Descrição das Medidas dos Dispositivos

José Alexandre Diniz

1) Caracterização dos Chips Didáticos Comerciais

1.1) Descrição dos Chips Didáticos

O CCS/Unicamp adquiriu 4 chips didáticos da Universidade de Edinburgh para o aluno obter familiaridade com a medida de dispositivos e de seus parâmetros, e com o funcionamento do sistema de medidas. Os chips são compostos pelas seguintes estruturas:

- Chip 1 - Resistores
- Chip 2 - Transistores MOS
- Chip 3 - Diodos
- Chip 4 - Oscilador em Anel

Estes chips são encapsulados com material transparente, o que permite visualizar e identificar estruturas através do microscópio e verificar o funcionamento de componentes mediante aplicação de luz.

A seguir uma descrição mais detalhada de cada um dos chips.

Chip 1 - Resistores

O seguinte diagrama da Figura 1 ilustra os dispositivos que constituem o chip 1 e sua respectiva pinagem:

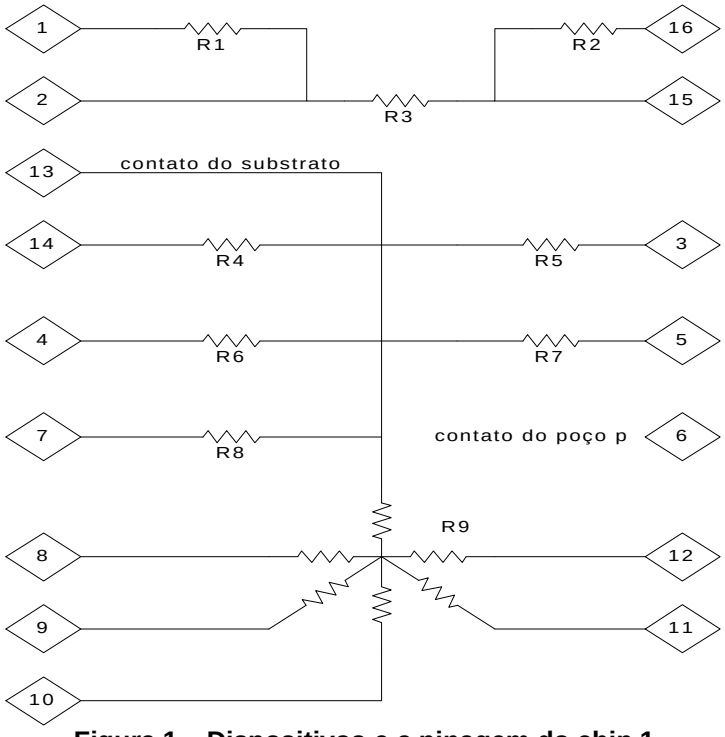

Figura 1 – Dispositivos e a pinagem do chip 1

Este chip é formado por um substrato do tipo n onde são feitos, através de implantação iônica, resistores do tipo p. Há vários resistores com diferentes dimensões cujos terminais são

acessados através de linhas metálicas. Há também uma linha metálica longa para a medida de resistência elétrica do metal. Além destes, existe um resistor quadrado do tipo n construído em um poço p. Este quadrado pode ser acessado em diferentes pontos.

O chip permite medidas de resistência de diferentes materiais e em várias temperaturas. O resistor R9 em especial permite uma avaliação qualitativa do efeito Hall.

Chip 2 - Transistores MOS

Este chip é composto por transistores do tipo p-MOS construídos em substrato tipo n, e transistores n-MOS construídos no poço p. As dimensões de porta variam de 50μm a 800μm. Vários parâmetros podem ser determinados através de medidas elétricas realizadas nos transistores, porém, a atenção neste estudo é voltada aos parâmetros pertinentes ao processo de fabricação do dispositivo, tais como a concentração e a mobilidade de portadores.

O seguinte esquema elétrico da Figura 2 representa o chip 2:

