

# Sensores Integrados em Silício

## IE012

### Sensores Magnéticos

Professor Fabiano Fruett

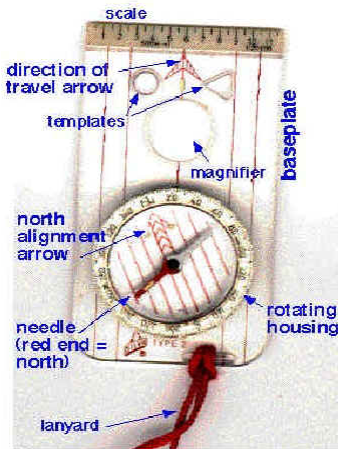
UNICAMP – FEEC - DSIF  
Sala 207

[www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano](http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano)

### Referências

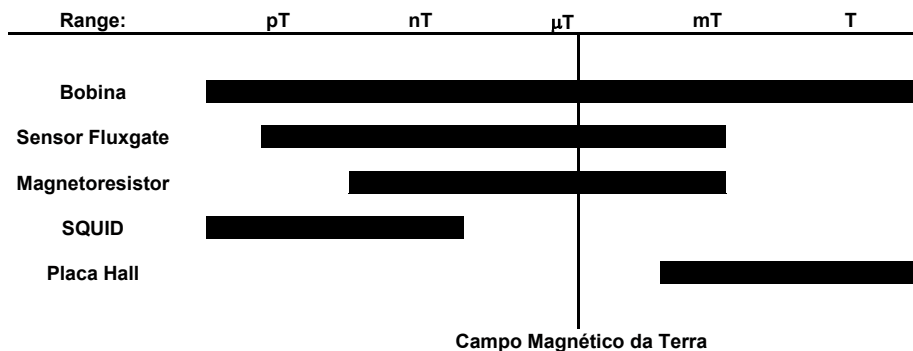
- R. S. Popovic, Hall effect devices, Adam Hilger, 1991, ISBN 0-7503-0096-5
- S.M. Sze, "Semiconductor Sensors", John Wiley & Sons, Inc, 1994
- H. Baltes and R. S. Popovic, Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors, Proceedings of the IEEE, Vol. 74, N 8, August 1986.
- Ch. Schott, J.-M. Waser and R.S. Popovic, Single-chip 3-D silicon Hall sensor, Sensors and Actuators 82 (2000)
- S. Middelhoek, S. A. Audet and P. J. French, "Silicon Sensors", Delf University of Technology, 2000

## Sensor magnético mais conhecido



A bússola já era utilizada a mais de 4000 anos pelos chineses

Faixa de intensidade da indução magnética em que os diferentes sensores são utilizados



## Sensores magnéticos

- **Bobinas** são dispositivos simples baseadas na indução. A tensão induzida é gerada apenas quando a indução magnética varia com o tempo. A implementação em circuitos integrados não é usual.
- **O Fluxgate** consiste de duas bobinas (enrolamentos). São de fabricação complexa e cara.
- **Materiais magnetoresistivos** mudam sua resistividade quando expostos a um campo magnético. Materiais ferromagnéticos tem um grande efeito magnetoresistivo. Não são lineares mas tem uma sensibilidade relativamente grande. O silício apresenta um baixo efeito magnetoresistivo.
- **SQUIDS** (Superconductivity Quantum Interface Device), são sensores baseados no efeito da quantização de fluxo magnético e efeito Josephson, ambos relacionados ao estado da supercondutividade.
- **Dispositivos Hall** são sensores magnéticos bem populares. Podem ser produzidos em grande escala através de processos microeletrônicos o que os torna baratos. Quando fabricados com tecnologia microeletrônica, nenhum processamento extra é necessário.

## Dr. Edwin Herbert Hall



Descobridor de efeito Hall em 1887

## Vantagens dos sensores Hall

- Velocidade de resposta
- Robustez
- Durabilidade
- Variedade de formatos e sensibilidades
- Não necessita de encapsulamento especial
- Medição sem contato

## Aplicações dos sensores magnéticos

### Diretas

- Medição do campo magnético terrestre
- Leitura de fitas e discos magnéticos
- Cartões de crédito e de identificação

### Indiretas

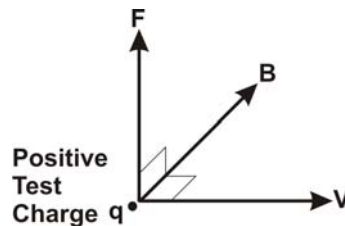
- Detecção do fluxo de corrente (através do seu campo magnético)
- Sensores de deslocamento mecânico (linear e angular)
- Chaves sem contato

# Unidades Magnéticas

Grandeza	Símbolo	Sistema Gaussiano (CGS)	Fator de conversão	Sistema Internacional (SI)
Fluxo magnético	$\Phi$	Maxwell (Mx), Gb * cm <sup>2</sup> (Gb - gilbert)	10 <sup>-8</sup>	Weber (Wb)
Indução magnética	$B$	Gauss (G)	10 <sup>-4</sup>	Tesla (T) Wb/m <sup>2</sup> (Wb - weber)
Campo magnético	$H$	Oersted (Oe)	10 <sup>3</sup> /4 $\pi$	A/m
Magnetização	$M$	emu/cm <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	A/m
Permeabilidade no vácuo	$\mu_0$	adimensional	4 $\pi$ * 10 <sup>-7</sup>	Wb/(A * m)
Permeabilidade	$\mu$	adimensional	4 $\pi$ * 10 <sup>-7</sup> $\mu_0$	Wb/(A * m)
Força magnetomotiva	$U$	Gilbert (Gb)	10/4 $\pi$	Ampere (A)

