelece o gradiente de concentração de espécies reduzidas na interface eletrodo/eletrólito.

3.1.2 Transporte de massa

Em geral, em sistemas eletroquímicos é necessário considerar três modos de transporte de massa: difusão, convecção e migração [10,11,12]. Em regiões próximas ao eletrodo, espécies são consumidas ou geradas, dando origem a um gradiente de concentração que causa o transporte de massa por difusão. No eletrodo de trabalho, a concentração de espécies iônicas é reduzida, formando uma região de depleção chamada de camada difusa. A Figura 3.3 ilustra a camada difusa em um gráfico de variação de concentração de substâncias iônicas no eletrólito em função da distância ao eletrodo.

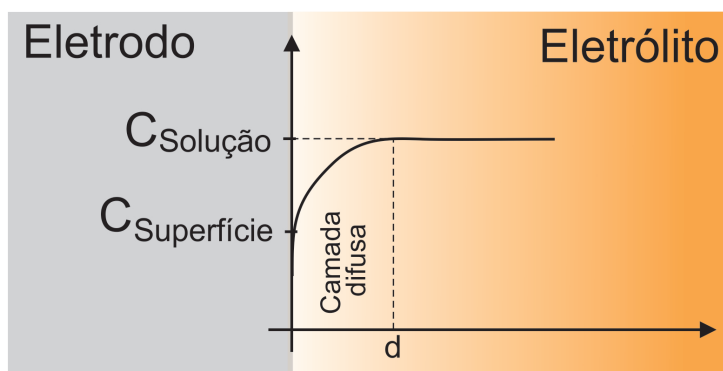


Figura 3.3: *Representação da camada difusa.*

O processo de deposição é controlado por difusão quando a taxa de reação no eletrodo é muito elevada. Quando a taxa é lenta, o processo de deposição é controlado pela cinética da reação. Nas regiões afastadas dos eletrodos, o transporte de massa ocorre por convecção, causada pelas flutuações na concentração das espécies, ou por migração dos íons, causada pela presença do campo elétrico existente devido ao potencial aplicado [11].

A atração eletrostática entre os íons e moléculas polares da água, presentes no eletrólito, geram íons solvatados que se deslocam pela camada difusa até atingirem o eletrodo de trabalho. Nesse momento, elétrons do eletrodo são doados a esses íons que perdem a esfera de solvatação e são adsorvidos na superfície, onde ficam conhecidos como adátomos [11,12]. A propagação dos adátomos pela superfície leva à formação de aglomerados, que se unem formando núcleos para o crescimento do depósito. Esse modelo de crescimento está ilustrado esquematicamente na Figura 3.4.

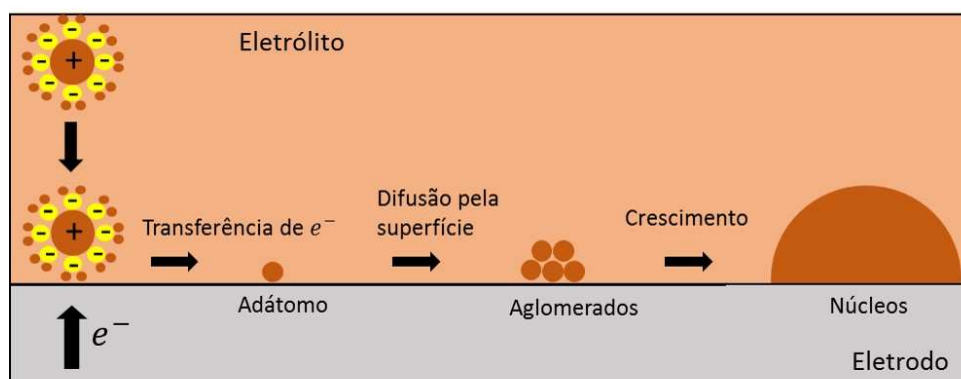
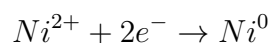
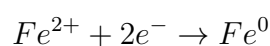


Figura 3.4: *Modelo de crescimento de eletrodepósitos.*

3.1.3 Transporte de carga

O processo de eletrodeposição ocorre por reações de redução, que consiste na transferência de elétrons do eletrodo para íons da solução. O número de íons reduzidos pode ser determinado medindo-se a corrente na célula eletroquímica. A quantidade de material depositado pode ser estimada com base na carga elétrica depositada [11,12].

Para ser uma boa estimativa, é feita uma idealização que considera que todos os íons reduzidos são agregados no depósito e que esteja ocorrendo apenas uma reação de redução. Neste trabalho foram crescidos por eletrodeposição filmes finos de FeNi. O ferro e o níquel presentes na solução estão sendo reduzidos segundo as reações [10]:



A equação $Q = Nne = it$ determina a quantidade de material depositado. Onde N é o número de átomos, "e" é a carga elementar do elétron e "n" é o número de elétrons reduzidos por átomo. O número N pode ser escrito como, mN_A/M , onde m é a massa de material eletrodepositado, N_A é o número de Avogadro e M é o peso atômico. Para obter a espessura do filme é necessário conhecer a densidade do material, $d = m/v$, a carga $Q = Nne$ e estimar a altura através da relação $h = v/A$, onde A é a área do depósito e v o volume de material depositado. Utilizando essas equações a espessura do material pode ser expressa como,

$$h = \frac{MQ}{ndAF} \quad (3-2)$$

onde F é a constante de Faraday, $F = N_Ae$. Neste trabalho foram realizados depósitos de ligas de FeNi sobre substrato de Si tipo N, orientação 100 e resistividade 2,55 – 3,45 $\Omega.cm$, para formar a base do dispositivo. O eletrólito utilizado para obtenção das ligas de FeNi foi baseado na referência [13], sendo as seguintes substâncias em suas quantidades para 100ml de água deionizada:

- * 700mM $NiSO_4$
- * 30mM $FeSO_4$
- * 20mM $NiCl_2$
- * 16mM *Sacarina*
- * 400mM H_3BO_3

Para produção das amostras, a limpeza do substrato é de fundamental importância. A limpeza do substrato consistiu em um banho ultrassônico de 10 minutos em acetona, a fim de remover sujeiras do substrato e em seguida enxaguado com água DI. Para remoção da camada de óxido nativo do substrato foi utilizado uma solução com 2% de HF (ácido fluorídrico) por 60 segundos.

Após a limpeza do substrato, uma liga de Gálio-Índio (Ga In) foi passado na parte de trás do silício e no eletrodo de trabalho para obtenção de um contato ôhmico entre eles. Em seguida, o eletrodo de trabalho e o substrato (Si) foram envolvidos por uma máscara plástica previamente vazada no formato circular, com área de $0,33\text{cm}^2$. A Figura 3.5 ilustra esse processo de preparação do eletrodo de trabalho que será utilizado na célula eletroquímica.

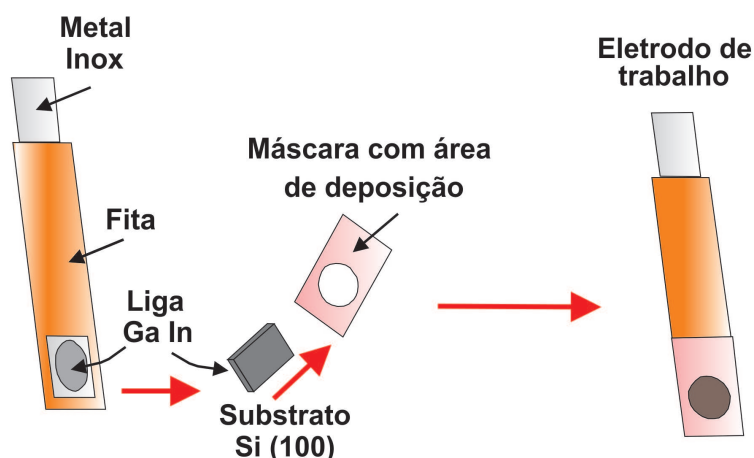


Figura 3.5: *Processo de preparação do eletrodo de trabalho.*

As deposições dos filmes de FeNi foram realizadas no modo galvanostático, isto é, corrente constante. Quando este modo de eletrodeposição é utilizado, a área de deposição deve ser levada em consideração. Para área utilizada, foi usada a corrente de $-2,258\text{mA}$. Foram realizadas várias deposições com tempos de depósitos diferentes. A amostra de 15 segundos de deposição foi escolhida por estar pouco acima do tempo de percolação apresentando um filme percolado de mínima espessura. O filme apresentou um caráter dourado metálico e boa aderência no substrato.

Para crescer o emissor/coletor, foram depositados filmes finos de óxido de zinco (ZnO) em uma área de $0,15\text{cm}^2$ sobre os filmes de FeNi. O eletrólito utilizado foi baseado

na referência [14], sendo 0,1M de $Zn(NO_3)_2$ para 100ml de água DI. A deposição foi realizada no modo potenciostático, isto é, potencial constante. O potencial de redução do ZnO utilizado foi de -1,3V, de acordo com a referência [14,15], e à temperatura de 70°C, sob agitação magnética. O tempo de deposição foi de 80s. O filme apresentou um caráter poroso e uma espessura de aproximadamente 200nm.

3.2 Evaporação térmica

A técnica de evaporação térmica para o crescimento de filmes finos começou a ser utilizada somente nos últimos 50 anos, pois somente nesses últimos anos que a tecnologia de vácuo ficou bem consolidada, como também o avanço no desenvolvimento de cadinhos que suportem altas temperaturas para geração de efeito Joule [16]. Nesse processo de crescimento, os filmes são obtidos em uma câmara sob pressão reduzida. A necessidade da baixa pressão se faz necessária para que o livre caminho médio seja maior que a distância entre o cadinho e o substrato, a fim de aumentar a qualidade do filme. O livre caminho médio é expresso pela seguinte equação [16,17],

$$\lambda = \frac{K_B T}{P \pi d^2 \sqrt{2}} \quad (3.-2)$$

onde K_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura dentro da câmara, P é a pressão no interior da câmara e “ d ” é o diâmetro médio das partículas. A Figura 3.6 ilustra um diagrama do sistema de evaporação térmica com seus principais componentes.

Para obter os filmes, é colocado no cadinho o material que se deseja depositar e no suporte superior é colocado o substrato. A câmara é então fechada e a pressão começa a ser diminuída, utilizando bombas de vácuo. Quando a pressão atinge 10^{-7} Torr o processo de evaporação é iniciado. Uma corrente elétrica é passada pelo cadinho e, por efeito Joule, o material começa a evaporar-se e átomos do alvo atingem o substrato iniciando o processo de crescimento.

Neste trabalho, a técnica de evaporação térmica foi utilizada para o crescimento de filmes finos de alumínio. Estes filmes foram crescidos sobre o ZnO a fim de se obter um contato ôhmico [18]. Foi utilizada uma taxa de crescimento 0,5 Å/s e um filme de aproximadamente 60nm foi obtido.

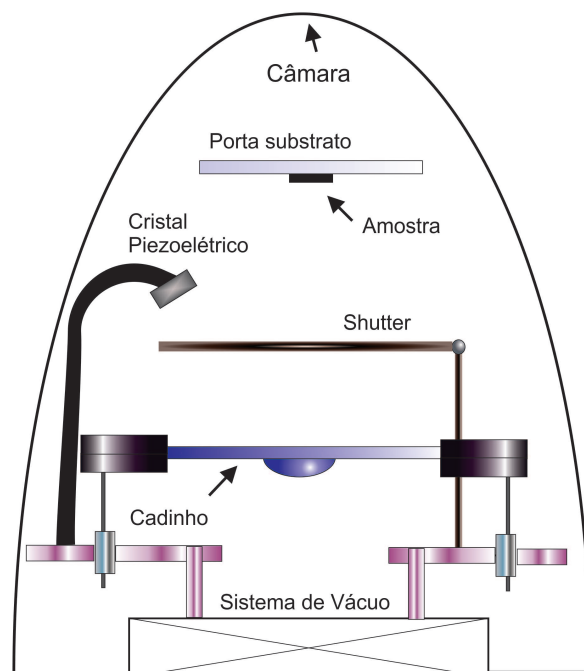


Figura 3.6: Principais componentes de um sistema de evaporação térmica.

3.3 Caracterização morfológica

Afim de se verificar a composição dos filmes obtidos para construção do dispositivo, foram realizadas medidas de difração de raio-X nas amostras de FeNi e ZnO.

3.3.1 Difração de raio X - DRX

Em 1912 com a descoberta da difração de raio-X, foi possível confirmar a periodicidade dos cristais. O físico M. von Laue formulou a teoria de difração de raio-X com base nesse arranjo periódico dos átomos. Esses átomos estão regularmente espaçados em uma rede, onde estes espaçamentos interatômico possuem a mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do raio-x [2].