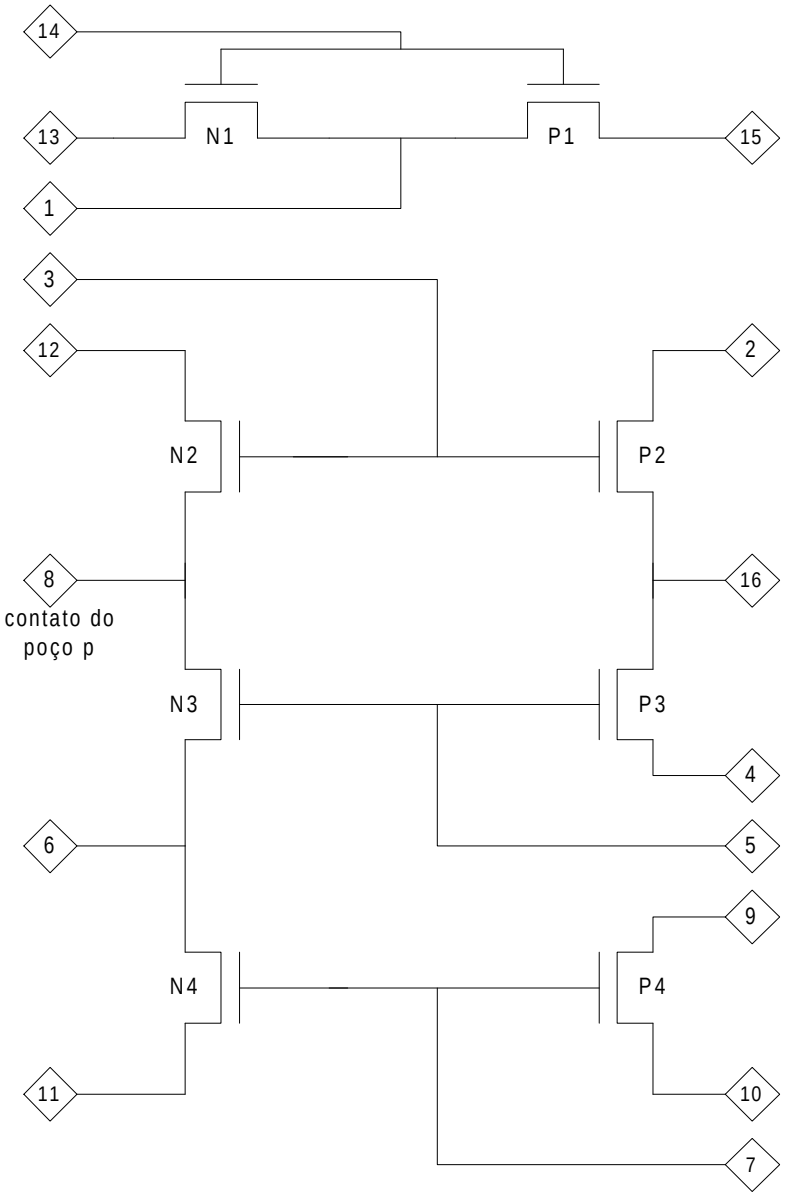

Figura 2 – Dispositivos e a pinagem do chip 2

Chip 3 - Diodos

O seguinte diagrama da Figura 3 ilustra os dispositivos que constituem o chip 3 e sua respectiva pinagem:

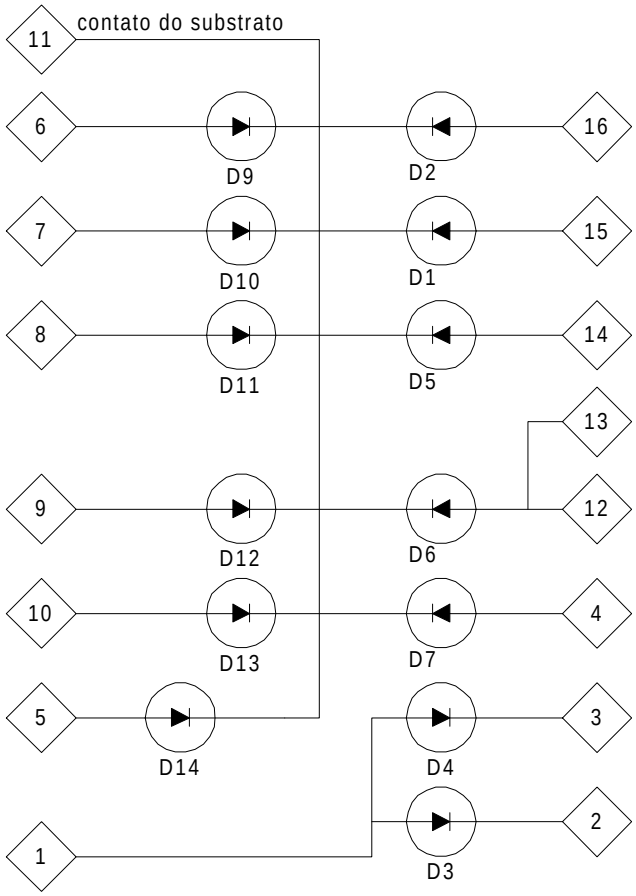

Figura 3 – Dispositivos e a pinagem do chip 3

Este chip é composto por diversos diodos pn confeccionados sobre o substrato do tipo n. Há vários diodos com diferentes dimensões e formatos. Pelo fato do encapsulamento ser transparente, este chip permite o estudo do comportamento do diodo como uma fotocélula, sendo possível a determinação da taxa de conversão de energia luminosa em energia elétrica. Também podem ser determinadas outras características, tais como tensão de ruptura reversa e corrente reversa.