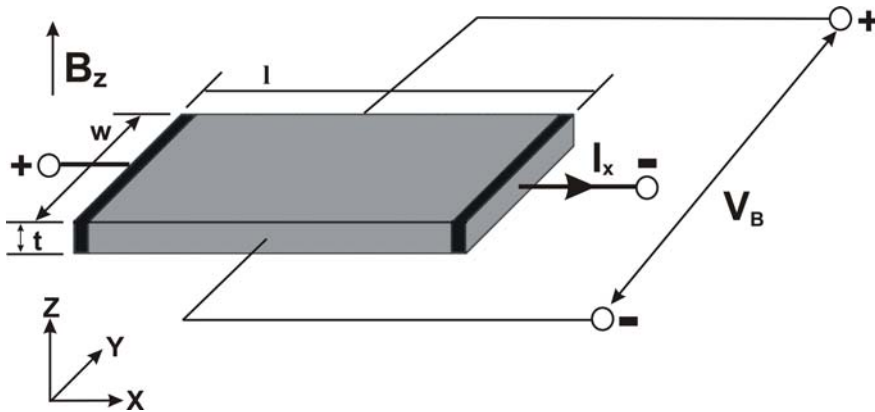
## Força de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



O vetor força magnética é perpendicular à velocidade da carga  $q$  e ao vetor indução magnética  $B$ .

# Placa Hall



## Efeito galvanomagnético

Densidade de corrente em um semiconductor tipo n; no caso em que  $B=0$

$$J_n(0) = \sigma_n E + qD_n \nabla n$$

$$\sigma_n = q\mu_n n$$

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{q} \quad \mu_n = \frac{v_n}{|E|}$$

Desprezando a componente de difusão:  $\nabla n = 0$

e no caso em que  $B \perp E$

$$J_n(B) = \sigma_{nB} (E - \mu_{Hn} B \times E)$$

Campo elétrico transverso

$$\mu_{Hn} (B \times E) = -(v_n \times B)$$

# Efeito galvanomagnético

Considerando:

$$J_n(B) = (J_{nx}, J_{ny}, 0)$$

$$E = (E_x, E_y, 0)$$

$$B = (0, 0, B_z)$$

Efeito da magnetocondutividade

$$\sigma_{nB} = \sigma_n \left[ 1 + (\mu_{Hn} B)^2 \right]^{-1}$$

Mobilidade Hall

$$\mu_{Hn} = r_n \mu_n$$

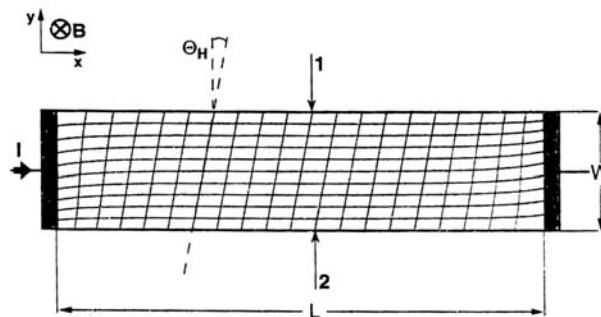
$$J_{nx} = \sigma_{nB} (E_x + \mu_{Hn} B E_y)$$

$$J_{ny} = \sigma_{nB} (E_y + \mu_{Hn} B E_x)$$

Fator de correção Hall para elétrons:

$$1 \leq r_n \leq 2$$

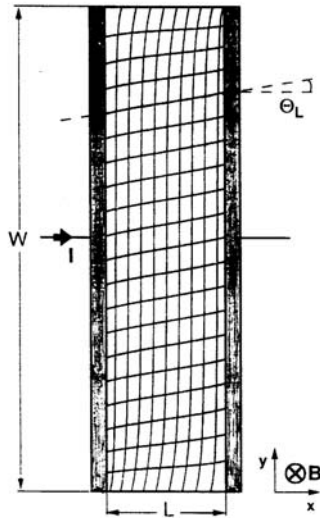
## Modo Hall



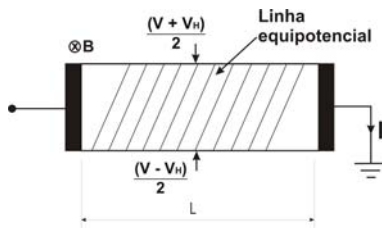
$$J_{ny} = 0$$

# Deflexão de portadores

$$E_y = 0 \quad J_{nx} = \sigma_{nB} (E_x - \mu_{Hn} B E_y)$$

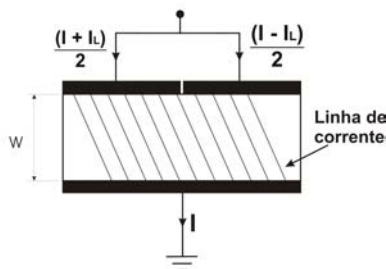


# Comparação dos modos de operação



- Placa Longa
  - Contatos curtos
  - Deflexão das equipotenciais
  - Tensão Hall

$$\frac{V_H}{2} = V \frac{W}{L} \mu_{Hn} B$$



- Placa Curta
  - Contatos longos
  - Deflexão das linhas de corrente
  - Corrente Hall

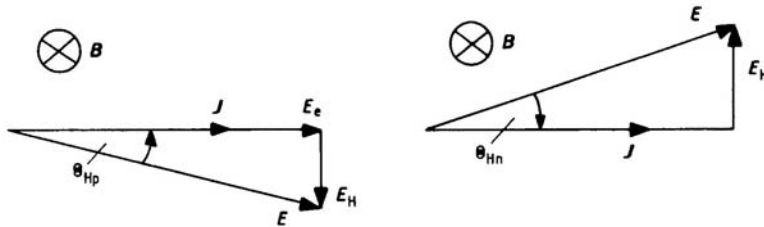
$$\frac{I_L}{2} = I \frac{W}{L} \mu_{Hn} B$$



