

Éfeso Francisco de Melo Maricato

SENSOR HALL DE GaAs POR IMPLANTAÇÃO DE ÍONS

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Unicamp como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jacobus W. Swart

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos A. Reis Filho – FEEC/Unicamp

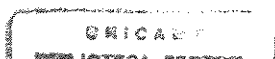
Prof. Dr. Ioshiaki Doi – FEEC/Unicamp

Prof. Dr. Mauro M. G. de Carvalho – IFGW/Unicamp

Este exemplar corresponde a redação final da tese	
defendida por <u>Éfeso Francisco de Melo Maricato</u>	
e aprovada pela Comissão	
Julgada em <u>18</u> / <u>12</u> / <u>2000</u>	<u>[Assinatura]</u>
	Orientador

Universidade Estadual de Campinas

Dezembro de 2000



200 115129

UNIDADE (DC)
 N.º CHAMADA:
 TUNICAMP
 M337s
 V. _____
 TOMBO BC/ 45285
 PROC. 46-392101
 C ☐ D ☒
 PREC. R\$ 11,00
 DATA 24/07/01
 N.º CPD _____

ii

CM00157773-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M337s

Maricato, Éfeso Francisco de Melo

Sensor Hall de GaAs por implantação de íons /
 Éfeso Francisco de Melo Maricato.--Campinas, SP:
 [s.n.], 2000.

Orientador: Jacobus W. Swart.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação.

1. Dispositivos magnéticos. 2. Detectores 3.
 Arsenieto de gálio. 4. Implantação iônica. I. Swart,
 Jacobus W. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
 Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo incentivo e preocupação com o desenvolvimento do Mestrado.

Ao Professor Jacobus pela orientação, amizade e confiança depositada durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Yuri e Luiz pelas inúmeras discussões e esclarecimentos sobre física de semicondutores e processos de fabricação.

Aos amigos do laboratório 38 do LPD pelo companheirismo e ajuda.

Ao Daniel e Emílio do CCS pela fabricação das máscaras.

Ao Eudócio e Lino do CCS pelas implantações iônicas.

Ao Ari pelas medidas de efeito Hall.

Ao Diniz e Celso pelas deposições de filme de oxinitreto.

Ao Ricardo e Totó pela evaporações de metais.

Ao Jefferson pelo crescimento das camadas epitaxiais.

À Anna pela obtenção de filmes dielétricos.

Ao Professor Sebastião do LSI/USP pelos recozimentos de RTP.

Ao Márcio do CTI pelo encapsulamento dos dispositivos.

Ao Fábio do Laboratório de Baixas Temperaturas (IFGW) pelas medidas com campo magnético.

À Raquel, secretária do DSIF/FEEC/Unicamp pelo apoio e amizade.

A todas as pessoas da FEEC, IFGW e CCS que contribuíram de alguma forma com este trabalho.

A FAPESP pelo apoio financeiro.

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Circuitos Integrados de Compostos III-V do LPD/IFGW/Unicamp e CCS/Unicamp.

RESUMO

Neste trabalho projetamos, fabricamos e caracterizamos sensores magnéticos de efeito Hall. Realizamos um estudo sobre os princípios físicos envolvidos e figuras de mérito dos sensores (Tensão Hall, Sensibilidade, Tensão offset, Linearidade, Ruído e Coeficiente de temperatura) e, então, projetamos sensores Hall de várias geometrias, obtendo dispositivos com diferentes sensibilidades. Fabricamos estes dispositivos em camadas ativas de diferentes espessuras e dopagens com o objetivo de estudar o efeito destas variáveis na sensibilidades e linearidade dos dispositivos. O processo de fabricação desenvolvido é compatível com o processo de fabricação de transistores MESFET. Após o projeto dos sensores e processo de fabricação, fabricamos 5 níveis de máscaras através de um equipamento de feixe de elétrons. As camadas ativas foram obtidas por duas diferentes técnicas: implantação de íons e crescimento epitaxial. As regiões ativas implantadas foram dopadas com íons de $^{29}\text{Si}^+$ e a camada epitaxial dopada com silício, de modo que a concentração de portadores na camada ficasse na ordem de $1,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ e a espessura entre $0,2 - 0,5 \text{ }\mu\text{m}$. Após o encapsulamento dos dispositivos, caracterizamos os sensores com polarização de $1 - 7 \text{ mA}$ e indução magnética entre $0 - 1,2 \text{ T}$ (tesla). Os sensores fabricados apresentaram alta sensibilidade ($88 - 820 \text{ V/A.T}$), tensão *offset* esperada e alta linearidade. Propomos alguns estudos sobre melhorias do processo de fabricação e sobre circuitos de condicionamento de sinais.

ABSTRACT

In this work we designed, fabricated and characterized Hall-effect magnetic sensors. We studied the involved physical principles and figures of merit of sensors (Hall voltage, Sensitivity, Offset voltage, Linearity, Noise and Temperature coefficient) and, then, we designed Hall sensors of different shapes, obtaining devices with different sensitivities. We fabricated these devices in active layers of different thicknesses and doping levels with the objective to study the effect of these variables on the sensitivity and linearity of the devices. The developed process is compatible with the fabrication process of MESFET transistors. After the design of the sensors and the process, we fabricated a set of 5 levels of masks through an electron-beam equipment. The active layers have been obtained by two different techniques: ion implantation and epitaxial growth. The implanted active regions have been doped with ions of $^{29}\text{Si}^+$ and the doped epitaxial layer with silicon, so that the concentration of carriers in the layer was of the order of $1,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and the thickness between $0.2 - 0.5 \text{ }\mu\text{m}$. After the packaging of the devices, we characterized the sensors with current bias of $1 - 7 \text{ mA}$ and magnetic induction between $0 - 1.2 \text{ T}$ (tesla). The fabricated Hall sensors presented high sensitivity ($88 - 820 \text{ V/A.T}$), low offset voltage and high linearity. Based on the results, some additional studies on improvements on the fabrication process and the signal conditioning circuits are suggested.

Sumário

CAP. I – INTRODUÇÃO	1
1.1. Sensores magnéticos	1
1.2. Especificações para a escolha de sensores magnéticos	2
1.3. O sensor Hall	3
1.4. Objetivo	5
CAP. II - PRINCÍPIOS E ELEMENTOS PARA PROJETO DOS SENSORES	7
2.1. O efeito Hall	7
2.2. O efeito Hall em amostras curtas e longas	8
2.3. O efeito Hall em amostras não muito longas nem curtas	13
2.4. Figuras de mérito do sensor Hall	18
2.4.1. Tensão Hall	18
2.4.2. Sensibilidade	19
2.4.3. Tensão offset	19
2.4.4. Linearidade	21
2.4.5. Ruído	22
2.4.6. Coeficiente de temperatura	23
CAP. III - PROJETO DOS SENSORES HALL	24
3.1. Projeto da geometria	24
3.1.1. Geometria retangular	24
3.1.2. Geometria “Cruz-grega”	25
3.1.3. Estruturas de “van der Pauw”	27
3.1.4. Estruturas para cancelamento de <i>offset</i>	28
3.2. Projeto do processo de fabricação	29
3.2.1. Processo para fabricar o sensor em camada implantada	29
3.2.2. Processo para fabricar o sensor em camada epitaxial	34
3.3. Projeto e fabricação das máscaras	37
CAP. IV - FABRICAÇÃO DOS SENSORES HALL	40
4.1. Testes preliminares do processo de fabricação	40
4.1.1. Obtenção das camadas por implantação iônica	40
4.1.2. Obtenção das camadas por crescimento epitaxial	45
4.2. Primeira rodada de fabricação	47

4.3.	Segunda rodada de fabricação	49
4.4.	Terceira rodada de fabricação	52
4.5.	Discussão final quanto à fabricação	55
CAP. V – CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES HALL		57
5.1.	Métodos utilizados para medidas	57
5.2.	Identificação dos dispositivos Hall	58
5.3.	Curvas da tensão Hall	59
5.3.1.	Amostra S-1B (Segunda rodada de fabricação)	59
5.3.2.	Amostra SHI-1 (Terceira rodada de fabricação)	63
5.3.3.	Amostra SHI-2 (Terceira rodada de fabricação)	68
5.3.4.	Amostra SHE-2 (Terceira rodada de fabricação)	72
5.3.5.	Amostras comerciais	73
5.4.	Resumo dos dados obtidos	75
5.5.	Discussão final quanto à caracterização	76
CAP. VI – CONCLUSÕES		87
	Referências bibliográficas	89

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1. SENSORES MAGNÉTICOS

Um sensor magnético é um dispositivo capaz de sentir um campo magnético e extrair informações dele. Isso é possível, pois certas propriedades dos materiais são influenciadas na presença de um campo magnético. O princípio básico de todos os sensores é a transdução (transmissão de energia de um sistema para outro). Em geral, um sinal elétrico é produzido pela mudança de uma propriedade física, química ou biológica induzida pela introdução de um segundo parâmetro (no caso o campo magnético).

Há um conjunto de princípios físicos usados pelos diversos tipos sensores magnéticos. Eles incluem: indução, efeitos galvanomagnéticos (efeito Hall e magnetoresistência), interferência quântica supercondutora e efeitos magneto-ópticos¹, entre outros. Os principais efeitos físicos utilizados pelos sensores magnéticos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Alguns efeitos físicos utilizados em sensores magnéticos.

Ano	Efeito	Explicação	Uso técnico
1842	Efeito Joule	Mudança na forma de um corpo ferromagnético com magnetização	Na combinação com elementos piezoelétricos para medidores magnéticos e potenciômetros
1846	Efeito ΔE	Mudança no módulo de Young com magnetização	Linha de componentes de atraso acústico para medidas de campo magnético
1847	Efeito Matteucci	A torsão de uma haste ferromagnética em um campo longitudinal muda a magnetização.	Sensores Magnetoelásticos
1856	Magnetoresistência (Efeito Thonson)	Mudança na resistência do material com aplicação de campo magnético	Sensores Magnetoresistivos
1858	Efeito Wiedemann	Uma torsão é produzida em uma haste ferromagnética conduzindo uma corrente quando sujeitada a um campo longitudinal.	Medidas de força e torque
1865	Efeito Villari	Efeito sobre a magnetização por intensidade de tensão ou compressão.	Sensores Magnetoelásticos
1879	Efeito Hall	Um condutor passando uma corrente produz uma tensão transversal para um campo vertical à sua superfície.	Sensores de Efeito Hall
1903	Efeito Pelicular	Deslocamento da corrente do interior do material para a superfície.	Sensores de distância e proximidade
1931	Efeito Sixtus Tonks	Pulso de magnetização por grandes saltos Barkhausen	Sensores Wiegande
1962	Efeito Josephson	Efeito túnel entre dois materiais supercondutores com camadas separadas extremamente finas	Sensores magnéticos SQUID

1.2. ESPECIFICAÇÕES PARA ESCOLHA DE SENSORES MAGNÉTICOS

Os vários tipos de sensores magnéticos existem para atender necessidades específicas de determinadas aplicações. A maioria dos sensores magnéticos são muito diferentes uns dos outros, em construção e custo. Assim, a escolha de um determinado tipo de sensor depende dos requerimentos impostos pelo tipo de aplicação em que ele será utilizado.

Para selecionarmos um determinado tipo de sensor magnético precisamos identificar qual a faixa de campo magnético que a aplicação vai trabalhar. A Fig. 1 mostra os principais sensores magnéticos e suas faixas de detecção².

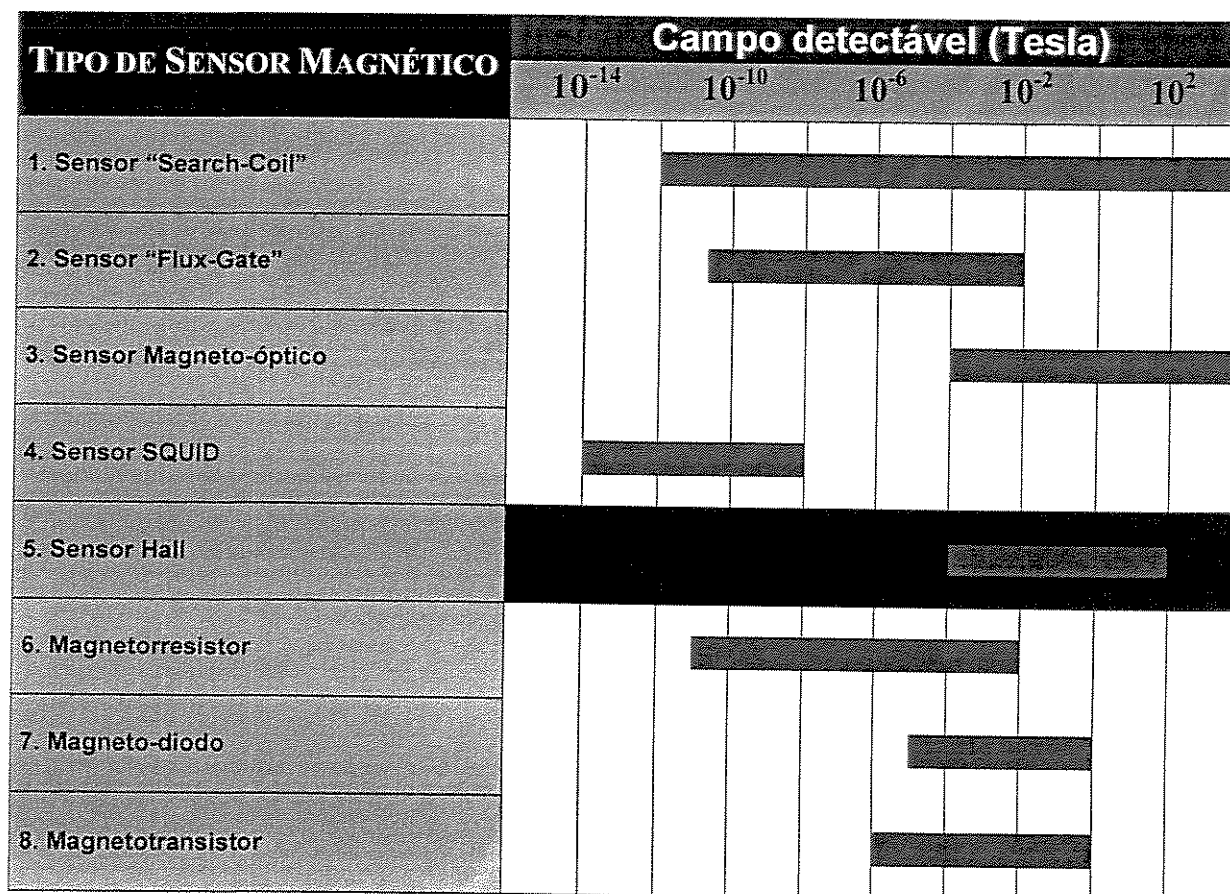


Fig. 1. Lista de sensores magnéticos e a faixa aproximada de campos sobre os quais eles são usados. (1 Tesla = 10^4 Gauss).

Além da faixa de detecção, muitos outros fatores adicionais devem ser levados em conta no momento de selecionar um sensor magnético, tais como³:

- Custo de fabricação
- Tamanho do dispositivo
- Sensibilidade, nível de sinal de saída
- Consumo de potência
- Impedância elétrica de entrada e saída
- Ambiente ao qual o sensor será exposto
 - Temperatura
 - Umidade e stress químico
 - Stress mecânico, vibrações
- Sinal/Ruído
- Resolução espacial
- Linearidade
- Tensão *offset*
- Estabilidade, confiabilidade, tempo de vida

1.3. O SENSOR HALL

O sensor Hall opera numa faixa de campo magnético de interesse prático para a maioria das aplicações e, atualmente, é o sensor magnético mais utilizado devido seu baixo custo proveniente do alto grau de compatibilidade com tecnologia de microeletrônica⁴. Este sensor é um dispositivo de estado sólido de quatro terminais que explora o Efeito Hall praticamente do mesmo modo como ele foi descoberto. Este dispositivo é capaz de produzir uma tensão de saída V_H , proporcional ao produto da corrente de entrada I , pela densidade de fluxo magnético B .

Um sensor Hall usualmente têm a forma de uma fina lâmina retangular (mas não necessariamente) de material semicondutor uniformemente dopado e

com relativa alta resistividade e dimensões l , w e t , provido de quatro contatos ôhmicos como pode ser visto na Fig. 2.

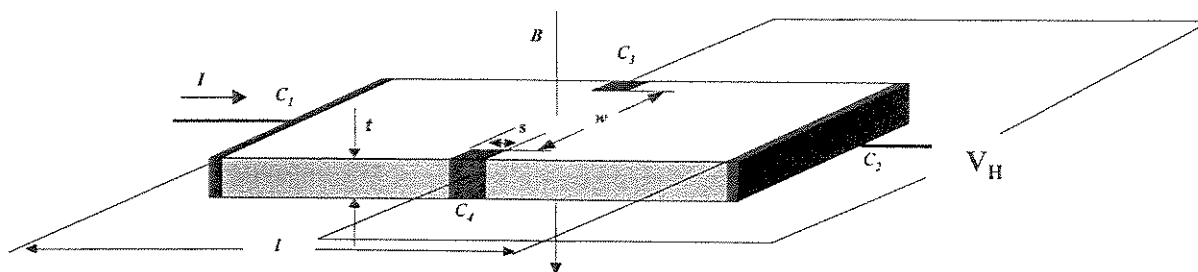


Fig. 2. Dispositivo Hall com geometria retangular.

Desta estrutura simples são derivados os sensores Hall. Quando aplica-se um campo magnético B perpendicular à superfície do elemento Hall pelo qual esteja passando uma corrente I (entre os contatos C_1 e C_2), uma tensão aparecerá entre os terminais opostos (C_3 e C_4 – contatos Hall). Essa tensão é proporcional ao campo magnético B e à corrente aplicada no dispositivo e é denominada de tensão Hall V_H . Uma inversão na direção do campo magnético ou da corrente de polarização resultará na mudança de polaridade de V_H . Uma inversão na direção de ambas manterá a polaridade da tensão Hall a mesma. Mantendo a corrente de polarização constante, a tensão Hall pode ser usada para medir a intensidade de campos magnéticos⁵.

Podemos distinguir dois principais grupos de aplicações para sensores Hall: aplicações diretas e indiretas. Em aplicações diretas, o sensor de efeito Hall é utilizado para medir o valor de campos magnéticos. Exemplos são medidas de campo magnético da terra, leitura de discos e fitas magnéticas, gaussímetros e medidores de corrente elétrica. Em aplicações indiretas o sensor Hall é utilizado para detectar velocidade de rotação, chaveamento sem contato e medidas de proximidade utilizando ímãs permanentes (≈ 100 mT). Uma das aplicações onde os sensores Hall são largamente utilizados são motores sem escovas (*Brushless dc Motors*).

Os sensores Hall são usualmente fabricados nos semicondutores Si, GaAs, InAs e InSb.

O silício apresenta dois principais problemas para os sensores Hall: baixo nível de tensão Hall (eq. 1 e 2) e alta tensão offset decorrente do efeito piezoresistivo mais intenso nesse semicondutor. Entretanto, o nível de tensão pode ser amplificado por amplificadores operacionais e a tensão offset cancelada por circuitos corretores^{6, 7, 8}.

Sensores Hall fabricados em substratos de InAs e InSb apresentam alta sensibilidade devido à alta mobilidade de elétrons nestes semicondutores. No entanto, estes semicondutores apresentam pequeno *bandgap*, limitando-os a trabalhar numa faixa de temperatura próximo à temperatura ambiente.

O GaAs é o semicondutor preferido para fabricação de dispositivos Hall discretos, uma vez que, devido sua alta mobilidade de elétrons, o nível da tensão Hall é suficientemente alto para aplicações práticas. Outra característica importante do GaAs é seu alto *bandgap*, possibilitando que estes sensores sejam operados em ambientes com temperatura de até 200 °C.

1.4. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi estudar a física envolvida em dispositivos de efeito Hall, projetar diferentes estruturas Hall (geometria e dopagem), fabricá-los em nosso laboratório (LPD/CCS/UNICAMP), encapsulá-los no ITI/Campinas e analisar o comportamento dos sensores Hall, como nível de tensão Hall, sensibilidade, tensão offset e linearidade dos sensores.

No Capítulo 2 estudamos os princípios físicos envolvidos no efeito Hall. Vimos o efeito da geometria da amostra sobre o comportamento dos dispositivos Hall (efeito Hall e magnetoresistência geométrica). Também, exibimos as figuras de mérito⁹ dos dispositivos Hall: tensão Hall, sensibilidade, tensão offset, linearidade e Coeficiente de temperatura. Através de um projeto geométrico otimizado da estrutura Hall, podemos obter sensores mais sensíveis.

No capítulo 3 exibimos o projeto geométrico dos sensores Hall. Projetamos estruturas Hall com duas diferentes geometrias, a retangular e a “cruz-grega”. Também, projetamos estruturas Hall para cancelamento de offset e estruturas “van der Pauw” para a caracterização das camadas ativas fabricadas.

No mesmo capítulo exibimos o projeto do processo de fabricação. Mostramos as etapas desenvolvidas para a fabricação dos sensores em camadas implantadas e epitaxiais. Em seguida mostramos o projeto e fabricação do jogo de máscaras utilizadas para a fabricação dos dispositivos.

No capítulo 4 exibimos a fabricação dos sensores. Inicialmente, fizemos alguns testes preliminares para a obtenção das camadas implantadas e por crescimento epitaxial. Após os testes preliminares, realizamos um total de três rodadas de fabricação finalizando sensores em quatro diferentes camadas ativas, três por implantação de íons e uma por crescimento epitaxial, com diferentes dopagens e espessuras. Também, discutimos os problemas surgidos durante o processo de fabricação dos sensores.

No capítulo 5 exibimos a caracterização dos sensores. Discutimos os métodos utilizados para as medidas com o campo magnético. Realizamos medidas da tensão Hall versus campos magnético para as estruturas projetadas nas quatro diferentes camadas. Finalmente, discutimos os resultados obtidos: valor da tensão offset, sensibilidade, erro de linearidade e tensão offset.

No capítulo 6, apresentamos as conclusões do trabalho, bem como sugestões para novas pesquisas.

CAPÍTULO II - PRINCÍPIOS FÍSICOS E ELEMENTOS PARA PROJETO DOS SENSORES HALL

2.1. O EFEITO HALL

Edwin Herbert Hall, em 1879, enquanto trabalhava na sua tese de doutorado em Física constatou que um imã afetava diretamente a corrente elétrica num condutor. Esta ação hoje é chamada de efeito Hall.

O efeito Hall é a geração de uma força eletromagnética transversal em uma amostra conduzindo uma corrente elétrica e exposta a um campo magnético perpendicular. Dependendo da geometria da amostra, esta força eletromagnética pode causar o aparecimento de uma tensão transversal através da amostra, ou uma deflexão da corrente na amostra.

O efeito Hall pertence à classe mais geral chamada de efeitos Galvanomagnéticos. Além do efeito Hall, o efeito da magnetoresistência¹⁰ também faz parte dos efeitos Galvanomagnéticos.

O efeito Hall é uma manifestação da ação da força de Lorentz sobre os portadores de carga na presença de um campo eletromagnético. Esta força é dada por

$$F = eE + e[v \times B]. \quad (1)$$

onde e é a carga da partícula (para elétrons $e = -q$ e para lacunas $e = q$), E é o campo elétrico, v a velocidade do portador e B o campo magnético. Esta força age sobre as partículas carregadas e é proporcional à velocidade do portador e ao campo magnético.

2.2. O EFEITO HALL EM AMOSTRAS LONGAS E CURTAS

O efeito Hall apresenta-se de duas diferentes formas em amostras longas e curtas. Dependendo da geometria da amostra, a força eletromagnética pode causar o aparecimento de uma tensão transversal (em amostras longas) ou uma deflexão de corrente em amostras curtas. Ambos fenômenos são consequência da ação da força de Lorentz sobre os portadores de carga quase livres. O componente elétrico da força de Lorentz (eq. 1) provê o transporte lateral dos portadores. O componente magnético da força de Lorentz, que é perpendicular à velocidade dos portadores, é responsável pelos efeitos transversais¹¹.

Para exemplificarmos, consideramos na Fig. 3 uma fina lâmina de material semiconductor tipo-n fortemente extrínseco, com dimensões l , w e t ao longo das direções x , y e z respectivamente, polarizado com uma tensão V_x .

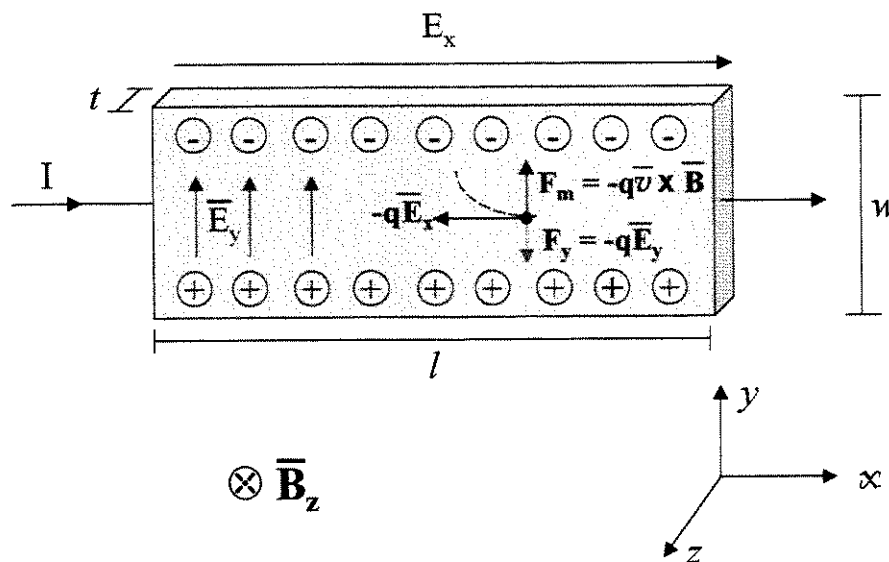


Fig. 3. Lâmina de material semiconductor tipo-n fortemente extrínseco, com dimensões l , w e t . O semiconductor tipo-n é escolhido devido à maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas.