Por terem a mesma magnitude, é possível observar fenômenos de interferência construtiva e destrutiva quando um feixe de raios-X incidem sobre um arranjo periódico de átomos [19,20]. Por essa razão os raios-X tornaram-se apropriados para essa tarefa. O fenômeno de difração pode ser explicado pela reflexão dos raios-X pelos planos cristalinos, como é ilustrado na Figura 3.7. A diferença de caminho dos feixes difratados pelos sucessivos planos do material é descrita pela lei de Bragg [19],

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta \quad (3.-2)$$

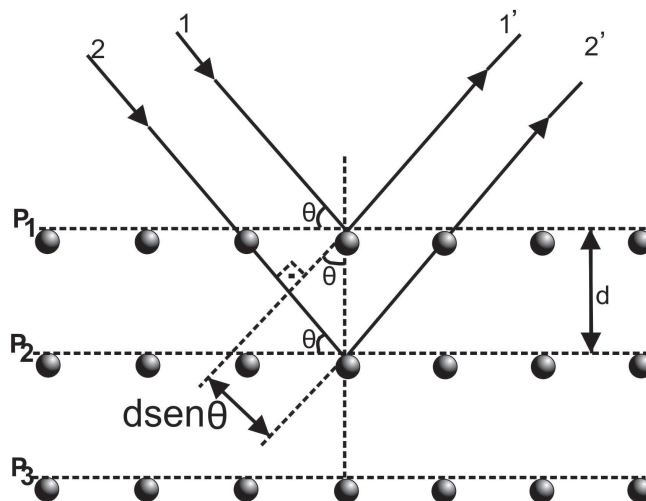


Figura 3.7: Difração de raio-X pelos planos cristalinos P_1 e P_2 .

Para realizar medidas de difração de raio-X, um feixe de raios-X é incidido sobre a amostra fazendo um ângulo “ θ ” com a superfície da mesma. Um detector de fótons é utilizado para medir a radiação que é difratada pela amostra. A Figura 3.8 ilustra os principais componentes e um método simplificado de operação. A fonte emite raios-X que serão difratados pela amostra e em seguida coletados pelo detector.

A amostra gira com velocidade angular constante e o detector gira em torno da amostra com velocidade angular duas vezes maior, sendo assim o ângulo de difração o dobro do ângulo de incidência. Quando o ângulo “ θ ” satisfizer a lei de Bragg, ocorrerá interferência construtiva, isto é, do ponto de vista do detector, mais fótons o alcançarão, fazendo com que surja um pico de intensidade [20].

Neste trabalho foram realizadas medidas de DRX na amostra de 15s de FeNi e na amostra de ZnO. Foi utilizado o equipamento D8 Discover da Bruker, na configuração $\theta - 2\theta$ onde foi confirmada a presença de ligas de FeNi e ZnO.

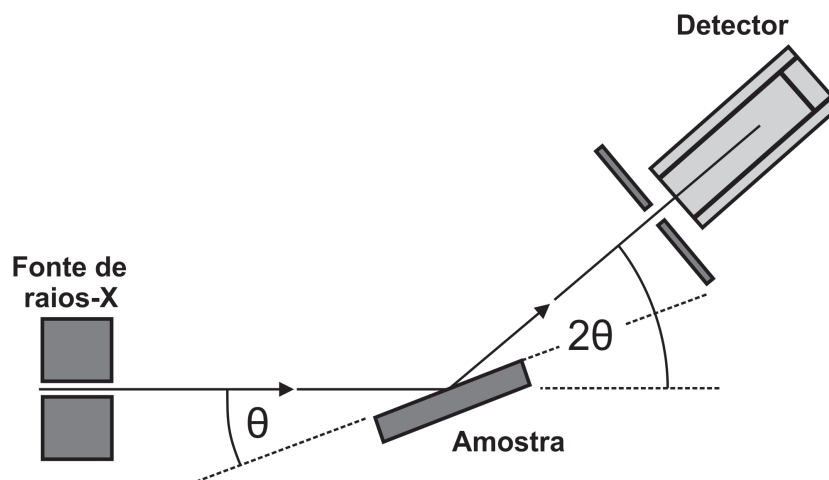


Figura 3.8: *Representação esquemática do aparato experimental.*

3.4 Caracterização topográfica

A fim de se obter informações topográficas do dispositivo, e principalmente a existência de defeitos que funcionam como curto-circuitos para as correntes elétricas nas junções, chamados pin holes, foi utilizado um microscópio de força atômica (AFM).

3.4.1 Microscopia de força atômica - AFM

A técnica de AFM possibilita a investigação de topografias de materiais condutores e isolantes [21]. O AFM é constituído basicamente por uma ponta anexada a uma haste flexível conhecida como *cantilever*, um posicionador piezoelétrico, um sistema de monitoramento da interação da sonda com a superfície da amostra, sistema de posicionamento da sonda e um software que controla todo o sistema.

O AFM pode ser utilizado no modo contato, no modo contato intermitente e no modo de não contato. No modo contato, os átomos localizados na extremidade da ponta sentem uma pequena força repulsiva devido à interação entre os seus elétrons orbitais e os da superfície da amostra. No modo intermitente o sistema determina a oscilação do *cantilever* em uma frequência de ressonância fazendo a ponta tocar periodicamente a superfície da amostra. Nesse tipo de medida o AFM opera em dois regimes de força: ora atrativa ora repulsiva.

No modo não contato, a ponta permanece alguns nanômetros da amostra e pode-se

mapear três tipos de gradientes de força: a eletrostática, a magnética e a de Van der Waals. Esse tipo de medida tem sua resolução limitada pela distância entre a ponta e a amostra [21]. A Figura 3.9(a) ilustra a força de interação entre os átomos da ponta da sonda e os átomos da superfície da amostra em função da distância de separação.

A Figura 3.9(b) ilustra esquematicamente o funcionamento do AFM e seus principais componentes. A ponta que está fixa no *cantilever* faz a varredura da amostra, um feixe de laser é refletido pelo *cantilever* e atinge o detector. As imagens são geradas pela deflexão do feixe de laser, causada pela movimentação do *cantilever*. O tipo de movimentação do *cantilever* por sua vez depende da topografia analisada. O sistema de monitoramento registra esse sinal e converte em uma imagem 3 – D , mostrando a topografia da superfície da amostra.

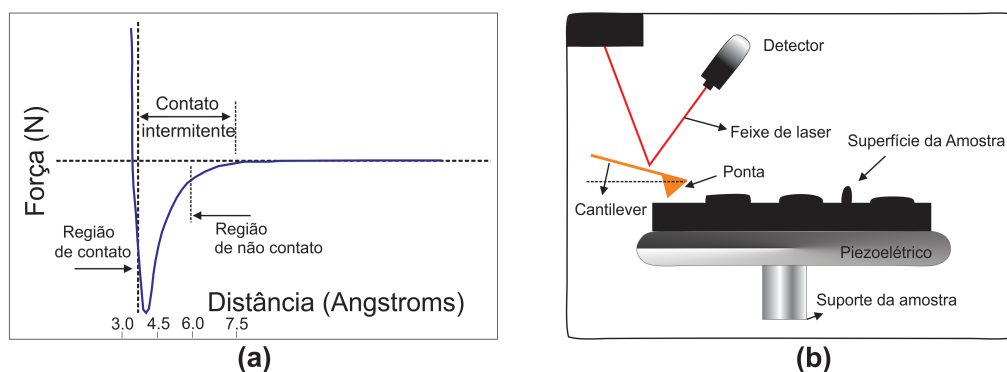


Figura 3.9: (a) Representação da força em cada modo de operação do AFM. (b) Esquema de funcionamento do AFM e seus principais componentes.

As medidas de AFM neste trabalho foram realizadas no modo contato nos filmes de Fe-Ni e foi verificado a existência de *pin roles*, como será mostrado e discutido nos resultados. Para os depósitos de ZnO foi possível visualizar a superfície e a mesma apresentou alta rugosidade.

3.5 Caracterização elétrica

3.5.1 Curvas $i \times V$

Foram realizadas medidas de corrente por tensão nos filmes de FeNi a fim de encontrar o tempo de percolação e auxiliar na escolha da amostra com menor tempo de deposição que esteja percolada.

Foram realizadas medidas elétricas como curvas de corrente por tensão para verificação da existência de diodos Schottky. Essas medidas foram realizadas nas junções Si-n/FeNi e FeNi/ZnO para determinação das alturas de barreiras e foi verificado a existência de barreiras Schottky. É importante conhecer essas alturas de barreiras para determinar qual semicondutor será utilizado como emissor e qual será utilizado como coletor no dispositivo final (TBM). Uma curva característica de diodo é mostrado na Figura 3.10.

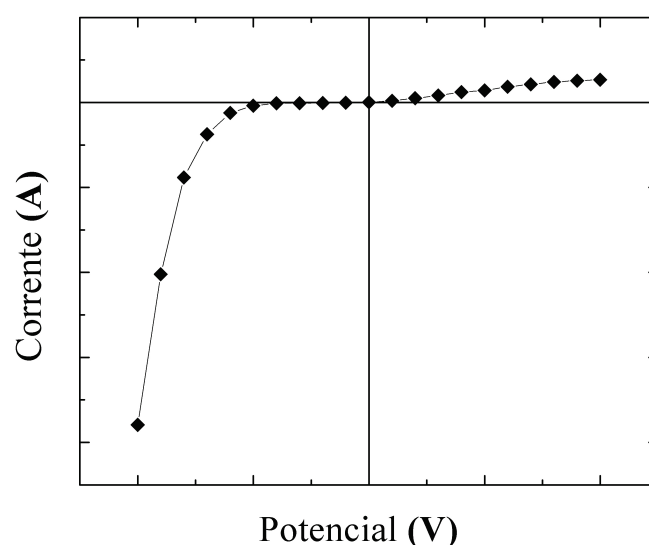


Figura 3.10: *Curva característica de um Diodo Schottky.*

3.6 Caracterização magnética

3.6.1 *Setup* MR - Magnetômetro de efeito Kerr

Foram realizadas medidas de magnetorresistência (MR) na base do TBM utilizando um *setup* de MR composto por um criostato e um eletroímã, a fim de verificar o comportamento do dispositivo na presença de campos magnéticos. Curvas de magnetorresistência longitudinal e transversal foram obtidas, mostrando a anisotropia da liga de FeNi utilizada como a base metálica do TBM, como previsto na literatura [5]. A Figura 3.11 mostra o *setup* utilizado no Laboratório de Spintrônica e Nanomagnetismo (LabSpin) da Universidade Federal de Viçosa.

Para obter informações sobre a dureza magnética [51] do material foram realizadas medidas de magnetometria Kerr. Nesse tipo de medida, uma luz polarizada linearmente é incidida sobre uma superfície magnetizada. Essa luz é afetada pela magnetização desta superfície, sendo refletida e tornando-se, no caso mais geral, elipticamente polarizada com seu eixo maior rodado de um ângulo θ_K (ângulo Kerr) em relação à polarização da luz incidente [22].

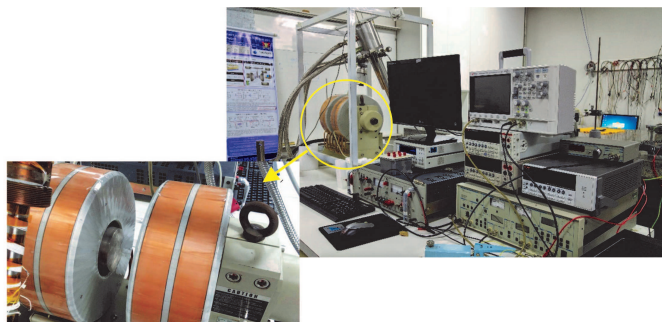


Figura 3.11: *Setup de MR destacando o criostato e o eletroímã, LabSpin - UFV.*

O efeito Kerr pode ser dividido em dois regimes distintos relacionados com a espessura da superfície magnética refletora e o comprimento de penetração da luz incidente. O regime conhecido como *MOKE* (Magneto-optical Kerr Effect) e o *SMOKE* (Surface Magneto-optical Kerr Effect). O regime utilizado foi o de *SMOKE*, onde a espessura da superfície é bem maior que o comprimento de penetração.

Para realização da medida foi utilizado um laser de 15mW com comprimento de onda de 632,8nm, um *chopper* para fazer a seleção de frequência, dois polarizadores, um eletroímã, um fotodiodo para receber o sinal, e um *lockin* para interpretar o sinal e enviar ao *software*. O *software* utilizado para caracterização magnética foi desenvolvido pelo grupo de *Spintrônica e Nanomagnetismo do LabSpin*. A Figura 3.12 mostra a parte principal do aparato utilizado na mesa óptica.

