

**VINICIUS GOMES BARBOSA**

# **CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICAS DE DISPOSITIVOS MOS EDUCACIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Materiais,  
Processos e Componentes Eletrônicos (MPCE) da  
Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC)

Orientador: Me. Ricardo Cardoso Rangel

**São Paulo  
2015**

## Ficha Catalográfica:

Barbosa, Vinicius Gomes

Caracterização Elétrica de Dispositivos MOS e estruturas de Medidas Elétricas Educacionais. São Paulo, 2015. 65

**Erro! Indicador não definido.**

p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Departamento de Sistemas Eletrônicos, **Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos.**

**1.Caracterização Elétrica; 2. Estruturas de Medidas Elétricas; 3. Dispositivos MOS; 4. Fabricação (Microeletrônica).**

## **Agradecimentos:**

Agradeço primeiramente a DEUS, pela proteção e saúde, sempre atuando como fonte de inspiração e motivação.

A todos que acreditaram no meu potencial. Aos meus pais, Getúlio e Elisabete, pela paciência, compreensão nos momentos de nervoso e ausência, sempre me confortando e não medindo esforços para me ajudar no que fosse preciso.

A minha esposa Nicole pela paciência e dedicação. Por ficar ao meu lado em todos os momentos, sempre com palavras de conforto e incentivo. E principalmente por me incentivar em todos os aspectos profissionais, abdicando de muito para participar de tudo.

As minhas irmãs, Camila, Lídia e Maísa, pela compreensão, paciência e apoio, sempre se mostrando dispostos a me ajudar no que fosse preciso.

Ao meu orientador Me. Ricardo Cardoso Rangel, que foi fundamental na realização deste trabalho, demonstrando com toda sua experiência em todos os passos do trabalho.

Aos meus colegas da Faculdade de Tecnologia de São Paulo pelo apoio, pelas dúvidas esclarecidas, pelas trocas de conhecimentos e por todos os momentos que passamos juntos durante esses anos de estudos.

***“Uma grande descoberta envolve a solução de um grande problema, mas há uma semente de descoberta na solução de qualquer problema. Seu problema pode ser modesto, porém, se ele desafiar sua curiosidade e fizer funcionar sua capacidade inventiva, e caso você o resolva sozinho, então você poderá experimentar a tensão e o prazer do triunfo da descoberta”***

**George Polya**

**Fonte: Livro de Cálculo, Volume 1, James Stewart.**

## Lista de Ilustrações:

Figura 1- Modelo de um transistor NMOS (Zurita, 2010)	12
Figura 2- Transistor NMOS: em acumulação (Zurita, 2010)	13
Figura 3- Transistor NMOS: em inversão, formação do canal (Zurita, 2010)	13
Figura 4- Transistor NMOS: Região de Triodo	14
Figura 5- Transistor NMOS: Curvas Características: a) $I_{DS} \times V_{GS}$ b) $I_{DS} \times V_{DS}$	15
Figura 6- Modelo de Curva $I_{DS} \times V_{GS}$	16
Figura 7- Método da 2ª Derivada da Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ , para determinação da Tensão de Limiar	16
Figura 8- Método da 1ª Derivada da Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ , para determinação da Transcondutância Máxima	17
Figura 9- Medidas Elétricas: Estrutura Ponte (Sonnenberg, 2015)	19
Figura 10- Medidas Elétricas: Estrutura Van der Pauw (Sonnenberg, 2015)	20
Figura 11- Medidas Elétricas: Função Van der Pauw (Sonnenberg, 2015)	21
Figura 12- Medidas Elétricas: Estrutura Cruz-Ponte (Sonnenberg, 2015)	22
Figura 13- Medidas Elétricas: Estrutura Kelvin	23
Figura 14- Representação esquemática dos DIE's que foram utilizados para as medidas	31
Figura 15- Estrutura Cruz-Ponte: Modelo de estrutura de medida elétrica (dos Santos, 2011)	32
Figura 16- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência de folha 1	34
Figura 17- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência de folha 2	34
Figura 18- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência ponte de 200 $\mu m$	35
Figura 19- Lâmina utilizada no processo, após a etapa de corrosão úmida, verificamos que houve uma corrosão por baixo do fotoressiste, onde o fotoressiste levantou-se	38
Figura 20- Perfil de Corrosão: a) amostra antes da corrosão; b) após uma corrosão isotrópica; c) após uma corrosão totalmente anisotrópica	39
Figura 21- Corrosão: Perfil isotrópico resultante da corrosão seca de silício com gases fluorados	39
Figura 22- Lâmina utilizada durante o processo	41
Figura 23- Estrutura Kelvin: Modelo de estrutura de medida elétrica (dos Santos, 2011)	42
Figura 24- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência ponte de contato	44
Figura 25- Transistores Isolados: Modelo de dispositivo (dos Santos, 2011)	46
Figura 26- Transistores- Cascatas: Modelo de dispositivo (dos Santos, 2011)	46
Figura 27- Transistores Isolados: T1 Curva ( $I_{DS} \times V_{DS}$ )	48
Figura 28- Transistores Isolados: T1- Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento e largura de canal de 10 $\mu m$	49
Figura 29- Transistores Isolados: T3- Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento e largura de canal de 100 $\mu m$	49
Figura 30- Transistores- Cascata: 1.TNL1 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 50 $\mu m$	50

Figura 31- Transistores- Cascatas: 1.TNL2 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 40 $\mu m$	50
Figura 32- Transistores- Cascata: 1.TNL 3 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 30 $\mu m$	51
Figura 33- Transistores- Cascata: 1.TNL4 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), com comprimento de 20 $\mu m$	51
Figura 34- Transistores- Cascata: 1.TNL 5 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 10 $\mu m$	52
Figura 35- Transistores- Cascatas: 1.TNL6 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 5 $\mu m$	52
Figura 36- Modelo de obtenção da tensão de limiar, através da 2ª derivada da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )	54
Figura 37- Modelo de obtenção da tensão de limiar, através da 1ª derivada da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )	55
Figura 38- Modelo para extração da Inclinação de Sublimiar, a partir da curva monologarítmico da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )	55
Figura 39- Problema da tensão superficial na corrosão úmida para dimensões de abertura reduzidas	57
Figura 40- Lâmina sem a definição de linhas abaixo de 2 $\mu m$	57
Figura 41- Lâmina com defeitos nas estruturas a) VDP3- não formou a linha da resistência ponte de 5 $\mu m$ , b) TNL1- região de porta não formada para os transistor 5 $\mu m$	58
Figura 42- Lâmina com defeitos na estrutura TNW4: a) "curto-circuito" entre as linha de fonte e dreno; b) não há contato para os transistores de 2 $\mu m$ e 1 $\mu m$	58
Figura 43- Cascata de Transistores: Relação da transcondutância em relação ao comprimento de canal	59
Figura 44- Curva $1/g_m$ -máx em função do comprimento de canal de máscara	60
Figura 45- Mobilidade efetiva para cada um dos transistores da cascatas	62