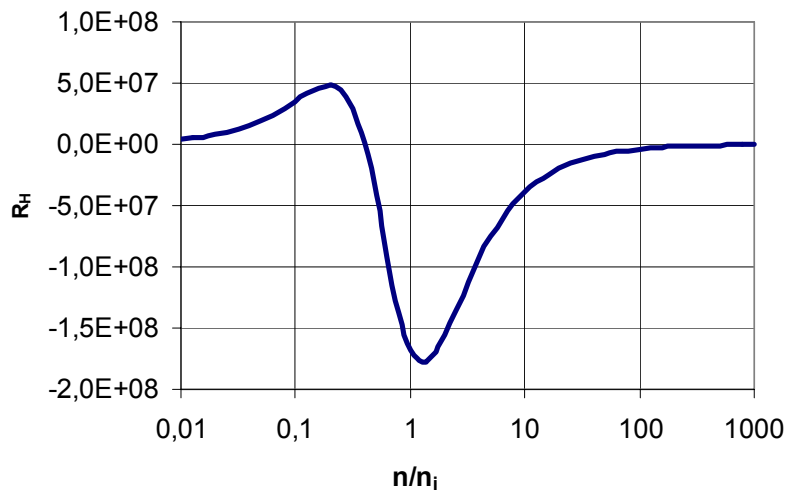
# Constante Hall

A constante Hall é um parâmetro do material que caracteriza a intensidade e o sinal do efeito Hall em um determinado semiconductor.

$$R_H = \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{q(n\mu_n + p\mu_p)^2}$$



# Constante Hall do Si



## Constante Hall      Mobilidade Hall

Tipo p

$$R_{H(\text{lacunas})} = \frac{r_p}{pq} \qquad \mu_{Hp} = r_p \mu_p$$

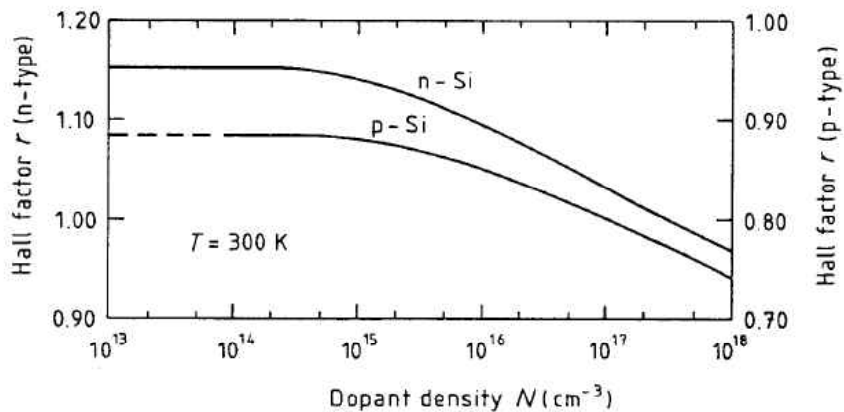
Tipo n

$$R_{H(\text{elétrons})} = -\frac{r_n}{nq} \qquad \mu_{Hn} = r_n \mu_n$$

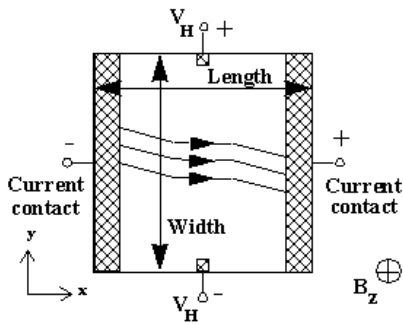
## Mobilidades Hall

$$\mu_{Hn} = r_n \mu_n$$

$$\mu_{Hp} = r_p \mu_p$$



# Magnetoresistividade



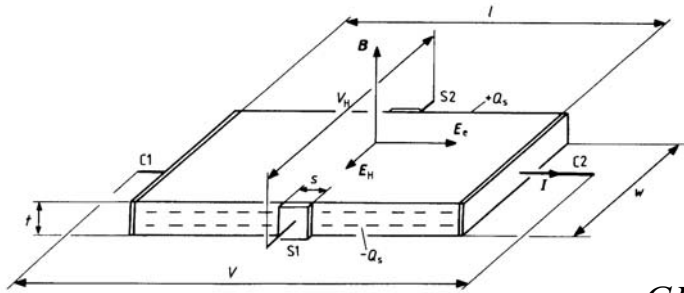
$$\frac{\rho_{nB} - \rho_n}{\rho_n} = (\mu_{Hn} B)^2$$

	$\frac{\rho_{nB} - \rho_n}{\rho_n} = (\mu_{Hn} B)^2$	B [T]	$\mu_n$ [cm <sup>2</sup> /Vs]
Si	1,02	1	1500
InSb	1,02	0,018	80000

## Materiais semicondutores e sua aptidão para sensores magnéticos

Semicondutor	$\mu_n$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	$E_g$ [eV]
Si	1500	1.12
Ge	3900	0.67
GaAs	8500	1.42
InAs	40000	0.4
InSb	80000	0.2