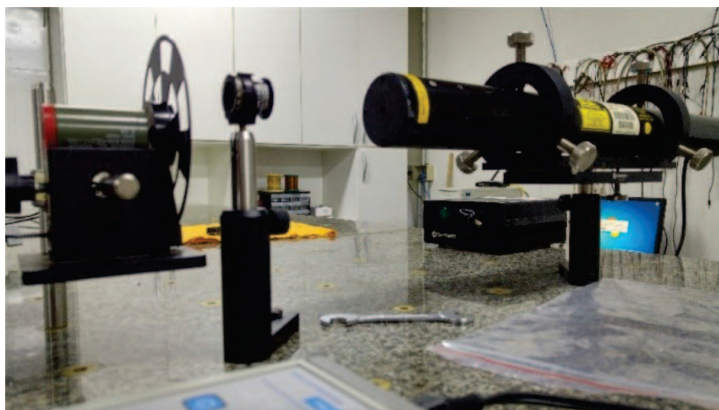


Figura 3.12: *Montagem do magnetômetro na mesa óptica. Na imagem segue o laser utilizado, um polarizador e o chopper, LabSpin - UFV*

A curva de Sinal Kerr por campo magnético foi obtida e o valor do campo coercivo da liga de FeNi para a amostra de 15s foi determinado. Uma curva característica desse tipo de medida é ilustrada na Figura 3.13, e é conhecida como curva de histerese magnética.

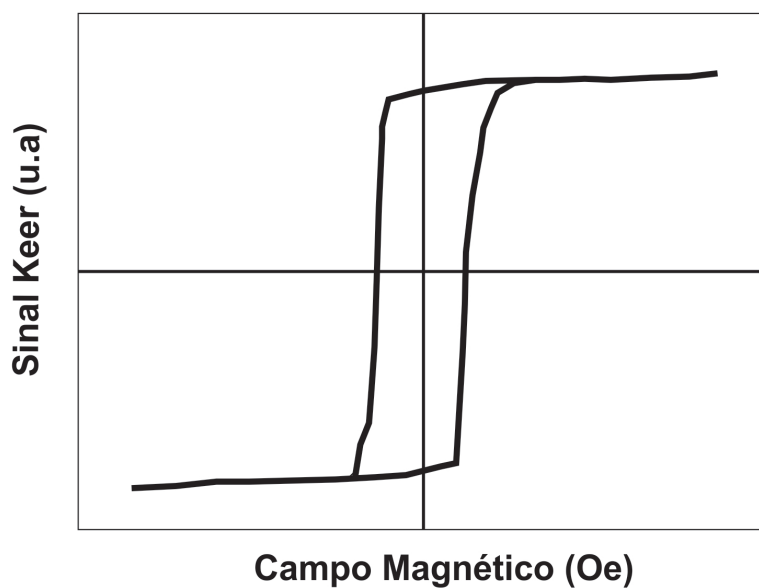


Figura 3.13: *Curva característica de histerese magnética em materiais ferromagnéticos.*

3.7 Curvas de transistor

Os transistores podem ser ligados em três configurações; base comum, emissor comum e coletor comum. Neste trabalho foram utilizadas as configurações mais usuais, base comum

e emissor comum para verificar a eficiência de transporte e amplificação do dispositivo. As curvas obtidas nas configurações medidas, são conhecidas como curvas de transistor.

3.7.1 Base-comum

Na configuração base comum, a corrente é injetada na junção emissor/base no sentido do emissor para base e outra corrente é medida na junção base/coletor como ilustra a Figura 3.14.

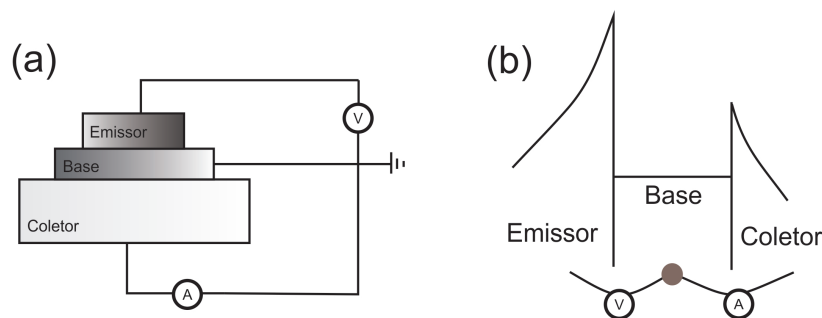


Figura 3.14: (a) Vista lateral de um transistor em base-comum. (b) Diagrama de energia ilustrando a configuração base-comum.

3.7.2 Emissor-comum

Na configuração emissor comum, uma corrente é injetada na base, enquanto o emissor é diretamente ligado ao coletor evitando a fuga dos elétrons que escoariam pela base devido aos espalhamentos. Aumentando assim o número de elétrons que alcançam o coletor. Por essa razão essa configuração é conhecida como modo de amplificação. A Figura 3.15 ilustra a configuração de emissor comum.

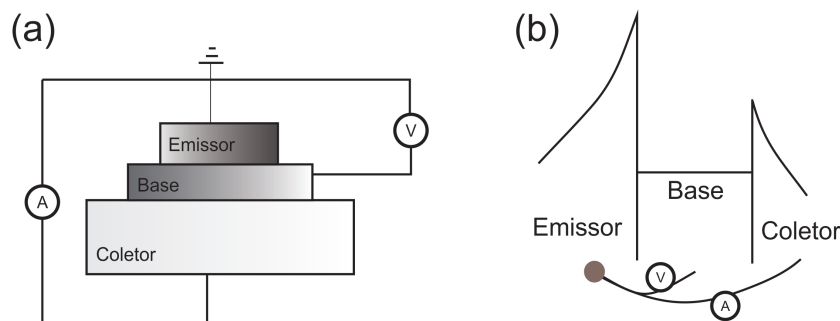


Figura 3.15: (a) Vista lateral de um transistor em emissor-comum. (b) Diagrama de energia ilustrando a configuração emissor-comum.

Capítulo 4

Resultados e discussões.

4.1 Construção e caracterização da base - FeNi

4.1.1 Voltametria e eletrodeposição

Na Figura 4.1(a) é apresentado o voltamograma obtido para o eletrólito de deposição que contém sais de Ni e de Fe. A taxa de varredura de potencial foi de 20mV/s e o pico de redução é observado para -1,086V vs. SCE (eletrodo de calomelano). O potencial de circuito aberto é -0,27V vs. SCE. Este voltamograma foi realizado em um substrato de silício de 1cm^2 . A corrente associada ao potencial de redução nesse substrato é de -6,84mA. Ocorre a dissolução da camada eletrodepositada para potenciais mais positivos que -0,1V vs. SCE, apontando que a barreira Schottky formada na interface FeNi/Si não é efetiva para segurar o fluxo de elétrons para a reação de oxidação. O voltamograma obtido é similar ao encontrado na literatura [23], mostrando a reprodutibilidade do processo de eletrodeposição de ligas de FeNi.

As amostras foram eletrodepositadas com intervalos de tempo entre 5 e 100s. O potencial entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletrodo varia de acordo com a taxa de reação de redução na superfície da amostra. Essa variação tem como objetivo manter a corrente constante durante o processo de deposição. O gráfico da Figura 4.1(b) mostra a variação do potencial em função do tempo, para tempos mais longos de deposição o potencial tende para -1.0 V vs. SCE, a semelhança dos transientes de potencial garante a reprodutibilidade da técnica.

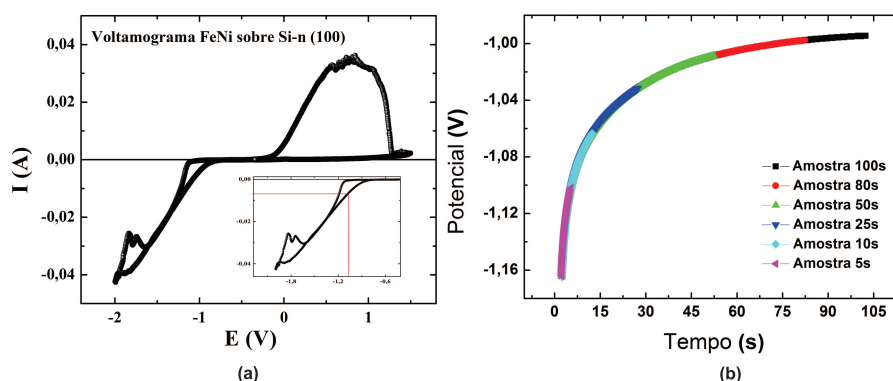


Figura 4.1: (a) Voltamograma com início em $-0,27V$ vs SCE variando entre $1,5V$ e $-2,0V$. (b) Transiente de potencial das amostras eletrodepositadas com tempos entre 5 e $100s$ e corrente $-2,26mA$.

A espessura teórica dos depósitos é calculada utilizando-se a equação 3.1.3. A densidade utilizada é média a ponderada entre as densidades do ferro e do níquel, que são respectivamente $7,874g/cm^3$ e $8,908g/cm^3$ e o peso atômico utilizado é a média ponderada entre os pesos atômicos do ferro e do níquel, que são respectivamente $55,847g.mol^{-1}$ e $58,693g.mol^{-1}$. A equação 4.1.1 possibilita a previsão teórica das espessuras em nanômetros das ligas de FeNi, depositadas sobre uma área de $0,332cm^2$, em função do tempo.

$$h = 2,5.t \quad (4.0)$$

O gráfico da Figura 4.2 mostra a variação da espessura em função do tempo de deposição, previsto pela equação 4.1.1.

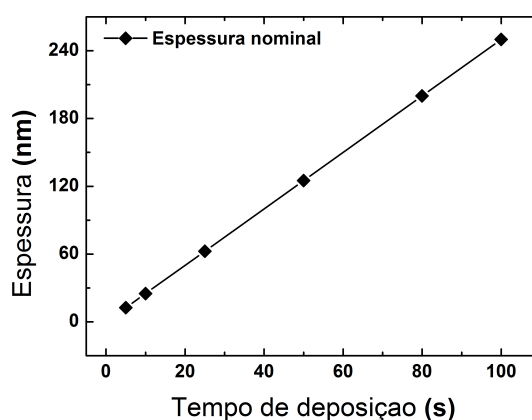


Figura 4.2: Espessura das deposição de 5 a $100s$ variando num intervalo entre $12,5$ a $250nm$.

4.1.2 Medidas elétricas

Nesta seção serão apresentadas as medidas elétricas realizadas em estruturas de FeNi sobre Si. As medidas elétricas descrevem o comportamento da resistência da estrutura em função do tempo de deposição. O objetivo destas medidas é estudar o comportamento elétrico e as propriedades de transporte nestas interfaces. Na Figura 4.3 é estudada a estrutura FeNi/Si-n, com os contatos de índio sobre a superfície do depósito de FeNi, distanciados de 3mm para diferentes tempos de deposição. Nesta configuração o contato é ôhmico e para as amostras de 5 a 100s a resistência varia num intervalo entre 496 e 8 Ω , respectivamente.

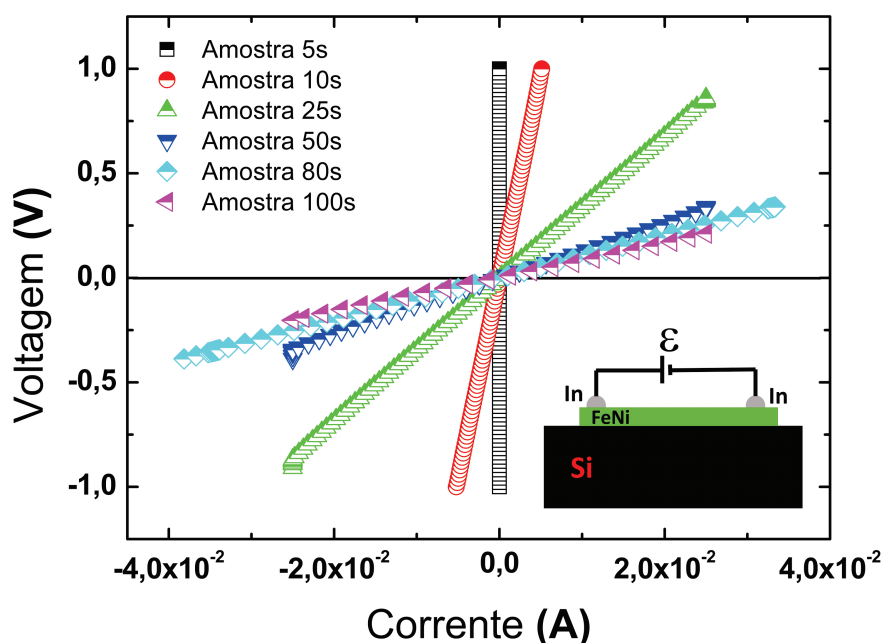


Figura 4.3: Curva $V \times I$ para a estrutura de FeNi/Si-n para diferentes tempos de deposição.