## Lista de Tabelas:

<i>Tabela 1- Espessura do óxido de campo</i>	25
<i>Tabela 2- Espessura do óxido de porta</i>	27
<i>Tabela 3- Resistência de folha do silício policristalino extraída com auxílio do equipamento quatro pontas</i>	27
<i>Tabela 4- Estrutura Cruz-Ponte: Parâmetros Agilent Desktop</i>	33
<i>Tabela 5- Estrutura Cruz-Ponte: Dados extraídos para todos os DIE's</i>	36
<i>Tabela 6- Estrutura Cruz-Ponte: Médias com seus respectivos desvios padrões</i>	37
<i>Tabela 7- Estrutura Kelvin: Parâmetros Agilent Desktop</i>	42
<i>Tabela 8- Estrutura Kelvin: Dados obtidos de todos os DIE's, com as resistividade de contato com as áreas de máscara e áreas efetivas</i>	44
<i>Tabela 9- Estrutura Kelvin: Médias com seus respectivos desvios padrões</i>	45
<i>Tabela 10- Transistores: Parâmetros Agilent Desktop</i>	47
<i>Tabela 11- Transistores Isolados: Principais parâmetros extraídos a partir da Curva (<math>I_{DS} \times V_{GS}</math>)</i>	56
<i>Tabela 12- Transistores- Cascatas: Principais parâmetros extraídos a partir da Curva (<math>I_{DS} \times V_{GS}</math>)</i>	56
<i>Tabela 13- Transistores Isolados: Resumo dos principais parâmetros extraídos</i>	58
<i>Tabela 14- Transistores Cascatas: Resumo dos principais parâmetros extraídos</i>	58
<i>Tabela 15- <math>\Delta L</math> obitdo para cara um dos DIE's, através da cascata TNL1</i>	61
<i>Tabela 16- Cascatas de Transistores: comprimento efetivo de canal para cada um dos transistores em cada DIE's</i>	61

## SUMÁRIO:

<b>1. RESUMO:</b>	<b>10</b>
<b>2. INTRODUÇÃO:</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Transistores MOS:</b>	<b>12</b>
2.1.1. Extração de parâmetros:	15
2.1.1.1. Tensão de limiar ( $V_T$ ):	15
2.1.1.2. Transcondutância Máxima ( $g_{m-máx}$ ):	17
2.1.1.3. Inclinação de Subliminar (S):	17
2.1.1.4. Comprimento efetivo de canal:	18
<b>2.2. Estruturas para medidas elétricas:</b>	<b>18</b>
2.2.1. Medidas de resistência (Ponte):	18
2.2.2. Medidas de resistência de folha (Cruz):	19
2.2.3. Medidas de largura de linha (Cruz-Ponte):	21
2.2.4. Medidas de resistência de contato (Kelvin):	22
<b>3. PARTE EXPERIMENTAL- PROCESSO DE FABRICAÇÃO:</b>	<b>24</b>
<b>4. ANÁLISE DE DADOS- CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA:</b>	<b>31</b>
<b>4.1. Estruturas de Medidas Elétricas:</b>	<b>31</b>
4.1.1. Estrutura Cruz-Ponte:	31
4.1.1.1. Parâmetros de Processo:	32
4.1.1.2. Parâmetros de Máscara:	32
4.1.1.3. Parâmetros estabelecidos em laboratório:	32
4.1.1.4. Cálculos:	33
4.1.1.5. Resumo e Conclusões:	37
4.1.2. Estrutura Kelvin:	41
4.1.2.1. Parâmetros de Processo:	41
4.1.2.2. Parâmetros de Máscara:	42
4.1.2.3. Parâmetros estabelecidos em laboratório:	42
4.1.2.4. Cálculos:	43
4.1.2.5. Resumo e Conclusões:	45



<b>4.2. Dispositivos MOS:</b>	<b>45</b>
4.2.1. Transistores:	45
4.2.1.1. Parâmetros de Processo:	45
4.2.1.2. Parâmetros de Máscara:	46
4.2.1.3. Parâmetros estabelecidos em laboratório:	47
4.2.1.4. Extração de parâmetros:	47
4.2.1.5. Resumo e Conclusões:	58
<b>5. CONCLUSÃO:</b>	<b>64</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:</b>	<b>65</b>

## **1. Resumo:**

Este trabalho, tem como objetivo, a caracterização elétrica de transistores MOS com o auxílio de estruturas de medidas elétricas (Cruz-Ponte e Kelvin) desenvolvidas pelos alunos da disciplina de Processos de Fabricação de Componentes Semicondutores II (PFCS II) do Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos (MPCE) da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC), no segundo semestre de 2015.

Mostra-se necessário para o desenvolvimento desta pesquisa, a caracterização elétrica que foi realizada nas dependências do Laboratório de Sistema Integráveis (LSI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP).

Em um primeiro momento, abordaremos um resumo sobre as análises de extração de parâmetros utilizadas durante este trabalho, como resistência de folha, largura efetiva de linha e resistência de contato. Depois, de forma breve, explicaremos o processo de fabricação com desenhos esquemáticos das etapas fundamentais para construção dos dispositivos e estruturas tratados neste trabalho.

Por fim, com a análise dos dados extraídos poderemos apresentar melhorias e cuidados a serem tomados durante os processos de fabricação realizados para a construção dos dispositivos e estruturas.

## **2. Introdução:**

Os circuitos integrados vem evoluindo desde os anos 60, quando foi implementado em escala industrial. Com a evolução de novas tecnologias estão ficando cada vez mais complexos e ao mesmo tempo com dimensões menores, grande confiabilidade e velocidade de operação. Por isso, já se procura substitutos para o transistor MOS, pois a redução de suas dimensões já atingiu o seu limite físico. Dispositivos de efeito quântico e dispositivos eletrônicos moleculares são alternativas emergentes.

Para que seja possível a fabricação de novos circuitos em escala industrial, as estruturas de testes e caracterização também precisam evoluir. É preciso simular as condições reais do ambiente em que esses novos circuitos serão usados. A quantidade de informações geradas é grande. São necessários procedimentos para organizá-las, transmiti-las e armazená-las para uma análise mais detalhada. Os métodos para avaliar os resultados também precisam ser eficientes para garantir a confiabilidade. Tudo isso precisa ser feito com os equipamentos, computadores e ferramentas de programação existentes atualmente no mercado.

Antes de tratarmos as estruturas de medidas elétricas, faremos uma breve introdução sobre os transistores NMOS e os principais parâmetros que serão tratados neste trabalho.