Chip 4 – Oscilador em Anel

Este chip é composto por aproximadamente 1500 transistores, formando um oscilador em anel com 301 inversores (Figura 4), um decodificador de 3 Bits (S0, S1 e S3) de entrada para configurar a quantidade de inversores desejada e um divisor de freqüência com 4 divisores, div1, div2, div3 e div4, que dividem respectivamente as freqüências de saída por 2^5, 2^{10}, 2^{15} e 2^{20}. A figura 5 mostra os circuitos em blocos e a pinagem do chip 4. O princípio de operação é o seguinte:

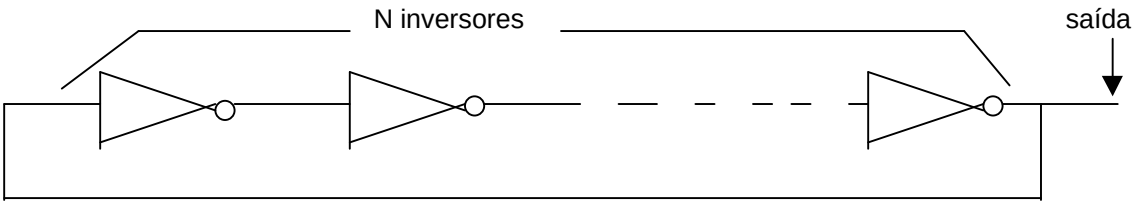

Figura 4 – Esquema do oscilador em anel

- O oscilador em anel, como esquematizado na Figura 4, é formado por 301 inversores. Cada inversor que sofre uma transição na entrada inverterá esse nível lógico na saída após um intervalo de tempo determinado t_D. Aplicando-se uma variação de nível lógico na entrada, o oscilador em anel composto por n inversores apresentará na saída uma transição do nível lógico original após um tempo igual a $n.t_D$, ou seja, a cada intervalo de tempo $n.t_D$ o circuito alterará seu estado;
- Quatro divisores, div1, div2, div3 e div4, reduzem a freqüência de saída por 32, 1024, 32768 e 1048576;
- A quantidade de inversores habilitados no oscilador em anel é selecionada pelas entradas de 3 Bits, S0, S1 e S2, conforme a tabela 1 abaixo.

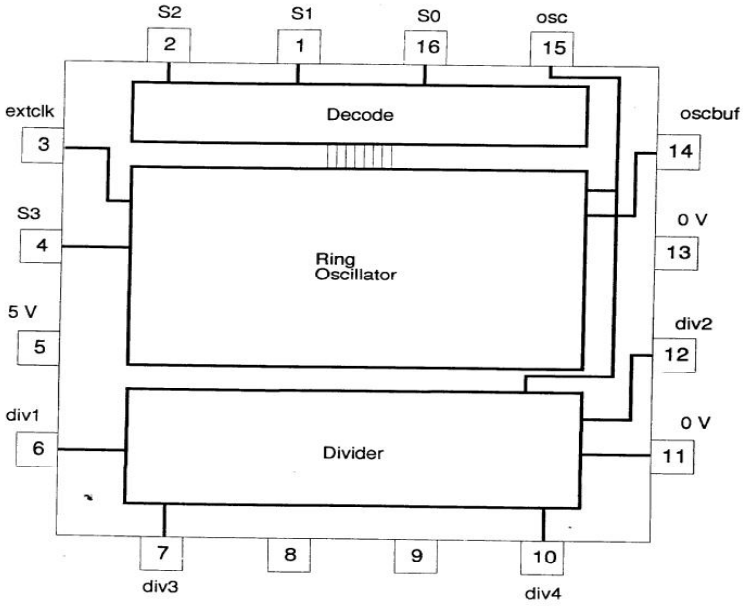

Figura 5- Circuitos em blocos e a pinagem do chip 4.

Tabela 1- Números de inversores do circuito oscilador em anel e suas respectivas freqüências habilitados pelas entradas de 3 Bits (S0, S1 e S2).