Quando falamos em amostra “longa” queremos dizer que o comprimento l da lâmina semicondutora é muito maior que sua largura w . E a amostra curta é considerada como $l \ll w$.

Considere que nesta lâmina, ao longo da direção x , um campo elétrico externo $E_e = (E_x, 0, 0)$ é estabelecido, e o campo magnético é zero. Então na força de Lorentz (eq. 1), somente o primeiro termo, que é a força elétrica, existe, ocasionando somente a deriva dos portadores. A velocidade de deriva dos elétrons é dada por:

$$v_d = \mu_n E_e \quad (2)$$

onde μ_n é a mobilidade dos elétrons. A densidade de corrente associada é dada por:

$$J = q\mu_n n E_e \quad (3)$$

onde n é a concentração de elétrons na lâmina semicondutora.

Se a lâmina for longa, quando aplicamos um campo magnético B perpendicular à superfície da lâmina, os elétrons sofrem ação da força de Lorentz e são “empurrados” para uma extremidade do condutor ao longo da direção y , e as cargas opostas agrupam-se na outra extremidade. Uma desigual distribuição lateral de cargas resulta no surgimento de um campo elétrico E_y transversal (denominado de campo Hall, E_H), o qual exerce uma força, $F = eE_y$, oposta ao sentido da força de magnética e de mesmo módulo, contrabalançando as forças ($e[v_d \times B] + eE_y = 0$) e, portanto, levando à formação de um estado estacionário. Assim, as partículas subsequentes de mesma carga e velocidade não são mais defletidas e voltam a mover-se paralelamente ao eixo x da lâmina, como se somente o campo elétrico externo estivesse agindo sobre elas. O campo elétrico Hall é

$$E_H = -[v_d \times B]. \quad (4)$$

Este efeito é observado como uma tensão (tensão Hall, V_H) perpendicular à direção da corrente no condutor¹². Esta tensão transversal é a dada por

$$V_H = \int_0^w E_y dy$$

$$V_H = \frac{r_H}{qnt} B.I. \quad (5)$$

onde r_H é o fator Hall, n é a concentração de portadores, t é a espessura do elemento Hall, B é o valor do campo magnético e I é a corrente de polarização. O fator Hall r_H é uma constante que depende das características do material semiconductor, tais como mecanismos de espalhamento, densidade de estados de superfície, intensidade do campo magnético B e da temperatura ($r_H \approx 1.2$ para GaAs à temperatura ambiente)¹³.

Através da (eq. 5) define-se o coeficiente Hall (R_H), que caracteriza a intensidade e sinal do efeito Hall em um material particular, expresso por¹⁵

$$R_H = \frac{r_H}{qn} \quad (6)$$

No efeito Hall, o campo elétrico total na amostra $E = E_e + E_H$ não é colinear com o campo elétrico externo E_e , mas a densidade de corrente é colinear com o campo elétrico externo, devido o balanceamento das forças transversais. Assim, do mesmo modo, o campo elétrico total não é colinear com a densidade de corrente. Portanto, o efeito Hall em uma amostra longa exhibe, de uma extremidade à outra, a inclinação do campo elétrico total com relação ao campo elétrico externo e a densidade de corrente na amostra. O ângulo de inclinação Θ_H , representado na Fig. 4, é chamado de ângulo Hall e sua magnitude calculada por.

$$\tan \Theta_H = |E_H|/|E_e| \quad (7)$$

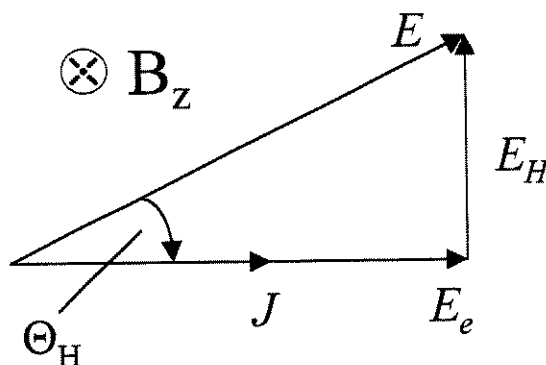


Fig. 4. Diagrama vetorial dos campos elétricos e densidade de corrente numa amostra longa.

O valor do ângulo Hall depende somente da mobilidade dos portadores e do campo magnético aplicado, e seu sinal coincide com o sinal dos portadores de carga. Então, podemos expressar o ângulo Hall por

$$\tan \Theta_H = -\mu_n B \quad (8)$$

Na camadas tipo-n fabricadas por nós, conseguimos mobilidade ao redor de $3000 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ Então para um campo magnético de 1 T ($\tan \Theta_H = -0.3$), o ângulo Hall é de aproximadamente 16° . Em silício para um campo magnético de mesma intensidade o ângulo Hall não ultrapassa 7° , devido à menor mobilidade de elétrons neste semiconductor.

Se a lâmina semicondutora vista na Fig. 3, for muito curta ($l \ll w$), os portadores de carga da região mais interna desta amostra são capturados pelo contato de polarização antes de poderem acumular-se na outra extremidade, não ocorrendo o estado estacionário como nas amostras longas. Então, na maior parte de uma amostra curta não há efeito Hall, mas o surgimento de um componente de corrente transversal (deflexão de corrente). A deflexão de corrente na lâmina causa um aumento na resistividade da amostra. Este efeito é conhecido como efeito da magnetoresistência geométrica. Portanto, em amostras curtas o efeito Hall apresenta-se como a inclinação da densidade de corrente com respeito ao

campo elétrico externo. O ângulo de inclinação é o ângulo Hall θ_H (eq. 8), por isso o efeito da magnetoresistência só é de interesse prático em materiais de altíssima mobilidade (InAs, InSb). Num caso extremo, onde a amostra seja infinitamente curta, não há campo elétrico Hall, e o campo elétrico externo é também o campo elétrico total. Assim, numa amostra curta exposta a um campo magnético, tudo acontece como se a condutividade do material da amostra fosse diminuída. Podemos expressar isso por¹⁴

$$\sigma_{nB} = \frac{\sigma_{n0}}{1 + (\mu_n B)^2} \quad (9)$$

onde σ_{n0} é a condutividade do material tipo-n para campo magnético $B = 0$.

A Fig. 5 ilustra as relações entre campo elétrico e densidade de corrente em uma amostra longa e uma curta. A densidade de corrente é também representada pelas linhas de corrente, e o campo elétrico pelas linhas equipotenciais

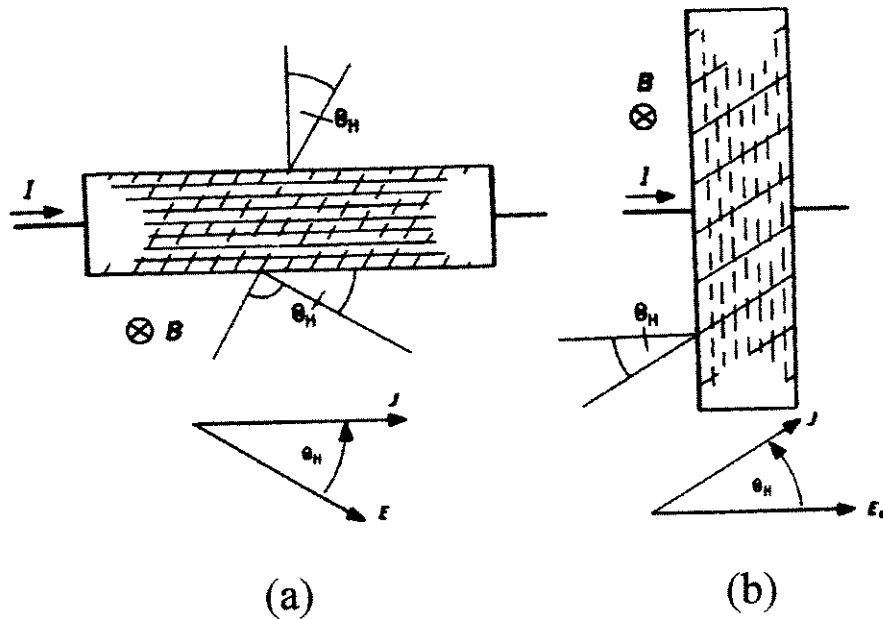


Fig. 5. A densidade de corrente (linhas cheias) e as linhas equipotenciais (linhas tracejadas) em uma amostra longa (a) e uma amostra curta (b).

Na amostra longa (a), as linhas de corrente sempre permanecem paralelas com as fronteiras isolantes longas, enquanto as linhas equipotenciais estão inclinadas com ângulo Hall com respeito à sua posição para $B = 0$. Em amostras curtas (b), as linhas equipotenciais sempre permanecem paralelas com os contatos de polarização, irrespectivamente à intensidade do campo magnético, mas as linhas de corrente inclinam-se pelo ângulo Hall com respeito à sua posição para $B = 0$.

Contudo, a aproximação para a amostra longa é aplicável somente na vizinhança de uma fronteira isolante, e a aproximação de uma amostra curta é aplicável somente na vizinhança de um contato altamente condutivo. ("Vizinhança" aqui tem um significado relativo: por exemplo a vizinhança de uma fronteira isolante é a região onde todos seus pontos estão muito mais próximos à fronteira isolante do que aos contatos.) O que acontece naquelas regiões (as áreas claras na Fig. 5) onde estas aproximações não são satisfeitas? Uma análise completa mostra que, próximo aos contatos em uma amostra longa, a deflexão de corrente prevalece, e na maior parte da fronteira isolante, o efeito Hall desenvolve-se. Dependendo da geometria da amostra, um ou outro efeito pode prevalecer, mas ambos estão sempre presentes.

2.3. O EFEITO HALL EM AMOSTRAS NÃO MUITO LONGAS NEM CURTAS

Como foi comentado no item anterior, em um dispositivo Hall o qual não é nem muito curto e nem muito longo, uma combinação dos efeitos inerentes às duas extremidades da geometria do dispositivo aparece. Próximo a uma periferia isolante, a corrente é forçada a fluir ao longo da periferia, e um campo elétrico Hall é gerado. Próximo a um contato ôhmico, a deflexão de corrente prevalece.

É então claro que um dispositivo com uma geometria intermediária tem características que estão entre aquelas de um dispositivo muito longo e muito curto. De modo particular, verifica-se que a tensão Hall de um dispositivo Hall com geometria arbitrária pode ser expressa como

$$V_H = GV_{H\infty} \quad (10)$$

onde G é um parâmetro chamado de fator de correção geométrico e $V_{H\infty}$ denota a tensão Hall em uma amostra infinitamente longa. O fator de correção geométrico resumidamente representa a diminuição da tensão Hall devido a um não perfeito confinamento da corrente em um dispositivo de comprimento finito. Portanto, este fator geométrico é um número entre 0 e 1. Para um dispositivo Hall muito longo, $G \approx 1$; para um dispositivo muito curto, $G \approx 0$.

O fator de correção geométrico é uma função da geometria do dispositivo e do ângulo Hall. Este fator geométrico é um importante parâmetro para dispositivos Hall reais, pois através dele podemos representar a geometria mais próxima da ideal para o desenvolvimento do efeito Hall. Para determinar o valor de G para um dispositivo Hall de geometria particular, deve-se de algum modo calcular a tensão Hall, V_H para este dispositivo, e a tensão Hall do correspondente dispositivo infinitamente longo, $V_{H\infty}$, de acordo com (eq. 5). Então, de acordo com (eq. 10), o fator de correção geométrico é dado por

$$G = V_H / V_{H\infty} \quad (11)$$

As tensões Hall para dispositivos Hall de várias geometrias diferentes tem sido calculadas através da técnica de mapeamento conforme^{15, 16}. Este método é muito conveniente para desenvolver um entendimento intuitivo da influência da geometria sobre as características de um dispositivo Hall. Além disso, o método rende uma simples e muito útil fórmula analítica para o fator de correção geométrico de diferentes estruturas Hall. Usando a teoria do mapeamento conforme, Wick¹⁷ demonstra que pode-se obter dispositivos Hall de mesma sensibilidade mesmo que possuam geometrias diferentes, bastando dimensionar a estrutura, o tamanho e posição dos contatos de maneira apropriada.

De forma geral, qualquer pedaço de material condutor elétrico, poderá ser usado como um dispositivo Hall. Contudo, para ser razoavelmente eficiente e conveniente para aplicações práticas, um dispositivo Hall deverá ser

preferencialmente feito na forma de uma fina barra ($l \gg w$), tal como a mostrada na Fig. 2.

Algumas geometrias utilizadas para fabricação de dispositivos Hall podem ser vistas na Fig. 6.

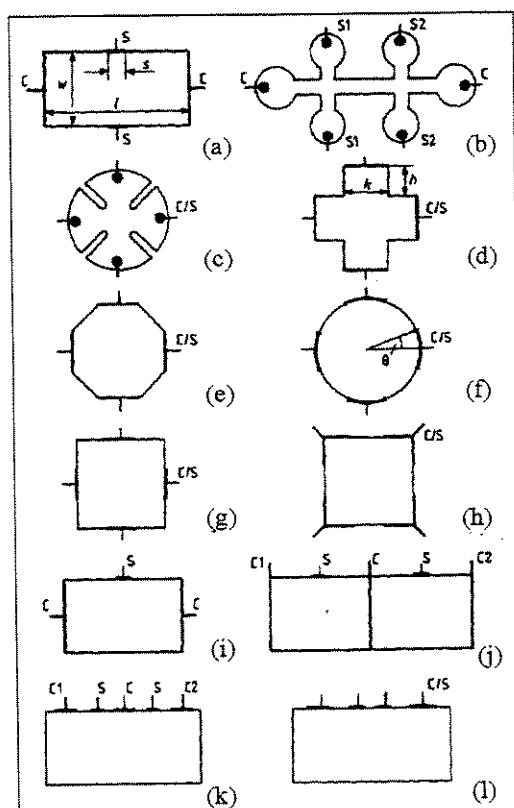


Fig. 6. Estruturas geométricas utilizadas para a fabricação de sensores Hall. Os contatos nomeados de C são os contatos onde a corrente é aplicada e os contatos S utilizados para medir a tensão Hall.

Os dispositivos Fig. 6 (c)-(h) são invariantes para uma rotação de $\pi/2$. Todos quatro contatos são equivalentes. Portanto, os contatos de corrente e os contatos Hall são intercambiáveis. Como mostrado mais adiante essa característica é utilizada para cancelamento da tensão offset. Os dispositivos (i)-(l) são sensores Hall perpendiculares¹⁸, utilizados para sentir um campo magnético paralelo à superfície da amostra, pois a região ativa é vertical à superfície.

Neste trabalho nos concentramos a estudar as duas geometrias mais utilizadas para a fabricação de dispositivos Hall: a retangular e a cruz. Além dos

coeficientes geométricos destas estruturas serem bem estudados¹⁹, seus layouts são mais fáceis de desenhar e fabricar quando comparados com estruturas em círculo, devido a limitações tecnológicas de alguns equipamentos de confecção de máscaras.

O fator de correção geométrico para o dispositivo Hall retangular, calculado pela técnica de mapeamento conforme, é representado na Fig 7 ^[14].

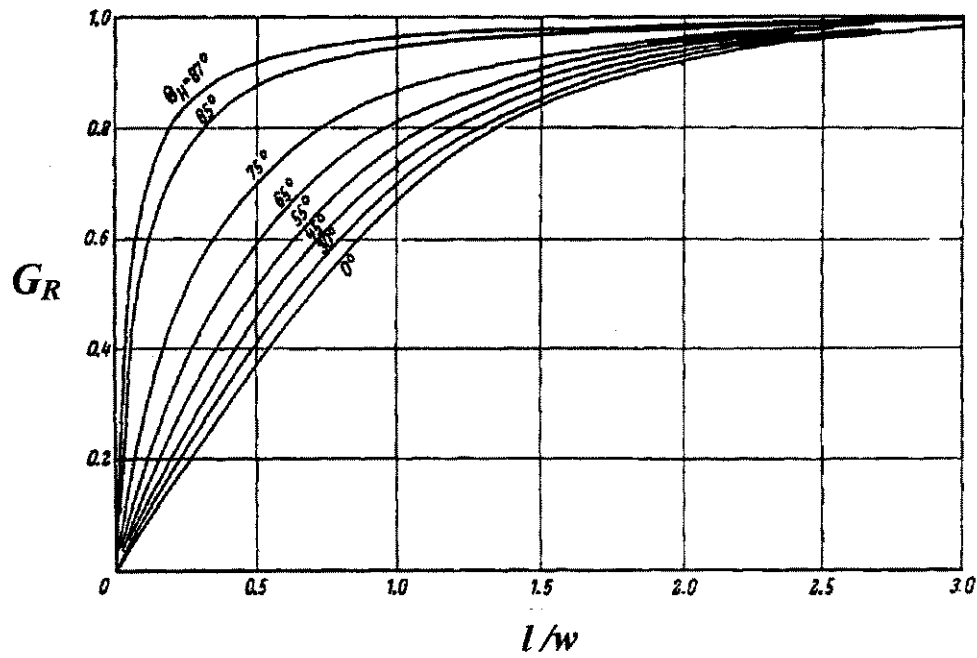


Fig. 7. O fator de correção geométrico (eq. 11) para um dispositivo Hall retangular (Fig. 2) com contatos Hall pontuais ($s/w < 1/20$) como função da razão comprimento/largura (l/w), para diferentes ângulos Hall (eq. 8).

Para um dispositivo Hall retangular (ver Fig. 2) relativamente longo ($l/w > 1.5$), com contatos Hall pontuais e ângulo Hall ($0 \leq \Theta_H \leq 0.45$) o fator de correção geométrico pode ser obtido pela função analítica¹⁴:

$$G_R = \left[1 - \frac{16}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi l}{2 w}\right) \frac{\Theta_H}{\tan \Theta_H} \right] \left[1 - \frac{2 s}{\pi w} \frac{\Theta_H}{\tan \Theta_H} \right] \quad (12)$$

O primeiro termo entre colchetes representa a influência do comprimento do dispositivo Hall e o segundo a influência dos contatos sobre o efeito Hall. Este coeficiente geométrico aproxima-se de 1 para $l/w > 3$ e $s/w < 1/20$, como visto na Fig. 7. Dentro dos limites acima, a exatidão da (eq. 12) é melhor do que 4%.

Para um dispositivo Hall retangular curto ($l/w < 0.35$) com contatos Hall pontuais e ângulos Hall pequenos ($\Theta_H < 0.45$), o fator de correção geométrico pode ser aproximado por¹⁴

$$G_R = 0.742 \frac{l}{w} \left[1 + \frac{\Theta_H^2}{6} \left(3.625 - 3.257 \frac{l}{w} \right) \right] \quad (13)$$

Dentro dos limites acima, a exatidão da (eq. 13) está entre 1%.

O gráfico mostrado na Fig. 8 exibe o coeficiente geométrico de um dispositivo Hall retangular como uma função do posicionamento dos contatos Hall ao longo da periferia isolante, para várias razões de l/w .

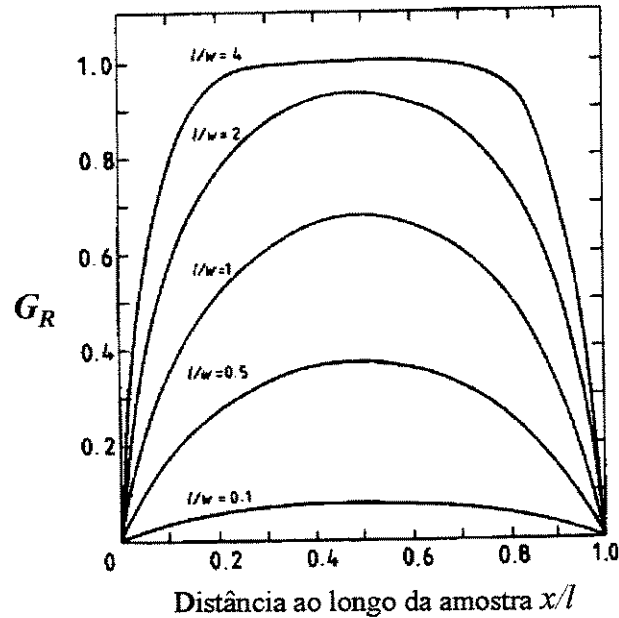


Fig. 8. O coeficiente geométrico como uma função da posição dos contatos Hall ao longo do comprimento de um dispositivo retangular ($0 < x < l$), para várias razões de l/w . Os contatos Hall são considerados pontuais ($s/w < 1/20$)^[10].

O gráfico da Fig. 8. deixa claro que para obtermos um alto valor para G_R a razão l/w deve ser maior que 3 e os contatos Hall pontuais devem ser posicionados no meio da barra Hall.

Para um dispositivo Hall com geometria em cruz, ver Fig. 6(d), o fator de correção geométrico pode ser obtido por¹⁴

$$G_c = 1 - \left[1.045 \exp\left(\frac{-\pi h}{k}\right) \frac{\Theta_H}{\tan \Theta_H} \right] \quad (14)$$

onde h é o comprimento dos braços da cruz e k a largura dos contatos. Esta função aproxima-se a 1 para $(h/k > 1)$ e sua exatidão fica dentro de 0,5 % se $(k/2h < 0,38)$. Por esta equação fica claro que para obtermos um alto valor para G_c os braços da cruz (h) devem ser longos.

2.4. FIGURAS DE MÉRITO DO SENSOR HALL

Neste item exibimos as principais figuras de mérito dos sensores Hall: tensão Hall, sensibilidade, tensão offset e linearidade.

2.4.1. TENSÃO HALL

A tensão Hall é a tensão que aparece entre os terminais Hall (C_3 e C_4 - Fig. 2) de um sensor Hall polarizado com corrente constante e sob a influência de um campo magnético perpendicular à superfície da região ativa. Através de (eq. 5 e 11), a tensão Hall para um dispositivo finito pode ser expressa por:

$$V_H = \frac{r_H}{qnt} I.B.G. \quad (15)$$

Note que o produto nt é a concentração de folha dos portadores na região ativa do dispositivo. Esta equação mostra a importância dos elementos Hall possuírem uma fina camada ativa (t) e de alta resistividade (baixa concentração de portadores n). No entanto, existe um limite físico para o mínimo valor do produto nt , devido ao efeito de depleção dos portadores. Existe a camada de depleção superficial devido ao potencial gerado por estados de superfície e a camada na interface tipo-n/semi-isolante. Um limite prático parece ser $nt > 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ [20].

2.4.2. SENSIBILIDADE

A sensibilidade é a característica mais importante de qualquer sensor. A sensibilidade absoluta de um elemento Hall é definida como

$$S_A = |V_H/B|. \quad (16)$$

No entanto, também podemos definir a sensibilidade relativa, isto é, dividimos a sensibilidade absoluta pela quantidade física modulada, corrente de polarização I . Então, através de (eq. 15 e 16) podemos definir a sensibilidade relacionada à corrente de polarização como

$$S_{RI} = \frac{S_A}{I} = \frac{r_H}{qnt} G. \quad [\text{V/A.T} = \text{volt / ampere.tesla}] \quad (17)$$

2.4.3. TENSÃO OFFSET

Uma das mais importantes figuras de mérito dos sensores integrados Hall é a tensão residual, mais conhecida como tensão *offset*, que aparece nos

eletrodos Hall (C_3 e C_4 - Fig. 2) sem a presença do campo magnético. Idealmente na ausência de um campo magnético a tensão extraída nos contatos Hall, deveria ser zero. As maiores causas da tensão *offset* em dispositivos Hall são devido a imperfeições no processo de fabricação, tal como desalinhamentos dos contatos e não homogeneidade da densidade de corrente na camada ativa causada pela não uniformidade na espessura e resistividade (ΔR) da região ativa. Um *stress* mecânico em combinação com o efeito piezoresistivo^{21, 22}, pode também produzir *offset*, durante o encapsulamento da pastilha (*die*). O efeito piezoresistivo no GaAs é uma ordem de grandeza menor que no silício. Todas as causas do *offset* podem ser representadas usando um simples modelo de circuito ponte de um dispositivo Hall, como mostrado na Fig. 9.