## Fatores geométricos em uma placa semicondutora operando no modo Hall



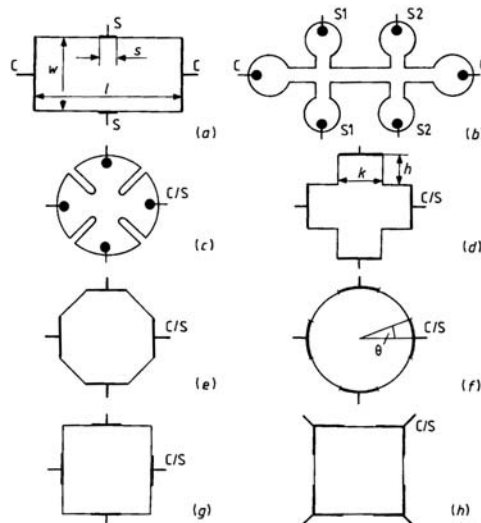
Exemplo:  $\frac{L}{W} > 1.5$        $\frac{s}{W} < 0,18$

$$V_H = \frac{GR_H I_X B_{\perp}}{t}$$

$$G \cong \left[ 1 - \frac{16}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi L}{2W}\right) \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \left( 1 - \frac{2s}{\pi W} \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right)$$

Fonte: Popovic

## Dispositivos Hall com diferentes geometrias



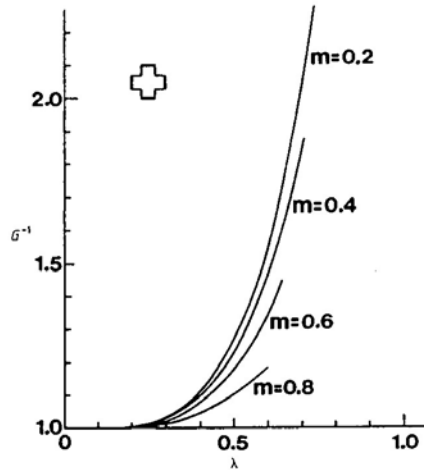
# Fator Geométrico – Método de Versnel

Ângulo Hall relativo:

$$m = \frac{\theta_H}{\pi/2}$$

$$\lambda = \frac{c}{b}$$

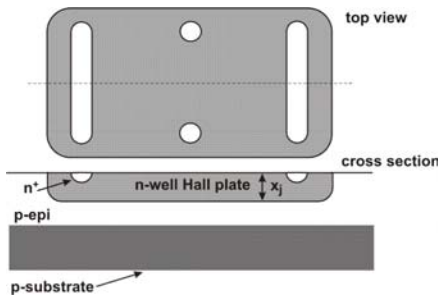
sendo que  $c$  é o comprimento total do contato e  $b$  é o perímetro externo da placa.



Fonte: Versnel W, Analysis of symmetrical Hall plates with finite contacts J. Appl. Phys. 52 4659- 4666, 1981

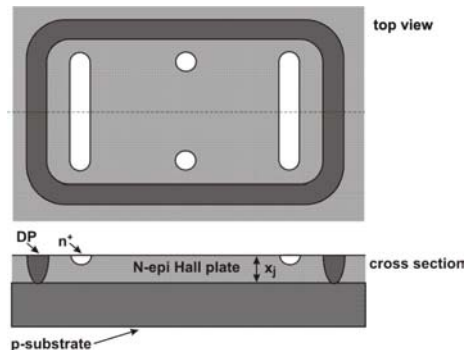
# Dispositivos Hall microeletrônicos

CMOS



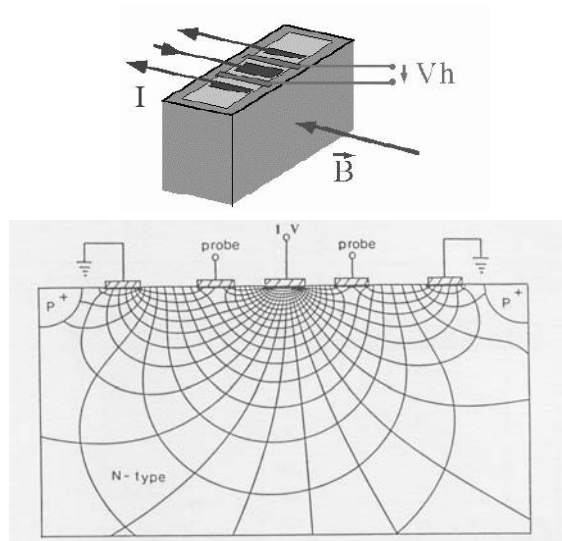
	$x_j$ [ $\mu\text{m}$ ]	$n$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]
p-epi		$10^{15}$
n-well	4	$10^{15} \sim 10^{16}$

Bipolar



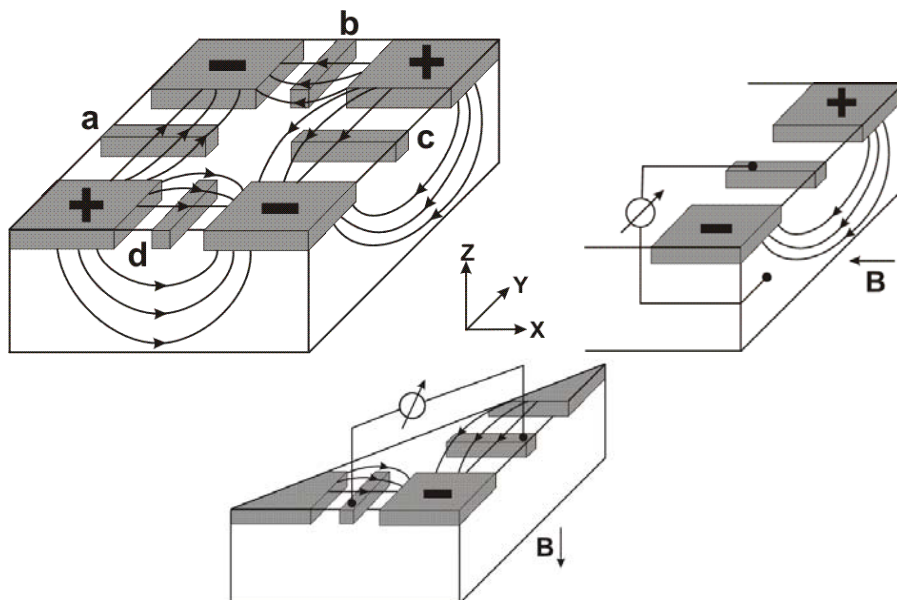
	$x_j$ [ $\mu\text{m}$ ]	$n$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]
n-epi	5~10	$10^{15} \sim 10^{16}$