## 2.1. Transistores MOS:

O transistor MOS é um dispositivo formado por quatro terminais, como verificamos na Figura 1, um dispositivo tipo-N (NMOS).

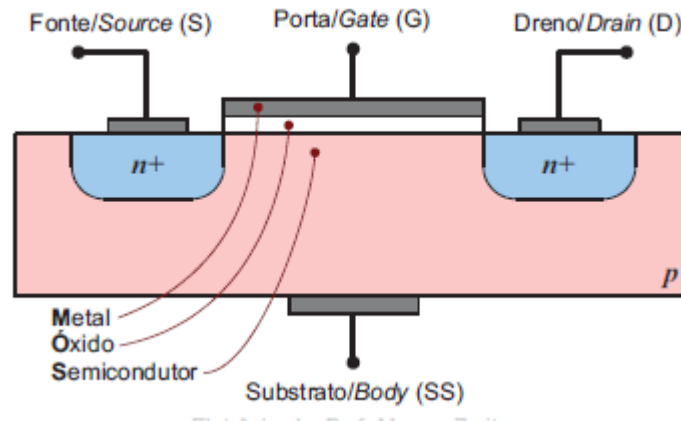


Figura 1- Modelo de um transistor NMOS (Zurita, 2010)

Este dispositivo é composto de duas difusões com alta densidade de dopantes tipo (n+) sobre um substrato de silício tipo (p), constituindo os terminais de fonte, dreno e substrato, e de um eletrodo isolado do substrato por uma fina camada de óxido, constituindo o terminal de porta. Este eletrodo de porta pode ser metálico ou, como normalmente utilizado em tecnologias atuais, de silício policristalino altamente dopado. O silício, quando altamente dopado, tem grande quantidade de portadores livres, comportando-se então como um ótimo condutor (metal). A região superficial do silício tipo-p, próxima ao óxido, é chamada de canal.

O dispositivo é constituído de dois diodos e um capacitor. A junção p-n entre fonte e substrato compõe o primeiro diodo, e a região entre dreno e substrato o segundo. As regiões de porta e substrato formam o capacitor MOS descrito anteriormente. O transistor nMOS é operado com substrato e fonte aterrados (0 V), e uma tensão positiva é aplicada ao eletrodo de dreno.

Vamos assumir inicialmente que o eletrodo de porta não induz cargas no canal. Assim, a quantidade de lacunas no canal corresponde à quantidade de dopantes p introduzidos neste. Com uma pequena tensão positiva aplicada ao

dreno, e com fonte e substrato aterrados, a única junção p-n sob tensão está polarizada reversamente, e a corrente que flui é insignificante.

Quando vamos aumentando a tensão aplicada na porta ( $V_{GS} < V_{FB}$ ), é induzida cargas negativas na superfície do silício, capacitor MOS em acumulação. Ocorre que é formada uma região de depleção no silício tipo p, a medida que a tensão na porta for aumentada, maior será a região de depleção e maior será o campo elétrico nesta região, dissemos que a região está em depleção ( $V_{FB} < V_{GS} < V_T$ ).

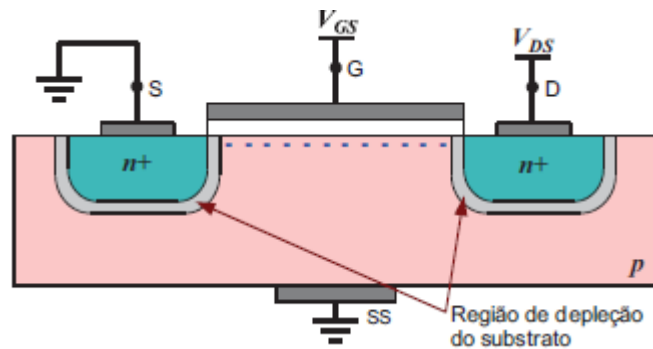


Figura 2- Transistor NMOS: em acumulação (Zurita, 2010)

No instante em que a tensão na porta é igual a tensão de limiar ( $V_{GS} = V_T$ ), há a formação de uma camada quase superficial de elétrons livres (formação do canal), mas não ocorre a passagem de corrente entre fonte e dreno, dissemos que o canal está em inversão.

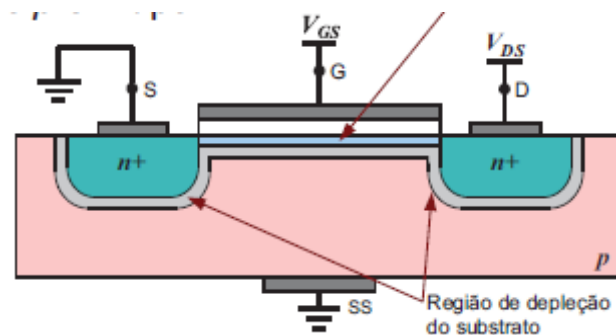


Figura 3-Transistor NMOS: em inversão, formação do canal (Zurita, 2010)

Utilizando uma tensão de porta maior que  $V_T$  e aplicando uma diferença de potencial entre dreno e fonte, então será induzido uma passagem de corrente, região de tródo ( $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$ )



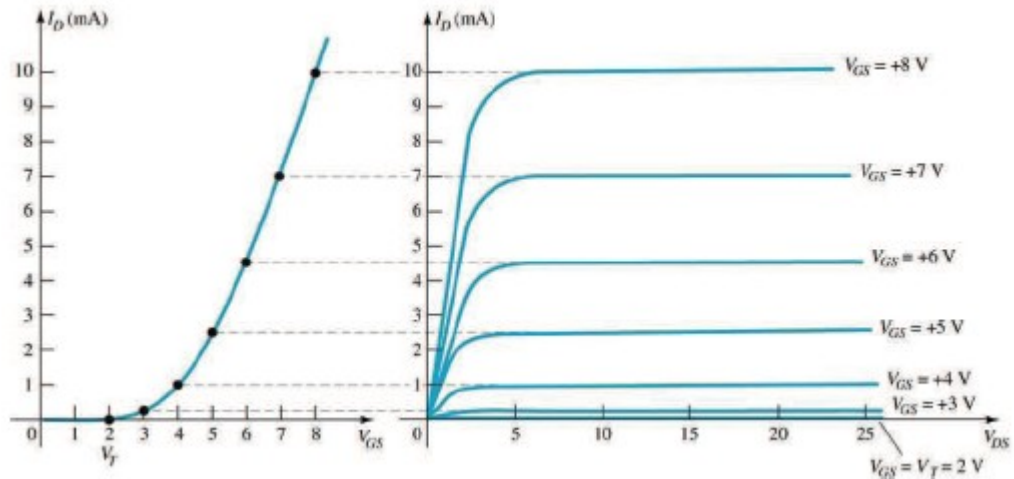


Figura 5- Transistor NMOS: Curvas Características: a)  $I_{DS} \times V_{GS}$  b)  $I_{DS} \times V_{DS}$

Os principais parâmetros do transistor MOS são: a distância  $L_{ef}$  entre as difusões de fonte e dreno; o comprimento  $L_M$  do eletrodo de porta; a largura  $W$  do eletrodo de porta, e a espessura  $t_{ox}$  do óxido de porta. A distância  $L_{ef}$  é denominada de comprimento de canal eletricamente efetivo, enquanto  $L_M$  é a dimensão mais próxima da largura de um retângulo.