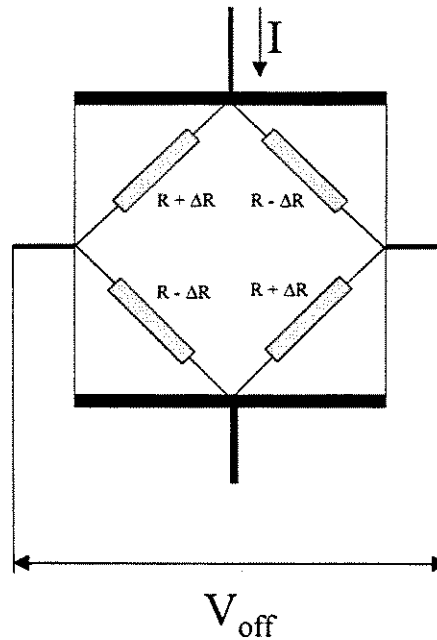


Fig. 9. Modelo de circuito ponte de um dispositivo Hall. Idealmente, os quatro resistores deveriam ser iguais. Variações na resistência ΔR levam à assimetria da ponte. O resultado é a tensão offset V_{off} .

A tensão offset causada pela assimetria da ponte é dada por

$$V_{off} = \Delta R \cdot I. \quad (18)$$

A tensão offset é usualmente representada por um campo magnético equivalente $B_{off,eq}$ correspondente à tensão offset V_{off} , isto é

$$B_{off,eq} \equiv V_{off}/S_A. \quad (19)$$

onde S_A denota a sensibilidade absoluta (eq. 16).

2.4.4. LINEARIDADE

Em algumas aplicações de sensores Hall é particularmente importante que a relação de proporcionalidade na (eq. 15), $V_H \sim BI$, possua um alto grau de exatidão. No entanto, algum erro de linearidade é apresentado quando realizamos medidas da tensão Hall versus campo magnético. Portanto, é útil medir o erro de linearidade (NL) de um sensor Hall que pode ser expresso, em escala percentual, pela razão²³

$$NL = \frac{V_H - V_{H0}}{V_{H0}} \quad (20)$$

Aqui V_H é a tensão Hall Medida e V_{H0} é a melhor adaptação linear para os valores medidos.

Se algum dos termos r_H , n , t e G na (eq. 15) variar com o campo magnético ou com a corrente de polarização, o sensor exibirá uma não linearidade, que nós chamamos de não linearidade do material, geométrica, ou do efeito da camada de depleção²⁴, respectivamente.

2.4.5. RUÍDO

O fenômeno do ruído limita severamente a performance do sensor. Para aplicações de campos magnéticos baixos, a razão sinal/ruído (SNR) é a figura de mérito dominante de um sensor.

A densidade espectral de tensão ruído através dos contatos Hall é dado por

$$S_V(f) = S_{V\alpha}(f) + S_{VT}. \quad (21)$$

onde $S_{V\alpha}$ representa o ruído $1/f$ e S_{VT} o ruído térmico. De acordo com o conceito do ruído $1/f$, $S_{V\alpha}$ é dado por uma expressão semi-empírica que pode ser escrita por¹⁴:

$$S_{V\alpha} = \alpha \left(\frac{V}{l} \right)^2 \left(\frac{1}{2\pi n t f} \right) \log \left(\frac{w}{s} \right) \quad (22)$$

onde α é o parâmetro *Hooge* do ruído $1/f$, f a frequência e $\log$ o logaritmo na base 10. O parâmetro Hooge α tem sido considerado constante com valor aproximadamente de 10^{-3} .

A densidade espectral de ruído térmico é¹⁴

$$S_{VT} = 8kT \left(\frac{1}{\pi \mu_n q n t} \right) \log \left(\frac{w}{s} \right) \quad (23)$$

com T agora denotando a temperatura absoluta.

2.4.6. COEFICIENTE DE TEMPERATURA

O coeficiente de temperatura é definido como a variação da sensibilidade (eq. 17) do sensor em função da temperatura. Essa variação ocorre devido a variação do fator Hall r_H em função da temperatura. Também, pode haver a influência da temperatura sobre as características da camada ativa (mobilidade e concentração de portadores) dependendo do semicondutor e da faixa de temperatura de operação. Por isso, dispositivos fabricados com materiais de maior banda proibida de energia (*band-gap*), como o semicondutor GaAs, apresentam maior estabilidade, quando comparados com semicondutores de menor banda proibida (Si, InAs e InSb).

CAPÍTULO III – PROJETO DOS SENSORES HALL

3.1. PROJETO DA GEOMETRIA

Projetamos os dispositivos Hall com duas geometrias diferentes com o objetivo de estudar a influência geométrica sobre as características dos sensores, tais como a sensibilidade e tensão *offset*. As geometrias escolhidas foram a retangular e a “cruz-grega”. Através deste projeto geométrico, com dispositivos de várias dimensões podemos verificar a influência da geometria sobre os parâmetros dos sensores: tensão Hall, sensibilidade, tensão offset e linearidade.

O ângulo Hall (eq. 8) utilizado para o cálculo dos coeficientes geométricos foi de 16° , pois como veremos mais adiante nossas camadas ativas possuem mobilidade de elétrons em torno de $3000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, e a faixa magnética estudada de até 1,2 T (tesla).

3.1.1. GEOMETRIA RETANGULAR

Projetamos os dois dispositivos retangulares exibidos na Fig. 10.

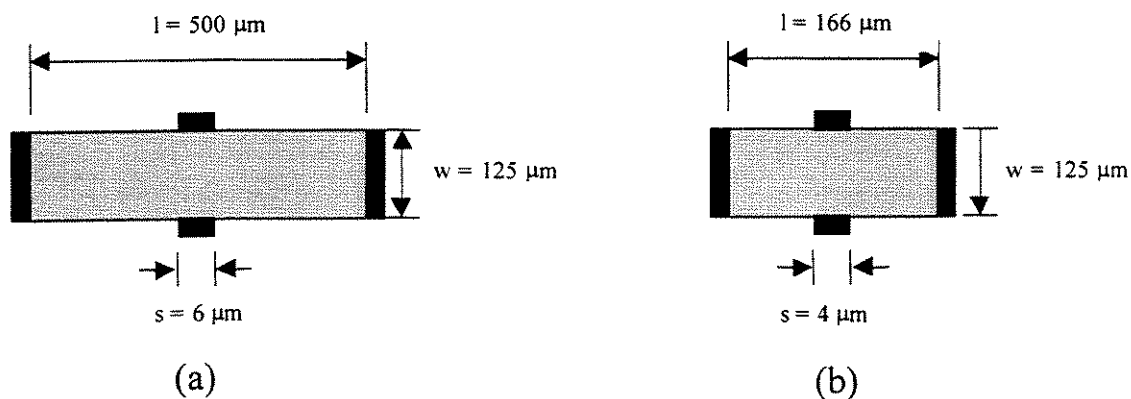


Fig. 10. Sensores Hall de geometria retangular. (a) Dispositivo Hall ideal ($G_R = 0.97$); (b) dispositivo Hall curto ($G_R = 0.80$).

O dispositivo Hall exibido na Fig. 10(a) foi projetado para apresentar alta sensibilidade (eq. 17), portanto, de acordo com seu projeto geométrico ($l/w = 4$; $s/w = 0.048$), possui um alto valor para seu coeficiente geométrico (eq. 12) no valor de $G_R = 0.97$. Este é considerado um dispositivo Hall longo ($l \gg w$) e suas dimensões são $l = 500 \mu\text{m}$, $w = 125 \mu\text{m}$ e $s = 6 \mu\text{m}$. O dispositivo da Fig. 10(b) foi projetado mais curto ($l/w = 1.33$; $s/w = 0.032$) com dimensões de $l = 166 \mu\text{m}$, $w = 125 \mu\text{m}$ e $s = 4 \mu\text{m}$. O coeficiente geométrico (eq. 12) desta estrutura tem um valor de ($G_R \cong 0.80$).

3.1.2. GEOMETRIA “CRUZ-GREGA”

A estrutura em cruz apresenta facilidades de fabricação quando comparada à retangular, pois uma estrutura retangular com largura (w) de $15 \mu\text{m}$ precisaria possuir contatos Hall sub-micron, dificultando a fabricação do dispositivo. Além disso, a estrutura cruz é simétrica numa rotação de $(\pi/2)$ podendo ser utilizada para diminuir a tensão offset como falaremos mais adiante. Essa estrutura permite que se utilize qualquer par de contatos para passar a corrente, extraíndo a tensão Hall nos contatos ortogonais ao fluxo de corrente. Projetamos quatro estruturas com geometria em forma de cruz, Fig. 11 e 12.

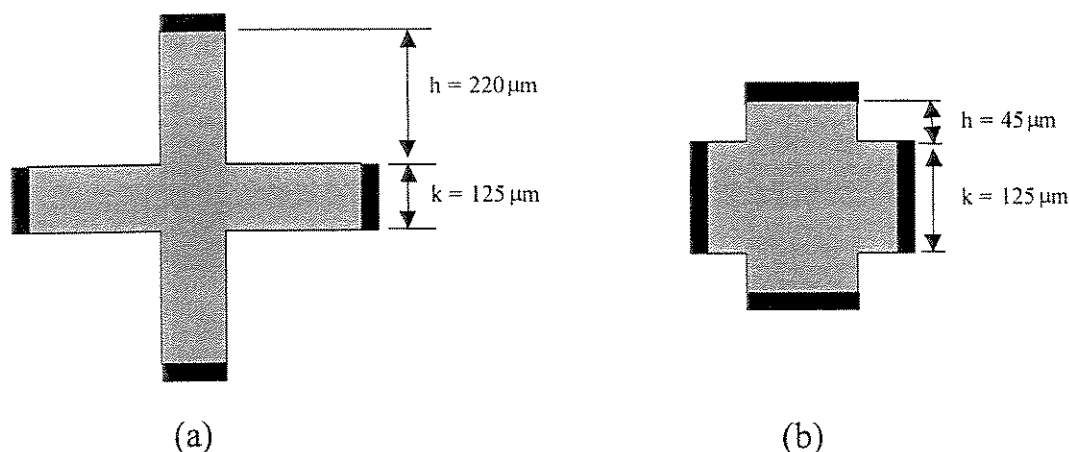


Fig. 11. Sensores Hall de geometria “cruz-grega”. (a) Dispositivo Hall longo ($G_C = 0,98$); (b) dispositivo Hall “curto” ($G_C = 0,67$).

O dispositivo visto na Fig. 11(a) foi projetado para ser um dispositivo longo ($h > k$) e apresentar alta sensibilidade (eq. 17). Desta maneira seu coeficiente geométrico (eq. 14) deveria aproximar-se de 1, para isso determinamos ($h/k = 1.76$) e obtemos um coeficiente geométrico com valor de $G_C = 0.98$. As dimensões deste dispositivo são $h = 220 \mu\text{m}$ e $k = 125 \mu\text{m}$.

O segundo dispositivo em cruz, Fig. 11(b), foi projetado para ser um dispositivo considerado bem “curto”, portanto, determinamos que ele tivesse um coeficiente geométrico de $G_C = 0.67$. Suas dimensões são $h = 45 \mu\text{m}$ e $k = 125 \mu\text{m}$.

Também, projetamos os dispositivos em cruz vistos na Fig. 12.

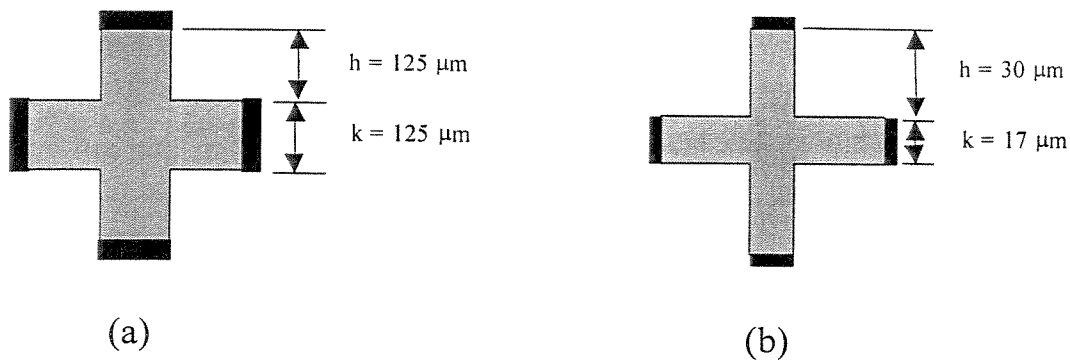


Fig. 12. Sensores Hall de geometria “cruz-grega”. (a) Dispositivo Hall com ($h/k = 1$) ($G_C = 0.95$); (b) dispositivo Hall ideal ($G_C = 0.98$).

O dispositivo da Fig. 12 (a) foi projetado com ($h/k = 1$) e desta maneira possui um coeficiente geométrico igual a $G_C = 0.95$. As dimensões deste dispositivo são $h = 125 \mu\text{m}$ e $k = 125 \mu\text{m}$.

O dispositivo da Fig. 12 (b) foi projetado com o mesmo coeficiente geométrico que a cruz da Fig. 11 (a), $G_C = 0.99$. Assim, ambos possuem o mesmo valor para a razão ($h/k = 1.76$). A diferença entre eles é que o dispositivo da Fig. 12 (b) foi projetado numa dimensão muito menor que o da Fig. 11 (a), portanto, apresenta melhor resolução espacial²⁵. Dispositivos sub-micron são utilizados para mapeamento de campo magnético com precisão²⁶ e memórias magnéticas com alta escala de integração²⁷.

Em dispositivos sub-micron a dissipação de potência não é tão importante, uma vez que a redução das dimensões implica numa condutividade de calor mais eficiente. Em vez disso, a influência de campos elétricos altos torna-se o fator dominante. Neste caso, a velocidade de deriva (eq. 2) dos portadores poderá alcançar seu valor máximo $v_{\max} \equiv v_{\text{sat}}$ ($v_{\max} = 2 \times 10^7$ cm/s para 300 K), limitando a sensibilidade dispositivo Hall²⁸.

3.1.3. ESTRUTURAS DE “VAN DER PAUW”

A geometria quadrada, Fig. 13, foi projetada para ser uma estrutura teste para caracterização da camada dopada através de medidas de efeito Hall. Esta geometria é conhecida por estrutura de van der Pauw e muito utilizada para a caracterização das camadas dopadas, pois possui características que diminuem os erros nas medidas: estrutura simétrica com contatos muito pequenos (contatos pontuais) e localizados na periferia da amostra^{29, 30}. Através das medidas de efeito Hall podemos levantar alguns parâmetros importantes da camada ativa, tais como mobilidade dos portadores, densidade de portadores e resistência de folha.

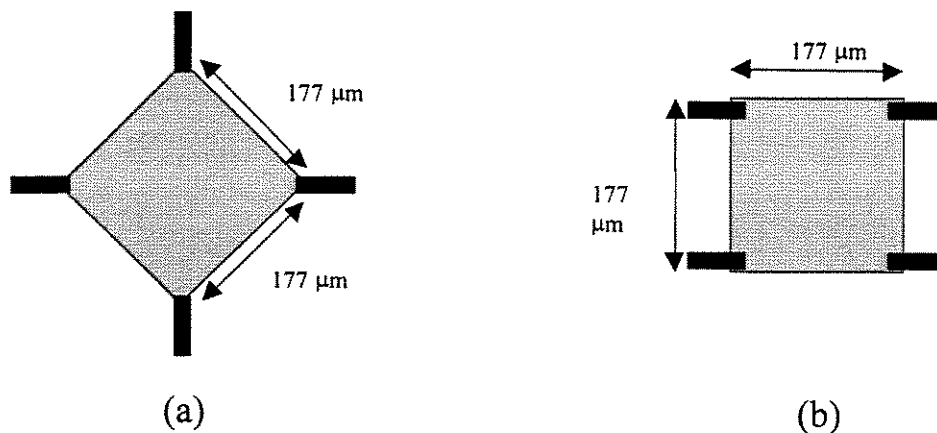


Fig. 13. Estruturas Hall quadradas (van der Pauw) para caracterização das camadas dopadas.

3.1.4. ESTRUTURAS PARA CANCELAMENTO DE OFFSET

Como vimos anteriormente, as principais causas do surgimento da tensão *offset* são devido a problemas introduzidos durante a fabricação do dispositivo, como não uniformidade na espessura e resistividade da camada ativa e desalinhamentos durante a fotogração. Dispositivos Hall com uma geometria que é invariante sobre uma rotação de 90° , Fig. 6 (c)-(h), são conhecidos por simétricos e permitem a aplicação de um método para redução automática da tensão *offset*. Neste método dois elementos Hall simétricos são fabricados um ao lado do outro^{31, 32}. Aproveitando o fato de que dispositivos fabricados lado a lado apresentarão erros sistemáticos relacionados à imperfeições durante o processo de fabricação e assim, o mesmo valor para a tensão *offset*, foi desenvolvido o método para eliminar o *offset*. Basta utilizar dois dispositivos em vez de um e alimentá-los de forma que a corrente de polarização sofra uma rotação de 90° no segundo dispositivo. Esta configuração pode ser vista na Fig 14.

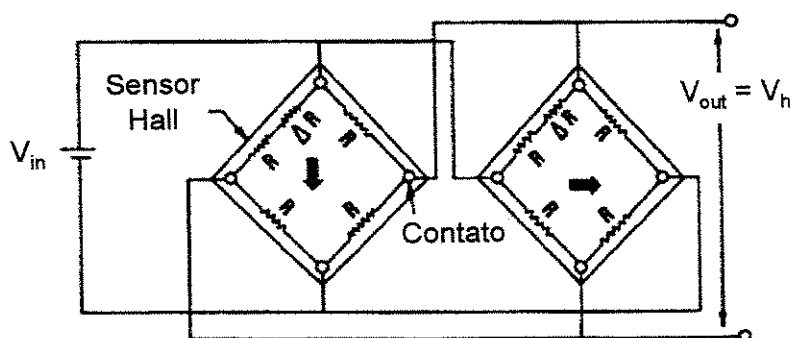


Fig. 14. Dois dispositivos Hall simétricos conectados, para cancelamento da tensão *offset*.

Dessa maneira inverte-se a polaridade da tensão sobre o resistor desbalanceado, que representa o *offset*, e este é cancelado. Entretanto, a tensão Hall não têm a sua polaridade invertida, e assim é preservada. Projetamos duas configurações com este método utilizando os dispositivos simétricos da Fig. 12(a) e Fig. 13 (a).

3.2. PROJETO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O objetivo foco deste trabalho foi fabricar sensores Hall pela técnica de implantação iônica de $^{29}\text{Si}^+$ compatível com tecnologia de fabricação de MESFET's. Entretanto, também fabricamos sensores Hall por camada epitaxial. As camadas obtidas por crescimento epitaxial apresentam menos defeitos cristalográficos quando comparados às camadas implantadas, favorecendo o aumento da mobilidade dos portadores de carga e, portanto, a fabricação de dispositivos mais sensíveis (eq. 2 e 4). No entanto, o processo de obtenção de camadas ativas por implantação iônica é mais barato que o de crescimento epitaxial e amplamente utilizado para fabricação de circuitos integrados.

3.2.1. PROCESSO PARA FABRICAR O SENSOR EM CAMADA IMPLANTADA

O processo desenvolvido para a fabricação dos sensores Hall por implantação iônica de $^{29}\text{Si}^+$ é compatível com a tecnologia de fabricação de MESFET's utilizada pelo LPD/Unicamp. Para o processo de fabricação utilizamos lâminas de GaAs s.i. (100) com resistividade de $\rho = 3 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ e densidade de defeitos com $\text{EPD} < 2.000 \text{ cm}^{-2}$.

As etapas de fabricação dos dispositivos são exibidas na Fig. 15.

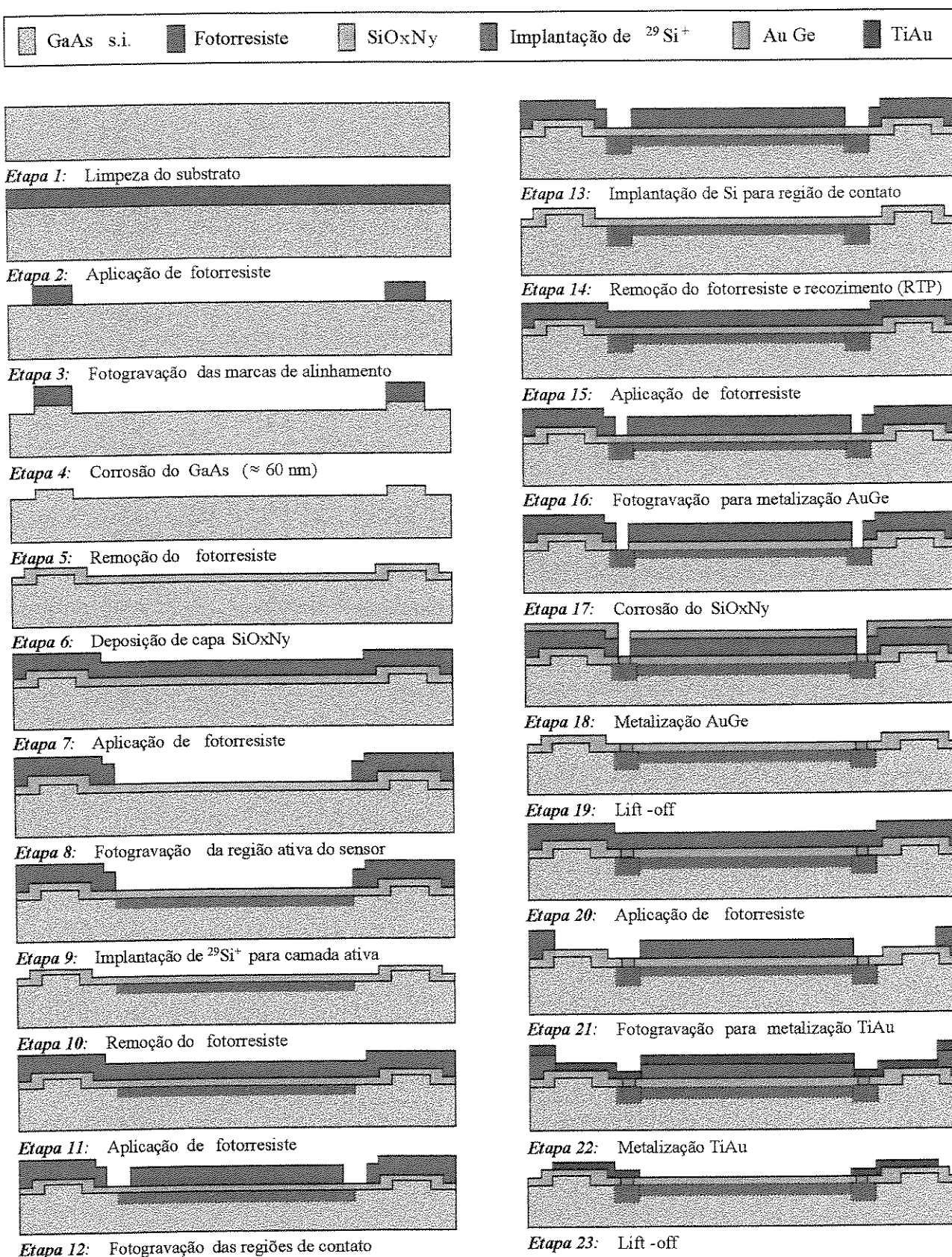


Fig. 15. Processo de fabricação dos sensores Hall por implantação iônica de ²⁹Si⁺.

Cada uma das etapas de fabricação vista na Fig. 15 são descritas em detalhes:

- **Etapa 1** (Limpeza do substrato)
 - Limpeza orgânica padrão:
 - Fervura em tricloro-etileno por 10 min
 - Fervura em Acetona por 10 min
 - Fervura em Isopropanol (ou metanol) por 10 min
 - Enxágüe em água deionizada
 - Secagem em jato de N_2
- **Etapa 2** (Aplicação de fotorresiste)
 - Secagem da lâmina a 118 °C por 15 min
 - Aplicação de fotorresiste positivo SPR 3012 com *spin* a 4000 rpm por 40s
 - Tratamento térmico (pré-bake) do fotorresiste a 90 °C por 4 min
- **Etapa 3** (Fotogravação das marcas de alinhamento)
 - Exposição a 9 mW/cm² por 40s
 - Revelação em solução de AZ400:H₂O (10:35) por 30-40 s
 - Lavagem em água deionizada (DI)
 - Secagem em jato de N_2
 - Controle visual
 - Tratamento térmico (pós-bake) a 110 °C por 1 min
 - Tratamento no plasma de oxigênio (barril) para retirar os resíduos de fotorresiste em janelas :
 - Fluxo de O₂ (50 sccm)
 - Potência de RF (100 W)
 - Pressão (120 mTorr)
 - Tempo (3 min)
- **Etapa 4** (Corrosão do GaAs)
 - Ataque químico de 60 nm de GaAs em solução H₂O:NH₄OH:H₂O₂ (400:2:1) por 1 min. A taxa de corrosão desta solução é de 60 nm/min.