S0	S1	S2	Nº. inversores	Freqüência (kHz)
0	0	0	21	267
0	0	1	31	226
0	1	0	61	163
0	1	1	91	131
1	0	0	121	110
1	0	1	181	86
1	1	0	241	72
1	1	1	301	62

1.2) Medidas nos Chips Didáticos

1.2.1) Chip 1 – Resistores (Figura 1).

a) Meça com um ohmímetro, os resistores R_3 (entre pinos 2 e 15), R_4 (entre pinos 13 e 14) e R_8 (entre pinos 7 e 13) em três temperaturas diferentes: temperatura ambiente, aproximadamente –10 ^{0}C (nitrogênio líquido próximo ao chip ou mesmo um cubo de gelo envolvido por um plástico sobre o chip) e a 55 ^{0}C (estufa verde localizada no laboratório PEL do CCS). Determine o valor da resistência de folha: $R_s = \frac{resistividade}{espessura}$ = R.W/L, onde R = resistência, W= largura e L= comprimento do resistor, de cada um e explique as diferenças de valores obtidos. As dimensões dos resistores são L=1680μm e W=30μm para o R3, L=10150μm e W=10μm para o R4, e L=1680μm e W=30μm para o R8.

b) Utilizando o resistor R_3, meça sua resistência através de: uma curva V x I, conforme esquema da Figura 6a e por 4 terminais (Figura 6b), que é denominada medida de 4 pontas usando os pinos 2, 15, 1 e 16. Faça passar uma corrente entre os pinos 2 e 15 e meça a tensão entre os pinos 1 e 16. Verifique se houve diferença e explique os resultados.

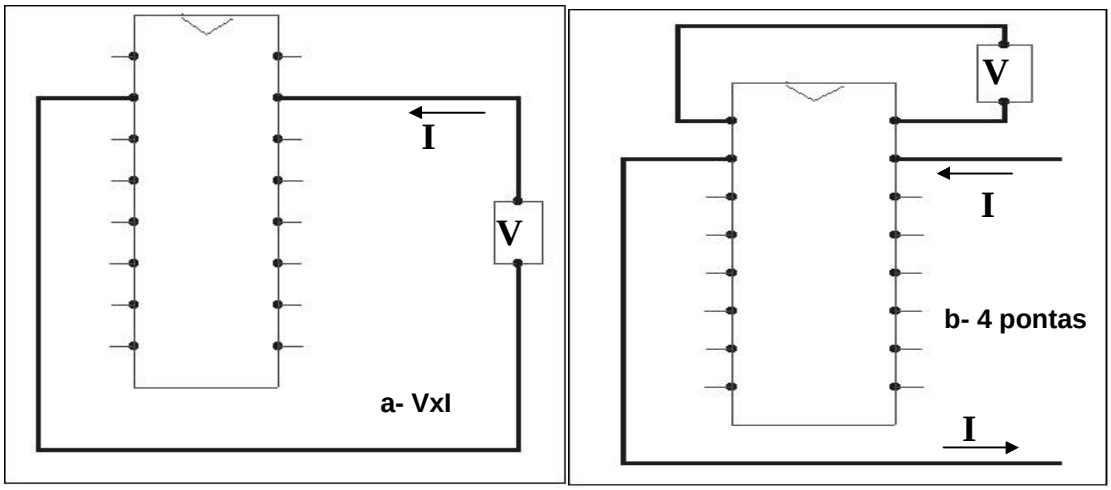

Figura 6- Esquemas das medidas: a- V × I e b- 4 pontas

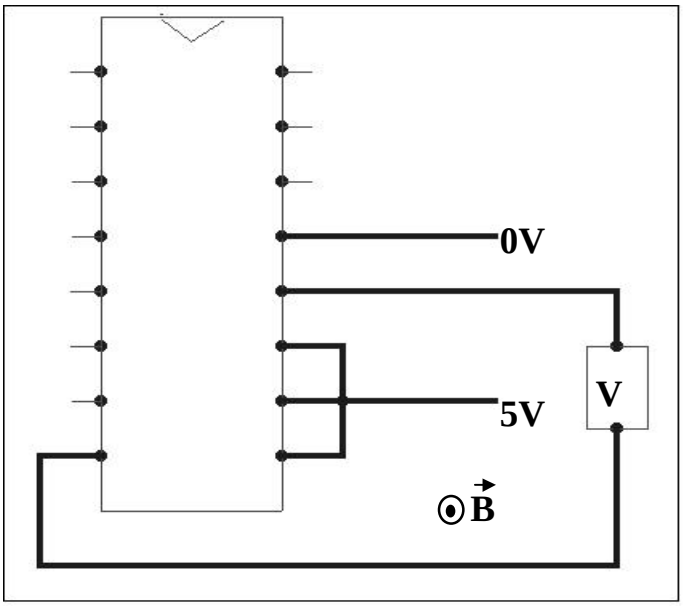

Figura 7- Esquema da medida do efeito Hall

c) Meça, com um ohmímetro, os valores das resistências de espalhamento do resistor R_9 entre os pinos: 8 – 13, 9 – 13, 10 – 13 e 8 – 10. Explique as diferenças entre as medidas.

d) Meça qualitativamente o efeito Hall sobre o resistor R_9, conforme esquema da Figura 7. Aterre o pino 13, coloque uma tensão de 5V nos pinos 9, 10 e 11 e com um imã, faça passar um campo magnético de baixo para cima do chip através de uma bobina próxima ao mesmo. Meça a tensão entre os pinos 8 e 12 explicando esta diferença de tensão. Repita o experimento invertendo o sentido do campo magnético.