A estrutura da amostra altera a resistência à injeção de elétrons no semicondutor. Isto é, na presença de aglomerados de FeNi, os elétrons são forçados a passar pelo semicondutor, como ilustrado na Figura 4.4(a)(b), aumentando a resistência da amostra. Para filmes fechados de FeNi os elétrons injetados não passam pelo semicondutor, passam somente pelo filme metálico de FeNi, como ilustrado na Figura 4.4(c). Por essa razão, as amostras de maiores tempos de deposição apresentam menores resistências. Na Figura 4.5 é apresentada a curva de resistência em função do tempo de eletrodeposição das diferentes amostras, chamada curva de percolação.

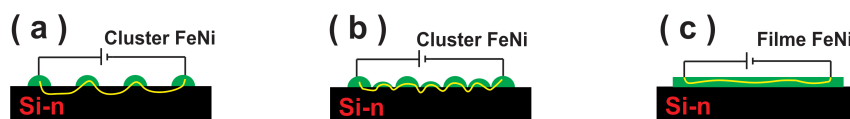


Figura 4.4: Modelo ilustrando a corrente passando por diferentes amostras. (a) Amostra de 10s; (b) Amostra de 15s; e (c) Amostra de 50s. Relação entre as resistências, $R_a > R_b > R_c$.

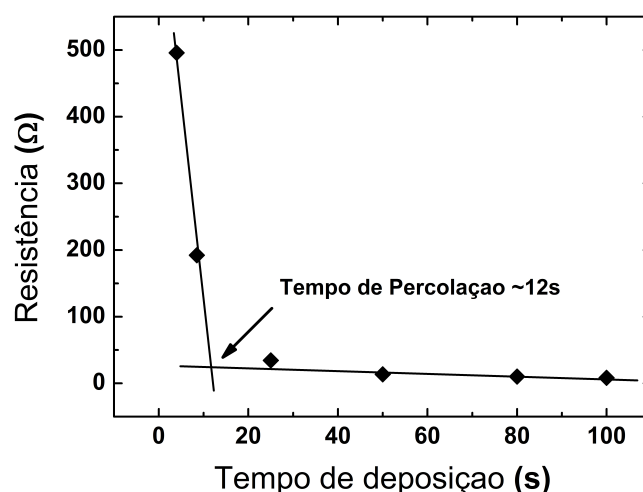


Figura 4.5: Curva de Percolação apresentando a intersecção das retas assintóticas em 12s.

As amostras com baixos tempos de eletrodeposição contêm pouco material ferromagnético depositado, apresentando altas resistências como pode ser observado no extremo esquerdo da curva de percolação. Para tempos maiores de eletrodeposição, os filmes de FeNi estão fechados sobre o substrato de silício, apresentando baixas resistências, pois os elétrons passam pelo filme de FeNi ao invés de passarem pelo silício. O ponto onde as retas assintóticas se encontram é chamado ponto de percolação e significa o ponto onde os aglomerados começam a se juntar formando depósitos fechados.

4.1.3 Medidas magnéticas

Para verificar o comportamento magnético a amostra foi submetida a caracterizações magnéticas. Nesta seção serão apresentadas as curvas de magnetorresistência longitudinal e transversal, ou seja, com a corrente paralela e perpendicular ao campo magnético externo aplicado e uma curva de histerese magnética, obtida através da magnetometria de efeito Kerr. Essas medidas foram realizadas na amostra de 15 segundos de eletrodeposição

de FeNi.

Na Figura 4.6, nota-se que há um aumento na resistência com o aumento do campo. Esse efeito caracteriza a AMR longitudinal presente nos materiais ferromagnéticos, como foi discutido no Capítulo 2. Através dessa curva foi determinado uma variação de 0,13% na resistência da liga de FeNi. Esse valor baixo de AMR pode ser explicado ao comparar com a literatura [50]. Para uma amostra de $Ni_{80}Fe_{20}$ (permalloy), uma AMR de 2% é observada à temperatura ambiente [50]. O permalloy possui a melhor composição dentre as ligas de FeNi do ponto de vista magnético [28,31,32]. Sendo assim, é esperado valores inferiores de AMR para ligas FeNi diferentes de $Ni_{80}Fe_{20}$.

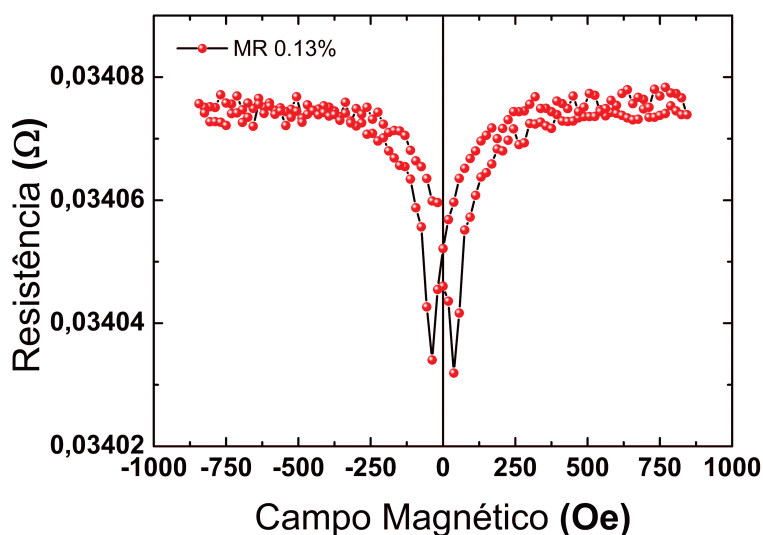


Figura 4.6: AMR longitudinal em liga de FeNi sobre Si-n, amostra de 15s de deposição.

De acordo com a Figura 4.6 é possível extrair o valor de campo magnético necessário para saturação da amostra. Para a amostra utilizada, foi necessário um campo de $\sim 400Oe$ para saturação da magnetização, isto é, para orientar todos os spins do material na direção do campo magnético externo. A separação entre os picos determina a coercividade do material [5], a partir da Figura 4.6 foi possível determinar um campo coercivo $H_c \sim 70Oe$.

Na Figura 4.7, nota-se que há um decréscimo da resistência com o aumento do campo. Esse efeito caracteriza a AMR transversal. Através dessa curva foi determinado uma variação de 0,31% na resistência da liga de FeNi. Essa variação encontrada é bem próxima do valor obtido na configuração longitudinal, mostrando que a liga possui baixa anisotropia magnética. Confirmando o resultado anterior, um campo coercivo de $H_c \sim$

70Oe foi determinado com base nessa curva.

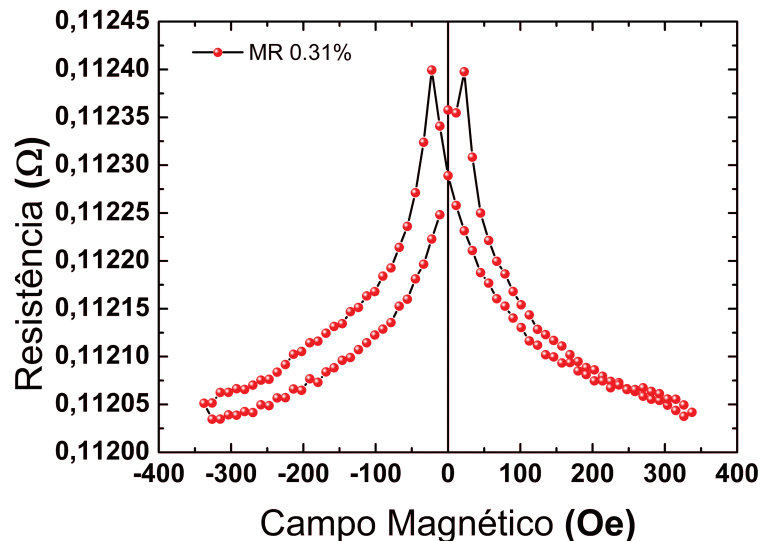


Figura 4.7: AMR Transversal em liga de FeNi sobre Si-n, amostra de 15s de deposição.

A Figura 4.8 mostra uma curva típica de histerese magnética para liga de FeNi de 15s de deposição. Os resultados que são possíveis extrair dessa curva são os mesmos já obtidos na caracterização magnetorresistiva. A importância da utilização de outra técnica de caracterização é a confirmação dos resultados. Na Figura 4.8, é possível determinar um campo de $\sim 400\text{Oe}$ para saturação da amostra e um campo coercivo de $H_c \sim 70\text{Oe}$. De acordo com a literatura [51], materiais que possuem alta coercividade, são materiais ferromagnéticos duros e aqueles que possuem uma baixa coercividade, são materiais ferromagnéticos moles ou doces.

Materiais ferromagnéticos que possuem um campo coercivo de até 8000A/m , isto é, 100Oe são considerados materiais ferromagnéticos moles [51]. As características magnéticas de um material estão fortemente relacionadas com o modo como este material responde a um campo magnético externo. Sendo assim, a amostra de 15s é um material magneticamente mole, por possuir uma baixa coercividade, o que nesse quesito, a torna atrativa para aplicações tecnológicas, como em dispositivos de sensores, cabeças de leitoras magnéticas, etc.

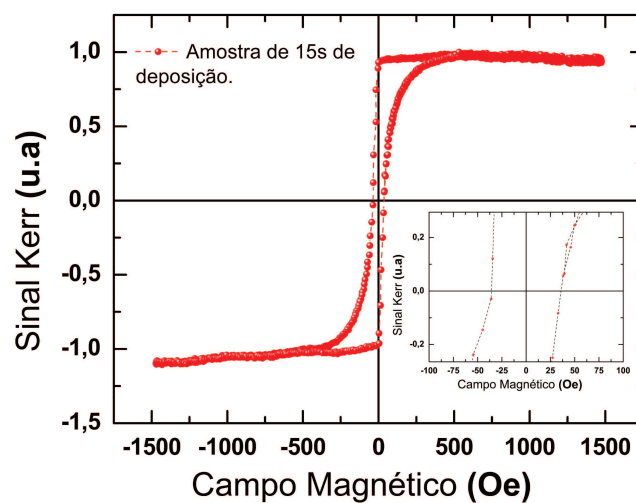


Figura 4.8: *Magnetometria da amostra de 15 segundos de deposição.*

4.1.4 Difração de raio X - DRX

A fim de verificar se o material eletrodepositado sobre o substrato de Si era composto por ligas de FeNi, a amostra foi submetida à análise por difração de raios-x na configuração $\theta - 2\theta$. A Figura 4.9 apresenta o difratograma de raio-X da amostra de 15 segundos de deposição.

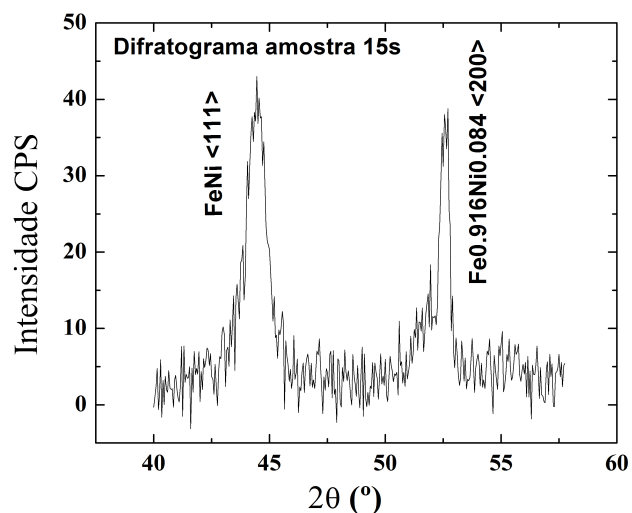


Figura 4.9: *Difratograma de raio-X do filme de FeNi com picos em concordância com a literatura [34,35].*

Pela análise do difratograma obtido, observou-se os picos difratados referentes aos planos cristalinos $\langle 111 \rangle$ e $\langle 200 \rangle$ correspondendo aos ângulos $2\theta = 44,65^\circ$ e $52,85^\circ$, respectivamente. Esses picos são característicos das ligas de FeNi descritos na literatura [34,35], confirmando a presença de ligas de FeNi na amostra. Como descrito na seção 2.7, existe um grande número de ligas de FeNi, com diferentes concentrações de Fe e Ni, para a faixa de ângulos varridos na medida é possível verificar tal afirmação.