# Placa Hall vertical



Fonte: Schott, Waser e Popovic

# Sensor Hall 3-D

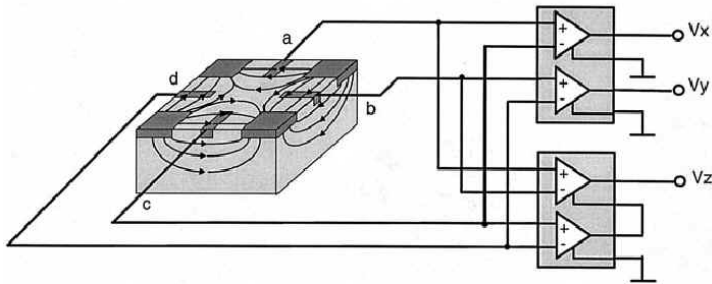


Fonte: Schott, Waser e Popovic

## Condicionamento do sinal de um Sensor Hall 3-D

A tensão em cada contato sensor é dada por:

$$V_a = \frac{V_x}{2} + \frac{V_z}{2} \quad V_b = \frac{V_y}{2} - \frac{V_z}{2} \quad V_c = \frac{-V_x}{2} + \frac{V_z}{2} \quad V_d = \frac{-V_y}{2} - \frac{V_z}{2}$$

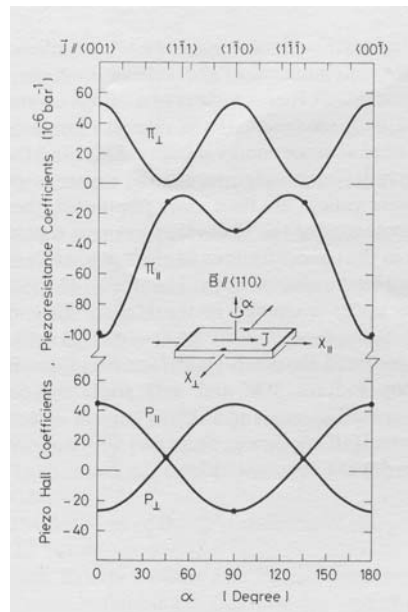
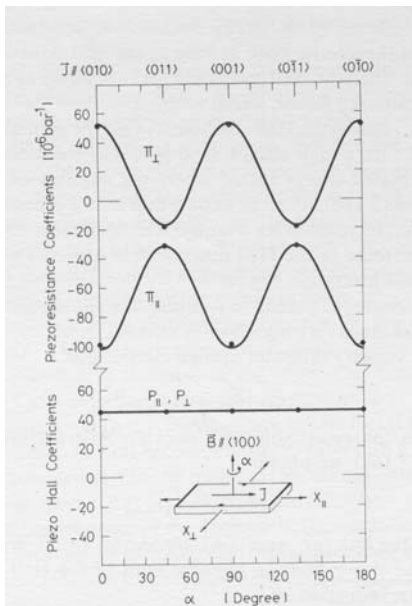


Extração do sinal:

$$V_x = V_a - V_c \quad V_y = V_d - V_b \quad V_z = \frac{V_a - V_b + V_c - V_d}{2}$$

Fonte: Schott, Waser e Popovic

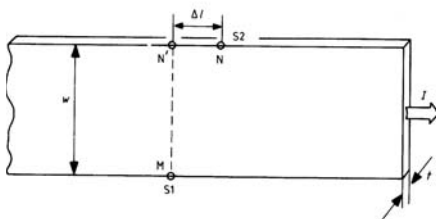
## Efeito piezo-Hall



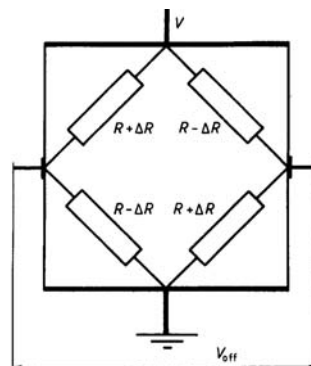
# Principais fontes de offset

- Desalinhamento dos contatos (fator geométrico)
- Efeito piezoresistivo (stress mecânico)
- Variação da dopagem (processo)
- Efeito Seebeck