1.2.2) Chip 2 – Transistores MOS (Figura 2)

Utilizando os transistores N_4 e P_4, realize as medições que seguem abaixo:

a) Obtenha suas curvas características utilizando a HP4145 da sala de medições do CCS. Observe que a mesma possui alguns programas de medições de transistores e diodos prontos.

b) Trace as curvas $I_D \times V_{GS}$ (HP4145) para $|V_{DS}|$ = 0,1V e $|V_{BS}|$ = 0V , 1,5V , 3,0V e 4,5V calculando os valores de V_T, μ e γ (fator de corpo).

c) Através das curvas de $\log(I_D) \times V_{GS}$ (HP4145) na região sub-limiar com $|V_{BS}|$ = 0V e $|V_{DS}|$ = 0V , 1,5V , 3,0V e 4,5V , calcule o fator de idealidade destes transistores. Obs: pode-se traçar uma reta entre dois pontos da curva na HP, o que facilita a obtenção dos coeficientes angular e linear da reta ou mesmo copiar os dados da HP e colocá-los no software Origin.

d) Obtenha as curvas $I_R \times V_G$ (HP4145) para $|V_D|$ = $|V_S|$ = 1,5V , 3,0V e 4,5V e explique o porquê de seu formato.

e) Com o traçador de curvas de capacitância da sala de medidas do CCS, obtenha as curvas $C_G \times V_G$ para $|V_D|$ = $|V_S|$ =0V , 1,5V , 3,0V e 4,5V. Explique as curvas e indique os pontos $V_T \times V_D$.

1.2.3) Chip 3 – Diodos (Figura 3)

a) Meça no escuro D_4, D_7, e D_8 traçando sua curva I x V em escala linear e logarítmica (utilizar a HP 4145B localizada na sala de medidas para traçar estas curvas) e suas capacitâncias a 0V (use o medidor de capacitância para traçar esta curva). Determine os fatores de idealidade e explique os resultados obtidos. Lembre-se que $I = I_0 \cdot e^{\frac{qV_D}{nkT}}$.
Encontre a tensão de rompimento (BV) dos diodos utilizando a HP ou, quando esta não suportar, o traçador de curvas ao lado da mesma. Obs: limite <u>sempre</u> a corrente sobre o diodo em 10mA.

b) 1) Trace a curva I x V linear (use o HP4145) do diodo D_1 no escuro e com uma luz muito forte. Explique as diferenças.
2) Conecte o diodo D_1 a um resistor de 1MΩ, ilumine com a mesma luz forte o diodo e meça a tensão sobre o resistor calculando a potência gerada pelo fotodiodo e sua potência por m^2. Qual área seria necessária para se obter 1W ?

Figura 8- Esquema para medida da potência gerada pelo fotodiodo.

c) Utilizando o HP4145 ou mesmo uma fonte de tensão, polarize reversamente (-4V) o diodo D_1 e meça I_R no escuro e com luz variável. Fixando agora a luz, verifique I_R para um tensão reversa de –4V e –7V. Explique os resultados.

d) Polarize reversamente com uma tensão –5V, os diodos D_1 e D_5 e meça I_R x λ. Utilize um monocromador para selecionar o comprimento de onda, tomando o cuidado de não usar comprimentos acima de 700nm.

1.2.4) Chip 4 – Oscilador em anel (Figura 5)

a) Através da montagem abaixo (Figura 9) do oscilador em anel usado como divisor de freqüência, meça a freqüência de oscilação nos pinos 6, 7, 10, 12, 14 e 15 para V_{DD} = 5V.