### 2.1.1. Extração de parâmetros:

Os métodos utilizados para a extração dos principais parâmetros dos transistores que serão apresentados a seguir, foram obtidos a partir das curvas características e são baseados no livro “*Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS*”.

**Fonte:** (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)

#### 2.1.1. Tensão de limiar ( $V_T$ ):

A tensão de limiar é obtida através curva ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ). Este parâmetro é extraído da intersecção da reta tangente a curva na região de maior transcondutância com o eixo das coordenadas ou fixando-se um nível de corrente correspondente à  $V_T$ , como por exemplo:

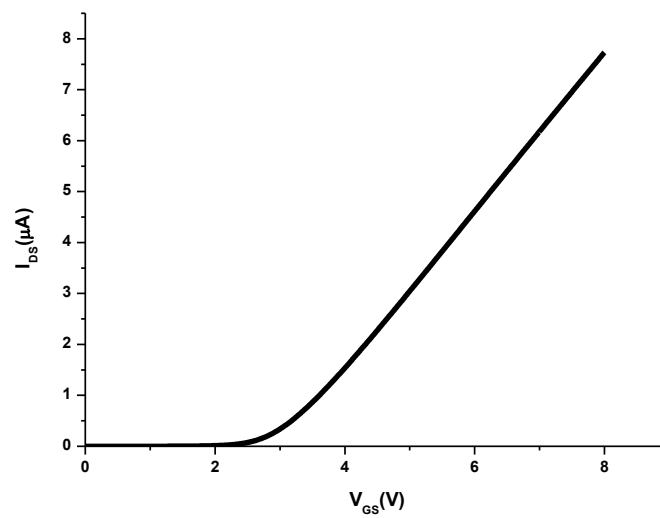


Figura 6- Modelo de Curva  $I_{DS} \times V_{GS}$

O método utilizado para obter a tensão de limiar é o de observação do pico máximo da segunda derivada da curva ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ) com baixos valores de  $V_{DS}$ :

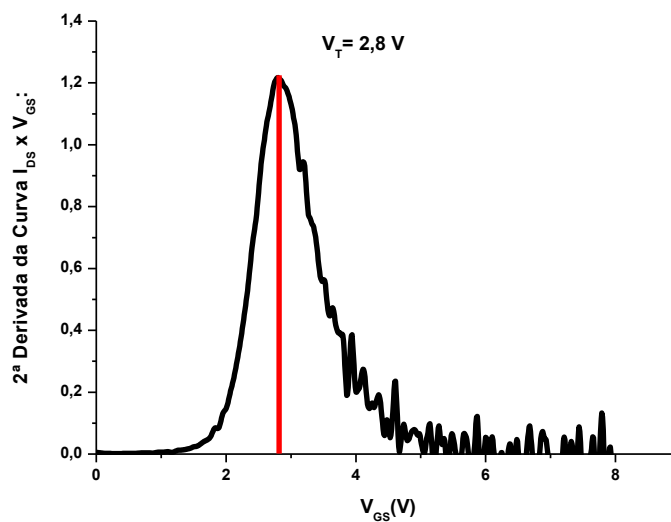


Figura 7- Método da 2ª Derivada da Curva  $I_{DS} \times V_{GS}$ , para determinação da Tensão de Limiar



### 2.1.2. Transcondutância Máxima ( $g_{m-m\acute{a}x}$ ):

A transcondutância foi obtida da observação do pico máximo da primeira derivada da curva ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ), e partir deste parâmetro podemos verificar o efeito de degradação da mobilidade das cargas nos transistores:

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}}$$

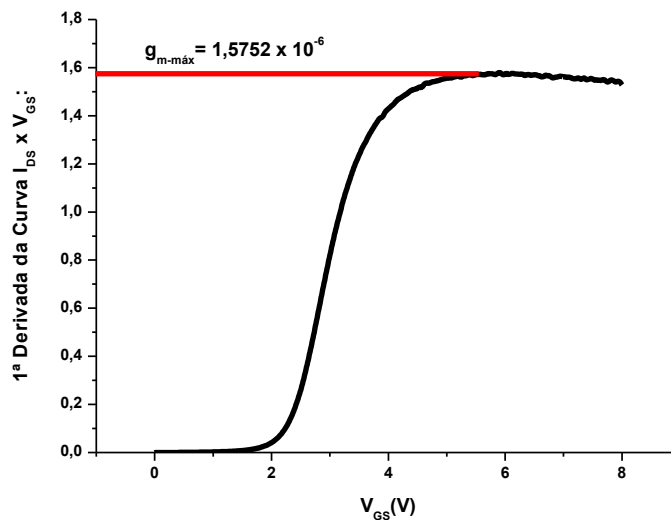


Figura 8- Método da 1ª Derivada da Curva  $I_{DS} \times V_{GS}$ , para determinação da Transcondutância Máxima

### 2.1.3. Inclinação de Subliminar (S):

É a taxa de variação da tensão por uma década de corrente na região de sublimiar ( $V_{GS} < V_T$ ). Através da curva  $I_{DS} \times V_{GS}$ , com baixo valor de  $V_{DS}$  e  $V_{GS} < V_T$ , é possível obter a taxa de variação da corrente  $I_{DS}$  com relação à tensão de porta  $V_{GS}$ , na região de sublimiar. Como nessa condição a corrente  $I_{DS}$  depende exponencialmente de  $V_{GS}$ , pois a corrente de difusão é predominante em relação à componente de deriva, pode-se fazer um gráfico monologarítmico de  $I_{DS} \times V_{GS}$  e se obter S por meio do inverso do coeficiente angular da curva resultante.