## Offset



Desalinhamento

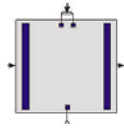


Modelo em ponte de  
uma placa Hall



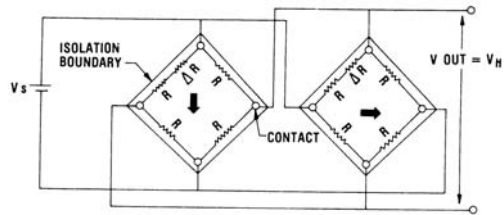
# Métodos de redução do offset

## Contato Hall potenciométrico



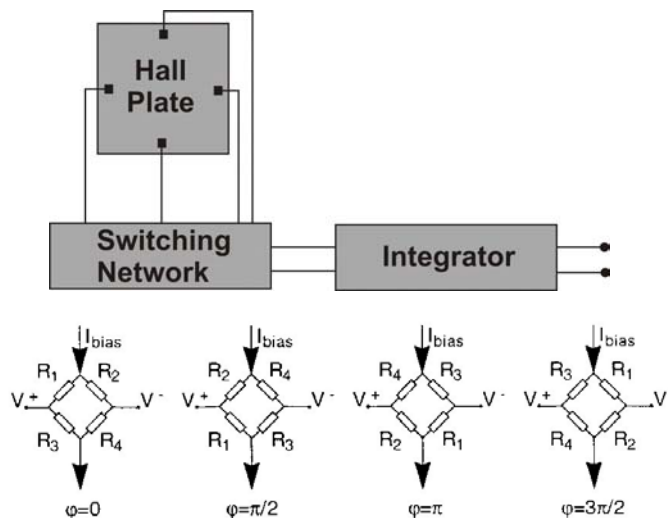
- Potenciômetro off ou on-chip
- Calibração individual
- Ineficiente contra desvios ao longo do tempo

## Casamento de dispositivos “idênticos”

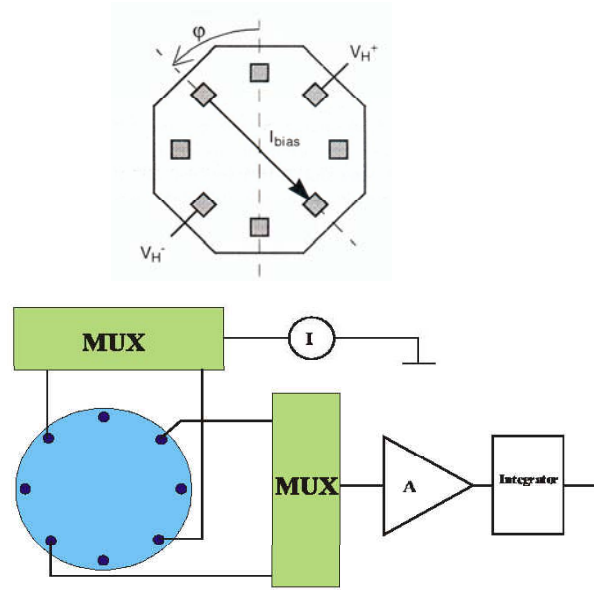


- Ocupa o dobro da área
- Depende do casamento (gradientes podem dificultar)

# Dispositivo Hall simétrico com chaveamento ortogonal

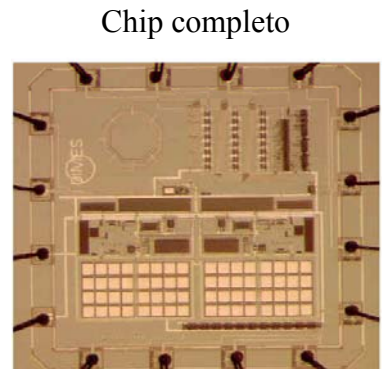
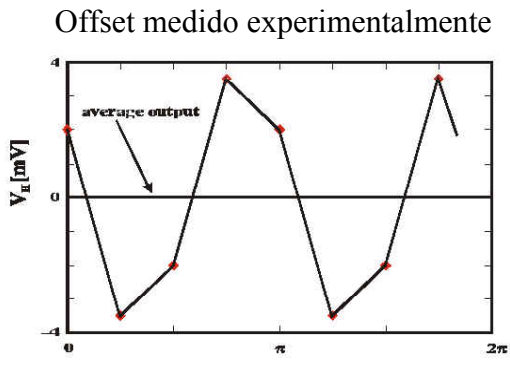


# Spinning Hall plate



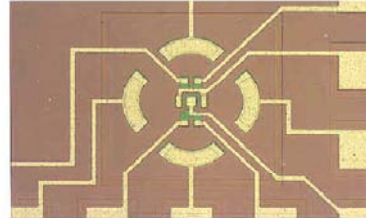
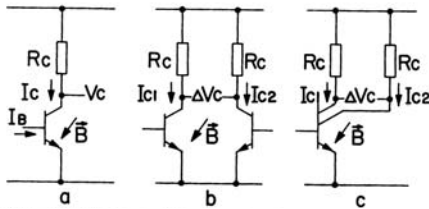
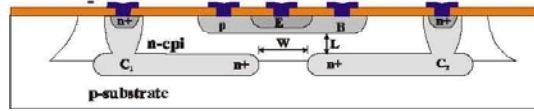
Fonte: Delft University of Technology

# Spinning Hall plate



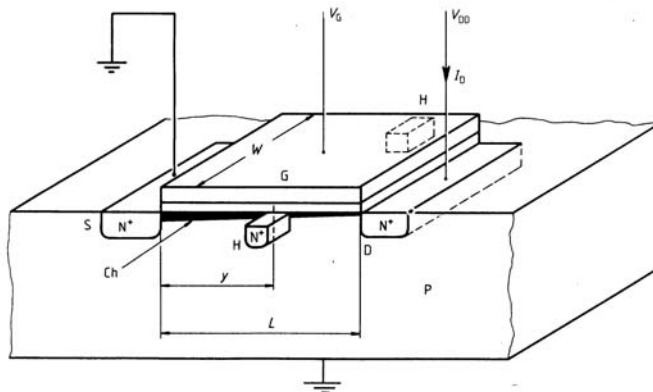
Fonte: Delft University of Technology

# Transistores Hall bipolar



Fonte: Delft University of Technology

# Transistores Hall MOS

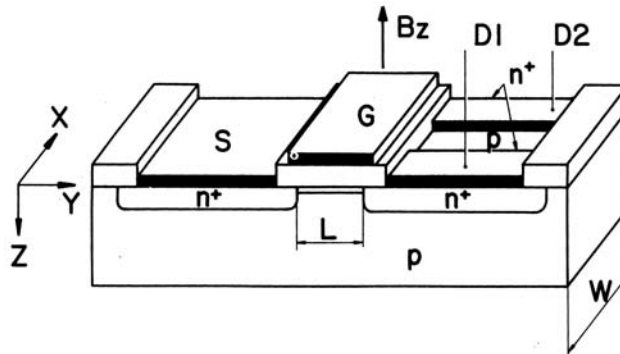


$$V_H = \mu_{Hch} \frac{W}{L} G V_D B_{\perp}$$

Fonte: Popovic

# Split-Drain MOS devices

Placa Hall curta (deflexão de Lorentz)