- **Etapa 5** (Remoção do fotorresiste)
 - Remoção do fotorresiste com acetona. O restante do fotorresiste é retirado em SN-12 com temperatura 95 °C por 5 min
 - Enxágüe em isopropanol (ou metanol)
 - Enxágüe em água deionizada
 - Secagem em jato de N₂
 - Limpeza orgânica padrão (ver Etapa 1)
- **Etapa 6** (Deposição da capa de SiO_xN_y)
 - Remoção do óxido nativo por meio de imersão em HCL:H₂O (1:10) por 10 s imediatamente antes do carregamento de lâminas.
 - Deposição de SiO_xN_y com espessura de 100 nm por técnica de Plasma de ECR (*Electron Cyclotron Resonance*):
 - Potência do ECR (750 W)
 - Pressão (4 mTorr)
 - Temperatura (20 °C)
 - Tempo (8 min)
 - Potência de RF (10 W)
 - Fluxo de O₂ (7 sccm)
 - Fluxo de Ar (20 sccm)
 - Fluxo de SiH₄ (200 sccm)
 - Fluxo de N₂ (13 sccm)
- **Etapa 7** (Aplicação de fotorresiste – ver Etapa 2)
- **Etapa 8** (Fotogravação da região ativa do sensor – ver Etapa 3)
- **Etapa 9** (Implantação iônica através da capa de SiO_xN_y)
 - Fabricação do primeiro sensor
 - Implantação de ²⁹Si⁺ para as camadas ativa dos sensores. Dose e energia como variáveis (ver capítulo 4)
 - Temperatura ambiente
 - Rotação 30°
 - Inclinação 13°
 - Densidade de corrente ≤ 10 nA/cm²

- **Etapa 10** (Remoção do fotorresiste – ver Etapa 5)
- **Etapa 11** (Aplicação de fotorresiste – ver Etapa 2)
- **Etapa 12** (Fotogração das regiões de contato – ver Etapa 3)
- **Etapa 13** (Implantação iônica através de capa de SiO_xN_y para regiões de contato)
 - Implantação de $^{29}\text{Si}^+$ ($E = 180 \text{ keV}$, $\phi = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)
 - Implantação de $^{29}\text{Si}^+$ ($E = 360 \text{ keV}$, $\phi = 5,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)
 - Temperatura ambiente
 - Rotação 30°
 - Inclinação 13°
 - Densidade de corrente $\leq 20 \text{ nA/cm}^2$
- **Etapa 14** (Remoção do fotorresiste e recozimento)
 - Remoção do fotorresiste (ver Etapa 5)
 - Recozimento
 - Forno RTP com fluxo de Ar de 2 l/min
 - Pré-recozimento a 450°C por 30 s , rampa de 50°C/s
 - Recozimento a (900°C , 925°C , 950°C ou 975°C) por 10s , rampa de 50°C/s
- **Etapa 15** (Aplicação de fotorresiste – ver Etapa 2)
- **Etapa 16** (Fotogração para metalização AuGe – ver Etapa 3)
- **Etapa 17** (Corrosão do SiO_xN_y – Janelas para contatos)
 - Potência de ECR 1000 W
 - Pressão 10mTorr
 - Temperatura 20°C
 - Tempo 3 min
 - Potência de RF 50 W
 - Fluxo de SF_6 10 sccm
- **Etapa 18** (Evaporação dos metais para contatos ôhmicos por meio de feixe de elétrons)
 - Ni – 5 nm ; Ge – 50 nm ; Au – 100 nm ; Ni – 30 nm ; Au – 100 nm ;

- **Etapa 19** (Processo de *lift-off* e tratamento térmico para liga de contato)
 - Acetona por 12 horas
 - Jato de acetona
 - Tratamento no plasma de oxigênio para retirar os resíduos de fotorresiste.
 - Limpeza orgânica padrão (ver Etapa 1)
 - Tratamento térmico no forno convencional
 - Temperatura 460 °C
 - Tempo 3 min
 - Fluxo de N₂ 1 l/min
- **Etapa 20** (Aplicação de fotorresiste – ver Etapa 2)
- **Etapa 21** (Fotogravação para metalização TiAu – ver Etapa 3)
- **Etapa 22** (Evaporação dos metais de interconexões por meio de feixe de elétrons)
 - Ti – 50 nm; Au – 400 nm;
- **Etapa 23** (Processo de *lift-off* e sintetização de contatos)
 - Acetona por 12 horas
 - Jato de acetona
 - Tratamento no plasma de oxigênio para retirar os resíduos de fotorresiste.
 - Limpeza orgânica padrão (ver Etapa 1)
 - Tratamento térmico para sintetização dos contatos entre níveis no forno convencional
 - Temperatura 270 °C
 - Tempo 5 min
 - Fluxo de N₂ 1 l/min

3.2.2. PROCESSO PARA FABRICAR O SENSOR EM CAMADA EPITAXIAL

A camada epitaxial especificada para a fabricação destes sensores pode ser vista na Fig. 16.

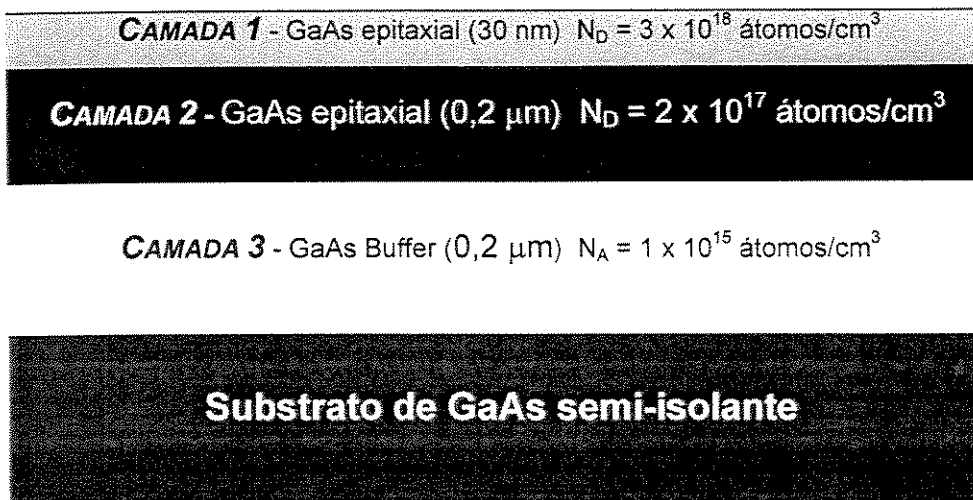


Fig. 16. Camada epitaxial especificada para o sensor Hall. A camada 2 é a região utilizada como camada ativa dos dispositivos Hall.

Esta camada epitaxial foi crescida por sistema CBE (*Chemical Beam Epitaxy*), com mais detalhes exibidos no item 4.1.2.

As etapas de fabricação dos sensores Hall em camada epitaxial são semelhantes ao processo desenvolvido para camadas implantadas, mas com algumas alterações:

- **Etapas 1** (Limpeza do substrato).
- **Etapas 2** (Aplicação de fotorresiste).
- **Etapas 3** (Fotogravação da região ativa e marcas de alinhamento).
- **Etapas 4** (Corrosão de mesas)
 - Ataque químico de 430 nm de GaAs em solução $H_2O:NH_4OH:H_2O_2$ (400:2:1) por 7 min.
- **Etapas 5** (Remoção do fotorresiste)
- **Etapas 6** (Limpeza do substrato).
- **Etapas 7** (Aplicação de fotorresiste).
- **Etapas 8** (Fotogravação das regiões de contato ôhmico).
- **Etapas 9** (Corrosão do GaAs)
 - Ataque químico de 30 nm de GaAs em solução $H_2O:NH_4OH:H_2O_2$ (400:2:1) por 35 segundos. A taxa de corrosão desta solução é de 60 nm/min.

- Esta etapa remove a camada de alta dopagem crescida sobre a região ativa, deixando-a somente nas regiões de contato.
- **Etapa 10** (Remoção do fotorresiste)
- **Etapa 11** (Limpeza do substrato).
- **Etapa 12** (Aplicação de fotorresiste)
- **Etapa 13** (Fotogravação para metalização AuGe)
- **Etapa 14** (Evaporação dos metais para formação dos contatos)
- **Etapa 15** (Processo de *lift-off* e *Alloy*)
- **Etapa 16** (Limpeza do substrato).
- **Etapa 17** (Deposição da capa de SiO_xN_y)
- **Etapa 18** (Aplicação de fotorresiste)
- **Etapa 19** (Fotogravação para abertura de vias)
- **Etapa 20** (Corrosão do SiO_xN_y)
- **Etapa 21** (Aplicação de fotorresiste)
- **Etapa 22** (Fotogravação para metalização de interconexão TiAu)
- **Etapa 23** (Evaporação dos metais de interconexões)
- **Etapa 24** (Processo de *lift-off* e sintetização de contatos)

A Fig. 17 mostra uma visão transversal do dispositivo Hall na camada epitaxial após o término do processo de fabricação.

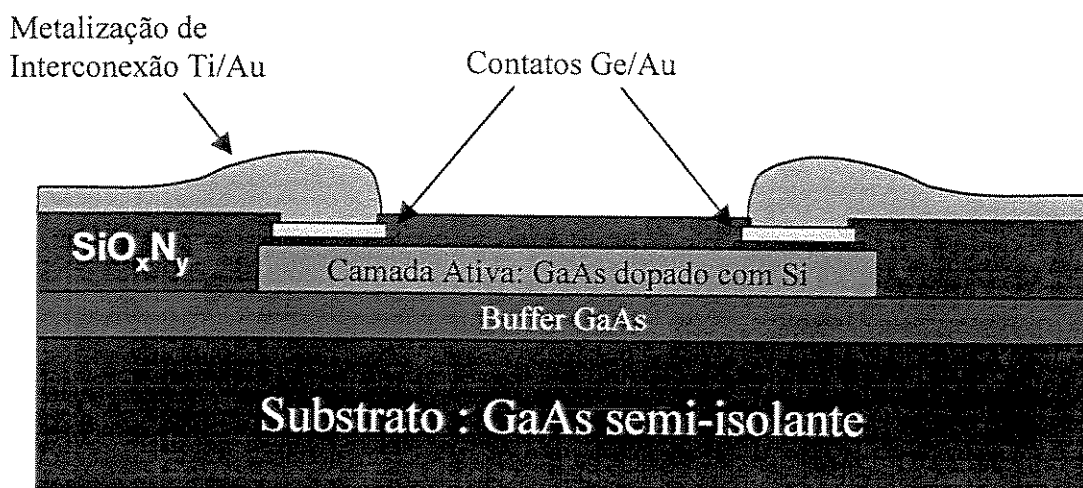


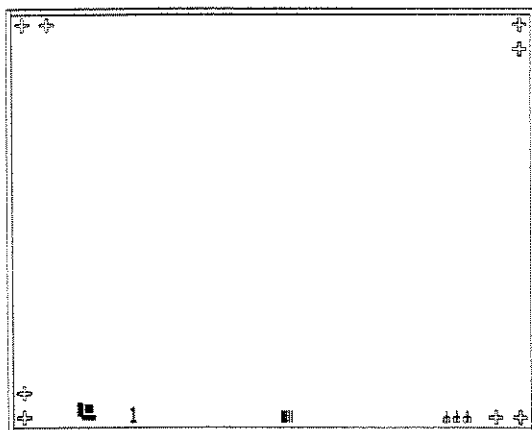
Fig. 17. Visão transversal do sensor Hall fabricado em camada epitaxial por técnica de corrosão de mesa.

3.3. PROJETO E FABRICAÇÃO DAS MÁSCARAS

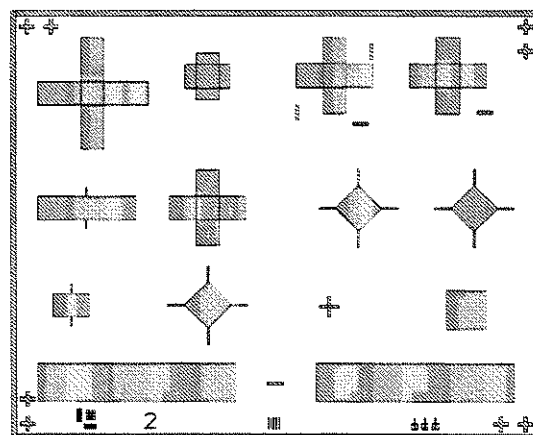
Após o projeto dos dispositivos e o desenvolvimento do processo de fabricação, desenhamos os *layouts* das máscaras no software LASI. Este aplicativo pode ser conseguido gratuitamente pela Internet (www.mrc.uidaho.edu/vlsi/cad_free.html) e instalado em qualquer computador pessoal que utilize o sistema operacional Windows. Seus arquivos podem ser convertidos para formatos amplamente utilizados hoje em dia, tais como CIF, GDS ou GDSII.

Desenhamos cinco *layouts* para a fabricação dos sensores Hall: marcas de alinhamento (nível 1), região ativa dos sensores Hall (nível 2), regiões de contato ôhmico (nível 3), metalização de contatos (nível 4) e metalização de interconexões (nível 5). Introduzimos estruturas de teste como TLM, para medir resistência entre contatos, estruturas para checar isolamento entre níveis e diversas estruturas para acompanhamento das etapas de processo, tais como *verniers* para controle de revelação de fotorresiste e estruturas para identificar desalinhamento entre máscaras. As máscaras foram desenhadas de tal forma a possibilitar a fabricação de dispositivos por implantação iônica (campo escuro) e por corrosão de mesa com GaAs epitaxial (campo claro).

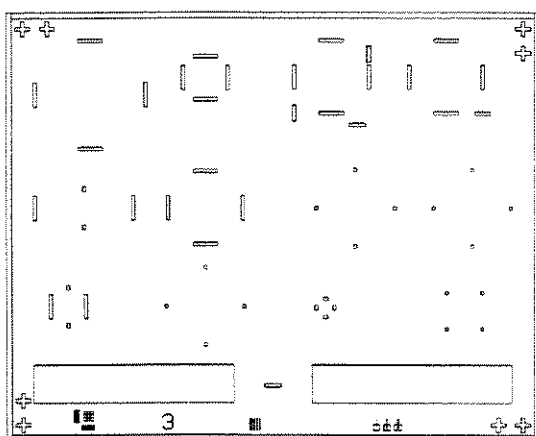
Os *layouts* desenhados para a fabricação dos dispositivos Hall podem ser vistos na Fig. 18. O nível 1 é exibido na Fig. 18 (a). Este nível têm apenas a função de introduzir no substrato algumas marcas para podermos alinhar os níveis posteriores. A fabricação do sensor Hall, propriamente dito, começa a partir do nível 2, Fig. 18 (b). Com este nível definimos a região ativa do dispositivo Hall através de implantação de $^{29}\text{Si}^+$ (item 3.2.1) ou corrosão da mesa (item 3.2.2), de acordo com o processo de fabricação comentado anteriormente. A implantação de alta dose de $^{29}\text{Si}^+$, para as regiões onde serão formados os contatos ôhmicos, será efetuada através do nível 3 mostrado na Fig. 18 (c). O nível 4 visto na Fig. 18 (d) define as regiões da primeira metalização, onde será evaporado AuGe, e o nível da Fig. 18 (e) define as regiões da segunda metalização (TiAu) para interconexões. O *layout* final pode ser visto na Fig. 18 (f), que nada mais é do que a sobreposição dos cinco níveis anteriores.



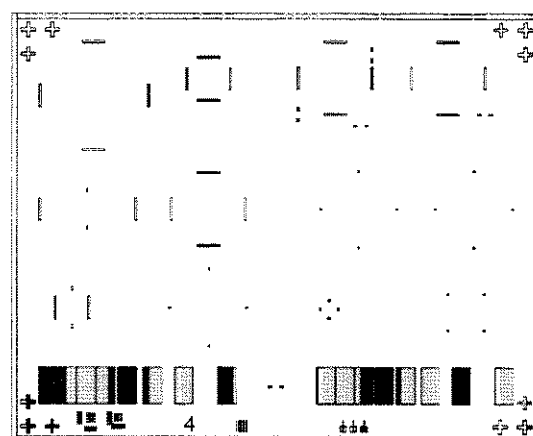
(a) Layout 1 : Marcas de alinhamento



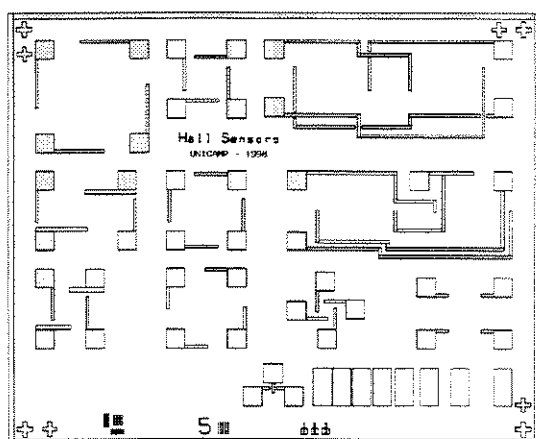
(b) Layout 2: Camada ativa dos sensores Hall



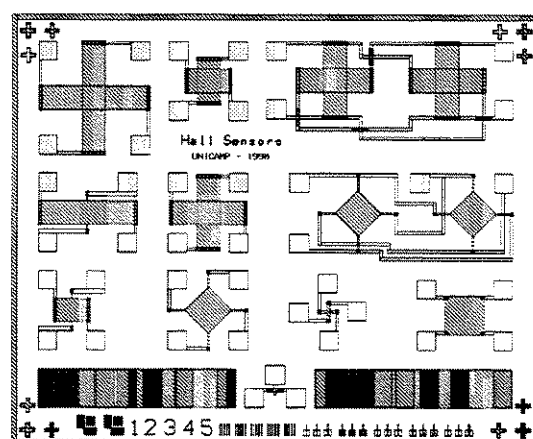
(c) Layout 3: Região de contatos ôhmicos



(d) Layout 4 : Primeira metalização (AuGe)



(e) Layout 5: Segunda metalização (TiAu)



(f) Layout final

Fig. 18. Layouts dos níveis de fabricação dos sensores Hall.

As máscaras foram fabricadas em substrato de quartzo banhado com cromo. Os layouts foram gravados em equipamento de feixe de elétrons no CCS/UNICAMP. Cada nível exibido na Fig. 18 foi distribuído e repetido várias vezes através de quatro quadrantes em duas máscaras, uma de campo escuro, Fig. 19 (a), e uma de campo claro, Fig. 19 (b). A máscara de campo escuro é utilizada para a fabricação por implantação iônica e a máscara de campo claro para o processo epitaxial.

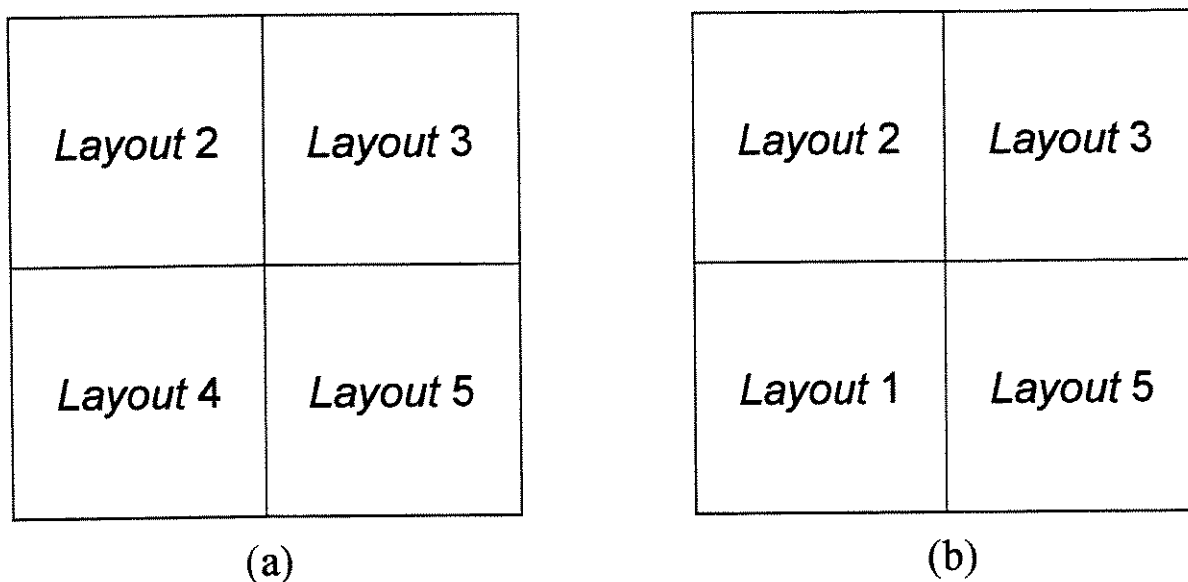


Fig. 19. Distribuição dos *layouts* em duas máscaras de quartzo: (a) máscara de campo escuro e (b) máscara de campo claro.

CAPÍTULO IV – FABRICAÇÃO DOS SENSORES HALL

4.1. TESTES PRELIMINARES DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Realizamos algumas implantações para obter camadas ativas de baixa concentração de portadores ($\approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) e diversas espessuras (0.2-0.5 μm). Também, fabricamos a camada epitaxial, exibida na Fig. 16, com concentração de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ e espessura de 0.2 μm .

4.1.1. OBTENÇÃO DAS CAMADAS POR IMPLANTAÇÃO IÔNICA

Realizamos alguns testes de processos antes de iniciar a fabricação dos dispositivos com o objetivo de calibrar algumas etapas do processo e obter camadas de interesse prático para sensores Hall. De acordo com a (eq. 17) podemos verificar que a sensibilidade do sensor é inversamente proporcional ao produto nt . Portanto, de acordo com o projeto geométrico das estruturas (item 3.1.) e com uma camada ativa com concentração de portadores ao redor de 10^{17} cm^{-3} e espessura entre 0.2-0.5 μm , esperamos obter dispositivos Hall com boa sensibilidade (85-350/ V/A.T).

Neste estudo preliminar, decidimos estudar implantações com doses e energias já utilizadas em artigos sobre fabricação de sensores Hall de GaAs^{13, 33}. Assim, fabricamos três camadas ativas com diferentes energias, e dose total de 7×10^{12} por camada, como visto nas tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros utilizados na implantação das amostras A_i , B_i , e C_i .

Amostras	Energia (keV)	Dose (cm^{-2})
A_1, A_2, A_3 e A_4	180	7×10^{12}
B_1, B_2, B_3 e B_4	180	2.5×10^{12}
	270	4.5×10^{12}
C_1 e C_2	180	1.85×10^{12}
	360	5.15×10^{12}

Estas implantações foram realizadas através de capa de SiO_xN_y de 100 nm de espessura. Esta capa tem o objetivo de aumentar a ativação elétrica dos átomos de silício implantados, pois durante o recozimento ela evita a fuga de As do substrato de GaAs. Após a deposição desta capa de oxinitreto, medimos a espessura por um equipamento conhecido por perfilômetro.

Especificamos 3 camadas com diferentes espessuras e concentrações de portadores para obtermos dispositivos com características diferentes, assim, podemos analisar a influência destes fatores sobre a sensibilidade dos sensores. Através de camadas rasas e de baixa concentração podemos obter dispositivos mais sensíveis (ver eq. 17).

As simulações das implantações exibidas na tabela 2 foram realizadas no software TRIM com capa de oxinitreto SiO_xN_y de 100 nm. O substrato de GaAs foi inclinado com um ângulo de 13° e rotação de 30° para evitar a canalização dos íons que poderia prejudicar a obtenção do perfil desejado. A simulação do perfil de implantação destas amostras é exibido na Fig. 20.

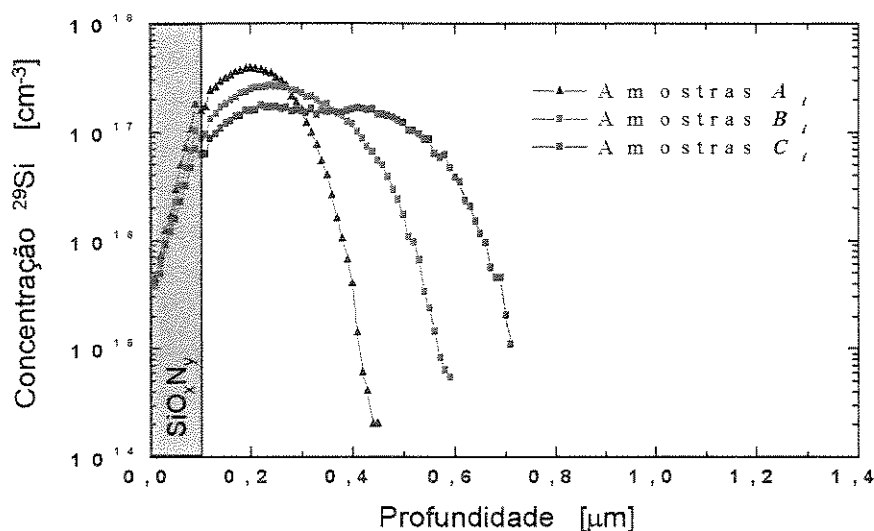


Fig. 20. Simulação do perfil de implantação nas amostras A_i , B_i e C_i realizado através do software TRIM.

A espessura das camadas implantadas é definida como sendo a profundidade onde a concentração de portadores fosse muito baixa ($\approx 1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$)²³.

Os parâmetros de implantação das amostras A_i foram selecionados para a profundidade (t) da camada ativa ficar ao redor de $0.3 \mu\text{m}$ (dentro do GaAs) e a concentração de pico de átomos de silício (N_D) em aproximadamente $4,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, como visto na Fig. 20. As amostras B_i foram projetadas para a espessura ficar em $0.45 \mu\text{m}$ com uma concentração de pico de átomos de $2,7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$. A implantação das amostras C_i foi projetada para que o perfil final de concentração de portadores ficasse com um valor aproximado de $1,7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ e uma profundidade perto de $0.55 \mu\text{m}$.