#### 2.1.4. Comprimento efetivo de canal:

O comprimento efetivo de canal ( $L_{ef}$ ) é dado pelo comprimento de máscara da porta ( $L_M$ ) menos uma componente ( $\Delta L$ ), que ocorre por causa da difusão lateral de dopantes das regiões de dreno e fonte para o interior do canal, e também por imperfeições na litografia e corrosão.

$$L_{ef} = L_M - \Delta L$$

O método utilizado na determinação do ( $\Delta L$ ), é o seguinte:

- 1) Obtêm-se as curvas ( $I_D \times V_D$ ), de preferência uma cascata (como o utilizado da cascata de transistores;
- 2) Determina-se a máxima transcondutância ( $g_{m-máx}$ )
- 3) Traça-se um gráfico de  $1/g_{m-máx}$  *versus* o comprimento de máscara  $L_M$ , no ponto de intersecção com o eixo  $L_M$ , isto é,  $1/g_{m-máx}=0$ . Tem-se o valor de  $\Delta L$ :

#### 2.2. Estruturas para medidas elétricas:

As estruturas para medidas elétricas foram utilizadas para a determinação dos erros durante o processo e a caracterização dos dispositivos descritos anteriormente. Basicamente aplica-se uma corrente entre terminais e mede-se a tensão em outros dois. As etapas de medidas foram tomadas como base do livro “*Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS*”.

##### 2.2.1. Medidas de resistência (Ponte):

As estruturas de medidas de resistência Ponte, surgiram com a necessidade de se realizar medidas mais precisas. Pois as medidas obtidas com as resistências tradicionais geram imprecisões devido a simplicidade das estruturas, ocasionando erros devido às resistências parasitárias.

As resistências parasitárias são: resistência de contato, a resistência do terminal, resistências das pontas dos microprovidores e fios.

*“Esta estrutura também não serve para se medir resistências de camadas de metal, pois são muito baixas, geralmente com valores inferiores aos das resistências parasitárias” (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)*

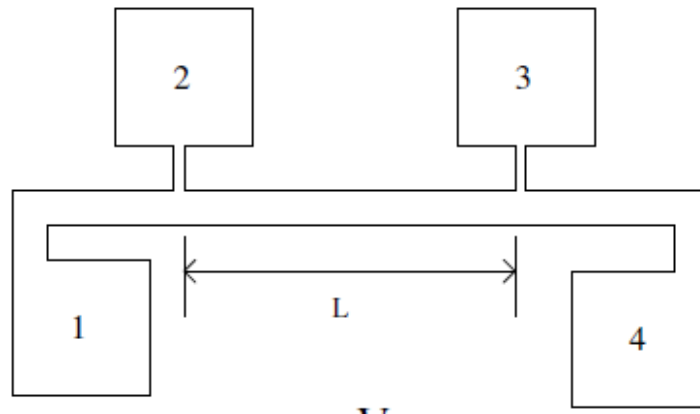


Figura 9- Medidas Elétricas: Estrutura Ponte (Sonnenberg, 2015)

Para minimizar as resistências parasitárias a estrutura ponte possui braços em que as medidas tensão são realizadas sem a passagem de corrente, assim a medida será quase que inteiramente depende da precisão dos equipamentos utilizados nas medições. Princípio utilizado para todas as outras estruturas.

As etapas de medida de resistência são realizadas como se segue:

**Fonte:** (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)

- 1) Aplica-se uma corrente entre os terminais 1 e 4:
- 2) Em seguida mede-se a queda de potencial entre os terminais 2 e 3.

Portanto a resistência é expressa por:

$$R = \frac{V_{32}}{I_{14}}$$

### 2.2.2. Medidas de resistência de folha (Cruz):

A resistência folha é uma característica muito importante de um processo depende da resistividade ( $\rho$ ) do material e da espessura ou profundidade da camada ( $x$ ).

$$R_{SH} = \frac{\rho}{x}$$

Então para uma linha com dimensões L e W, resulta:

$$R = R_{SH} \times \frac{L}{W}$$

Para a realização das medidas devem ser tomados todos os cuidados para a amenizar os efeitos das resistências parasitárias como nas estruturas ponte. Portanto utiliza-se a estrutura Van der Pauw (Cruz Grega). Assim seguem:

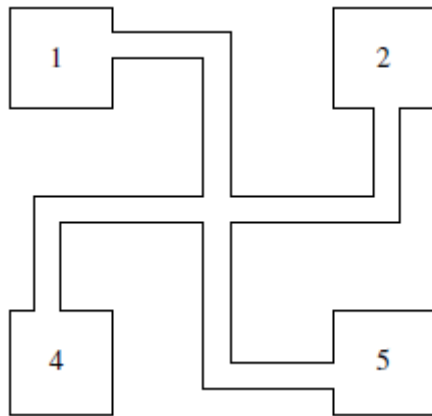


Figura 10- Medidas Elétricas: Estrutura Van der Pauw (Sonnenberg, 2015)

**Fonte:** (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)

- 1) Aplica-se uma corrente entre dois terminais adjacentes, por exemplo 1 e 2;
- 2) Depois mede-se a tensão nos outros dois terminais 3 e 4.

A resistência pode ser calculada da seguinte forma:

$$R_{SH} = 4,53 \times \frac{V_{43}}{I_{12}}$$

Para uma melhor precisão é realizada uma rotação de 90° nos terminais utilizados nas medidas.

Logo, o resultado na resistência de folha final:

$$R_{SH-TOTAL} = \frac{(R_{SH1} + R_{SH2}) \times F}{I_{12}}$$

“(...)  $F$  é conhecida como a função Van der Pauw(...), que mostra que o valor dessa função é normalmente muito próximo de 1 quando existe pouca diferença entre  $R_{SH1}$  e  $R_{SH2}$ , em geral inferior a 5%” (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)

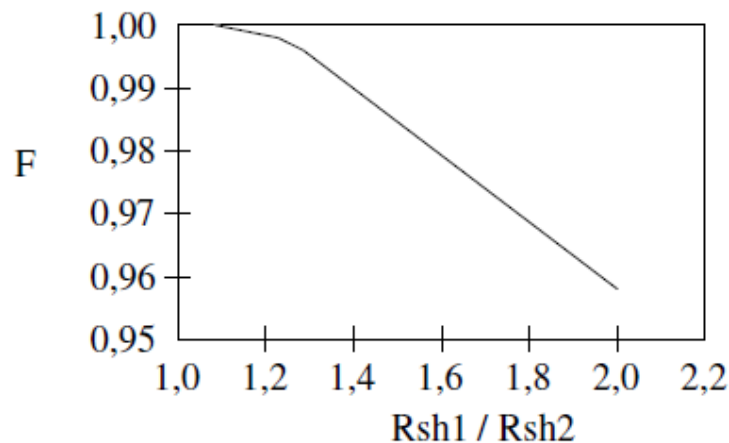


Figura 11- Medidas Eléctricas: Função Van der Pauw (Sonnenberg, 2015)

### 2.2.3. Medidas de largura de linha (Cruz-Ponte):

A largura de linha é um parâmetro mais importante em processos. As larguras são diferentes das larguras na máscara por causa de imprecisões que ocorrem durante os processos de litografia, corrosão e outros como oxidação local.