Fonte:Popovic

## Estudos de Caso

Sensor Hall com sensibilidade maximizada  
IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

# Sensor Hall com sensibilidade maximizada

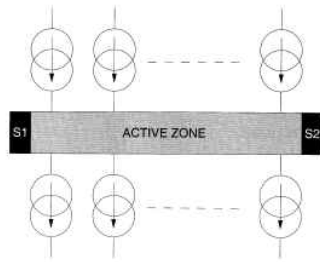


Fig. 2. Biasing principle.

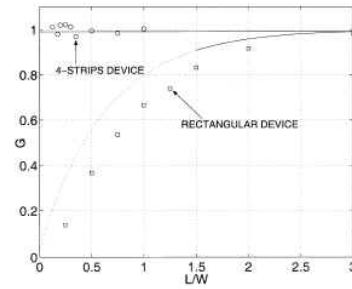


Fig. 4. Simulated (circles and squares) and theoretical (solid lines) geometrical correction factors [(3) and (7)].

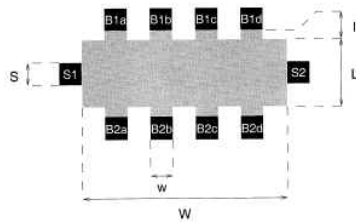
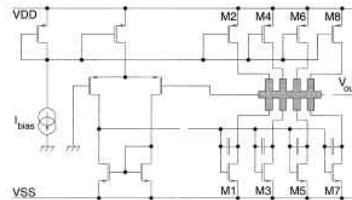
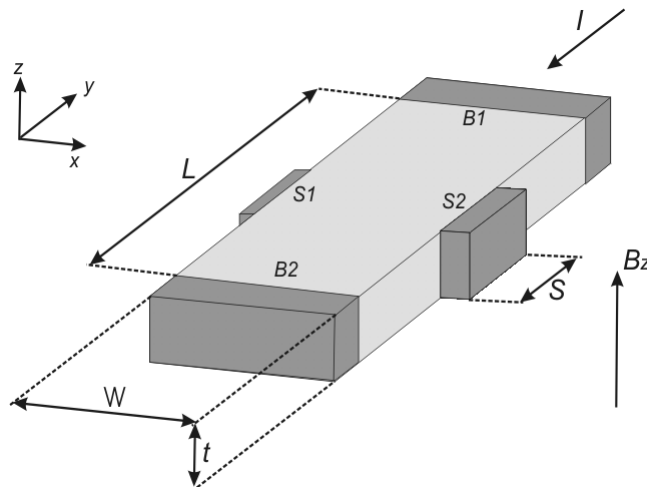


Fig. 3. New shape (four strips).



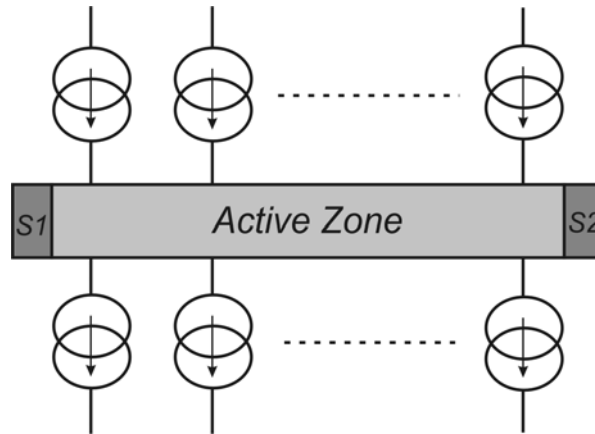
Fonte: IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

# Placa Hall Convencional



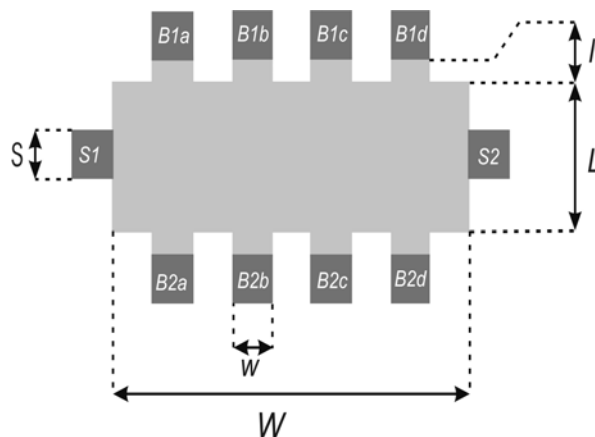
Fonte: IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