O método utilizado para o crescimento das ligas de FeNi influencia nas concentrações de Fe e Ni presentes na amostra. Para tempos menores de deposições, a liga de FeNi é mais rica em Fe assemelhando com a literatura [36-39] que prevê um depósito anômalo, em que ocorre um favorecimento no depósito de Fe no início do processo e um aumento na taxa de deposição de Ni para tempos maiores. A Figura 4.10 apresenta a concentração dos metais envolvidos em função do tempo de deposição, resultado retirado da literatura [23]. O difratograma obtido para a amostra de FeNi apresenta parcialmente esse resultado, semelhante ao abordado pelas literaturas [23,36-39] com uma concentração de $\sim 91,6\%$ de Fe e $\sim 8,4\%$ de Ni em uma determinada região da amostra.

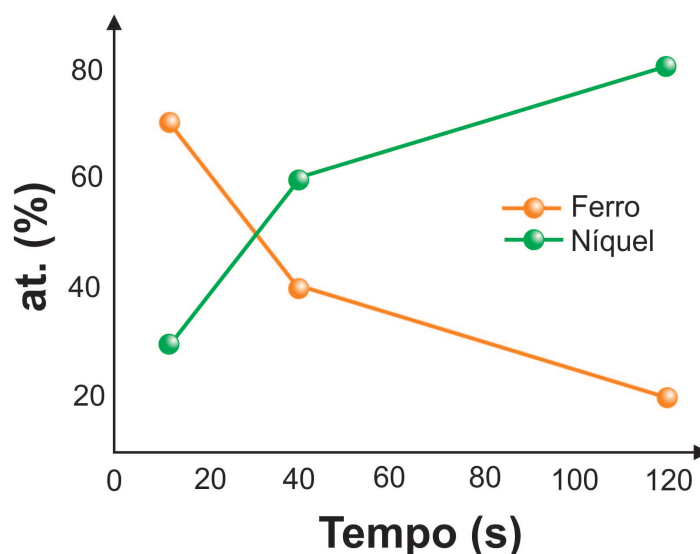


Figura 4.10: *Composição do Fe e Ni em função do tempo de deposição extraído da referência [23].*

4.1.5 Microscopia de força atômica - AFM

Para obter informações sobre a topografia da amostra, foi realizado um mapeamento da superfície utilizando a técnica de AFM na amostra de 15 e 60s de deposição. A partir deste mapeamento pode-se observar a formação de aglomerados, como discutido na subseção

3.1.2. As Figuras 4.11(a)(c) são imagens de AFM em duas dimensões para as amostras de 15 e 60s, respectivamente. As Figuras 4.11(b)(d) apresentam uma análise de perfil da região “hachurada” de verde nas Figuras 4.11(a)(c), evidenciando a presença de *pin holes*.

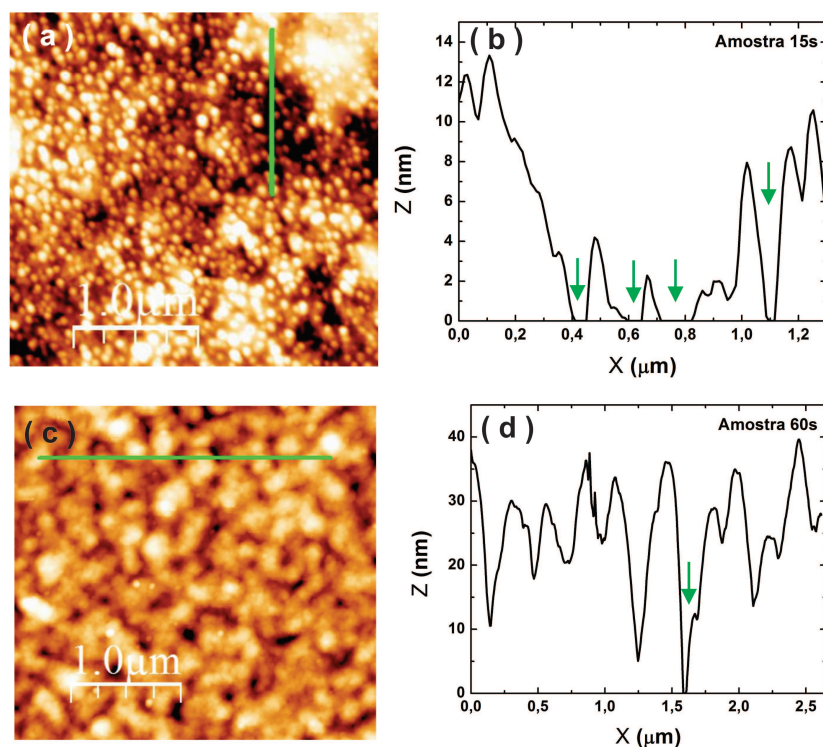


Figura 4.11: Figura 1 (a)Imagem de AFM em 2D da amostra de 15s. (b)Imagem de perfil mostrando a presença de *pin holes*. (c)Imagem de AFM em 2D da amostra de 50s. (d)Imagem de perfil evidenciando a diminuição de *pin holes*.

À medida que o tempo de deposição aumenta, o processo de crescimento dos metais conduz a formação de camadas mais espessas e fechadas. Havendo também um aumento do diâmetro dos grãos. É possível observar uma diminuição significativa na presença de *pin holes* na amostra de 60s, entretanto a espessura do depósito teve um aumento considerável, inviabilizando a aplicação da mesma como base do TBM.

4.2 Construção e caracterização do emissor - ZnO

4.2.1 Eletrodeposição

A deposição do ZnO foi realizada no modo potenciostático, neste caso a corrente varia entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletrodo. A variação da corrente em função do

tempo é expresso na Figura 4.12 para o depósito de ZnO, tal curva é conhecida como gráfico de transiente de corrente. O aumento da corrente (em módulo) que ocorre de 0 à 12 segundos, se deve ao fato da formação de núcleos de crescimento que estimulam um aumento da área eletroativa. Nesse intervalo de tempo o comportamento da corrente pode ser explicada por um processo de nucleação bidimensional limitado pela incorporação dos átomos na rede [43].

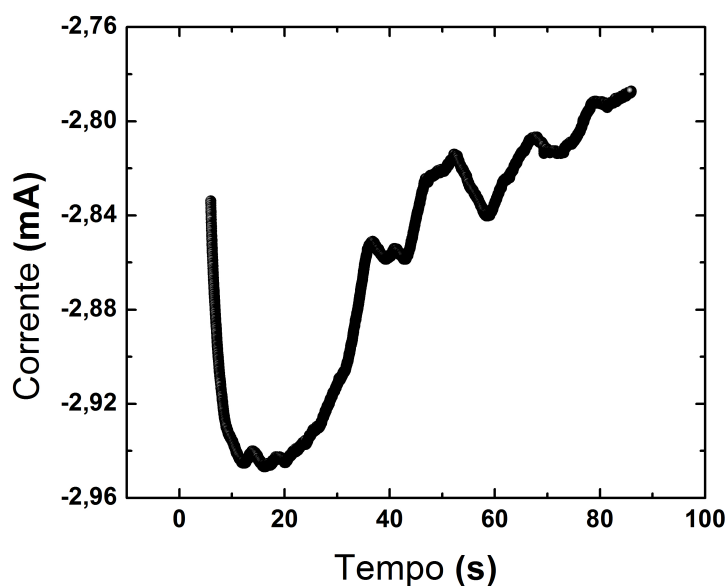


Figura 4.12: *Transiente de corrente referente a deposição de ZnO.*

O pico de nucleação ocorre por volta dos 17 segundos, momento em que começa a formação dos núcleos de depósitos. Daí em diante, os íons vão sendo consumidos próximos à superfície e a taxa de reação e a corrente elétrica começam a diminuir até atingir um valor que depende da raiz quadrada do tempo [44]. Nesta etapa ocorre o recobrimento da superfície pela junção dos núcleos e em seguida o crescimento tridimensional limitado pelo transporte de íons do volume da solução, que explica a diminuição da corrente para tempos maiores [43].

4.2.2 Difração de raio X - DRX

A escolha do potencial de deposição do ZnO não foi possível ser realizada a partir da técnica de voltametria, pois os voltamogramas obtidos eram inconclusivos. Então para contornar essa situação foi utilizado o potencial descrito pelas referências [14,15] e o procedimento experimental descrito pelas mesmas. Sendo assim, a fim de verificar a

presença de ZnO nas amostras foi utilizado a técnica de difração de raio-x e a Figura 4.13 apresenta o difratograma obtido.

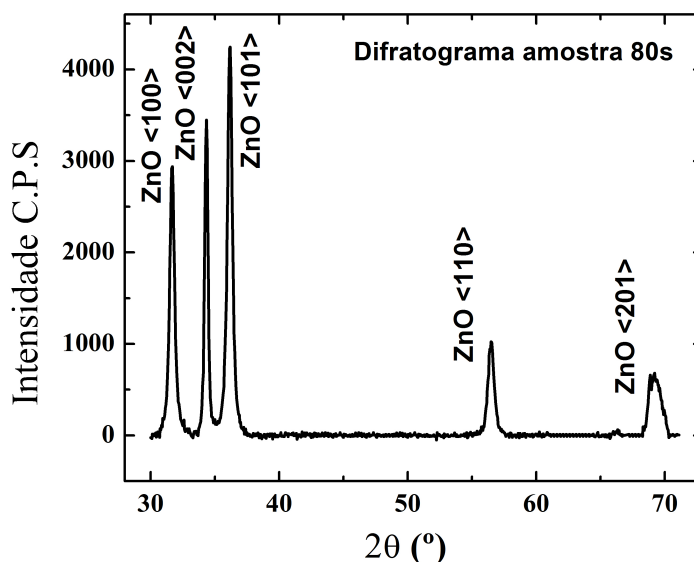


Figura 4.13: Difratograma de raio-x de filmes de ZnO que estão em concordância com a literatura[40 – 42]

O difratograma obtido mostra os picos difratados referentes aos planos cristalinos < 100 >, < 002 >, < 101 >, < 110 > e < 201 > correspondendo aos ângulos $2\theta = 31.76^\circ$, 34.41° , 36.24° , 56.58° e 69.21° , respectivamente. Estes picos comprovam a presença de ZnO na amostra e estão de acordo com a literatura [40-42] e confirmam a eficiência da técnica de eletrodeposição no modo potencioestático.

4.2.3 Microscopia de força atômica - AFM

O contato feito no emissor do transistor exige que o emissor seja composto por um filme fechado. Essa exigência se faz necessária para evitar que a cola prata utilizada sobre o alumínio não contate o FeNi diretamente. Sendo assim, um mapeamento sobre a superfície da amostra recoberta de ZnO foi realizada através da técnica de AFM. A Figura 4.14(a)(b) são as imagens de AFM 2D e 3D, respectivamente. O filme de ZnO apresentou um aspecto com alta rugosidade e com ausência de *pin holes*. Desse ponto de vista, a estrutura de ZnO obtida através da técnica de eletrodeposição se mostrou satisfatória.

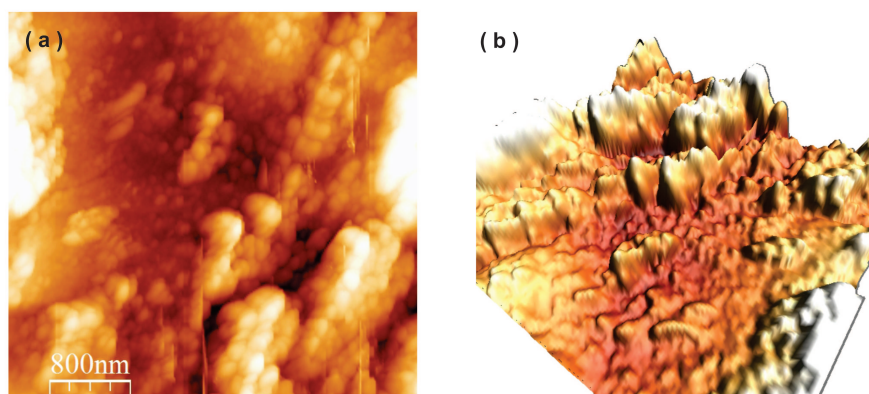


Figura 4.14: (a) Imagem de AFM em 2D da amostra de ZnO. (b) 3D do item a.

4.2.4 Perfilometria óptica

Foi realizada medidas de perfilometria óptica para determinar a espessura média da estrutura de ZnO. A espessura de $\sim 200\text{nm}$ foi determinada e a Figura 4.15 ilustra os resultados obtidos. Embora a estrutura de ZnO esteja sobre o filme de FeNi no TBM, essas medidas foram realizadas na amostra de ZnO sobre Si-n apenas para relacionar o tempo de depósito com a espessura obtida.