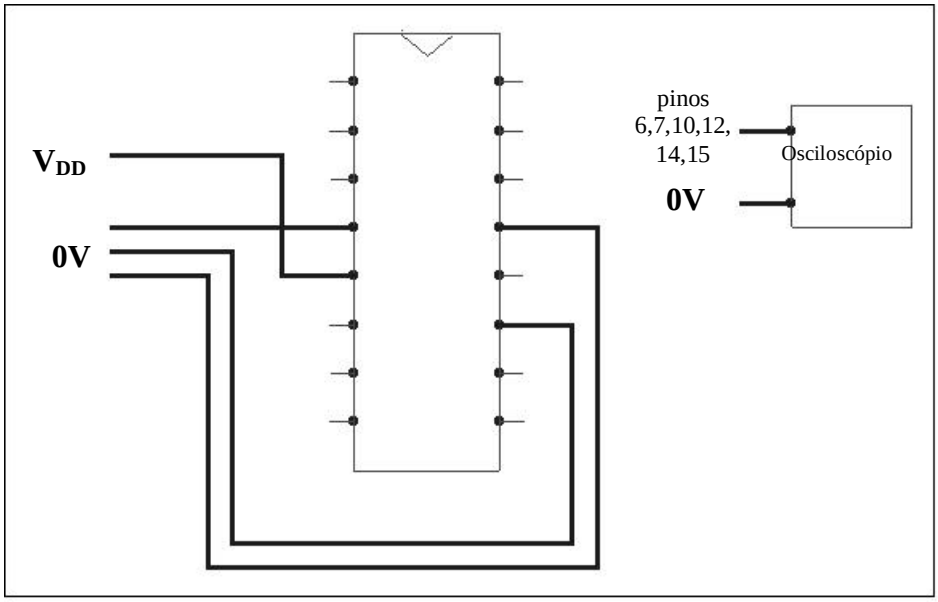

Figura 9- Esquema para medida do oscilador em anel usado como divisor de freqüência

b) No esquema do circuito da Figura 10, meça a freqüência de oscilação no pino 14 para V_{DD} variando de 3V a 12V. Calcule o tempo de atraso (t_d) por inversor e monte um gráfico de $t_d \times V_{DD}$. Comente os resultados obtidos.

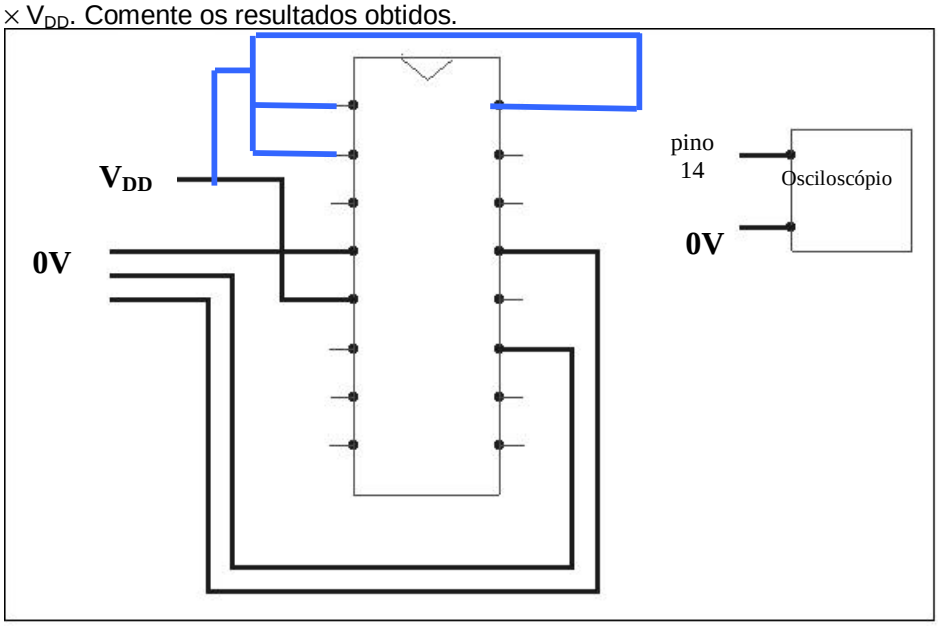

Figura 10- Esquema para medida do oscilador em anel usado para estudo da variação de tensão V_{DD} em relação à freqüência

2) Caracterização do Chip Didático CCS2 Fabricado

2.1) Diodo pn

a) Utilizando o traçador de curvas HP4145B, obtenha as curvas I_D x V_A e log(I_D) x V_A e comente os resultados obtidos. Veja que o canal SMU do traçador correspondente ao terminal comum é ligado ao catodo e o SMU correspondente à var1 ao anodo. A relação entre a corrente e a tensão de polarização é dada pela expressão:

$$I_D = I_S(e^{qVa/nkT} - 1) \qquad (1)$$

onde:
n - fator de idealidade; kT/q = 25,25 mV para T = 20° C
Utilizando-se a expressão (1), podemos aplicar a função logaritmo de forma a obtermos:

$$\log(I_D) = \log(I_S) + \log(e^{qVa/nkT} - 1)$$

para Va > 100 mV, $e^{qVa/nkT} >> 1$. Assim

$$\log(I_D) = \log(I_S) + (qVa)/(2{,}302nkT)$$

Tomando dois pontos da curva log(I_D) x Va na região entre 0,1 e 0,3 V, determina-se uma reta de inclinação (α). Desta forma, calcula-se o fator de idealidade através da expressão:

$$\alpha = q/(2{,}302nkT)$$

e portanto:

$$n = \frac{q}{\alpha \cdot 2{,}302 \cdot kT}$$

b) Utilizando as expressões anteriores e a curva obtida no HP4145B, encontre a inclinação da reta (α), calcule o fator de idealidade e comente.