Em camadas implantadas necessita-se realizar um tratamento térmico para ativação elétrica dos portadores e restauração dos defeitos surgidos na rede cristalina devido o choque dos íons. Estas amostras foram recozidas em quatro diferentes temperaturas (900°C , 925°C , 950°C , 975°C) para verificar o efeito da ativação elétrica dos portadores de carga. A capa de oxinitreto da amostra C_2 foi

retirada antes do RTP para verificarmos o efeito da fuga de As quando comparada com a amostra C₁ que possui as mesmas características mas foi recozida com capa. As características destas camadas implantadas foram levantadas através de medidas de efeito Hall e podem ser vistas na tabela 3.

Tabela 3: Características das amostras implantadas (A_i, B_i, C_i) obtidas por medidas de efeito Hall.

Amostras	RTP (°C)	n_s (cm²)	Ativação elétrica (%)	n (cm³)	R_s (Ω/□)	μ_n (cm²/V.s)
A ₁	900	$2,87 \times 10^{12}$	41	$9,60 \times 10^{16}$	670	3250
A ₂	925	$3,00 \times 10^{12}$	43	$1,00 \times 10^{17}$	652	3200
A ₃	950	$3,23 \times 10^{12}$	46	$1,07 \times 10^{17}$	637	3040
A ₄	975	$4,05 \times 10^{12}$	58	$1,35 \times 10^{17}$	603	2560
B ₁	900	$1,59 \times 10^{12}$	23	$3,50 \times 10^{16}$	1000	3930
B ₂	925	$2,31 \times 10^{12}$	33	$5,00 \times 10^{16}$	840	3220
B ₃	950	$2,50 \times 10^{12}$	35	$5,50 \times 10^{16}$	927	3010
B ₄	975	$3,63 \times 10^{12}$	52	$8,00 \times 10^{16}$	679	2530
C ₁	900	$3,85 \times 10^{12}$	55	$7,00 \times 10^{16}$	454	3570
C ₂	900	$3,44 \times 10^{12}$	49	$6,25 \times 10^{16}$	519	3505

As medidas de efeito Hall utilizadas para obtenção dos parâmetros exibidos na Tabela 3 foram realizadas com pequenas amostras (0,5 x 0,5 cm), onde contatos de índio foram depositados na periferia da amostra para a formação de contatos ôhmicos. Estas amostras foram recozidas à 250 °C para ocorrer a difusão do índio dentro do GaAs e formar uma região n+. Utilizamos uma indução magnética de 0.5 T (tesla), temperatura ambiente e corrente de polarização de 1 mA. O equipamento para estas medidas possui métodos automáticos (inversão de corrente e campo magnético) para cancelar erros devido a assimetria da amostra.

A ativação elétrica dos dopantes, exibida na quarta coluna da tabela 3, é a razão da concentração de folha (n_s) pela dose total implantada (tabela 2). O resultado desta razão indica a porcentagem de átomos de ²⁹Si⁺ implantados que ocuparam uma posição substitucional na rede cristalina do GaAs e, portanto, doaram um elétron para a banda de condução. A concentração (cm⁻³) é obtida dividindo a concentração de folha (n_s) pela espessura da camada. Entretanto, o

cálculo da ativação e da concentração possui alguma margem de erro devido às regiões de depleção (regiões sem portadores de carga). Os elétrons das regiões de depleção são capturados pelos estados de superfície.

Na Fig. 21 podemos ver o gráfico da eficiência da ativação versus a temperatura de recozimento.

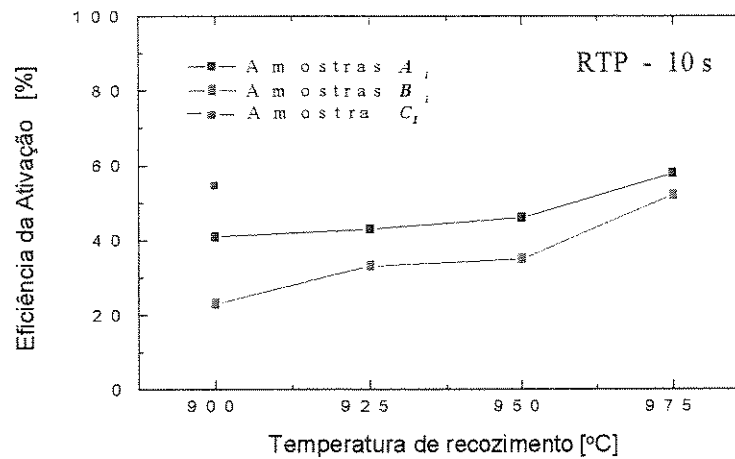


Fig. 21. Ativação elétrica dos portadores nas amostras A_i, B_i e C_i como função da temperatura de recozimento.

Embora a eficiência na ativação dos portadores aumente com a temperatura como mostrado na Fig. 21, a mobilidade dos elétrons cai com o aumento da ativação elétrica devido o mecanismo de espalhamento por impurezas ionizadas que é proporcional à concentração de portadores de carga na camada ativa. A mobilidade deve seguir a seguinte relação

$$\mu_n = \frac{1}{e n_s R_s} \quad (24)$$

onde e é a carga do elétron, n_s a concentração de folha na camada e R_s a resistência de folha da camada. Como já mencionamos a alta mobilidade é um parâmetro importante para dispositivos Hall (eq. 2 e 4), portanto, camadas de alta resistividade são de interesse para fabricação de sensores Hall.

Outra informação, que tiramos da tabela 3, quando comparamos as amostras C₁ e C₂, é a melhor ativação elétrica quando o recozimento da amostra é realizado com capa de oxinitreto (SiO_xN_y). Como já mencionamos, isso ocorre porque a capa evita a fuga de As durante o processo RTP.

Através destes estudos preliminares podemos concluir que as amostras C_i são melhores, obtendo melhor ativação dos portadores e maior mobilidade. Embora, a concentração de folha seja o parâmetro mais importante para as características dos sensores Hall, alta mobilidade implica em menor resistência e, portanto, menos potência, para a mesma corrente.

4.1.2. OBTENÇÃO DAS CAMADAS POR CRESCIMENTO EPITAXIAL

Fabricamos a estrutura de camadas epitaxiais mostrada na Fig. 16. A camada 1 é uma camada n⁺ com concentração de elétrons de $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ e espessura de 30 nm, que foi fabricada para obtenção de contatos ôhmicos de baixa resistividade. A camada 2 tipo-n foi especificada para a região ativa dos sensores Hall, com espessura de 0,2 μm e concentração de elétrons de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. A camada 3 é conhecida como “buffer” e tem o objetivo de planarizar e eliminar defeitos superficiais.

Estas camadas foram crescidas por um equipamento CBE (*Chemical Beam Epitaxy*) e dopadas com fonte de silício. Os parâmetros de crescimento desta camada foram:

- Temperatura: 500 °C
- Fluxo de TEG: 1,2 sccm
- Fluxo de AsH₃: 3,5 sccm para a camada “buffer” e 12 sccm para as camadas dopadas.
- Temperatura da fonte de silício: 1035 °C para camada ativa ($2,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) e 1150 °C para a camada de contato ôhmico ($3,0 \times 10^{18}$).

Em camadas epitaxiais não necessita-se realizar um tratamento térmico para ativação elétrica dos portadores, sendo a concentração de elétrons igual ao número de átomos doadores ativos ($n=N_D$). As características destas camadas epitaxiais foram levantadas através de medidas de efeito Hall e podem ser vistas na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros da amostra SHE-2 medidas por efeito Hall.

Amostra	n_s [cm^{-2}]	N [cm^{-3}]	R_s [Ω]	μ [$\text{cm}^2/\text{V.s}$]	Espessura [μm]
SHE-2	$4,0 \times 10^{12}$	$2,0 \times 10^{17}$	520	3040	0,2

As medidas de efeito Hall utilizadas para obtenção dos parâmetros exibidos na tabela 4 foram realizadas com pequenas amostras ($0,5 \times 0,5$ cm). No entanto, antes de colocarmos os contatos de índio na periferia da amostra, realizamos um ataque químico de 30 nm de GaAs em solução $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$ (400:2:1) por 35 segundos para remover a camada 1 (Fig. 16.).

Embora o processo de obtenção de camadas ativas por crescimento epitaxial seja mais caro que o processo de implantação iônica, as camadas epitaxiais apresentam superior qualidade. O primeiro ponto que podemos observar comparando a camada SHE-2 (tabela 4) com uma amostra semelhante implantada A_4 (tabela 3) é que a camada epitaxial possui maior mobilidade, mesmo tendo uma maior concentração de portadores. A menor mobilidade das camadas implantadas deve-se à maior densidade de defeitos na camada, surgidos durante o choque dos íons na rede cristalina do GaAs durante o processo de implantação. Outro ponto é que pela técnica de crescimento epitaxial podemos obter camadas ativas com concentração uniforme e de perfil abrupto, o que é uma característica importante para obtermos sensores Hall de baixa tensão *offset*³⁴.

4.2. PRIMEIRA RODADA DE FABRICAÇÃO

Após a análise dos dados obtidos nos estudos preliminares, selecionamos os parâmetros exibidos na tabela 5 para iniciar a primeira rodada de fabricação. As diferentes doses das 3 amostras foram escolhidas para levar em conta as diferentes taxas de ativação elétrica (tabela 3.).

Tabela 5: Parâmetros utilizados para obtenção das camadas ativas *Sensor 1*, *Sensor 2* e *Sensor 3*.

Amostras	Energia (keV)	Dose (cm ⁻²)	Recozimento (°C)
Sensor 1	180	$7,00 \times 10^{12}$	900
Sensor 2	180	$5,00 \times 10^{12}$	975
Sensor 3	180	$1,45 \times 10^{12}$	900
	360	$3,80 \times 10^{12}$	

Todas as amostras *Sensor 1*, *Sensor 2* e *Sensor 3*, foram fabricadas com capa de oxinitreto (SiO_xN_y).

As implantações para as regiões de contato foram fabricadas com dupla implantação de íons e com alta dose para obtenção de contatos ôhmicos de baixa resistência. A primeira implantação foi com dose de 3×10^{13} cm⁻² e energia de 60 keV, e a segunda implantação com dose de 2×10^{13} cm⁻² e energia de 25 keV.

Durante a etapa de RTP surgiram bolhas nas capas de oxinitreto com diâmetro de aproximadamente 50 µm. Nas regiões do filme onde surgiram estas bolhas houve fuga de As e, portanto, as formas das bolhas foram “gravadas” na superfície do substrato como pode ser visto na Fig. 22, impossibilitando a continuidade do processo.

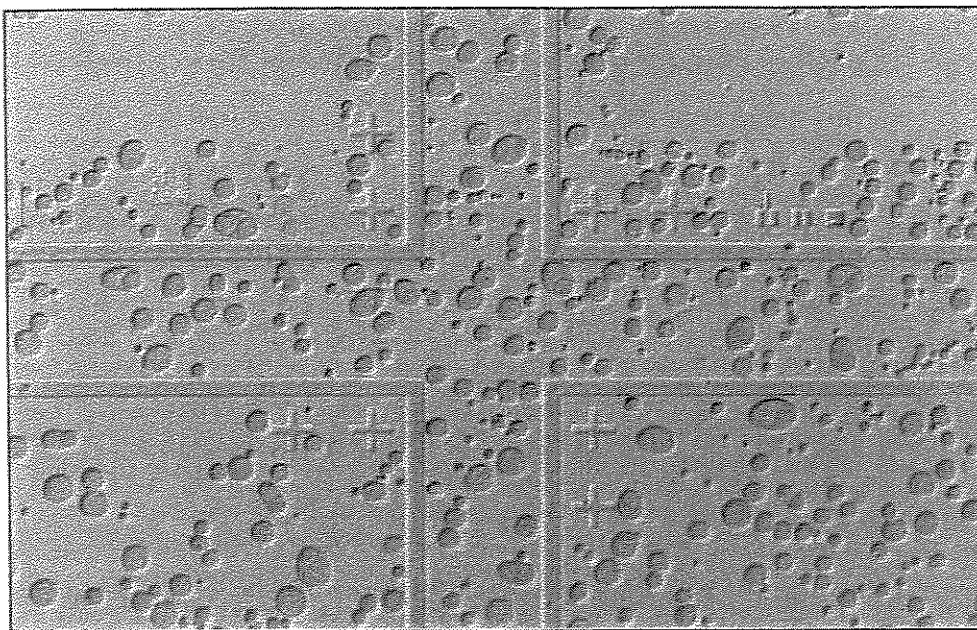


Fig. 22. Crateras no substrato de GaAs surgidas durante o processo RTP.

Como a formação destas bolhas não ocorreu em experimentos anteriores, elas podem estar associadas a alguma mudança nas condições dos processos. A primeira hipótese para o surgimento das bolhas no filme de oxinitreto foram impurezas na superfície do substrato, devido a uma limpeza não perfeita. A contaminação por impurezas no substrato poderia diminuir a aderência do filme ao substrato e facilitar a formação de bolhas pela fuga de As durante o recozimento a 900 °C. No entanto, realizamos três subseqüentes deposições que voltaram a apresentar o mesmo problema durante o RTP.

Outra hipótese para a formação de bolhas no filme é a contaminação do filme, durante a deposição pelo sistema ECR, por espécies gasosas como hidrogênio e/ou nitrogênio, provenientes dos gases (SiH_4 e N_2) utilizados para a formação do plasma, ou ainda algum gás residual de outros processos feitos no mesmo equipamento (ex. BCl_3). O hidrogênio difunde-se rápido dentro do filme mesmo a 100-300 °C, podendo formar centros gasosos durante o recozimento a 900 °C.

4.3. SEGUNDA RODADA DE FABRICAÇÃO

Como as amostras processadas na primeira rodada (Tabela 5) foram perdidas devido a problemas no filme de oxinitreto, decidimos processá-las novamente e adicionar outras amostras, com características diferentes. Os parâmetros utilizados para a fabricação das novas camadas ativas é exibido na tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros utilizados para obtenção das camadas ativas dos sensores Hall.

Amostras	Energia (keV)	Dose (cm ⁻²)	Recozimento (°C)
Sensor 1	180	$7,00 \times 10^{12}$	900
Sensor 2	180	$5,00 \times 10^{12}$	975
Sensor 3	180	$1,45 \times 10^{12}$	900
	360	$3,80 \times 10^{12}$	
Sensor 4	180	$7,00 \times 10^{12}$	900
Sensor 5	180	$5,00 \times 10^{12}$	975
Sensor 6	180	$1,45 \times 10^{12}$	900
	360	$3,80 \times 10^{12}$	
S-1B	180	$7,00 \times 10^{12}$	900

As amostras *Sensor 1*, *Sensor 2*, *Sensor 3*, *Sensor 4*, *Sensor 5* e *Sensor 6* foram processadas idênticas às amostras exibidas na tabela 5 e a amostra S-1B foi processada idêntica à amostra *Sensor 1*, portanto, a amostra S-1B possui o mesmo perfil das amostras A_i exibido na Fig. 20 . Entretanto, as capas de oxinitreto das amostras *Sensor 4*, *Sensor 5*, *Sensor 6* e *S-1B* foram retiradas antes do processo de recozimento, e portanto, foram recozidas sem capa (motivado pelo problema da primeira rodada).

As bolhas voltaram a surgir nas amostras recozidas com capa *Sensor 1*, *Sensor 2*, *Sensor 3* impossibilitando a continuidade do processo nestas amostras.

Após o recozimento das amostras *Sensor 4*, *Sensor 5* e *Sensor 6* depositamos um filme dielétrico BCB (Benzocyclobutene)³⁵ para tomar o lugar do filme de oxinitreto e continuamos o processamento. No entanto, na etapa de

soldagem dos fios durante o processo de encapsulamento, as plataformas para solda (*Pad's*) não suportaram a pressão mecânica por ultra-som e “descolaram” da superfície do dielétrico BCB, pois as máscaras não foram fabricadas para este tipo de processo onde os *Pad's* deveriam estar diretamente sob o substrato de GaAs. Estes problemas impossibilitaram o término do processo nestas amostras.

Então, terminamos o processamento da amostra S-1B sem a presença de filme isolante. O perfil de implantação desta amostra é o mesmo das amostras A_i obtidas nos testes preliminares e exibido na Fig. 20, portanto, com uma concentração de pico de aproximadamente $4,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$.

Os contatos ôhmicos foram fabricados com perfil raso e com alta concentração de portadores ($\approx 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), pois são exigências para se obter contatos ôhmicos de boa qualidade. Portanto, realizamos dupla implantação: $E = 60 \text{ keV}$, $\phi = 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ e $E = 25 \text{ keV}$, $\phi = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Os contatos ôhmicos devem ter características linear de corrente-tensão. Os contatos devem ser capazes de suprir a corrente necessária ao dispositivo, e a queda de tensão através dos contatos deve ser pequena quando comparada à queda de tensão através das regiões ativas do dispositivo. Assim, a obtenção de contatos ôhmicos em GaAs de boa qualidade é de grande importância para um bom desempenho dos componentes eletrônicos. Um dos métodos para avaliar a qualidade dos contatos ôhmicos é através da estrutura TLM (*Transmission Line Model*) projetada nas máscaras dos sensores Hall. O modelo TLM fornece dois parâmetros importantes: a resistência de contato “ ρ_c ” e a resistência de folha “ r_s ” que estão diretamente relacionados com a “qualidade elétrica” do contato ôhmico. O ponto chave para se obter um bom contato ôhmico para GaAs é a formação de uma junção própria para o “tunelamento”, entre o metal e o semiconductor. O GaAs apresenta baixa solubilidade sólida para dopantes tipo-n, tipicamente $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Isto dificulta a formação de contatos ôhmicos, havendo necessidade de formação de uma liga de contato que resulta em dopagem adicional tipo-n. Na fabricação dos sensores Hall utilizamos o sistema de metalização Ni/Ge/Au/Ni/Au que já é utilizado na fabricação de HBTs (*Heterojunction Bipolar Transistor*) no LPD. Os contatos produzidos para os sensores Hall apresentaram resistências entre 1,0 e

$1,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Segundo a literatura, contatos ôhmicos de boa qualidade tem resistências entre 10^{-4} e $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ para camadas de GaAs tipo-n, então os contatos produzidos estão com qualidade aceitável.

Os dispositivos foram encapsulados em capsulas de 18 pinos e o fio utilizado foi de alumínio. Uma foto dos dispositivos já encapsulados é mostrado na Fig. 23.

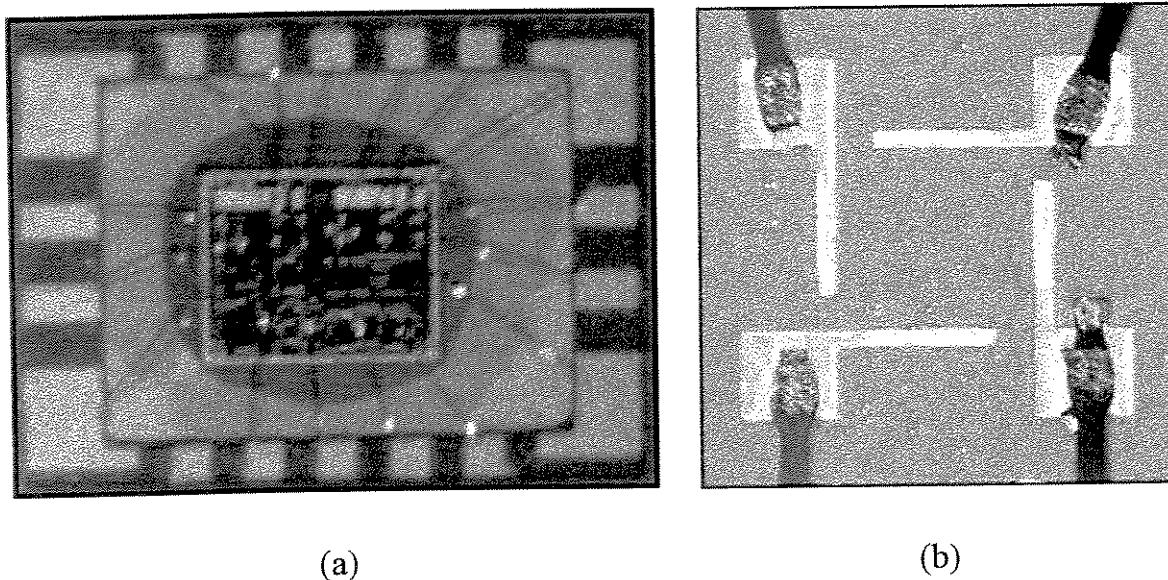


Fig. 23. Foto dos dispositivos Hall encapsulados (amostra S-1B, tabela 6): (a) chip dentro da cápsula e (b) foto ampliada de um dispositivo Hall.

As características elétricas da amostra S-1B, obtidas por medidas de efeito Hall, são exibidas na tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros da amostra S-1B medidas por efeito Hall.

Amostra	n_s [cm ⁻²]	n [cm ⁻³]	R_s [Ω/□]	μ_n [cm ² /V.s]	Espessura [μm] [*]	Ativação [%]
S-1B	$4,18 \times 10^{12}$	$1,40 \times 10^{17}$	426	3510	0,3	59

* Simulação TRIM

As estruturas utilizadas para o levantamento destes parâmetros elétricos foram as estruturas de van Der Pauw (Fig. 13).

4.4. TERCEIRA RODADA DE FABRICAÇÃO

Quando iniciamos esta terceira rodada, o implantador de íons sofreu algumas manutenções técnicas e voltou a operar com um novo limite máximo de implantação de íons de 145 keV. Também estas novas implantações foram realizadas sem a presença de capa de oxinitreto devido a não disponibilidade do equipamento ECR.

Então, decidimos fabricar uma camada ativa mais fina ($0,2 \mu\text{m}$) que as anteriormente fabricadas, com o objetivo de obter sensores mais sensíveis (eq. 17), e duas outras camadas de mesma espessura ($0,35 \mu\text{m}$), mas com concentrações diferentes. Durante as simulações das implantações das camadas SHI-1 e SHI-3, selecionamos doses específicas para manter a mesma concentração de pico ($4,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$) obtidas nas camadas A_i e S-1B, para verificar-mos a taxa de ativação e mobilidade.

Também, fabricamos sensores Hall na camada epitaxial exibida no item 4.1.2 com o perfil mostrado na Fig. 16.

Fabricamos três diferentes camadas ativas por implantação iônica de $^{29}\text{Si}^+$, as quais denominamos de SHI-1, SHI-2 e SHI-3. Os parâmetros utilizados para a obtenção destas camadas ativas são exibidos na tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros utilizados para obtenção das camadas ativas SHI-1, SHI-2 e SHI-3.

Amostras	Energia (keV)	Dose (cm^{-2})	Recozimento ($^{\circ}\text{C}$)
SHI-1	145	$6,00 \times 10^{12}$	900
SHI-2	145	$4,60 \times 10^{12}$	900
SHI-3	70	$3,30 \times 10^{12}$	900

As simulações destas implantações foram realizadas pelo software TRIM e o perfil de concentração de doadores versus a profundidade pode ser visto na Fig 24.

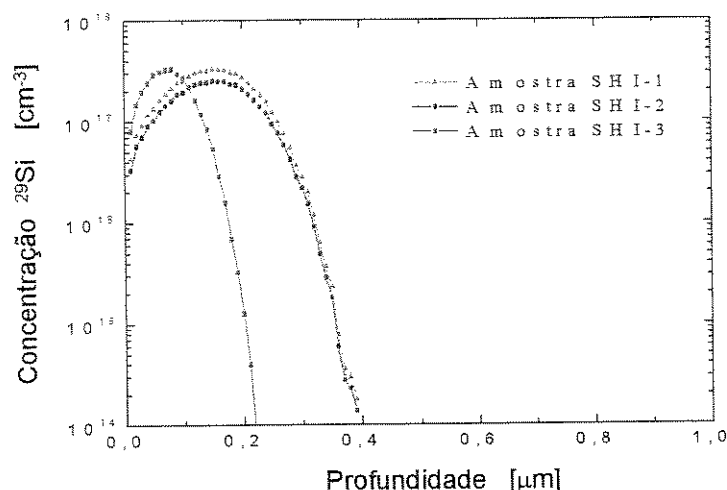


Fig. 24. Simulação do perfil de implantação nas amostras SHI-1, SHI-2 e SHI-3, realizado através do software TRIM.

Os parâmetros de implantação das amostras SHI-1 e SHI-2 foram selecionados para a profundidade (x) destas camadas ficar ao redor de $0,35 \mu\text{m}$ e a concentração de átomos de silício (N_D) em aproximadamente $4,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ e $2,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, respectivamente, como visto na Fig. 24. A amostra SHI-3 foi projetada para a espessura ficar em torno de $0,2 \mu\text{m}$ com uma concentração de silício de $4,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$. Todas as camadas foram recozidas à 900°C .

As características destas camadas implantadas foram levantadas através de medidas de efeito Hall utilizando as estruturas de “van der Pauw”, e seus resultados podem ser vistas na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros das amostras SHI-1, SHI-2 e SHI-3 medidas por efeito Hall.