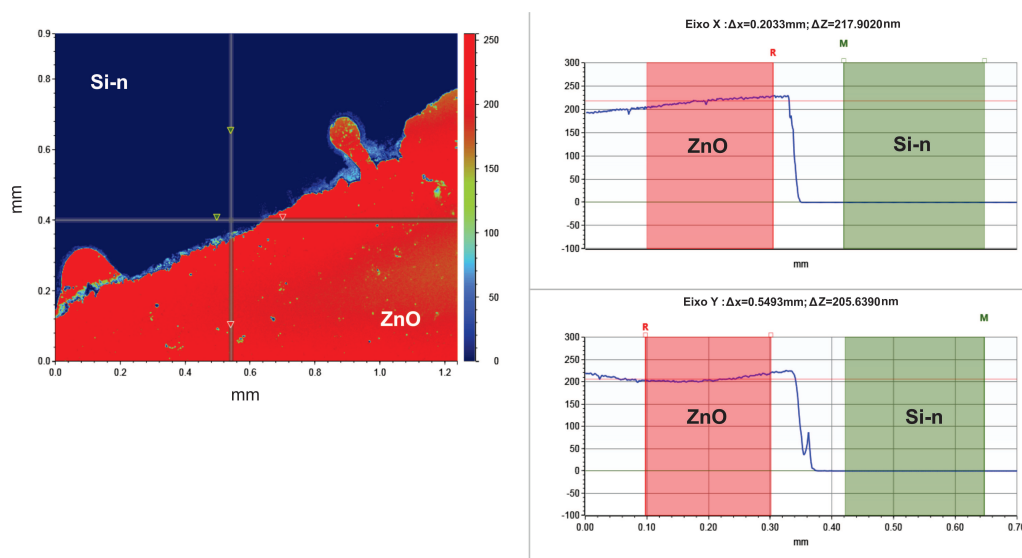


Figura 4.15: Espessura média do filme de ZnO sobre Si-n, obtida através da técnica de perfilometria óptica

4.3 Curvas de diodo: Si-n/FeNi - FeNi/ZnO

As medidas elétricas realizadas nas interfaces Si/FeNi e FeNi/ZnO mostram o comportamento $i \times V$, ou curva de diodo do dispositivo. Para este dispositivo, ambas as interfaces apresentam um comportamento característico de junções Schottky, do tipo metal/semicondutor n , onde a polarização direta é obtida para potenciais negativos no semicondutor. A Figura 4.16 apresenta as curvas de diodo da interface Si/FeNi e FeNi/ZnO.

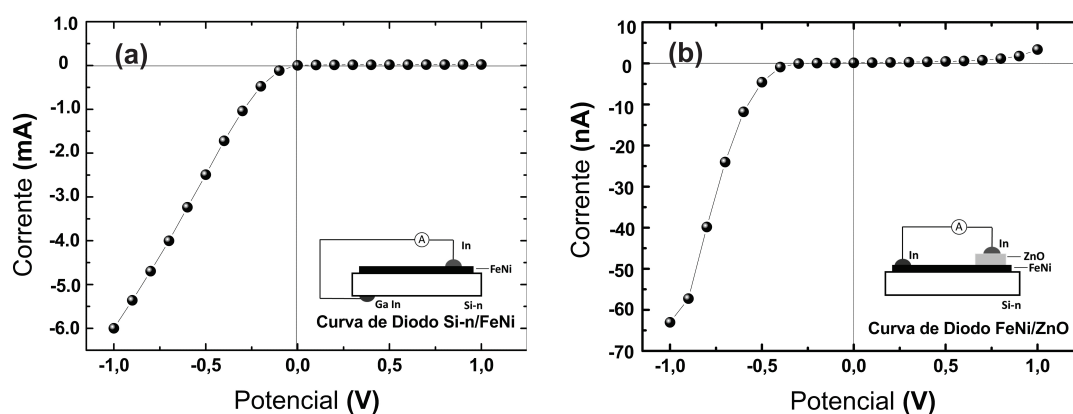


Figura 4.16: Curva $I \times V$ obtida nas interfaces (a) Si/FeNi e (b) FeNi/ZnO, ambas preparadas por eletrodeposição.

Esse resultado mostra que as interfaces utilizadas, Si/FeNi e FeNi/ZnO servem para finalidade proposta inicialmente, junções Schottky. Para encontrar a corrente de saturação e o fator de idealidade serão utilizados os dados da Figura 4.17, que representa a Figura 4.16 em escala logarítmica no eixo “ y ”. O coeficiente linear e angular da reta de linearização expressa a corrente de saturação e o fator de idealidade, respectivamente. A equação 2.6, obtida da teoria da emissão termiônica será utilizada.

Para extrair o fator de idealidade a partir das Figuras 4.17(a)(b), foi realizado um *fit* linear usando como critério os primeiros pontos. Como a escala é logarítmica, a escolha do *fit* não apresentará relevância nos resultados. O fator de idealidade calculado para interface Si/FeNi foi $n^{FeNi} = 7,75$ e para interface FeNi/ZnO foi $n^{ZnO} = 1,35$, esses valores acima de 1 implicam que a teoria de emissão termiônica somente não explica o mecanismo de corrente. O Fator de idealidade é um parâmetro que indica a uniformidade da altura de barreira [47]. Esse desvio encontrado é causado pela variação de espessura e composição da camada interfacial, bem como, por defeitos em determinadas regiões [47]. Esse resultado é expressivamente compatível, pois na técnica de eletrodeposição o controle na uniformidade da espessura e da composição é algo difícil de ser obtido.

O valor da corrente de saturação é utilizada para o cálculo das alturas de barreira Schottky das junções utilizando a equação 2.6. Através da curva da Figura 4.17(a), a corrente de saturação medida foi $i_0^{FeNi} = 0,812mA$ e através da Figura 4.17(b), a corrente de saturação medida foi $i_0^{ZnO} = 22nA$. Assumindo o valor da constante de Richardson $A = 110 \times 10^4 A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$ para Si-n [48] e a área de deposição de $0,283cm^2$, a altura de barreira encontrada para interface Si/FeNi é de $\phi_B^{FeNi} = 0,57eV$. A altura de barreira é determinada pela combinação do semiconductor e o metal, valores típicos para diodos de Si variam entre 0.5 e 1eV [48]. Assumindo o valor da constante de Richardson $A = 32 A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$ para ZnO [49] e a área de deposição de $0,071cm^2$, a altura de barreira encontrada para interface FeNi/ZnO é de $\phi_B^{ZnO} = 0,58eV$.

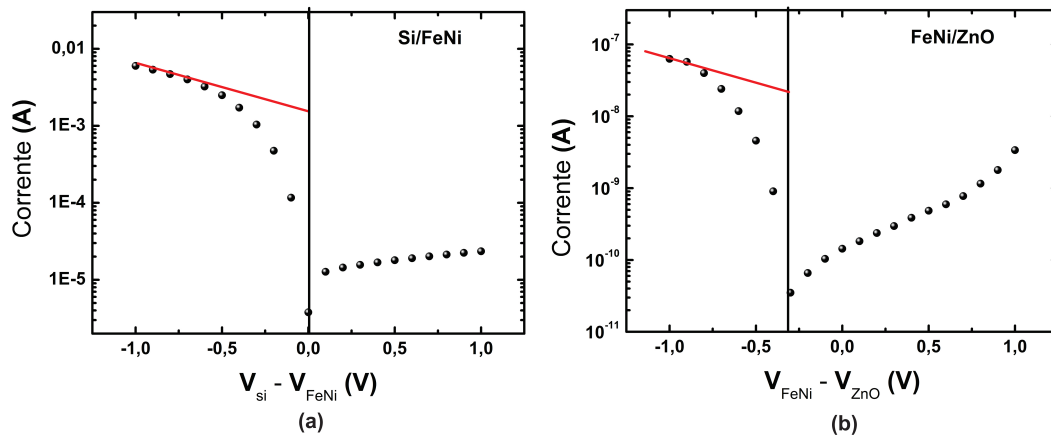


Figura 4.17: *Curvas de diodo das interfaces (a)Si/FeNi e (b)FeNi/ZnO em escala logarítmica. A intersecção com o eixo “y” indica o valor da corrente de saturação, i_0 , e o coeficiente angular o fator de idealidade, n .*

Portanto, a partir dos resultados obtidos das curvas $I \times V$ para as duas interfaces, foi possível determinar as alturas de barreira. A Figura 4.18 mostra as alturas de barreira das respectivas interfaces. Deste modo, feito esse estudo, esses resultados evidenciam o uso do ZnO como emissor do TBM e o Si-n como coletor.

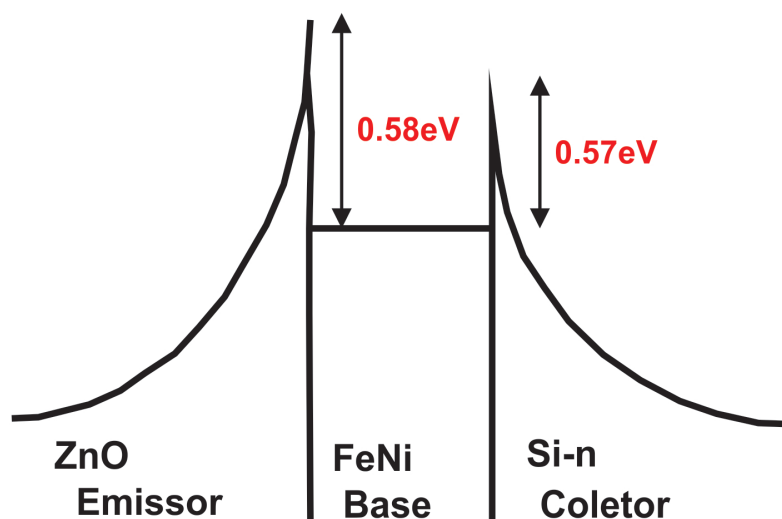


Figura 4.18: Representação das alturas de barreira das interfaces $ZnO/FeNi$ $0.58eV$ e $FeNi/Si$ $0.57eV$.

4.4 Curvas de transistor - ZnO/FeNi/Si-n

4.4.1 Medidas de base-comum

As curvas de transistor obtidas no dispositivo ZnO/FeNi/Si-n à temperatura de 300K e 50K, na configuração base comum, com correntes diretas injetadas na junção ZnO/FeNi variando de 0 a $60 \mu A$, estão expostas na Figura 4.19. O ganho do dispositivo nessa configuração é o coeficiente linear da curva de correntes de coletor por correntes de emissor, e está representado nas Figuras 4.19(b)(d), para as temperaturas de 300K e 50K, respectivamente. Estes valores de correntes são extraídos das curvas representadas nas Figura 4.19(a)(c), em potencial zero na interface base/coletor.

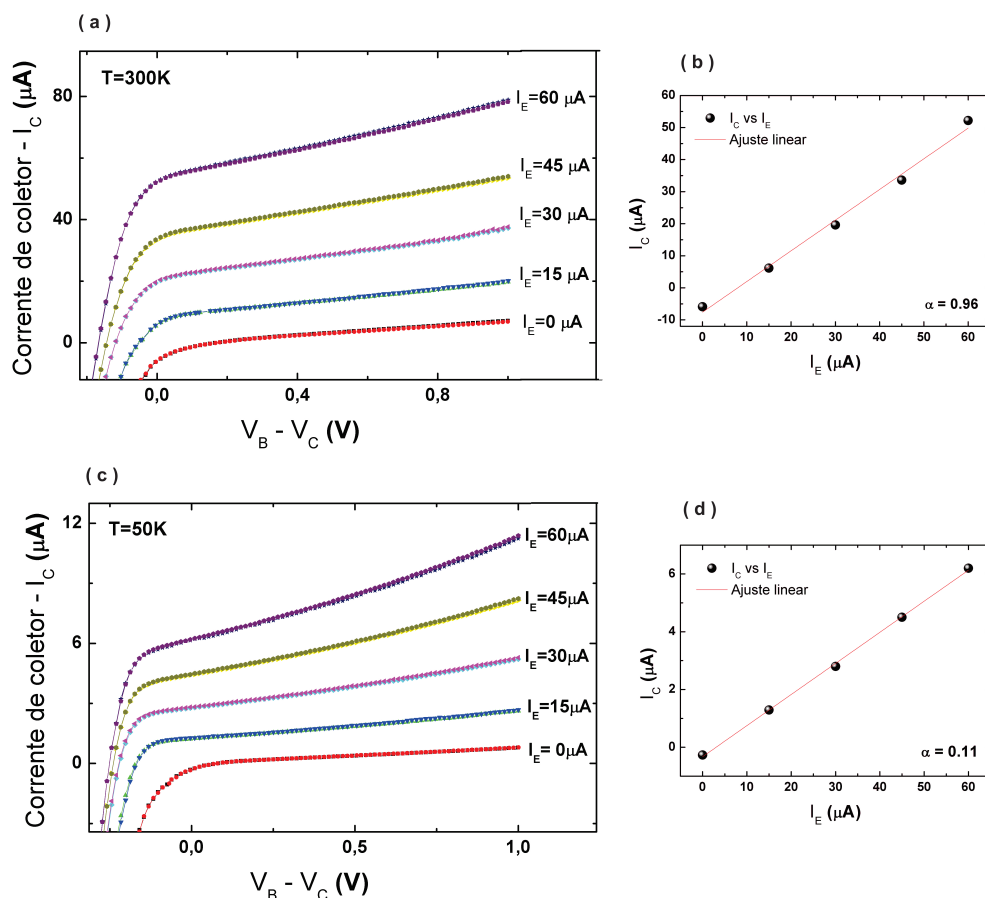


Figura 4.19: (a) Curva de transistor em base-comum do dispositivo a $T=300\text{K}$. (b) Ganho do dispositivo a $T=300\text{K}$ (c) Curva de transistor em base-comum do dispositivo a $T=50\text{K}$ (d) Ganho do dispositivo a $T=50\text{K}$.