## Placa Hall com múltiplos contatos de corrente



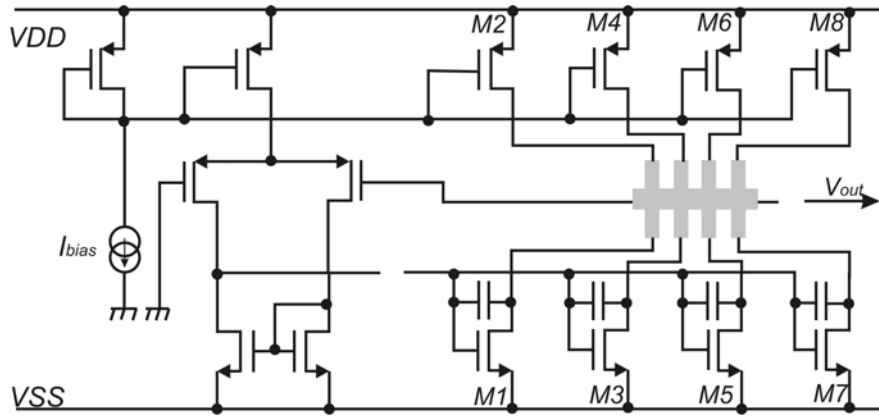
Fonte: IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

## Layout da placa Hall com múltiplos contatos de corrente



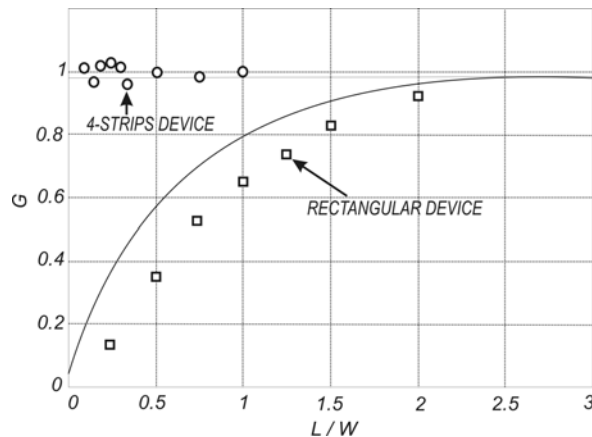
Fonte: IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

## Circuito de condicionamento em tecnologia CMOS



Fonte: IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

## Resultado experimental da placa Hall com múltiplos contatos de corrente



Fonte: IEEE Sensors Journal, V. 3, N.6, December 2003

# Sensores Magnéticos Alternativos

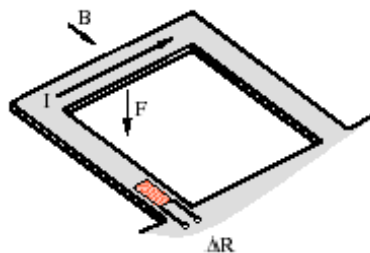
## Conversões de energia entre Domínios do sinal



Fonte: L. Latorre et al, Design, Characterization & Modelling of a CMOS Magnetic Field Sensor

# Sensores magnéticos CMOS alternativos

O sensor é composto por uma “trave” microfabricada que sofre a ação da força de Lorentz.

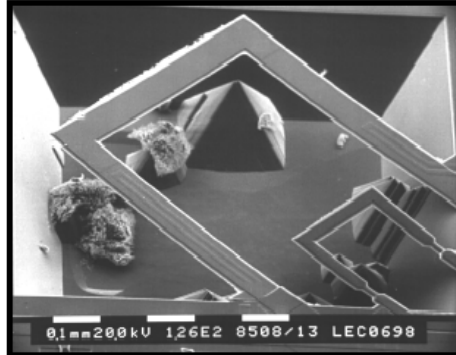


Fonte: L. Latorre et al, Design, Characterization & Modelling of a CMOS Magnetic Field Sensor



# Sensores magnéticos CMOS alternativos

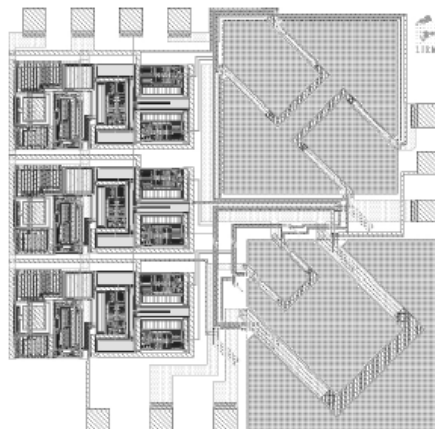
- Estrutura suspensa:  
óxido de silício
- Condutor de Corrente:  
Alumínio
- Piezoresistores em  
polisilício



Fonte: L. Latorre, Design, Characterization & Modelling of a CMOS Magnetic Field Sensor

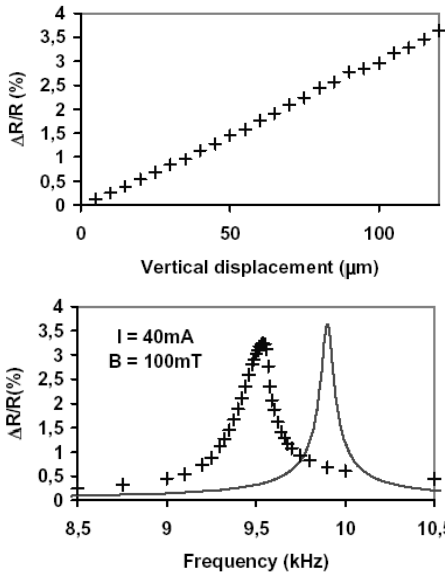
## Integração

- Área: 5mm<sup>2</sup>
- Processo CMOS 0.8um  
(CMP services)
- Estágio amplificador de  
ganho
- Sensibilidade 50 mV/mT



Fonte: L. Latorre, Design, Characterization & Modelling of a CMOS Magnetic Field Sensor

# Resultados experimentais



Comportamento no domínio da frequência

+ experimental

- teórico

## MEMS Magnetic Sensor in Standard CMOS B. Eyre et al