Amostra	n_s [cm ⁻²]	n [cm ⁻³]	R_s [Ω/□]	μ_n [cm ² /V.s]	Espessura [μm] [*]	Ativação [%]
SHI-1	$1,5 \times 10^{12}$	$4,3 \times 10^{16}$	1490	2890	0,35	25
SHI-2	$1,0 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{16}$	2210	2920	0,35	21
SHI-3	-	-	-	-	0,2	

* Simulação TRIM

Nas amostras exibidas na tabela 9, observa-se uma baixa ativação dos dopantes e baixa mobilidade, bem inferior ao esperado, com o obtido na amostra S-1B. Isto indica ser um problema de repetibilidade dos processos.

A camada ativa da amostra SHI-3 apresentou características de semi-isolante. Essa camada ativa foi projetada para apresentar alta sensibilidade, portanto, foi a camada fabricada com menor espessura (0,2 μm). Ela provavelmente foi totalmente depletada devido ao potencial da superfície, pois sabe-se que existe um limite mínimo de espessura e concentração para que isso ocorra.

Uma foto dos dispositivos fabricados com camada implantada e camada epitaxial pode ser vista na Fig. 25.

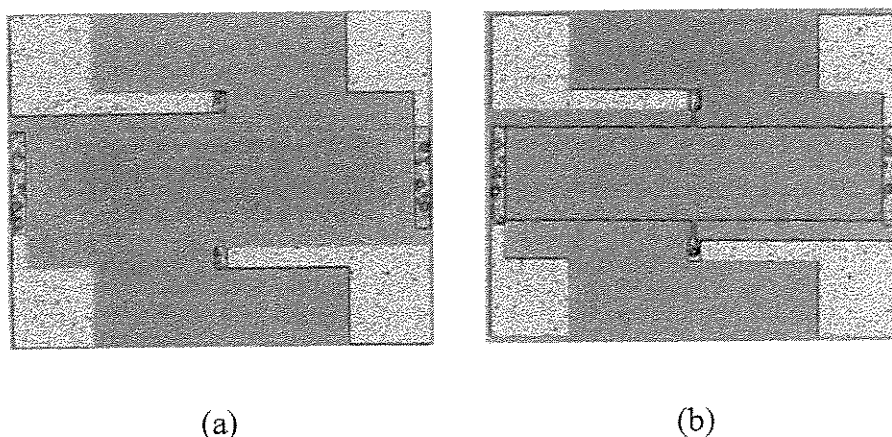


Fig. 25. Foto de dispositivos Hall retangulares fabricados em: (a) camada implantada e (b) camada epitaxial.

4.5. DISCUSSÃO FINAL QUANTO À FABRICAÇÃO

Um aspecto importante surgido durante a fabricação destes sensores foi o aparecimento das bolhas no filme de oxinitreto. Esse filme, além de capa tinha a função de isolante entre níveis, necessário para algumas estruturas projetadas. Outras tentativas para isolação entre níveis, como utilização do dielétrico BCB, também fracassaram devido à falta de uma máscara adequada, onde o metal fosse depositado diretamente sobre o GaAs. Portanto, impossibilita-nos de desenvolver os dispositivos para cancelamento da tensão offset proposto no item 3.1.4.

As camadas exibidas na tabela 3 apresentaram altos valores para mobilidades de elétrons para as respectivas concentrações (cm^{-3}) e estão condizentes com os valores apresentados pela literatura³³.

Embora, as camadas implantadas apresentem alta qualidade o processo de fabricação não está totalmente repetitivo. Podemos observar isso quando comparamos a amostra S-1B (tabela 7) e A_1 (tabela 3). Estas amostras foram implantadas com as mesmas condições, mas a amostra S-1B foi recozida sem capa. O resultado esperado era que a amostra S-1B apresentasse inferior ativação (devido a fuga de As). No entanto, ocorreu o contrário, apresentando ativação de 59 % contra 41 % da amostra A_1 . Essa não repetibilidade pode ter sido induzida por problemas durante o processo de implantação (menor dose do que a especificada) ou recozimento RTP (maior temperatura do que a estabelecida). Também, podemos verificar o efeito da não repetibilidade do processo de fabricação quando comparamos estas amostras com a amostra SHI-1 (tabela 9) que tem perfil semelhante, mas taxa de ativação muito inferior às anteriores, tal como 25 %. Essas não repetibilidades são provenientes de muitos fatores, relacionados à utilização dos equipamentos por diversos outros estudos científicos, que algumas vezes prejudicam os posteriores por mudar as condições de funcionamento dos equipamentos, tais como introduzir impurezas contaminantes, alterar pressão das câmaras entre outros fatores.

Quando comparamos a amostra implantada S-1B (tabela 7) com a amostra epitaxial SHE-2 (tabela 4) observamos a boa qualidade da amostra implantada, uma vez que amostras epitaxiais já possuem superior qualidade inerente ao processo de fabricação como discutido anteriormente.

CAPÍTULO V – CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES HALL

Neste capítulo exibimos os resultados da caracterização dos sensores Hall fabricados na segunda e terceira corrida de fabricação.

5.1. MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDIDAS

Usamos uma configuração para realizar as medidas de tensão Hall (V_H) versus o campo magnético como visto na Fig. 26. Este sistema faz parte do Laboratório de baixas temperaturas do IFGW/Unicamp.

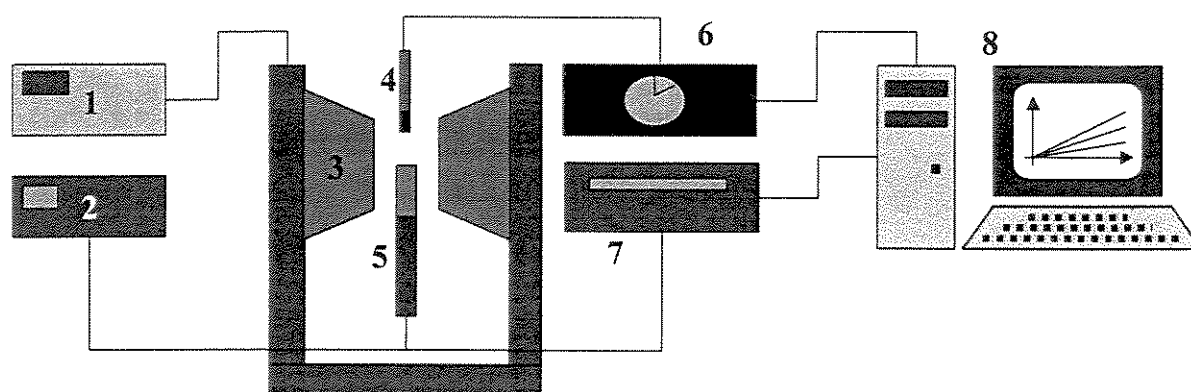


Fig. 26. Configuração montada para caracterização dos sensores Hall.

A fonte de corrente (1) é variável e polariza o eletroímã (3) gerador do campo magnético. Programamos a fonte de corrente (1) para alimentar o eletroímã de maneira que o campo magnético entre as bobinas inicie em 0 e suba até 1,2 Tesla num intervalo de 5 min. Para medir o valor do campo gerado utilizamos uma ponta de prova Hall (4) de um gaussímetro analógico (6) da F. W. BELL. Então, colocamos o sensor Hall (5) entre as bobinas. Este sensor é alimentado por correntes constantes (1-7 mA) pela fonte de corrente (2) e o valor da tensão Hall é medido pelo multímetro digital (7). Os valores de saída da tensão Hall e os valores

do campo magnético, num determinado instante, são transferidos através de uma placa GPIB para um computador pessoal (8) que traça o gráfico e gera uma tabela com 150 pontos medidos.

Esse sistema utilizado para as medidas é bem estável, no entanto, possui algum ruído, que discutimos com mais detalhes no item 5.4.

5.2. IDENTIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS HALL

Para facilitar comentários sobre os dispositivos projetados e os resultados, classificamos cada estrutura Hall da maneira exibida na Fig. 27.

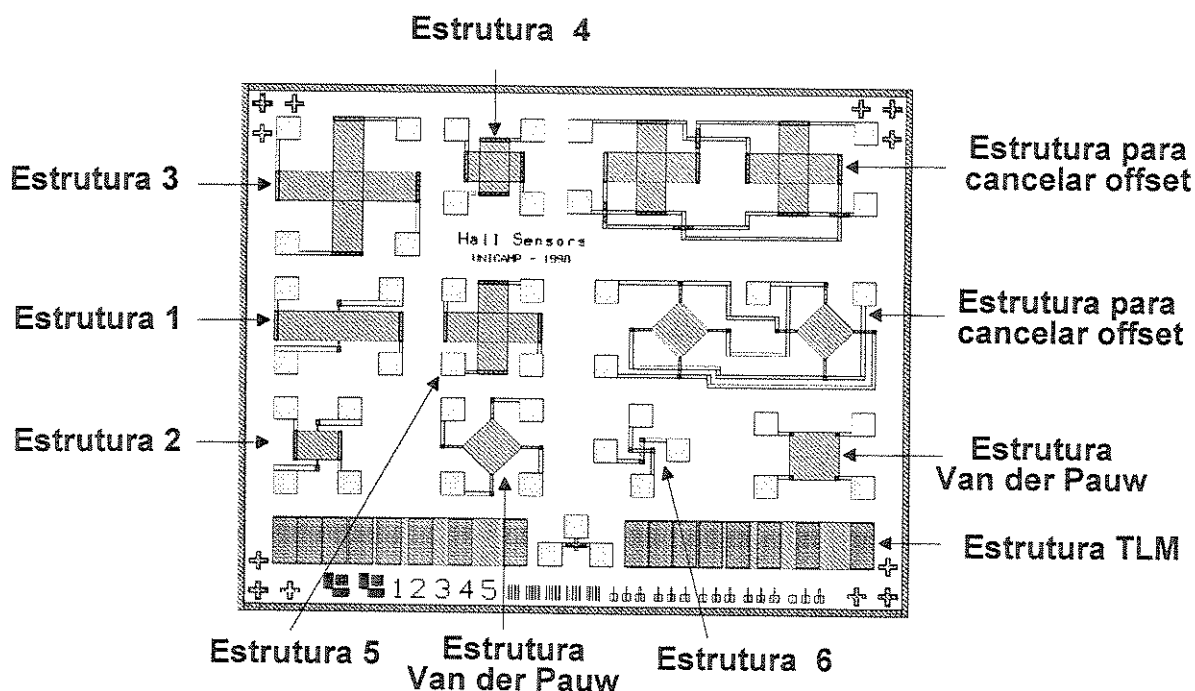


Fig. 27. Layout final com identificação dos dispositivos Hall.

5.3. CURVAS DA TENSÃO HALL VERSUS O CAMPO MAGNÉTICO

Neste item exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos sensores fabricados.

5.3.1 AMOSTRA S-1B (SEGUNDA RODADA DE FABRICAÇÃO).

Neste item exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos sensores Hall fabricados durante a segunda rodada de fabricação sobre a amostra implantada S-1B (tabela 7). Os dispositivos fabricados na amostra S-1B e apresentados neste item apresentaram ótima relação linear com o campo magnético e com a corrente de polarização, seguindo a relação da (eq. 15). Mais detalhes são comentados no item 5.4.

• ESTRUTURA 1

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 1 fabricada sobre a amostra S-1B é exibida na Fig. 28.

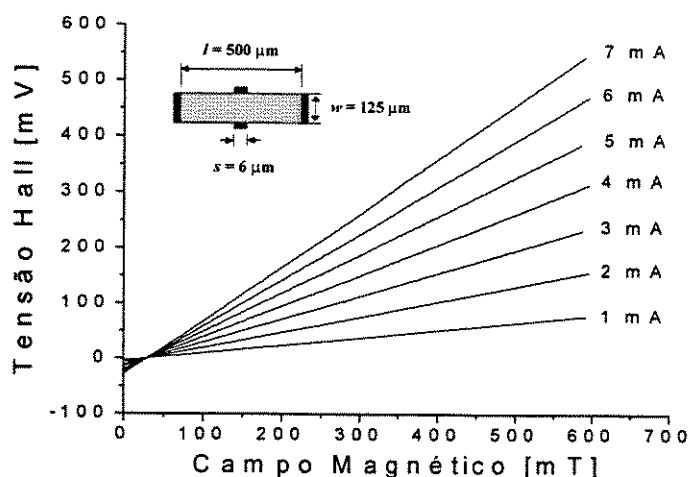


Fig. 28. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 1 (ver Fig. 27) fabricado na amostra S-1B (ver tabela 7).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 137 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -4$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -32$ mT). A tensão offset neste caso apresentou um valor negativo. Um valor positivo ou negativo depende do sentido das variações de erros, tal como do alinhamento das máscaras durante as etapas de fotolitografia.

- ESTRUTURA 2

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 2 fabricada sobre a amostra S-1B é exibida na Fig. 29.

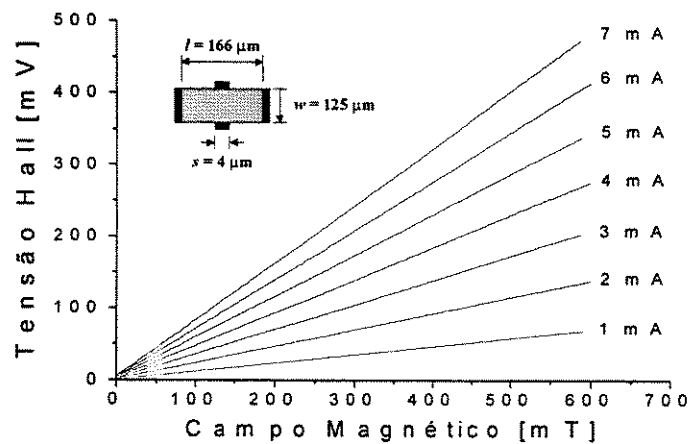


Fig. 29. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 2 (ver Fig. 27) fabricado na amostra S-1B (ver tabela 7).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 113 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 1$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 8$ mT).

- ESTRUTURA 3

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 3 fabricada sobre a amostra S-1B é exibida na Fig. 30.

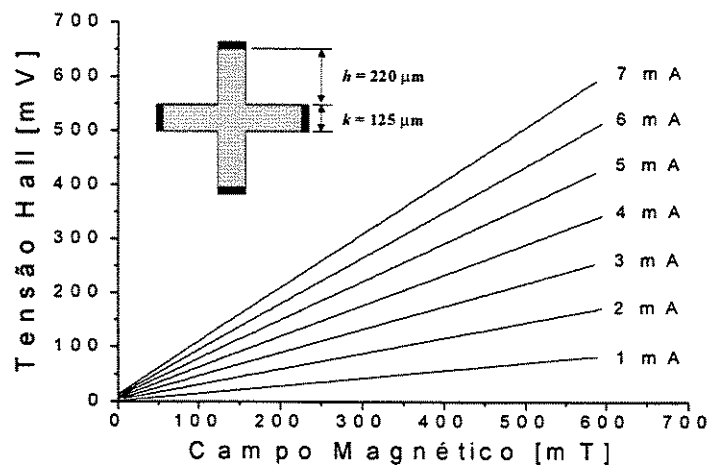


Fig. 30. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 3 (ver Fig. 27) fabricado na amostra S-1B (ver tabela 7).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 137 V/A.T e sua tensão offset de $V_{\text{off}} = 1,5 \text{ mV}$ para $I = 1\text{mA}$ e $B = 0\text{T}$ ($B_{\text{off},eq} = 11 \text{ mT}$).

- ESTRUTURA 4

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 4 fabricada sobre a amostra S-1B é exibida na Fig. 31.

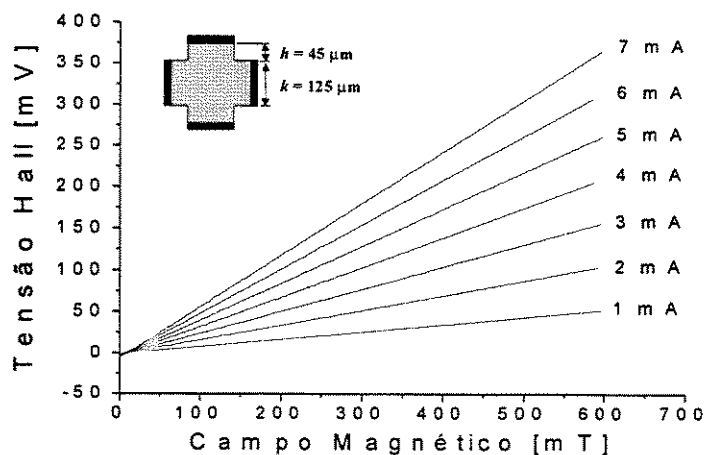


Fig. 31. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético do Estrutura 4 (ver Fig. 27) fabricado na amostra S-1B (ver tabela 7).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 88 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -1$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -11$ mT).

- ESTRUTURA 5

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 fabricada sobre a amostra S-1B é exibida na Fig. 32.

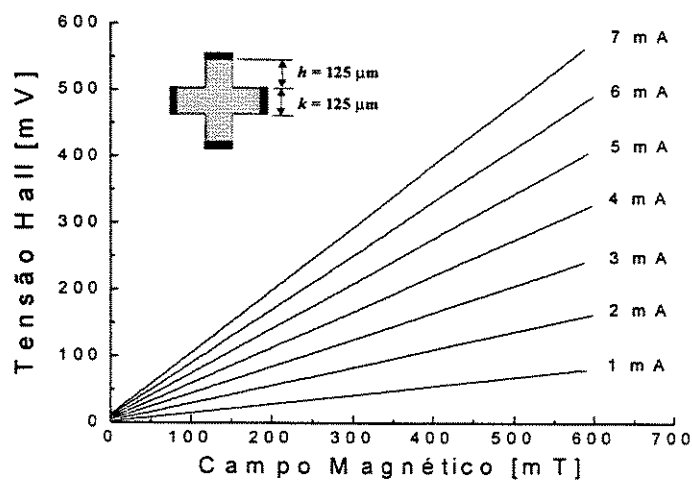


Fig. 32. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 (ver Fig. 27) fabricado na amostra S-1B (ver tabela 7).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 134 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 2$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 13$ mT).

- ESTRUTURA 6

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 6 fabricada sobre a amostra S-1B é exibida na Fig. 33.

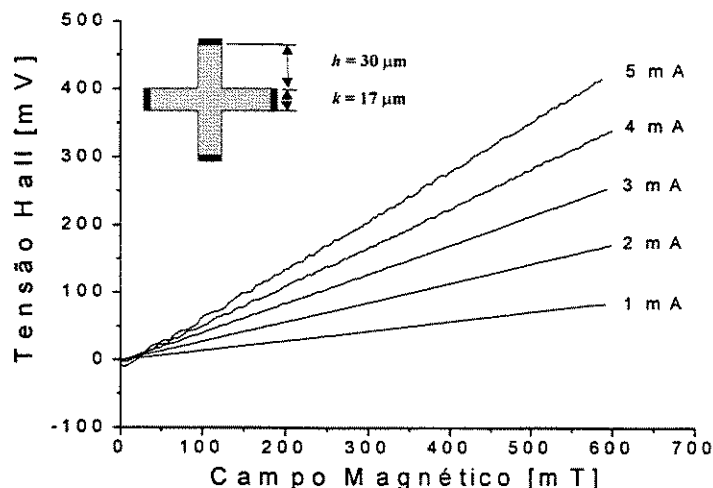


Fig. 33. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 6 (ver Fig. 27) fabricada na amostra S-1B (ver tabela 7).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 143 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -1 \text{ mV}$ para $I = 1 \text{ mA}$ e $B = 0 \text{ T}$ ($B_{off,eq} = -7 \text{ mT}$).

Este dispositivo apresentou grandes oscilações (ruídos) nas medidas da tensão Hall em função do campo para correntes superiores a 4 mA , como visto na Fig. 33. Esse dispositivo “cruz-grega” é equivalente ao apresentado na Fig. 30 e, ambos possuem a mesma resistência. No entanto, como polarizamos os dois dispositivos com correntes iguais, a densidade de corrente por área neste dispositivo de menor dimensão (Fig. 33) é bem superior comparado ao dispositivo de maior área (Fig. 30). Assim, a densidade de potência é maior no dispositivo de menor área implicando numa maior temperatura. Portanto, como hipótese as oscilações apresentadas na Fig. 33 pode estar relacionada ao ruído térmico (eq. 23).

5.3.2 AMOSTRA SHI-1 (TERCEIRA RODADA DE FABRICAÇÃO)

Neste item exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos sensores Hall fabricados durante a terceira rodada de fabricação sobre a

amostra implantada SHI-1 (tabela 9). Embora, os dispositivos fabricados sobre esta camada terem apresentado alta sensibilidade, os valores da tensão Hall não apresentaram perfeita relação linear com o campo magnético e corrente de polarização devido à instabilidade na espessura da camada (efeito *pinch-off*). Mais detalhes são comentados no item 5.4.

- ESTRUTURA 1

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 1 fabricada sobre a amostra SHI-1 é exibida na Fig. 34.

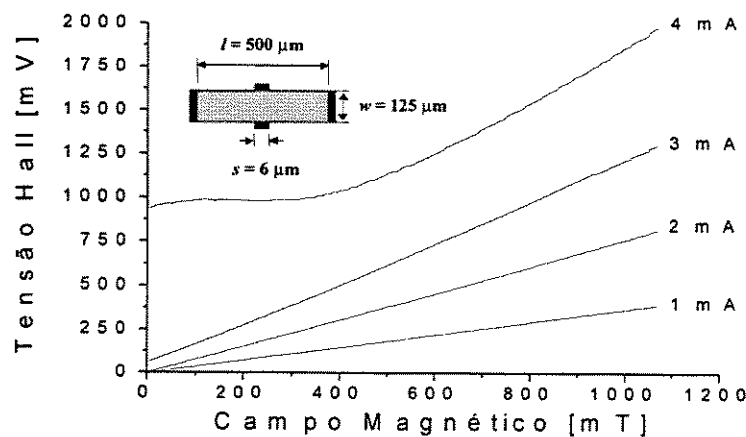


Fig. 34. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 1 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-1 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 363 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 1,92 \text{ mV}$ para $I = 1 \text{ mA}$ e $B = 0 \text{ T}$ ($B_{off,eq} = 5 \text{ mT}$).

- ESTRUTURA 2

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 2 fabricada sobre a amostra SHI-1 é exibida na Fig. 35.

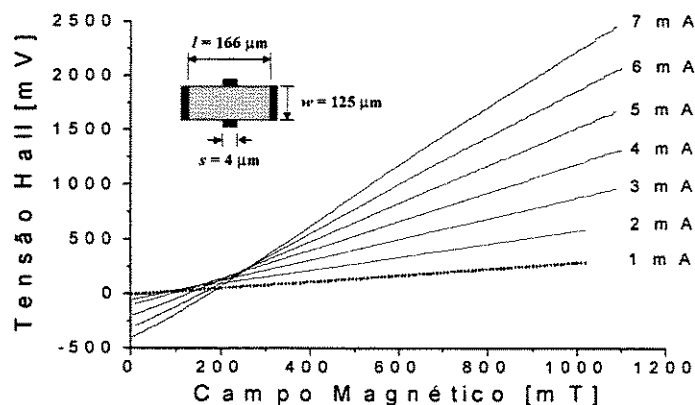


Fig. 35. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 2 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-1 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 276 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -7$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -25$ mT).

- ESTRUTURA 3

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 3 fabricada sobre a amostra SHI-1 é exibida na Fig. 36.

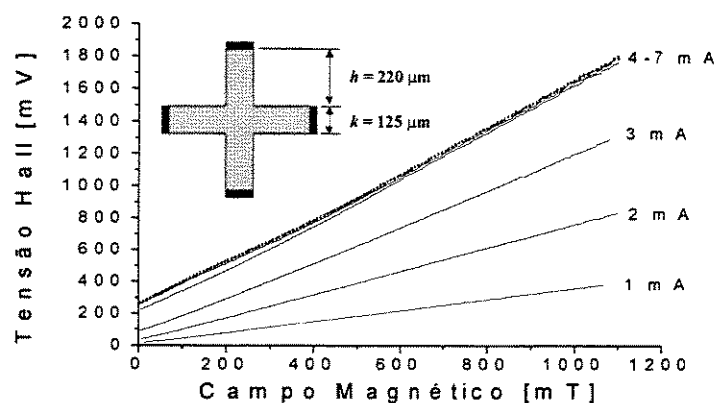


Fig. 36. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 3 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-1 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 367 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 10$ mV ($B_{off,eq} = 27$ mT) para $I = 1$ mA e $B = 0$ T.

- ESTRUTURA 4

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 4 fabricada sobre a amostra SHI-1 é exibida na Fig. 37.

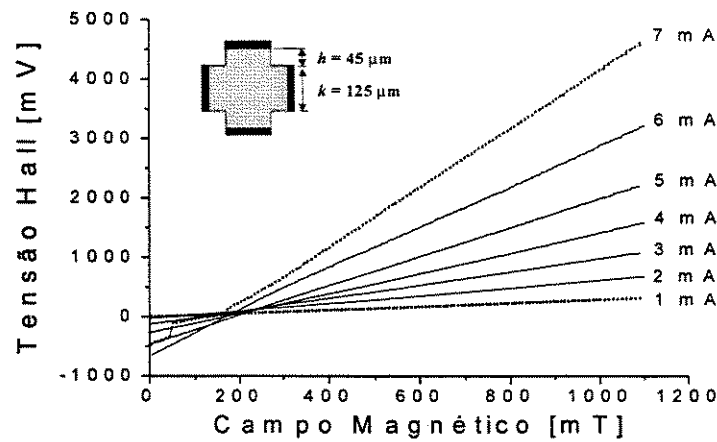


Fig. 37. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 4 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-1 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 282 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -6$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -21$ mT).