α =

n =

c) Obtenha a tensão de breakdown (V_B) para o diodo utilizando o HP4145B e comente. Observe que o equipamento tem um limite de +/- 100 V e portanto se V_B for maior que 100V não será possível determinar seu valor; neste caso indique o ocorrido e comente.

V_B =

c) Meça o valor da corrente reversa para $|V_a|$ = 5 V. Compare com valores obtidos em outros dispositivos e com o das outras lâminas processadas. Comente sobre o valor obtido.

2.2) Capacitor MOS

a) Obtenha a curva Capacitância x Tensão para o capacitor MOS, calcule os parâmetros indicados a seguir e comente os resultados obtidos.

- espessura do óxido (t_{ox})

$$t_{ox} = \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_{ox} . A}{C_{ac}}$$

ε_0 = 8.854 x 10-14 Faraday/centímetro
ε_{0x} = 3,9 (para S_iO_2)
A ⇒ Área do capacitor em cm^2
C_{ac} ⇒ Capacitância na região de acumulação

t_{ox} =

- largura da camada de depleção (W_f)

$$W_f = \left[\frac{C_{ac}}{C_{inv}} - 1\right] \cdot \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_{Si} . A}{C_{ac}}$$

ε_{Si} = 11,9
C_{inv} ⇒ Capacitância na região de inversão

W_f =

- concentração de portadores ($N_{A,D}$)

$$N_{A,D}(n+1) = \frac{4.\varepsilon_0 . \varepsilon_{Si}}{q.W_f^2} . \left(\frac{kT}{q}\right) . \ln\left[\frac{N_{A,D}(n)}{n_i}\right]$$ Cálculo recursivo

$N_{A,D}(0) = 10^{15}$	⇒	$N_{A,D}(1)$ =
$N_{A,D}(1)$ =	⇒	$N_{A,D}(2)$ =
$N_{A,D}(2)$ =	⇒	$N_{A,D}(3)$ =
$N_{A,D}(3)$ =	⇒	$N_{A,D}(4)$ =

- capacitância de "flat-band"

$$C_{FB} = \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_{Si} . A}{t_{ox} + \frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{Si}} . \left[\frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_{Si}}{q.N_{A,D}} \left(\frac{kT}{q}\right)\right]^{1/2}}$$

k = 8.62 x 10^{-5} eletron-Volt/Kelvin
T ⇒ Temperatura
q = 1.602 x 10^{-19} Coulomb

C_{FB} =

- cargas efetivas de interface (Q_{ef}/q)

$\phi_{MS} = -0,6 - \phi_F$, onde $\phi_F = \left(\frac{kT}{q}\right) . \ln\left[\frac{N_{A,D}}{n_i}\right]$ e

$\phi_F > 0 \Rightarrow$ tipo p
$\phi_F < 0 \Rightarrow$ tipo n

n_i= 1,45 x 10^{10} e V_{FB} é a tensão onde a capacitância é igual à C_{FB}, obtida através da curva C x V.

V_{FB} =
Φ_F =
Φ_{MS} =

$$\frac{Q_{ef}}{q} = \left[V_{FB} - \phi_{MS}\right] . \frac{C_{ac}}{q.A}$$

Q_{ef}/q =

2.3) Transistores MOSFET

a) Utilizando o HP4145B, obtenha as curvas características (I_D x V_{DS}) de 2 transistores da lâmina, um de canal curto e um de canal longo. Explique o porquê de seu formato, indicando as regiões ôhmica e de saturação e compare as curvas dos 2 transistores.

b) Obtenha a curva I_D x V_{GS} para $|V_{DS}|$ = 0,1 e $|V_{BS}|$ = 0, 2 e 4V. Determine valor de V_{T0}, mobilidade (μ) e fator de corpo (γ) e comente os resultados obtidos.

V_{T0} =

$$\mu = \frac{L_{eff} \cdot A \cdot gm}{W \cdot C_{ac} \cdot V_{DS}}$$, onde $L_{eff} = L - 1{,}4\ X_J$

L ⇒ comprimento do canal
X_J ⇒ profundidade da junção
W ⇒ largura do canal
C_{ac}, A ⇒ parâmetros obtidos na medida C x V
gm ⇒ transcondutância máxima

μ =

$$\gamma = \frac{A}{C_{ac}} \sqrt{2q\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 N_{A,D}}$$

C_{ac}, A, $N_{A,D}$ ⇒ parâmetros obtidos na medida C x V
ε_{Si} = 11,9
ε_0 = 8.854 x 10-14 Faraday/centímetro
q = 1.602 x 10^{-19} Coulomb