O valor de ganho $\alpha = 0.96$ encontrado pela reta de linearização mostrado na Figura 4.19(b) mostra a permeabilidade da base com existência de pin holes, pois, nos transistores em que a base metálica é fechada, isto é, livre de pin holes, os valores característicos de ganho não são maiores que $\alpha = 0.3$ [8,52]. A existência de pin holes aumenta as chances dos elétrons quentes alcançarem o coletor, visto que estes elétrons não sofrerão espalhamentos na base nas regiões da mesma onde os pin holes estão presentes.

A Figura 4.19(d) mostra um ganho de $\alpha = 0.11$, obtido a temperatura de 50K. A queda no ganho, consequência da queda de temperatura pode ser explicado com base na existência de pin holes. A resistência dos semicondutores aumenta com a diminuição da temperatura [53], pois a baixas temperaturas poucos portadores de carga estão "populando" a banda de condução. Sendo assim, na região onde existem os pin holes, a resistência é maior, diminuindo significativamente o número de portadores que por ali

passam, conseqüentemente diminuindo o número de elétrons que conseguem alcançar o coletor. A Figura 4.20 ilustra um modelo de circuito equivalente, expondo esquematicamente o que acontece na interface FeNi/ZnO.

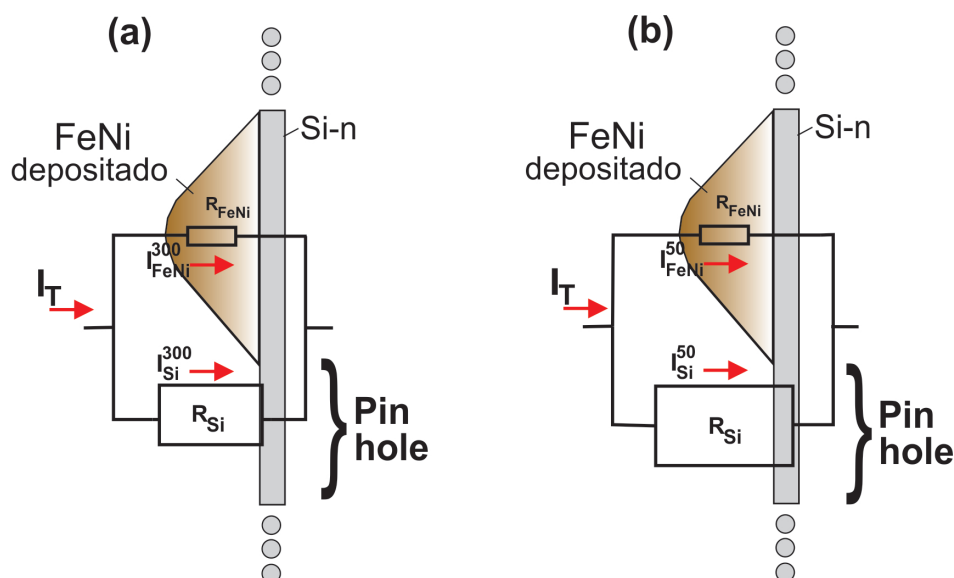


Figura 4.20: Modelo de circuito equivalente para mostrar a influência dos pin holes nas correntes do dispositivo, nas temperaturas de (a) $T=300K$ (b) $T=50K$.

A composição ferromagnética da base permite a variação da corrente de coletor em função do campo magnético aplicado. A magnetização imposta na base, diminui os espalhamentos dos elétrons quentes que a atravessam, devido à diminuição da magnetorresistência. Deste modo, o transporte de carga através da base é afetado com a presença do campo e a corrente coletada no Si tende a aumentar na presença do campo magnético.

A influência do campo magnético na corrente de coletor depende da corrente injetada no emissor, como é mostrado na Figura 4.21(a)(b) para a temperatura de 300K e 50K, respectivamente. A ausência de magnetocorrente em ambos os casos para corrente de emissor igual a zero indica que a propriedade magnética é verificada principalmente nos elétrons quentes emitidos do ZnO. O comportamento é semelhante para as duas temperaturas e sugere uma queda no valor da magnetocorrente à medida que cresce o valor da corrente injetada no emissor.

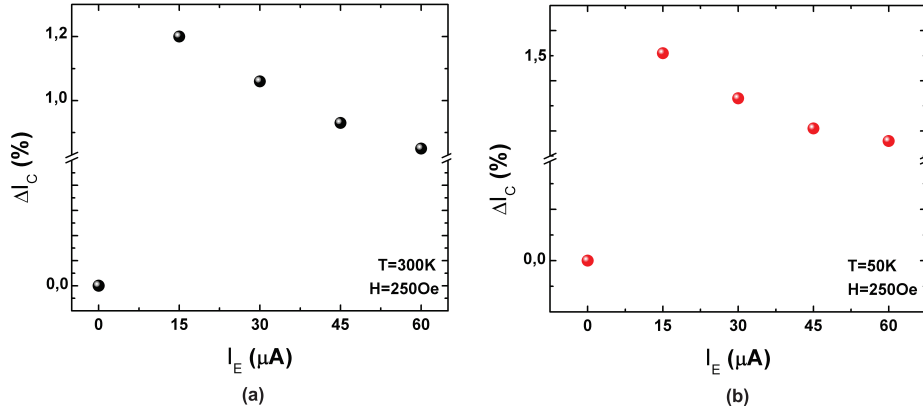


Figura 4.21: *Influência da corrente de emissor no efeito da magnetização (a) $T=300K$, (b) $T=50K$.*

A situação particular de uma corrente de $60\mu A$ injetada pelo emissor e um campo de 250Oe no plano da amostra para a temperatura de $T=300K$ e $T=50K$ é mostrado pela Figura 4.22(a)(b), respectivamente. Foi observado uma variação de 0,85% e 1,16% na corrente de coletor para $T=300K$ e $T=50K$, respectivamente. Este melhor resultado magnético em 50K pode ser interpretado com base na permeabilidade da base. Como discutido anteriormente, a atratividade do FeNi aumenta em baixas temperaturas no ponto de vista dos elétrons. A liga de FeNi é responsável pela magnetização, sendo assim, como a maior parte dos elétrons passará por ela, então, maior será a influência do campo sobre os elétrons que alcançam o coletor.

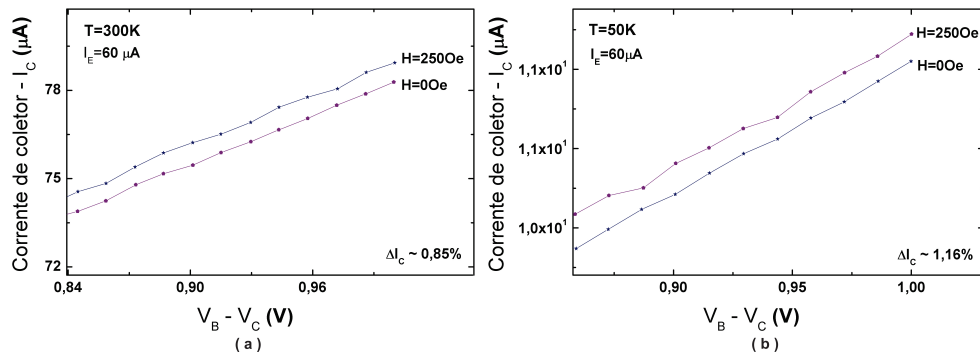


Figura 4.22: *Varição da corrente de coletor em função do campo magnético aplicado para $I_E = 60\mu A$ (a) $T=300K$ (b) $T=50K$.*

Estes resultados claramente evidenciam a existência de uma competição entre o transporte de carga através dos pin holes da base e a injeção de corrente spin polarizada no coletor, em função da temperatura. Devido a presença dos *pin holes*, a queda de temperatura diminui o fator de ganho em torno de 90%. Por outro lado, sob as mesmas condições,

a influência da magnetização aumenta por volta de 0,31%. Todos os resultados magnéticos exibidos foram coletados no potencial de 1.0V. A Figura 4.23 mostra a variação da corrente de coletor em função do campo magnético aplicado na configuração base-comum e revela uma concordância com o resultado obtido e exposto na Figura 4.22(a).

Para uma varredura de 0 – 250Oe, foi observado uma variação de aproximadamente 1% na corrente de coletor. A sensibilidade magnética do dispositivo na configuração de base-comum foi aumentada em cerca de 10x ao se comparar com a AMR da liga de FeNi, mostrando uma vantagem na utilização deste dispositivo nesta configuração. O aumento significativo foi obtido à temperatura ambiente, o que torna o dispositivo atraente. A medida à T=50K não foi possível de ser obtida devido a problemas no *setup* de medida na estabilização de temperatura. Medidas magnéticas são sensíveis e pequenas flutuações de temperatura já são suficiente para interferir na medição.

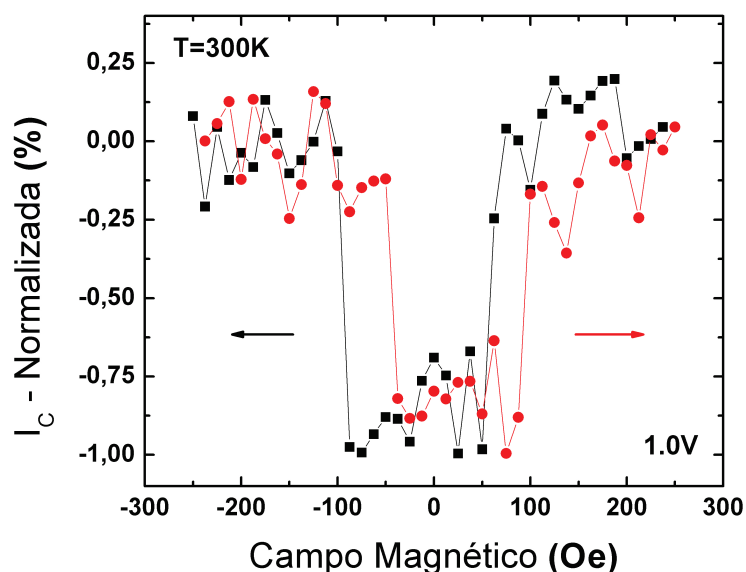


Figura 4.23: *Variação da corrente de coletor em função do campo magnético aplicado, potencial fixado em 1.0V.*

Este dispositivo poderia ser utilizado em modo de amplificação à temperatura ambiente, ou preferencialmente como sensor a baixas temperaturas, resultando em maior sensibilidade. Para construção de dispositivos dessa natureza, mostrou-se necessário conhecer as condições de operação do mesmo, como, regime de temperatura e modo de utilização. Uma vez definidas as condições de operação é possível apontar as características

do filme de FeNi mais adequadas para confecção do dispositivo. Essas características se resumem em filmes mais abertos ou mais fechados, ou seja, com mais ou menos *pin holes*, respectivamente.

4.4.2 Medidas de emissor-comum

A curva de transistor obtidas no dispositivo ZnO/FeNi/Si-n à temperatura de 300K, na configuração emissor comum, com correntes diretas injetadas na base (FeNi) variando de 0 a $50 \mu A$, está exposta na Figura 4.24(a). O ganho β do dispositivo nessa configuração é o coeficiente linear da curva de correntes de coletor por correntes de base, e está representado nas Figura 4.24(b).