A estrutura utilizada para a determinação da largura de linha é conhecida como Cruz-Ponte, em que na realidade é uma composição das duas estruturas apresentadas anteriormente:

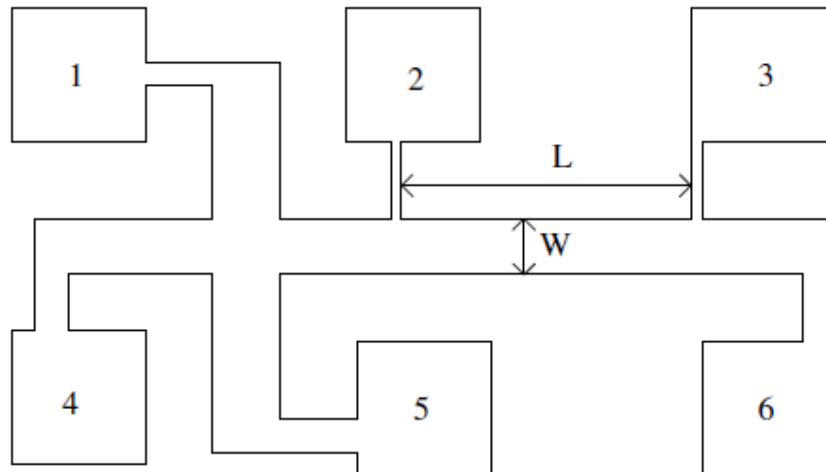


Figura 12- Medidas Elétricas: Estrutura Cruz-Ponte (Sonnenberg, 2015)

As etapas para a realização das medidas seguem:

- 1) Primeiramente determina-se a resistência de folha, como foi mostrado em Medidas de resistência de folha (Cruz);;
- 2) Em seguida calcula-se a resistência do resistor ponte como em Medidas de resistência (Ponte);;
- 3) Obtendo a largura efetiva( $W_{eff}$ ) a partir da equação:

$$W_{eff} = R_{SH} \times \frac{L}{R}$$

#### 2.2.4. Medidas de resistência de contato (Kelvin):

A resistências de contato são causadas por dois motivos:

- a) Em uma camada rasa do semiconductor abaixo do metal, a densidade de cargas é diferente da que existe no corpo, por causa de diferenças nas funções de trabalho entre os dois materiais ou por causa de estados de superfície no semiconductor;
- b) Pode haver uma camada de material entre o metal e o semiconductor que impeça um bom contato.

A resistência de contato pode influenciar o comportamento global de um transistor MOS.

$$R_{CO} = \frac{\rho_{co}}{A}, \text{ considerando como um caso ideal.}$$

Este modelo não funciona muito bem se levarmos em consideração os efeitos de aglomeração de correntes.

*“(...). A maior parte da corrente percorre a menor distância possível dentro do semiconductor minimizando a resistência, e logo passa para o metal” (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)*

A estrutura mais simples que permite este estudo é a CBKR (Cross Bridge Kelvin Resistor), com resistência de contato  $R_K$ .

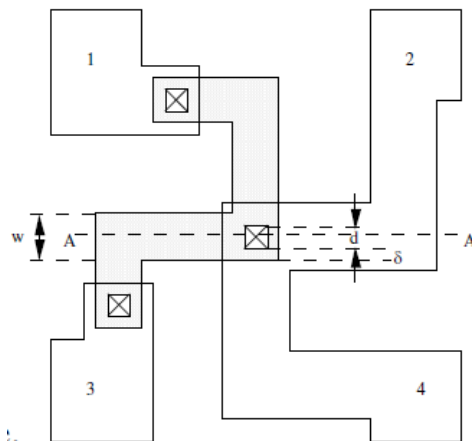


Figura 13- Medidas Elétricas: Estrutura Kelvin

A medida de resistência é feita como a seguir:

**Fonte:** (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)

- 1) Aplica-se uma corrente entre os terminais 3 e 2;
- 2) Em seguida mede-se a tensão pelo contato entre os terminais 1 e 4.

O valor da resistência de contato pode ser obtido, por intermédio da equação:

$$R_K = \frac{V_{14}}{I_{32}} = \frac{\rho_{CO}}{d^2}$$

A resistência de contato específica pode ser calculada pela equação:

$$\rho_{CO} = R_K \times d^2$$

### 3. Parte Experimental- Processo de Fabricação:

Para a fabricação dos dispositivos e estruturas foram realizadas as seguintes etapas de processo:

#### 1) Limpeza química:

- a) Enxágue em água DI durante 5 minutos;
- b) Limpeza piranha, para remoção de resíduos orgânicos  
 $1\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$  (durante 10 minutos)
- c) Enxágue em água DI durante 5 minutos;
- d) Banho em solução de para remoção do óxido formado pela água oxigenada  
 $100\text{H}_2\text{O} + 1\text{HF}$   
O tempo do banho é determinado pelo estado da superfície das lâminas, já que, quando estas saem secas da solução todo óxido foi removido;
- e) Enxágue em água DI durante 5 minutos;
- f) Banho em solução aquecida RCA-1  
 $1\text{NH}_4\text{OH} + 1\text{H}_2\text{O}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$  (durante 10 minutos)
- g) Enxágue em água DI durante 5 minutos;
- h) Banho em solução aquecida RCA-2  
 $1\text{HCl} + 1\text{H}_2\text{O}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$  (durante 10 minutos)
- i) Enxágue em água DI durante 5 minutos;
- j) Banho em solução para remoção do óxido formado pela água oxigenada nas limpezas RCA-1 e RCA-2  
 $100\text{H}_2\text{O} + 1\text{HF}$
- k) E posterior jateamento com nitrogênio para secagem completa.

#### 2) Oxidação térmica:

Para a obtenção do óxido de campo foi realizada oxidação térmica, conforme os parâmetros abaixo:

G (gás)	V (L/min)	Temp (°C)	T (horas)
O <sub>2</sub>	2	1150	34



Depois cura em ambiente N<sub>2</sub> por 30 minutos.

Com o auxílio do interferômetro medimos a espessura do óxido de campo em cinco pontos da lâmina, conforme tabela1:

Tabela 1- Espessura do óxido de campo

Ponto	Espessura (nm)
1°	922,83
2°	927,00
3°	921,00
4°	924,40
5°	925,00
Média	924,04

### 3) Litografia I:

Para definição das regiões ativas foi utilizada uma máscara de campo escuro e foram necessárias três etapas:

**a) Aplicação do fotoressiste (FR):** foi utilizado o *spinner* em 3500 RPM por 20 segundos, onde primeiramente aplicamos álcool isopropílico para a remoção de particulados. Depois foi adicionado o promotor de aderência para fixação do fotoressiste e assim adicionado o FR. Após a aplicação do FR a lâmina foi colocada no *hot plate* por 90 segundos a temperatura 105°C, para evaporação do solvente e ativação.