- ESTRUTURA 5

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 fabricada sobre a amostra SHI-1 é exibida na Fig. 38.

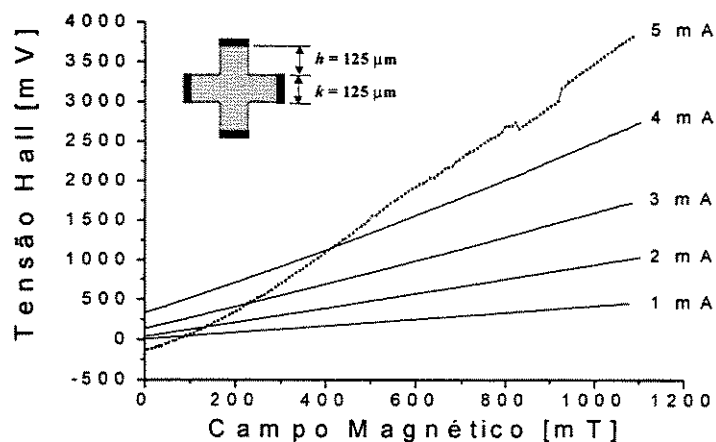


Fig. 38. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-1 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 418 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 5$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 11$ mT).

- ESTRUTURA 6

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 6 fabricada sobre a amostra SHI-1 é exibida na Fig. 39.

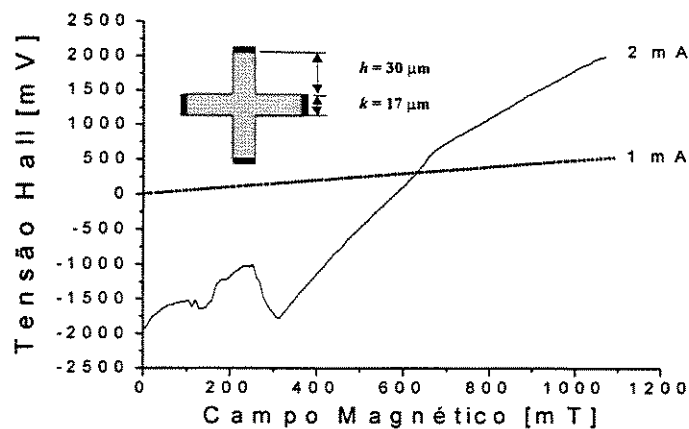


Fig. 39. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 6 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-1 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 496 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 5$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 10$ mT).

5.3.3 AMOSTRA SHI-2 (TERCEIRA RODADA DE FABRICAÇÃO)

Neste item exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos sensores Hall fabricados durante a terceira rodada de fabricação sobre a amostra implantada SHI-2 (tabela 9). Os resultados apresentados neste item referentes aos dispositivos fabricados na amostra SHI-2, também, não apresentaram perfeita relação linear com o campo magnético e corrente de polarização como os dispositivos do item anterior devido ao mesmo efeito (*pinch-off*). Mais detalhes são comentados no item 5.4.

- ESTRUTURA 1

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 1 fabricada sobre a amostra SHI-2 é exibida na Fig. 40.

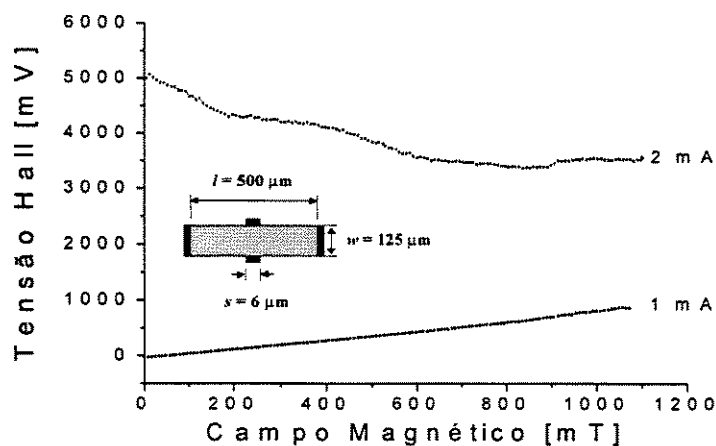


Fig. 40. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 1 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-2 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 708 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -57$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -80$ mT).

- ESTRUTURA 2

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 2 fabricada sobre a amostra SHI-2 é exibida na Fig. 41.

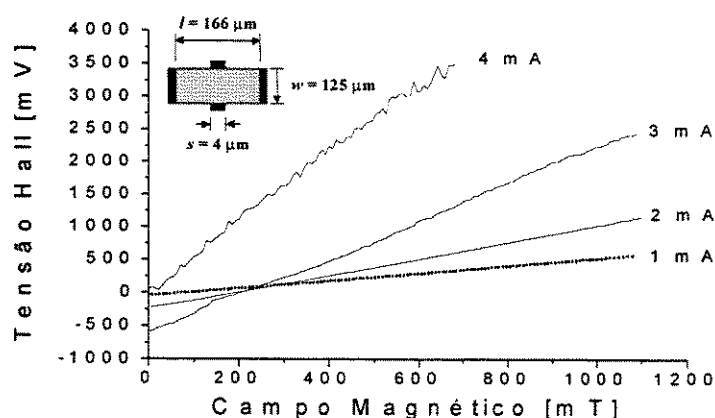


Fig. 41. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 2 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-2 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 463 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -47$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -100$ mT).

- ESTRUTURA 3

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 3 fabricada sobre a amostra SHI-2 é exibida na Fig. 42.

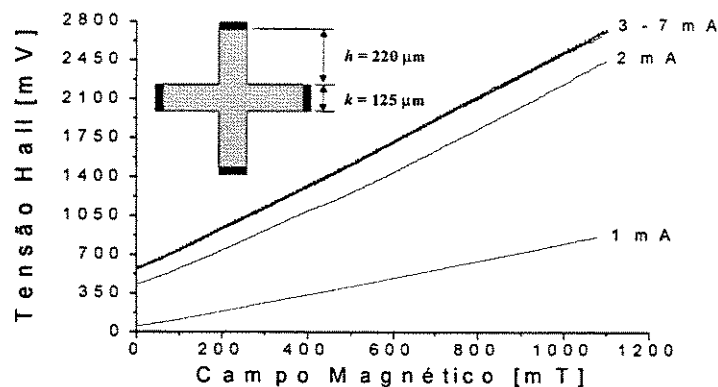


Fig. 42. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 3 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-2 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 820 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 35 \text{ mV}$ para $I = 1 \text{ mA}$ e $B = 0 \text{ T}$ ($B_{off,eq} = 42 \text{ mT}$).

• ESTRUTURA 4

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 4 fabricada sobre a amostra SHI-2 é exibida na Fig. 43.

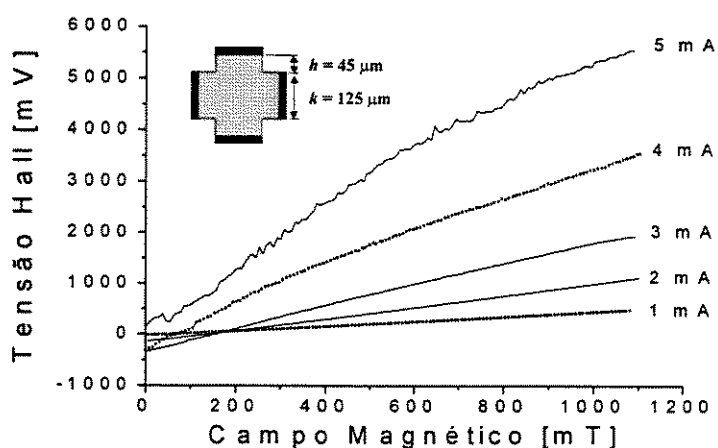


Fig. 43. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 4 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-2 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 406 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -30$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 5$ mT).

- ESTRUTURA 5

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 fabricada sobre a amostra SHI-2 é exibida na Fig. 44.

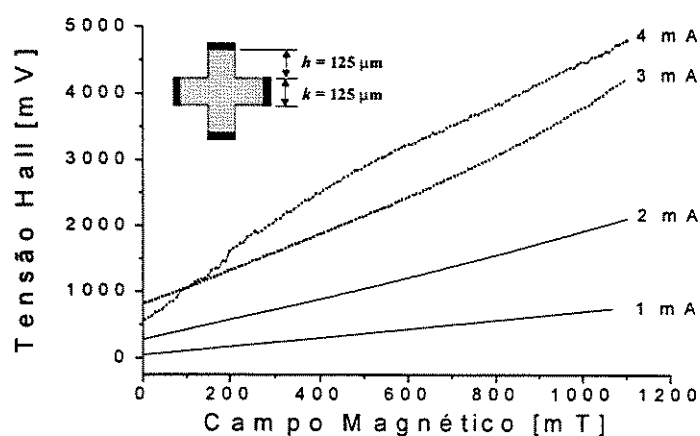


Fig. 44. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHI-2 (ver tabela 9).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 727 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 35$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 48$ mT).

- ESTRUTURA 6

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 6 fabricada sobre a amostra SHI-2 é exibida na Fig. 45.

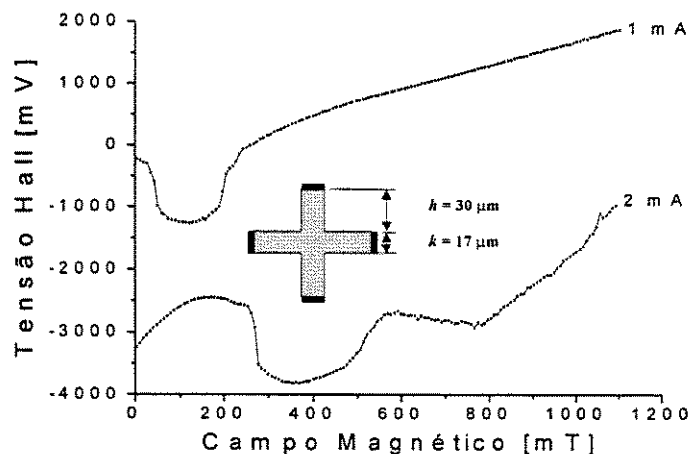


Fig. 45. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 6 (ver Fig. 27) fabricada na amostra SHI-2 (ver tabela 9).

5.3.4 AMOSTRA SHE-2 (TERCEIRA RODADA DE FABRICAÇÃO)

Neste item exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos sensores Hall fabricados durante a terceira rodada de fabricação sobre a amostra epitaxial SHE-2 (tabela 4). Somente exibimos a curva da estrutura 5, pois os outros dispositivos foram danificados durante o processo de encapsulamento.

- ESTRUTURA 5

A curva da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 fabricada sobre a amostra epitaxial SHE-2 é exibida na Fig. 46.

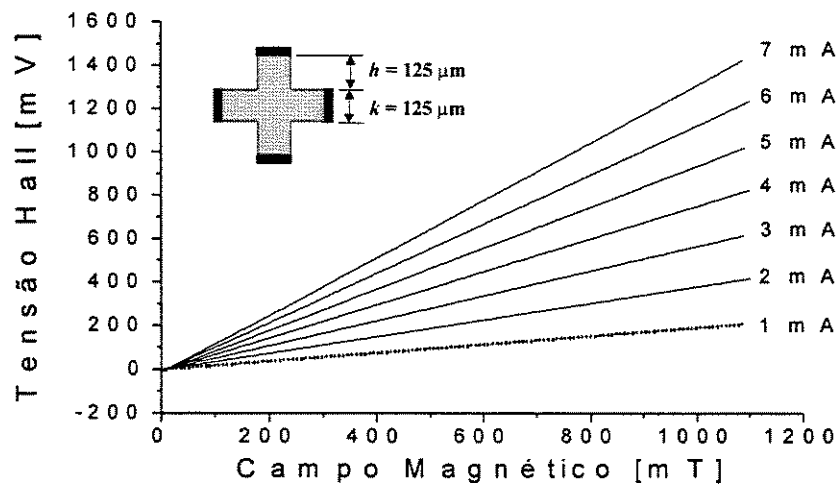


Fig. 46. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 (ver Fig. 27) fabricado na amostra SHE-2 (ver tabela 4).

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 186 V/A.T e sua tensão offset de $V_{\text{off}} = -1,85 \text{ mV}$ para $I = 1 \text{ mA}$ e $B = 0 \text{ T}$ ($B_{\text{off,eq}} = 9 \text{ mT}$).

5.3.5 AMOSTRAS COMERCIAIS

Neste item exibimos duas amostras comerciais à título de comparação.

Na Fig. 47 exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo de um sensor Hall comercial, denominado HG-106, fabricado pela empresa japonesa ASAHI KASEI. Esta curva foi medida utilizando o sistema exibido na Fig. 26.

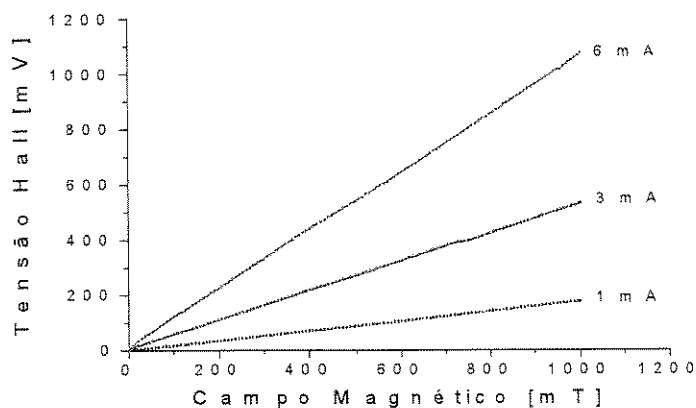


Fig. 47. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético do sensor HG-106 fabricado pela empresa ASAHI KASEI em camada de GaAs epitaxial.

Este sensor Hall é fabricado em substrato de GaAs e a camada ativa crescida epitaxialmente por um equipamento de MBE (*Molecular Beam Epitaxy*). A geometria deste sensor é a “cruz-grega” como pode ser visto na Fig. 48.

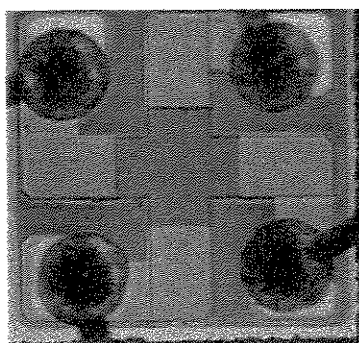


Fig. 48. Foto do sensor HG-106 fabricado pela empresa ASAHI KASEI em camada de GaAs epitaxial.

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 176 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = 1$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = 5$ mT).

Na Fig. 49 exibimos as curvas de um outro sensor Hall comercial, denominado KSY-44, fabricado pela empresa alemã SIEMENS.

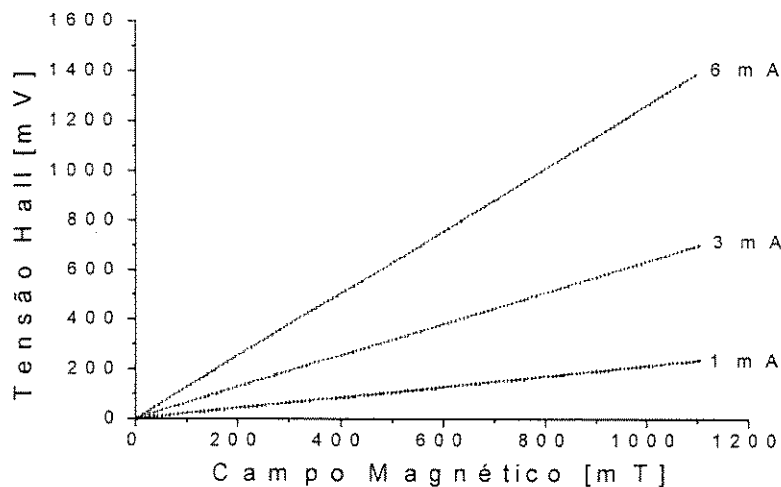


Fig. 49. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético do sensor KSY-44, fabricado pela empresa SIEMENS em camada de GaAs epitaxial.

Este sensor Hall é fabricado em substrato de GaAs e a camada ativa crescida epitaxialmente por um equipamento de MOVPE (*Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy*). A geometria deste sensor é a “cruz-grega”.

A sensibilidade medida deste dispositivo foi de 210 V/A.T e sua tensão offset de $V_{off} = -1$ mV para $I = 1$ mA e $B = 0$ T ($B_{off,eq} = -5$ mT).

5.4. RESUMO DOS DADOS OBTIDOS

Com o intuito de facilitar a análise, apresentamos neste item um resumo dos dados das camadas das amostras (ver tabela 10), bem como dos valores de sensibilidade e de tensão offset dos diversos sensores (ver tabela 11).

Tabela 10: Resumo dos dados das camadas S-1B, SHI-1, SHI-2, SHI-3 e SHE-2.

Camadas	Dose [cm^{-2}]	Energia [keV]	T [$^{\circ}\text{C}$]	N_s [cm^{-2}]	R_s [$\Omega/\square$]	μ [$\text{cm}^2/\text{V.s}$]	Ativação [%]	Esp. [μm]
S-1B	$7,0 \times 10^{12}$	180	900	$4,2 \times 10^{12}$	426	3510	59	0,3
SHI-1	$6,0 \times 10^{12}$	145	900	$1,5 \times 10^{12}$	1500	2890	25	0,35
SHI-2	$4,6 \times 10^{12}$	145	900	$1,0 \times 10^{12}$	2200	2920	21	0,35
SHI-3	$3,3 \times 10^{12}$	70	900	-	-	-	-	0,2
SHE-2	-	-	-	$4,0 \times 10^{12}$	520	3040	-	0,2

Tabela 11: Sensibilidade (V/A.T) e tensão offset (mV) dos sensores Hall fabricados.

Estrutura	1	2	3	4	5	6
Amostra						
S-1B	137 V/A.T - 4 mV	113 V/A.T 1 mV	137 V/A.T 1,5 mV	88 V/A.T -1 mV	134 V/A.T 2 mV	143 V/A.T -1 mV
SHI-1	363 V/A.T 1,92 mV	276 V/A.T -7 mV	367 V/A.T 10 mV	282 V/A.T -6 mV	418 V/A.T 5 mV	496 V/A.T 5 mV
SHI-2	708 V/A.T -57 mV	463 V/A.T -47 mV	820 V/A.T 35 mV	406 V/A.T -30 mV	727 V/A.T 35 mV	-
SHE-2	-	-	-	-	186 V/A.T	-

5.5. DISCUSSÃO FINAL QUANTO À CARACTERIZAÇÃO

Neste item procuramos discutir o comportamento dos sensores Hall fabricados considerando os diferentes parâmetros de projeto: geometria e camada ativa (dopagem e espessura).

- TENSÃO HALL

Como representado na (eq. 15), a tensão Hall de um sensor com estrutura específica, deve manter uma relação de proporcionalidade com a corrente e campo magnético ($V_H \sim I.B$). Através da Fig. 28 e das demais curvas dos dispositivos fabricados por implantação de íons sobre a amostra S-1B, observamos que os sensores Hall apresentaram ótima relação linear da tensão Hall em função do campo magnético, na faixa medida de 0 a 600 mT, para correntes de polarização entre 1 e 7 mA. Essa relação linear também é mantida quando mantemos um campo magnético constante (500 mT) e variamos a corrente de polarização, como pode ser visto na Fig. 50 (a).

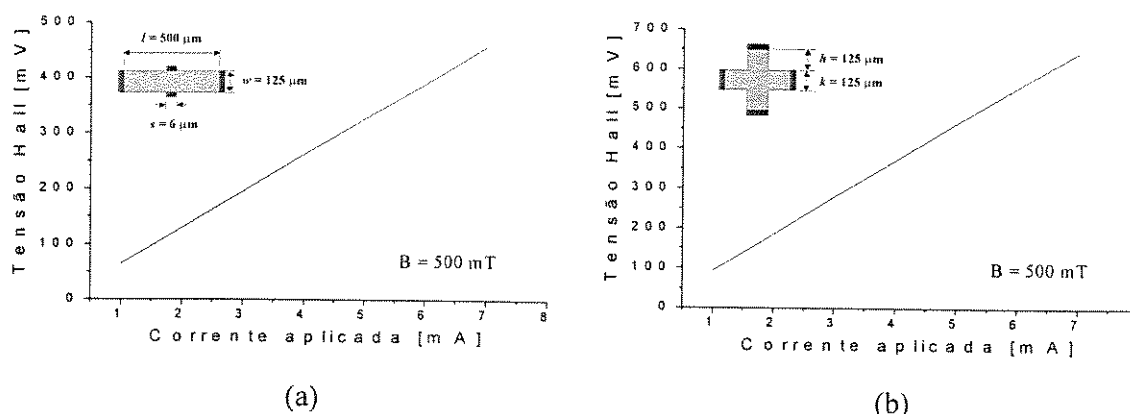


Fig. 50. Curva da tensão Hall versus a corrente de polarização para um campo constante de 500 mT: (a) Estrutura 1 (Amostra S-1B), (b) Estrutura 5 (Amostra SHE-2).

Através da Fig. 46 e Fig. 50 (b) podemos ver que a relação linear da tensão Hall com o campo magnético e corrente de polarização, também é mantida no dispositivo fabricado sobre amostra SHE-2.

Entretanto, a relação de linearidade da tensão Hall em função do campo magnético não é observada nos dispositivos fabricados nas amostras SHI-1 e SHI-2, para os mesmos valores de correntes utilizadas nas medidas anteriores (1 – 7 mA). Quando olhamos para as curvas exibidas no item 5.3.2 e 5.3.3, podemos

observar alguns casos de não linearidade em função do campo em algumas curvas. Isso fica claro, por exemplo, quando olhamos para a Fig. 34 (Estrutura 1 - amostra SHI-1) e Fig. 40 (Estrutura 1 - Amostra SHI-2). Ambas estruturas possuem a mesma geometria, entretanto, valores diferentes para resistências devido às características das camadas (ver tabela 9).

Analisando as demais curvas exibidas no item 5.3.2 e 5.3.3 observamos que as não linearidades ocorrem para valores diferentes de corrente dependendo da estrutura. Então, encontramos uma relação entre as não linearidades e resistência do dispositivo, indicando que dispositivos de idêntica geometria, mas fabricados em camadas mais resistivas apresentam maiores erros para a mesma corrente, como é o caso da Estrutura 5 (Fig. 38) e Estrutura 5 (Fig. 44). A relação de linearidade da tensão Hall pela corrente aplicada, para estes dispositivos, com um campo constante de 700 mT pode ser visto na Fig. 51.

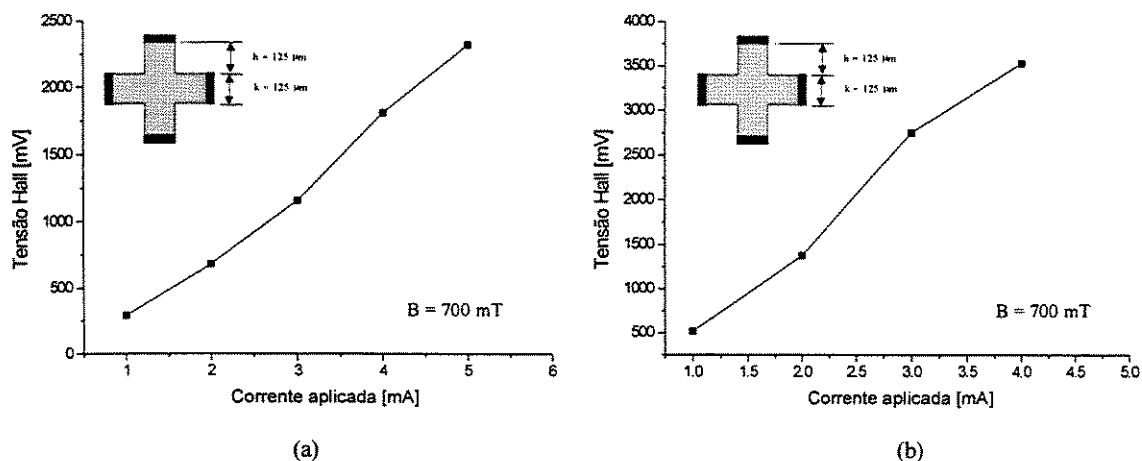


Fig. 51. Curva da tensão Hall versus a corrente de polarização para um campo constante de 700 mT: (a) Estrutura 5 (Amostra SHI-1), (b) Estrutura 5 (Amostra SHI-2).

Através da Fig. 51, comparamos duas estruturas idênticas (Estrutura 1), mas fabricadas em camadas ativas de diferentes resistividades. Podemos observar um maior efeito de não linearidade na amostra SHI-2, Fig. 51 (b), onde a não linearidade inicia-se em algum ponto para correntes superiores a 1 mA,

enquanto, na amostra menos resistiva SHI-1, Fig. 51 (a) os problemas de linearidade iniciam-se em algum ponto para correntes superiores a 2 mA.