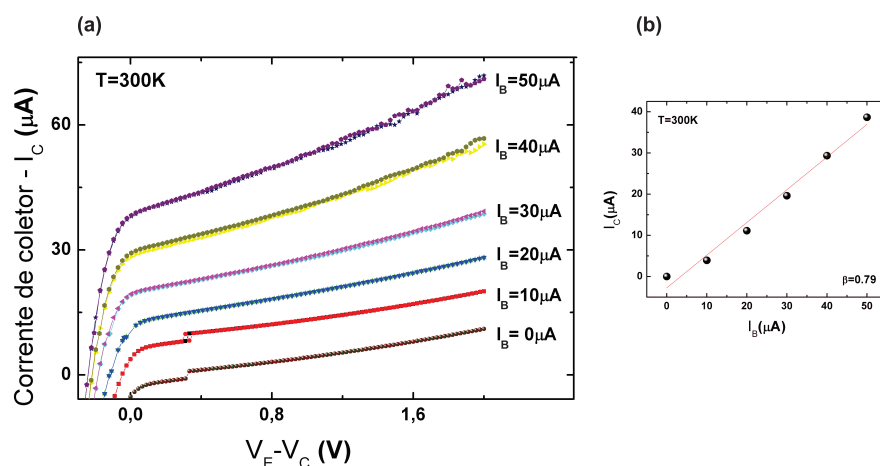


Figura 4.24: (a) Curva de transistor em emissor-comum do dispositivo a $T=300K$. (b) Ganho do dispositivo a $T=300K$

O valor encontrado de $\beta = 0.79$, mostra um desvio da previsão teórica proposta pela equação 2.6, que previa um ganho de $\beta = 24$. Analisando o resultado com base na equação 2.6, percebe-se uma dependência da corrente de coletor com relação aos potenciais aplicados nas junções. Essa dependência denota baixa qualidade das junções [8]. As interfaces do transistor eletrodepositado não funcionam como nos casos ideais, ou pelo menos, onde existe uma maior uniformidade na deposição do filme, o que torna a estimativa de difícil previsão.

Os ruídos apresentados nas curvas de $I_B = 40 \mu A$ e $50 \mu A$ são devidos a potenciais elevados aplicado na junção ZnO/FeNi para obter tais correntes. Os resultados obtidos na configuração emissor-comum, sugerem um emissor de ZnO muito resistivo. As medidas foram realizadas na presença de campos magnéticos, mas os resultados obtidos

foram inconclusivos e não mostraram relevância a serem discutidos. A resistência do filme de ZnO, material que compõe o emissor, é definida durante a etapa de crescimento eletroquímico (eletrodeposição). Sendo assim, a fim de obter filmes menos resistivos e de maior qualidade, sugere-se uma intervenção na formulação do eletrólito utilizado.

Capítulo 5

Considerações finais e perspectivas.

Este trabalho apresenta a construção e caracterização de um dispositivo spintrônico. A construção teve como técnica principal a eletrodeposição. Foi utilizado como substrato, silício tipo n de baixa resistividade. Sobre o substrato foram crescidos ligas de FeNi para diferentes tempos de deposição e através de medidas elétricas foi determinado o tempo de percolação. A partir dessa determinação foi escolhido a amostra de 15 segundos. As medidas magnéticas mostraram valores baixos de AMR e de campo coercivo, mostrando que a liga é um material ferromagnético mole. Nas medidas de DRX e AFM foram constatadas duas concentrações distintas de FeNi, $Fe_{50}Ni_{50}$ e $Fe_{92}Ni_8$ e observado a presença de *pin holes*, respectivamente.

Na estrutura de ZnO, a medida de DRX mostrou a presença dos compostos e a medida de AFM mostraram um filme fechado. A partir da técnica de perfilometria óptica foi observado uma espessura de $\sim 200\text{nm}$. As medidas elétricas realizadas nos diodos si-n/FeNi e FeNi/ZnO revelaram curvas de diodo do tipo Schottky e as alturas de barreira das junções apresentaram uma diferença de apenas 0.1eV. Essa pequena diferença compromete o desempenho do dispositivo, pois aumentam as chances dos elétrons quentes serem espalhados pela base. As medidas de transistor revelaram fator de amplificação na configuração base-comum satisfatório à $T=300\text{K}$ e um valor de $\sim 90\%$ menor à temperatura de $T=50\text{K}$. Na presença de campo magnético, foi observado uma influência de MR $\sim 10\text{x}$ maior em relação a AMR da liga de FeNi à temperatura ambiente. A existência dos *pin holes* claramente beneficiou a injeção de corrente spin polarizada à temperatura de 50K e minimizou a amplificação. As medidas de transistor em emissor-comum não foram compatíveis com o esperado no quesito de amplificação, mostrando possíveis defeitos e

baixa qualidade das junções.

A fim de otimizar a *performance* do dispositivo sugere-se:

Melhorar a qualidade da junção ZnO/FeNi aumentando a altura de barreira Schottky. Para isso, uma fina camada de Au pode ser crescida sobre o FeNi [9].

Realizar uma curva de diodo em função da temperatura para encontrar o valor exato da altura de barreira.

Intervir no eletrólito utilizado para deposição do óxido de zinco, a fim de diminuir a resistência da estrutura de ZnO.

Realizar medidas de MEV nas amostras de 5 a 100s de deposição, para verificar com mais precisão a presença dos *pin holes*.

Melhorar o sistema de estabilização de temperatura do *setup de MR* do LabSpin, com o objetivo de obter MR em base-comum a baixas temperaturas.

Como sugestão para continuação do trabalho pode-se propor a microfabricação deste dispositivo com dimensões controladas e estudar a influência das dimensões nos parâmetros do transistor. Além disso, pode-se fazer a base do dispositivo utilizando uma válvula de spin e obter maior sensibilidade a campos magnéticos.

Referências Bibliográficas

- [1] Rezende, S. M., *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*, **3º ed.**, Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2014.
- [2] C. Kittel, *Física do Estado Sólido*, **8. Ed.** Rio de Janeiro, 2006.
- [3] Sze, S.M., *Physics of semiconductor devices - 3rd edition*. Wiley, New York, 1985.
- [4] E.H.Rhoderick, "Metal-Semiconductor contacts", Clarendon Press, Oxford (1980).
- [5] Robert C. O'Handley, "Modern Magnetic Materials", *John Wiley & Sons, Inc*, **pg.557-560** (1999)
- [6] N.W. Ashcroft and N.D Mermin, "Solid State Physics", *Saunders College Publishing* (1976).
- [7]] F. Seitz, *Phys. Rev.* **79**, 372 (1950).
- [8] K. K. Ng, *Complete Guide to Semiconductor Devices*, **2nd ed.** (*Wiley, New York, 2002*).
- [9] L. Zhao, B. Huang, O. Olowolafe, I. Appelbaum, *IEEE Electron Device Letters*, **Vol.29, 08, 892-894**, (2008).
- [10] PONTE, H. A., *Fundamentos da Eletrodeposição*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- [11] Southampton Electrochemistry Group, "Instrumental Methods in Electrochemistry", *Horwood Publishing*, 2001.
- [12] Gerischer, Heinz; Tobias, Charles W. "Advances in electrochemical science and engineering", *Weinheim: VCH*, 1990

- [13] E.R. Spada, L.S. de Oliveira, A.S. da Rocha, A.A. Pasa, G. Zangari, M.L. Sartorelli, "Thin films of Fe_xNi_{1-x} electroplated on silicon (100)", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **272-276** (2004).
- [14] N. L. Mariana, J. R. Sambrano, A. R. Souza, *Química Nova*, **Vol.33, 04, 810-815**, (2010).
- [15] E. A. Dalchielea, P. Giorgia, R. E. Marottia, F. Martín, J.R. Ramos-Barrado, R. Ayoub, D. Leinen, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **70, 245-254**, (2001).
- [16] R. A. Colclaser, "Microelectronics processing and device design", **Vol. 1**, 1980.
- [17] Leon I. Maissel e Reinhard Gland, "*Handbook of Thin Film Technology*", **Vol. 1**, 1970.
- [18] Leonard J. Brillson, and Yicheng Lu.; "ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts". *APPLIED PHYSICS REVIEWS*, 2011.
- [19] B. C. e S. R. Stock, "Elements of X-Ray Diffraction", **3. Ed.** 2001.
- [20] L. L. M. J. e. a. Hobart H. Willard, "Instrumental Methods of Analysis", **7. Ed.** 1988.
- [21] B. Bhushan, "Springer Handbook of Nanotechnology", 2004.
- [22] D A Allwood¹, Gang Xiong, M D Cooke and R P Cowburn.; "Magneto-optical Kerr effect analysis of magnetic nanostructures". *JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS*, 2003.
- [23] ARAÚJO, C. I. L., Magnetorresistência em ligas Ferro-Níquel eletrodepositadas em Silício Tipo-n. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Física, 2007.
- [24] J F Valderruten, GA Pérez Alcázar and J M Grenèche., "Mossbauer and x-ray study of mechanically alloyed Fe-Ni around the Invar composition". *JOURNAL OF PHYSICS: CONDENSED MATTER*, 2008.
- [25] Félix, J. F., Síntese e caracterização de filmes finos de óxido de zinco e polianilina para aplicações em heterojunções semicondutoras. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais, 2009.

- [26] SILVA, L. J. V., Produção e caracterização de filmes finos de ZnO. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Física, 2010.
- [27] REZENDE, N. P., Preparação e caracterização de nanocompósitos de nanotubos de carbono revestidos com nanopartículas de óxido de zinco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, 2015.
- [28] M. Razeghi, *Fundamentals Of Solid State Engineering*, **volume 1**, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [29] R. G. Delatorre, M. L. Munford, R. Zandonay, and A. A. Pasa, W. Schwarzacher, M. S. Meruvia and I. A. Hümmelgen, *Appl. Phys. Lett.* **88**, **233504** (2006).
- [30] A. Janotti, C. G. Van de Walle, *Rep. Prog. Phys.* **72**, **126501**, (2009).
- [31] J. C. A. Huang, T. E. Wang, C. C. Yu, Y. M. Hu, P. B. Lee, M. S. Yang, *Journal of Crystal Growth*, **171**, **442-446**, (1997).
- [32] R.M. Bozorth, *Rev. Mod. Phys.*, **25**, **42**, (1953).
- [33] A. Goldman, *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*, *Springer Science+Business Media*, 1999.
- [34] ICSD 56386.
- [35] ICSD 185055.
- [36] L.T. Romankiw and D.A. Thompson, "Magnetic Properties of Plated Films" in: *Properties of Electrodeposits, Their Measurement and Significance*, The Electrochemical Society, N. J. (1976), **Chap. 23**, **pp.410-11**.
- [37] R.S. Smith, L.E. Godlicki, and J.C. Long, "Effects of Saccharin on the Structural and Magnetic Properties of Iron-Nickel Films," *J. Electrochem. Soc.* **108**, **996** (1961).
- [38] E.E. Castellani, J.V. Powers, and L.T. Romankiw, "Nickel Iron (80:20) Alloy Thin Film Electroplating Method and Electrochemical Treatment and Plating Apparatus", U.S. Patent **4**, **102**, **756** (Jul. 25, 1978).

- [39] N.C Anderson and C.R. Grover, Jr., "Electroplating of Nickel-Iron Alloys for Uniformity of Nickel/Iron Ratio Using a Low Density Plating Current", U.S. Patent **4, 279, 707** (Jul. 21, 1981).
- [40] ICSD 26170.
- [41] ICSD 34477.
- [42] ICSD 57450.
- [43] M. Palomar-Pardave, M.Miranda-Hernandez, I. Gonzalez et al, Surface Science 399 (1) **80-95** (1998).
- [44] Southampton Electrochemistry Group, Instrumental Methods In Electrochemistry. Southampton: *Horwood Publishing Ltd.*, **443p** (2001).
- [45] E. H. Rhoderick, Metal-semiconductor Contacts, Oxford University Press, 1978.
- [46] S. Ishizuka, S. Kato, Y. Okamoto, K. Akimoto, *Applied Physics Letters* 80 950 (2002).
- [47] J F Felix, M Aziz, C I L de Araujo, W M de Azevedo, V Anjos, E F da Silva Jr and M Henini.; "Zinc oxide thin films on silicon carbide substrates (ZnO/SiC): electro-optical properties and electrically active defects" *Semiconductor Science and Technology*, 2014.
- [48] Olaf van 't Erve, Device properties of the spin-valve transistor and the magnetic tunnel transistor, *Ph.D. thesis, University of Twente*, 2002.
- [49] Holger von Wenckstern, a Gisela Biehne, R. Abdel Rahman, Holger Hochmuth, Michael Lorenz, and Marius Grundmann.; "Mean barrier height of Pd Schottky contacts on ZnO thin films", *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 2006.
- [50] Th. G. S. M. Rijks and S. K. J. Lenczowski.; "In-plane and out-of-plane anisotropic magnetoresistance in Ni₈₀Fe₂₀ thin films", *PHYSICAL REVIEW B*, 1997.
- [51] SINNECKER, J. P.; "Materiais magnéticos doces e materiais ferromagnéticos amorfos", *Revista brasileira de Ensino de Física*, **Vol.22, nº 3**, 2000.
- [52] D. J. Monsma, Spin Valve Transistor, tese de doutorado (1998).
- [53] David L. Blackburn.; "Temperature measurements of semiconductor devives - A review", Semiconductor Electronics Division, *20th SEMI-THERM Symposium*.