γ =

c) Obtenha a curva $\sqrt{I_D}$ x V_{GS}, com V_{DS} = V_{GS} e V_{BS} = 0V. Encontre o valor de V_{T0} e compare com o valor encontrado anteriormente. Qual método é mais preciso na determinação de V_{T0}?

d) Obtenha as curvas I_D x V_{GS} em região sub-limiar, com $|V_{DS}|$ = 1, 2 e 3,9 V, e V_{BS} = 0V. Determine o fator de idealidade e explique o formato das curvas obtidas.

n =

2.4) Cruz – Grega (Figura 11)

a) Meça V_{13}/I_{24} da cruz - grega cujos terminais são identificados na Figura 11 e determine a resistência por quadrado. Compare com os valores do caco teste medido durante o processamento.

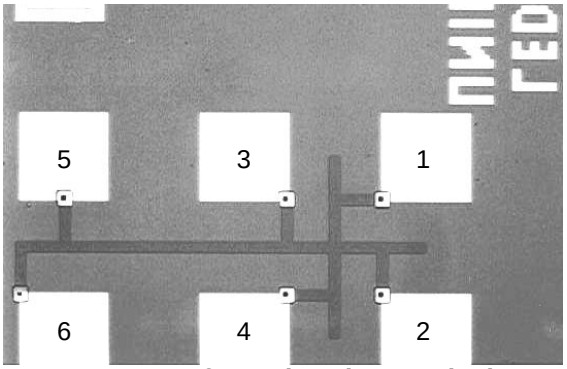

Figura 11- Cruz grega formada pelos terminais 1, 2, 3 e 4.

Rs = 4,53 $\frac{V_{13}}{I_{24}}$

Rs =

b) Meça V_{35}/I_{46}. Do valor desta resistência, determine a largura da linha e compare com o valor nominal de máscara (se disponível).

$$Rs = \frac{V_{35}}{I_{46}} \cdot \frac{W}{L}$$

$^{W}/_{L}$ =

2.5) Flip-Flop

a) A partir da foto do flip-flop da Figura 12, determine o tipo e o circuito elétrico do mesmo. Veja que o flip-flop é formado por 12 transistores MOS e a pinagem já está indicada na figura.

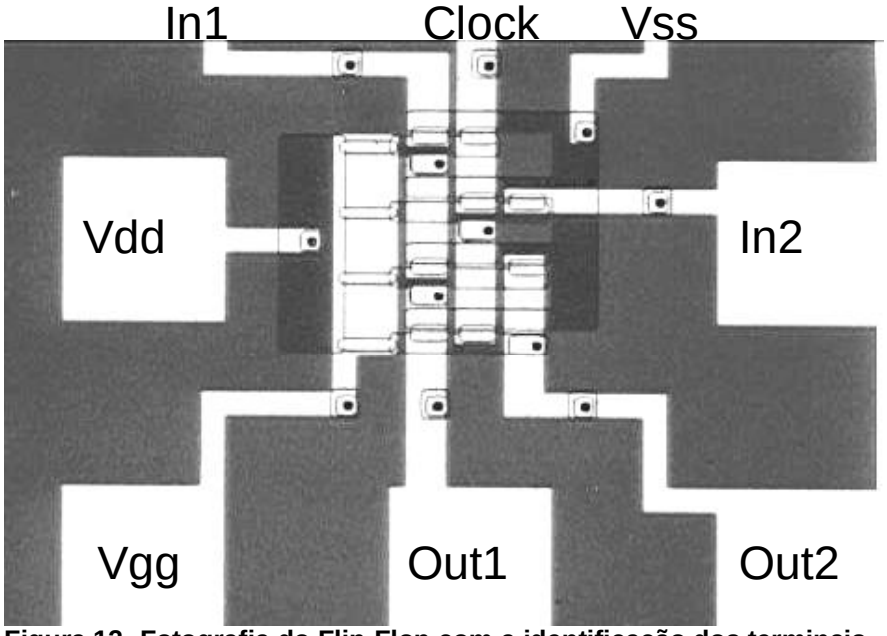

Figura 12- Fotografia do Flip-Flop com a identificação dos terminais.

Tipo do Flip-Flop

Circuito elétrico do Flip-Flop

b) Ligue as fontes no flip-flop com as seguintes tensões: Vgg = -12V, Vdd = -5V e Vss = 0V. A partir das medidas elétricas, complete a tabela-verdade a seguir com os níveis de tensão nas saídas Out 1 e Out 2 e comente os resultados obtidos.

FLIP FLOP TESTE - TABELA VERDADE

Clock	In 1	In 2	Out 1	Out 2
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

Obs: O estado "0" corresponde a uma tensão de 0V e o estado "1" corresponde a -5V