Como comentamos anteriormente, camadas ativas de alta resistividade são importantes para obter dispositivos Hall de alta sensibilidade (eq. 17), no entanto, camadas com dopagem muito baixa, como SHI-1 e SHI-2, começam a apresentar variações na espessura, devido às regiões de depleção moduladas por campos elétricos relativamente altos. Essas regiões de depleção podem se tornar intensas e ocorrer um mecanismo chamado de "*pinch-off*", onde a região ativa pode ser eliminada em certos pontos. Provavelmente esse é o efeito que está ocasionando as não linearidades apresentadas nos dispositivos fabricados nas amostras SHI-1 e SHI-2. A solução seria diminuir as correntes de operação para uma faixa, onde o comportamento fosse linear. Para estes dispositivos as correntes de polarização não deveriam ultrapassar 1 mA.

- SENSIBILIDADE

Através dos dispositivos fabricados na amostra S-1B durante a segunda rodada de fabricação, realizamos um estudo da influência geométrica sobre a sensibilidade dos sensores. Na Fig. 52 exibimos as curvas das tensões Hall versus o campo magnético das 6 estruturas estudadas para corrente de polarização de 1 mA.

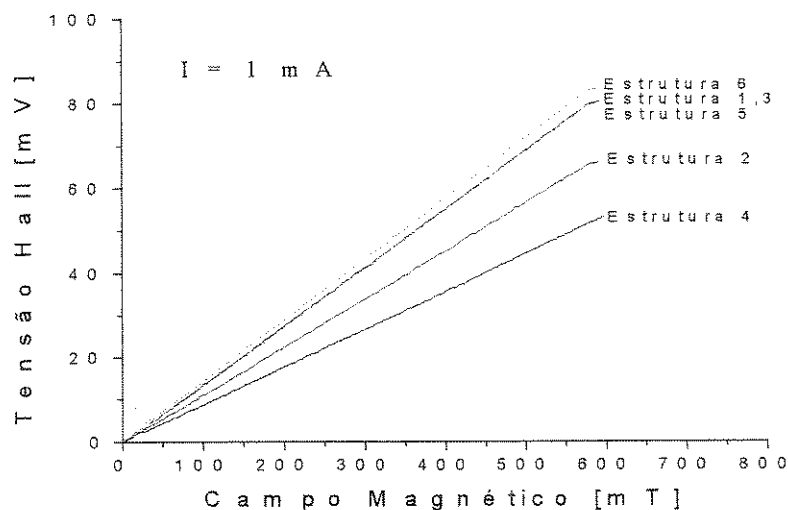


Fig. 52. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético das 6 estruturas fabricadas na amostra S-1B (ver tabela 7).

Na Fig. 52 a inclinação da reta indica a sensibilidade do dispositivo. Exibimos na tabela 12 os valores numéricos das sensibilidades medidas e calculadas para os dispositivos projetados e fabricados sobre a amostra S-1B.

Tabela 12: Sensibilidades medidas e calculadas dos sensores fabricados sobre a amostra S-1B

Estruturas	Coefficiente geométrico G	Sensibilidade calculada [V/A.T.]	Sensibilidade medida [V/A.T.]	Erro [%]
1	0,97	145	137	5,8
2	0,80	119	113	5,3
3	0,98	146	137	6,5
4	0,67	100	88	13,6
5	0,95	142	134	5,9
6	0,98	146	143	2

Através dos resultados representados na Fig. 52 e exibidos na tabela 10 podemos observar a importância de um projeto geométrico otimizado

(representado pelo coeficiente geométrico) para obtermos sensores Hall mais sensíveis. Os dados da tabela mostram que os resultados medidos estão, dentro de uma margem de erro satisfatória, de acordo com os valores calculados. A pequena diferença entre os valores medidos e calculados das sensibilidades são inerentes ao cálculo dos coeficientes geométricos (eq. 12 e 14). A maior discrepância é apresentada na Estrutura 4, pois a equação que utilizamos (eq. 14) apresenta menores erros para $(h/k > 1)$, no entanto, esta estrutura possui $h/k = 0,36$.

Com os dispositivos fabricados na terceira rodada, podemos ver a influência da dopagem sobre a sensibilidade dos sensores. Como já discutimos, camadas de alta resistividade são importantes para obter dispositivos de alta sensibilidade, assim, a Estrutura 3 fabricada sobre a amostra SHI-2 obteve a maior sensibilidade de 820 V/A.T, com valor muito próximo a sensores Hall fabricados em heteroestruturas 2D (poços quânticos)³⁶ que estão na ordem de 900 V/A.T

Na Fig. 53 exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 (ver Fig. 27) fabricada nas diferentes camadas SHE-2 (tabela 4), S-1B (tabela 7), SHI-1 (tabela 9) e SHI-2 (tabela 9).

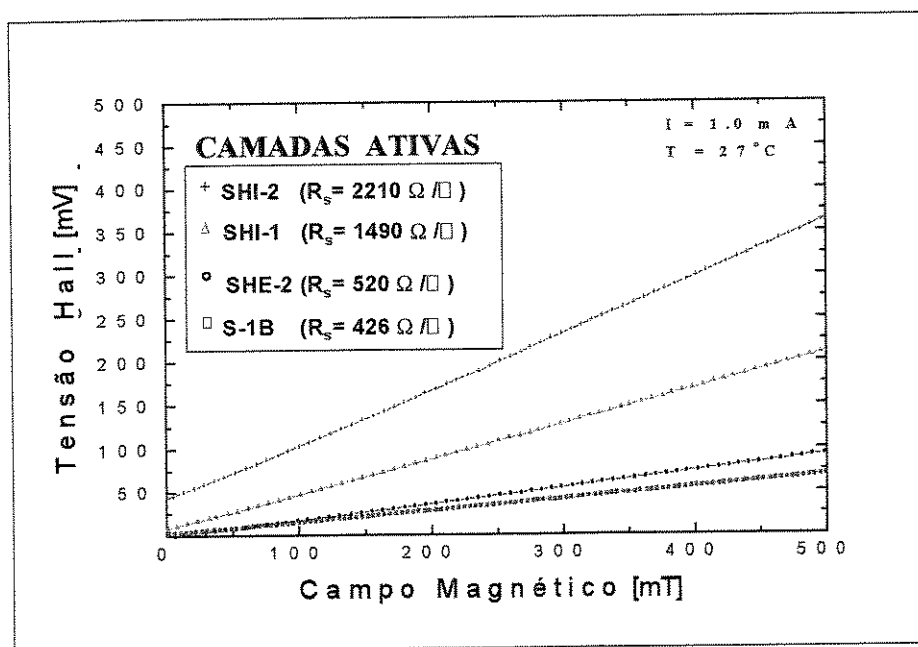


Fig. 53. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético da Estrutura 5 fabricada nas diferentes camadas (SHI-1, SHI-2, SHE-2 e S-1B).

Através da Fig. 53 podemos ver a influência da resistência de folha sobre a sensibilidade dos dispositivos.

Na Fig. 54 exibimos as curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos dispositivos Hall comerciais (SIEMENS, ASAHI KASEI) em camada epitaxial e da Estrutura 5 fabricada em nossas instalações (CCS/LPD), também, em camada epitaxial (SHE-2).

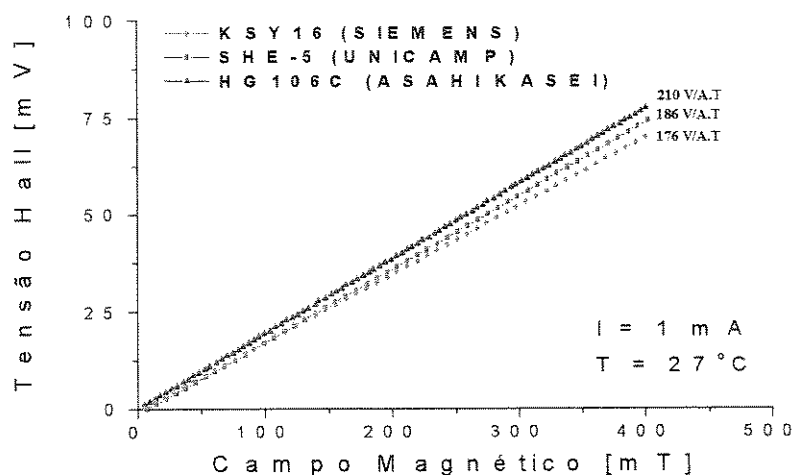


Fig. 54. Curvas da tensão Hall versus o campo magnético dos dispositivos Hall fabricados em camadas epitaxiais. São exibidos os dispositivos comerciais (SIEMENS, ASAHI KASEI) e a Estrutura 5, fabricada em nossas instalações.

Através da Fig. 54, podemos observar que os dispositivos fabricados em nossas instalações (LPD/CCS) apresentam sensibilidade e tensão offset comparável a sensores Hall comerciais fabricados sobre GaAs.

• TENSÃO OFFSET

Como já comentamos anteriormente a tensão offset é uma tensão residual que aparece nos contatos Hall em campo zero. Esta tensão surge devido a não perfeita uniformidade da corrente na região ativa ocasionada por flutuações na resistividade da camada, efeito piezoresistivo, defeitos cristalinos. Outra causa da

tensão offset é desalinhamentos das máscaras durante o processo de fotogravação. Para evitar problemas de desalinhamentos dos contatos Hall nas estrutura retangulares, projetamos as regiões de contato Hall na mesma máscara da camada ativa, como visto na Fig. 18 (b). Também, projetamos estruturas para cancelamento da tensão offset (Fig. 27) que não foram finalizadas devido a não possibilidade de obter um filme dielétrico, por problemas de processo ou equipamentos.

Na Fig. 55, mostramos o comportamento da tensão offset como uma função da resistência de folha para a Estrutura 5.

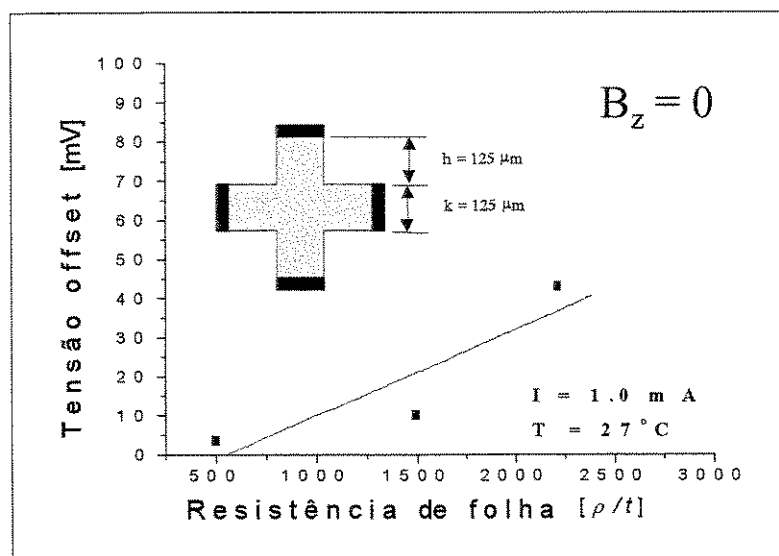


Fig. 55. Curvas da tensão offset versus a resistência de folha da Estrutura 5.

Através desta Fig. 55 podemos observar que camadas ativas menos dopadas apresentam maior nível de tensão offset. Portanto, existe um compromisso entre obter camadas altamente sensíveis (alta resistividade) e dispositivos Hall discretos com baixo nível de tensão offset. No entanto, a tensão offset pode ser eliminada ou reduzida através de circuitos de cancelamento.

Outro ponto importante que observamos quando comparamos a Estrutura 5 fabricada na amostra implantada S-1B com a mesma estrutura fabricada na camada epitaxial SHE-2 é que o dispositivo fabricado na camada epitaxial exibe

tensões Hall menores para as mesmas correntes de polarização. Mesmo a resistência de folha da camada epitaxial (tabela 4) sendo maior que a da camada implantada (tabela 7) o dispositivo epitaxial apresenta menor tensão offset. Isso deve-se a uma maior uniformidade da corrente na camada epitaxial devido a menos defeitos cristalinos, homogeneidade na dopagem e perfil abrupto.

- ERRO DE LINEARIDADE

Na Fig. 56 exibimos o erro de linearidade medido através de (eq. 20) obtido da Fig. 46.

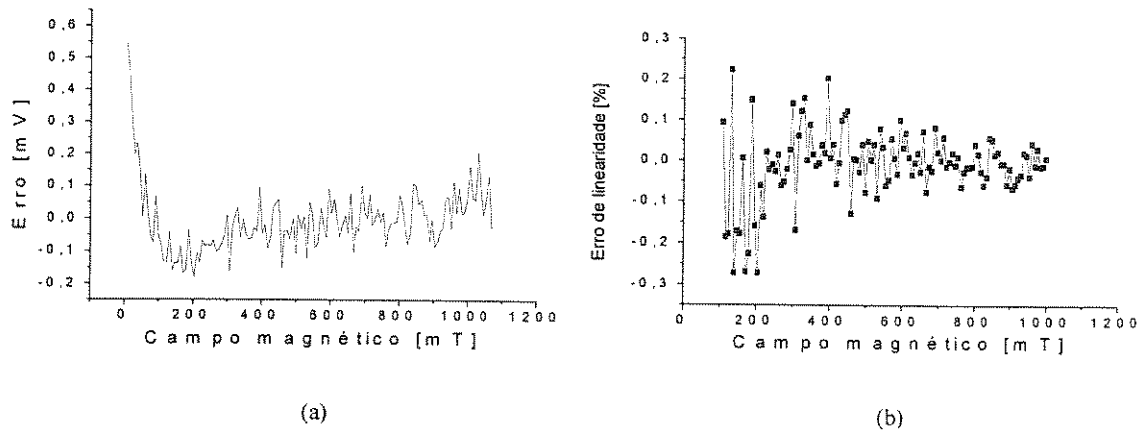


Fig. 56. Linearidade da tensão Hall da amostra SHE-2 (Estrutura 5) obtida da Fig. 46: (a) erro de linearidade ($V_{med} - V_{fit}$) entre 1mT e 1.1T representado em milivolts; (b) erro de linearidade (eq. 20) entre 100mT e 1T.

Através da Fig. 56 (a) podemos observar um maior erro de linearidade para campos baixos de até 100 mT. Este erro inicial pode ser consequência de um campo magnético remanescente.

Na Fig. 56 (b) expressamos o erro em porcentagem para campos superiores a 100 mT. Este erro, tem um valor correspondente aos dispositivos Hall desenvolvidos em GaAs¹³. Embora os equipamentos utilizados no *set-up* de

medidas (Fig. 26) introduzam erros, é bem provável que o ruído da curva medida seja devido a uma pequena instabilidade da fonte de corrente que polariza o eletroímã, levando a pequenas oscilações na tensão Hall dos sensores.

- COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TENSÃO HALL

Na Fig. 57 exibimos a variação da tensão Hall versus a temperatura da Estrutura 3 fabricada sobre a amostra S-1B (tabela 7).

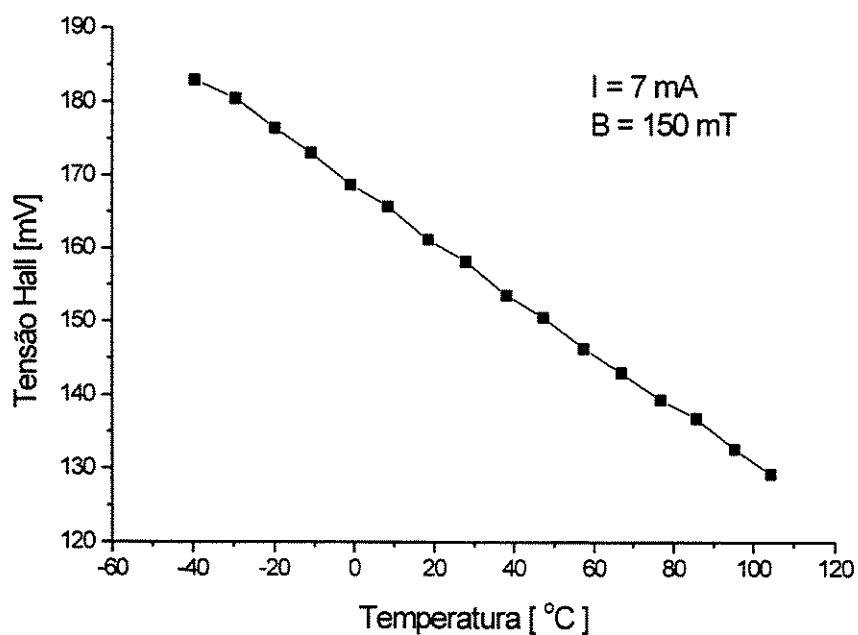


Fig. 57. Tensão Hall versus a temperatura da Estrutura 3 fabricada sobre a amostra S-1B (tabela 7)

O coeficiente de temperatura (TC) calculado para esta estrutura é de $-0,4 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$.

Quando mantemos constante a polarização do sensor, o nível de tensão Hall cai com o aumento da temperatura, pois o fator de espalhamento (ver eq. 5) é variável em a temperatura.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES

Fabricamos sensores Hall com diferentes geometrias e dopagens, obtendo dispositivos com boa sensibilidade comparável aos exibidos na literatura e comerciais.

As diferentes geometrias mostram-se equivalentes de acordo com o respectivo coeficiente geométrico. A estrutura “cruz-grega” apresenta maiores vantagens para miniaturização. Uma estrutura retangular com dimensões de poucos microns deveria ter contatos Hall pontuais com dimensões sub-micron dificultando a fabricação e podendo introduzir maior nível de tensão offset.

Sensores fabricados em camadas epitaxiais, apresentam menor nível de tensão offset devido a sua melhor qualidade cristalina e perfil abrupto, no entanto, é uma tecnologia mais cara que a implantação de íons.

O processo de fabricação desenvolvido pelo CCS/LPD apresenta uma relativa falta de repetibilidade devido às várias diferentes pesquisas desenvolvidas, o que é uma característica inerente a muitos laboratórios de pesquisa.

Em um processo por implantação de íons recomendamos o uso de alta energia de implantação, dado que isto resulta em maior ativação elétrica e de mobilidade eletrônica.

Como sugestões futuras temos:

- Otimizar o processo de deposição de oxinitreto por ECR em condições repetitivas sem produção de danos.
- Otimizar a repetibilidade do processo de implantação de íons e RTP.
- Concluir o trabalho de cancelamento de tensão offset que não foi possível realizar.
- Projetar e fabricar sensores para uma aplicação específica, onde os vários compromissos apontados devem ser considerados.

- Projetos de circuitos de condicionamento, onde haja amplificação do sinal Hall, cancelamento da tensão offset, cancelamento da ação da temperatura sobre a tensão Hall.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ R. Boll, K. J. Overshott, "Sensors 5: Magnetic Sensors", VHC, v. 5, 1989.
- ² D. J. Mapps, "Magnetoresistive Sensors", Sensors and Actuators A 59, pp. 9-19, 1997.
- ³ H. Baltes, R. S. Popovic, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors", Proceedings of the IEEE, v. 74, n. 8, pp. 1107-1132, 1986.
- ⁴ R. S. Popovic, J. A. Flanagan, P. A. Besse, "The Future of Magnetic Sensors", Sensors and Actuators A 56, pp. 39-55, 1996.
- ⁵ Catálogo F. W. BELL, "An Introduction to the Hall Effect", www.fwbell.com.
- ⁶ C. Schott, H. Blanchard, R. S. Popovic, R. Racz, J. Hrejsa, "High-Accuracy Analog Hall Probe", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 46, n. 2, p.p. 613-616, 1997.
- ⁷ P. Simon, P. Vries, S. Middelhoek, "Autocalibration of Silicon Hall devices", Sensors and Actuators A 52, p.p. 203-207, 1996.
- ⁸ Y. Xing, S. Kordic, S. Middelhoek, "A new Approach to Offset Reduction in Sensors: the Sensitivity-Variation Method", J. Phys. E: Sci. Instrum., v. 17, p.p. 657-663, 1984.
- ⁹ N. Mathieu, A. Chovet, M. Chertouk, "Figures of Merit of Semiconductor Integrated Magnetic Sensors", Sensors and Materials, 5, 6, p.p. 359-368, 1994.
- ¹⁰ H. H. Wieder, "Hall Generators and Magnetoresistors", Pion Limited, 1971.
- ¹¹ J. Heremans, "Solid State Magnetic Field Sensors and Applications", J. Physics D: Appl. Phys. 26, pp. 1149-1168, 1993.
- ¹² A. C. Beer, "The Hall Effect and Related Phenomena", Solid-State Electronics, v. 9, pp. 339-351, 1966.
- ¹³ E. Pettenpaul, J. Huber, H. Weidlich, W. Flossman, U. v. Borcke, "GaAs Hall Devices Produced by Local Ion Implantation", Solid-State Electronics, vol. 24, n. 8, p.p. 781-786, 1981.
- ¹⁴ Popovic R. S., "Hall Effect Devices", The Adam Hilger Series no Sensors, Adam Hilger, 1991.
- ¹⁵ W. Versnel, "Analysis of Symmetrical Hall Plates with Finite Contacts", J. Appl. Phys. 52(7), p.p. 4659 – 4666, 1981.
- ¹⁶ W. Versnel, "The Geometrical Correction Factor for a Rectangular Hall Plate", J. Appl. Phys. 53(7), p.p. 4980-4986, 1982.
- ¹⁷ Wick R. F. "Solution of the field problem of the germanium gyrator", J. Appl. Phys. 25, p.p. 741-756, 1954.
- ¹⁸ A. M. J. Huizer, H. P. Baltes, "Numerical Modeling of Vertical Hall-Effect Devices", IEEE Electron Device Letters, c. EDL-5, n. 11, 1984.
- ¹⁹ J. Haeusler, H. J. Lippmann, "Hallgeneratoren Mit Kleinem Linearisierungsfehler", Solid-State Electronics, vol. 11, p.p. 173-182, 1968.
- ²⁰ H. Baltes, R. S. Popovic, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors", Proceedings of the IEEE, v. 74, n. 8, pp. 1107-1132, 1986.
- ²¹ Y. Kanda, M. Migitaka, H. Yamamoto, H. Morozumi, T. Okabe, S. Okazaki, "Silicon Hall-Effect Power IC's for Brushless Motors", IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-29, n. 1, p.p. 151-154, 1982.

- ²² G. Björklund, "Improved Design of Hall Plates for Integrated Circuits", IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-25, n. 5, p.p. 541-543, 1978.
- ²³ T. Hara, M. Mihara, N. Toyoda, M. Zama, "Highly Linear GaAs Hall Devices Fabricated by Ion Implantation", IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-29, n. 1, p.p. 78-82, 1982.
- ²⁴ R. S. Popovic, B. Hälg, "Nonlinearity in Hall Devices and its Compensation", Solid-State Electronics, v. 31, n. 12, p.p. 1681-1688, 1988.
- ²⁵ T. Kanayama, H. Hiroshima, M. Komuro, "Miniature Hall Sensor Fabricated with Maskless Ion Implantation", J. Vac. Sci. Technol. B 6 (3), p.p. 1010-1013, 1988.
- ²⁶ H. T. Minden, M. F. Leonard, "Micron-Size Hall Probe for Precision Magnetic Field Mapping", J. Appl. Phys. 50(4), p.p. 2945-2947, 1979.
- ²⁷ Y. V. Timoshkov, A. L. Danilyuk, I. S. Molchan, T. I. Orechovskaya, V. I. Kurmashev, "Memory Element Based on a Layered Galvanomagnetic Structure", IEEE Transactions on Magnetics, v. 34, n. 4, p.p. 1078-1080, 1998.
- ²⁸ C. S. Roumenin, "Magnetic Sensors Continue to Advance Towards Perfection", Sensors and Actuators A (46-47), p.p. 273-279, 1995.
- ²⁹ Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization", John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- ³⁰ A. A. Ramadan, R. D. Gould, A. Ashour, "On the Van der Pauw Method of Resistivity Measurements", Thin Solid Films (239), p.p. 272-275, 1994.
- ³¹ J. T. Maupin, M. L. Geske, "The Hall Effect in Silicon Circuits - The Hall Effect and its Applications", New York - Plenum, p.p. 421-445, 1980.
- ³² J. R. Hines, "Improved Hall Devices Find New Uses", ElectronicsWeek - Texas Instruments Inc, p.p. 59-61, 1985.
- ³³ H. Tanoue, T. Tsurushima, S. Kataoka, "GaAs Hall Element Fabricated by Ion Implantation", IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-27, n. 6, p.p. 1188-1192, 1980.
- ³⁴ R. Campesato, C. Flores, "GaAs Hall Sensors made by the MOCVD Technique", Sensors and Actuators A32, p.p. 651-655, 1992.
- ³⁵ A. S. Lujan, A. C. S. Ramos, J. W. Swart, P. M. Enquist, "Dry Etch Characteristics of BCB for Application in a Multilevel Interconnection", X Congress of the Brazilian Microelectronics Society, p.p. 597-605, 1995.
- ³⁶ V. Mosser, S. Contreras, S. Aboulhoda, P. Lorenzini, F. Kobbi, J. L. Robert, K. Zekentes, "High Sensitivity Hall Sensors with Low Thermal Drift Using Al/GaAs/InGaAs/GaAs Heterostructures", Sensors and Actuators A43, p.p. 135-140, 1994.