**b) Alinhamento e Exposição:** na alinhadora/expositora em um primeiro momento não precisamos ter um cuidado com o alinhamento da máscara de campo escuro com a lâmina, pois não havíamos transferido nenhum padrão para a lâmina. A exposição da lâmina foi realizada por contato, para minimizar os efeitos de difração. A exposição a luz ultravioleta foi de 12 segundos.

c) **Revelação:** por fim fizemos a revelação em solução de:

**2 KOH + 1 DI** (Durante 15 segundos)

Após mais 05 minutos para o *hot plate* a 130°C, para cura do FR.

#### 4) Corrosão úmida:

Para a remoção do óxido de silício foi realizada uma corrosão úmida nas seguintes condições:

**6 NH<sub>4</sub>F + 1 HF** (Durante 20 minutos, taxa de corrosão: 100 nm/min)

Depois enxágue em água deionizada (Água DI) por 5 minutos.

#### 5) Remoção do fotoressiste:

Para a remoção do FR mergulhamos a lâmina em solução de acetona por 5 minutos e depois mais 5 minutos em álcool isopropílico.

#### 6) Oxidação térmica:

Para a obtenção do óxido de porta foi realizada oxidação térmica, conforme os parâmetros abaixo:

G (gás)	V (L/min)	Temp (°C)	T (min)
O <sub>2</sub>	2	1150	20

Depois cura em ambiente N<sub>2</sub> por 15 minutos.

Com o auxílio do interferômetro medimos a espessura do óxido de porta em cinco pontos da lâmina.

Tabela 2- Espessura do óxido de porta

Ponto	Espessura (nm)
1°	88,80
2°	89,95
3°	89,63
4°	89,98
5°	90,23
<b>Média</b>	<b>89,72</b>

## 7) Sputtering:

Para a deposição de silício policristalino (amorfo) utilizamos o processo de *magnetron sputtering*, conforme os parâmetros abaixo:

G (gás)	V (sccm)	P (mTorr)	Pot (W)	T (min)
<b>Ar</b>	<b>80</b>	<b>10</b>	<b>300</b>	<b>60</b>

Para a determinação da espessura foi utilizado o perfilômetro e obtivemos a seguinte medida:

Espessura ( $\mu\text{m}$ )
<b>0,983</b>

Com o auxílio do equipamento quatro pontas, fizemos cinco medidas de resistência de folha ( $R_{SH}$ ) em uma lâmina de acompanhamento do processo.

Tabela 3- Resistência de folha do silício policristalino extraída com auxílio do equipamento quatro pontas

Ponto	RSH ( $\Omega/\square$ )
1°	209
2°	220
3°	130
4°	160
5°	147
<b>Média</b>	<b>173 <math>\pm</math> 35</b>

## 8) Litografia II:

Para definição da porta (Si-poli) foi utilizada uma máscara de campo claro e foram realizadas as mesmas etapas como descrito na Litografia I, **tempo de exposição 12 segundos e tempo de revelação 20 segundos.**

## 9) Corrosão por plasma:

Para a remoção do Silício Policristalino (Amorfo) foi realizada a corrosão por plasma, conforme os parâmetros abaixo:

G (gás)	V (sccm)	P (mTorr)	Pot (W)	T (min)
SF <sub>6</sub>	25	100	50	6*

\*O tempo de corrosão foi de aproximadamente de 6 minutos, através da inspeção visual verificamos que o silício amorfo foi corroído devido a diferença de coloração do centro em relação a borda da lâmina.

## 10)Corrosão úmida:

Para a remoção do óxido de porta sobre as regiões de dreno e fonte foi realizada uma corrosão úmida nas seguintes condições:

**100 H<sub>2</sub>O + 1 HF** (Temperatura ambiente até a lâmina sair seca, taxa de corrosão: 12 nm/min)

Após a lâmina sair com aspecto de hidrofóbica colocamos ela em enxágue em água deionizada (Água DI) por 5 minutos.

## 11)Remoção do fotoressiste:

Para a remoção do FR mergulhamos a lâmina em banho de acetona por 5 minutos e depois mais 5 minutos em álcool isopropílico.

## 12)Difusão:

Para a formação de fonte e dreno fizemos uma deposição de óxido de silício dopado com fósforo no *spinner* a uma rotação de 2000 RPM e por

20 segundos. Logo em seguida foi colocado no *hot plate* a uma temperatura de 200°C por 5 minutos. Para a ativação dos dopantes a lâmina foi colocado em forno convencional nas seguintes condições.

G (gás)	V (L/min)	Temp (°C)	T (min)
N <sub>2</sub>	2	1150	20

### 13)Corrosão úmida:

Para a remoção da camada do óxido de silício dopado com fósforo foi realizada uma corrosão úmida nas seguintes condições:

**15 HF + 10 HNO<sub>3</sub> + 300 H<sub>2</sub>O** (Durante 8 minutos)

Em seguida a lâmina foi enxaguada em água deionizada (Água DI) por 5 minutos

### 14)Litografia III:

Para abertura de contatos elétricos foi utilizada uma máscara de campo claro e foram realizadas as mesmas etapas como nas litografias anteriores, apenas não foi utilizado o promotor de aderência.

### 15)Evaporação:

Para a formação dos contatos elétricos fizemos uma evaporação de alumínio (frente da lâmina) com o auxílio da evaporadora.

### 16)Corrosão úmida:

Para a definição dos contatos elétricos foi realizada uma corrosão úmida nas seguintes condições:

**80H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 10H<sub>2</sub>O + 5HNO<sub>3</sub>** (Durante 10 minutos, taxa de corrosão: 200 nm/min)

Após a lâmina sair com aspecto de hidrofóbica colocamos ela em enxágue em água deionizada (Água DI) por 5 minutos

#### **17) Remoção do resiste:**

Para a remoção do FR mergulhamos a lâmina em banho de acetona por 5 minutos e depois mais 5 minutos em álcool isopropílico.

#### **18) Evaporação:**

Para finalizar fizemos a metalização das “costas” da lâmina para posterior polarização do substrato

#### 4. Análise de Dados- Caracterização Elétrica:

Neste capítulo iremos abordar a caracterização elétrica das estruturas e dispositivos construídos, para isso foi utilizado o equipamento Agilent 4156C, onde o equipamento nos fornecia as curvas características ( $I \times V$ ). Para uma melhor análise dos dados foram realizadas 05 (cinco) medidas de cada estrutura em DIE's<sup>1</sup>(regiões) diferentes da lâmina, como mostra a Figura 14.

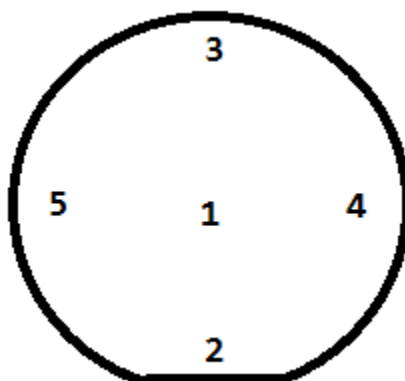


Figura 14- Representação esquemática dos DIE's que foram utilizados para as medidas

##### 4.1. Estruturas de Medidas Elétricas:

Primeiramente vamos analisar as estruturas de medidas elétricas, pois elas nos auxiliaram na verificação das possíveis falhas de processo e auxiliar na caracterização elétrica dos dispositivos (capacitores, diodos e transistores).

##### 4.1.1. Estrutura Cruz-Ponte:

As Estruturas Cruz-Ponte foram utilizadas para determinação da resistência de folha(RSH), dos resistores( $R$ ) e a largura efetiva de linha( $W_{eff}$ ), que é um dos principais parâmetros do nosso processo. Por fim, assim podemos determinar a diferença entre a largura efetiva e a largura de máscara ( $\Delta W$ ), que possibilitaram a verificação dos defeitos que ocorreram durante as etapas de processo de fabricação.

---

<sup>1</sup> DIE's: regiões formadas pelo conjunto de estruturas e dispositivos, que se repetem ao longo da lâmina

Para a realização das medidas devemos levar em consideração os parâmetros estabelecidos para cada uma das 03(três) estruturas (VDP1, VDP2 e VDP3) utilizadas, com os seguintes parâmetros:

#### 4.1.1.1. Parâmetros de Processo:

- **VDP1:** Silício Policristalino (óxido de porta);
- **VDP2:** Região N+ (fonte e dreno);
- **VDP3:** Alumínio.

#### 4.1.1.2. Parâmetros de Máscara:

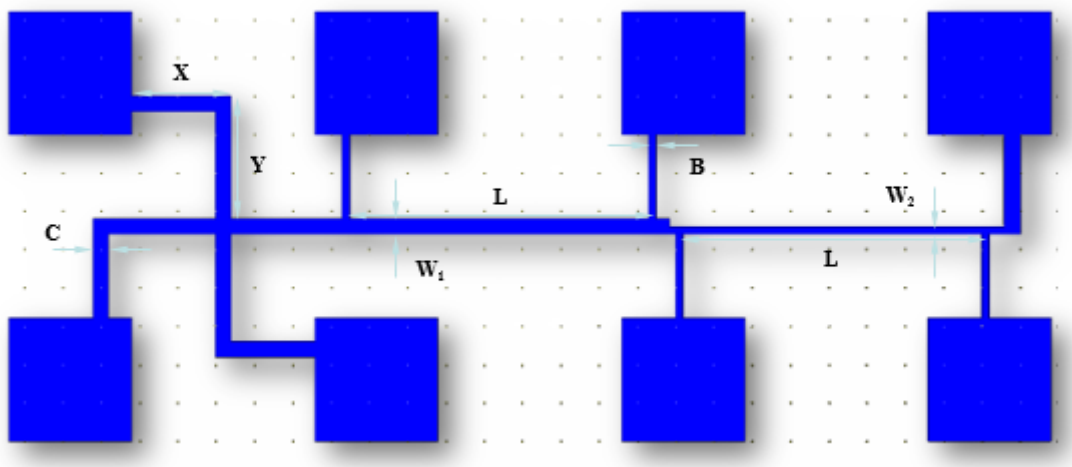


Figura 15- Estrutura Cruz-Ponte: Modelo de estrutura de medida elétrica (dos Santos, 2011)

**W1= 10  $\mu$ m   W2= 5  $\mu$ m   B= 5  $\mu$ m   L= 200  $\mu$ m   C= 10  $\mu$ m   X + Y= 145  $\mu$ m**

Todas as estruturas tinham os mesmos padrões de máscaras.

#### 4.1.1.3. Parâmetros estabelecidos em laboratório:

Para as medições feitas em laboratório, foram estabelecidos os seguintes parâmetros para medição no software (Agilent Desktop EasyEXPERT):



Tabela 4- Estrutura Cruz-Ponte: Parâmetros Agilent Desktop

CHANNEL SETUP				
UNIT	V NAME	I NAME	MODE	FUNCTION
SMU1:HR	V1	I1	I	VAR1
SMU2:HR	V2	I2	V	CONST
VM1:HR	V3	I3	I	CONST
VM2:HR	V4	I4	I	CONST

MEASUREMENT SETUP	
UNIT	SMU1:HR
NAME	I1
START	100 $\mu$ A
STOP	400 $\mu$ A
STEP	10 $\mu$ A
Nº DE STEP	31

#### 4.1.1.4. Cálculos:

Para a determinação da diferença da largura de linha de cada estrutura VPD, primeiramente, determinamos a medida de resistência de folha( $RSH_{TOTAL}$ ), depois a resistência do resistor de comprimento( $L= 200 \mu m$ ) e por fim a largura efetiva de linha.

##### 4.1.1.4.1. Resistência de Folha (RSH):

$$RSH = 4,53 \times \frac{V}{I}$$

Onde  $\frac{V}{I}$ , foi obtido através das curvas de resistências medidas em laboratório:

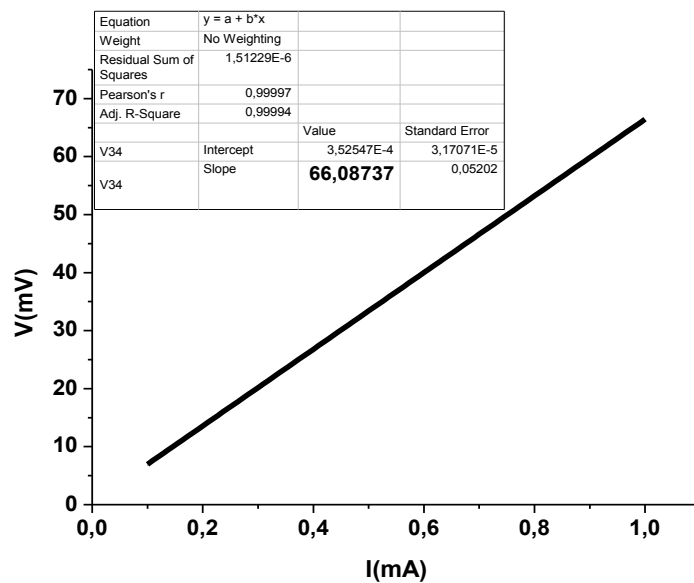


Figura 16- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência de folha 1

$$RSH1 = 4,53 \times 66,08 = 299,38 \, \Omega/\square$$

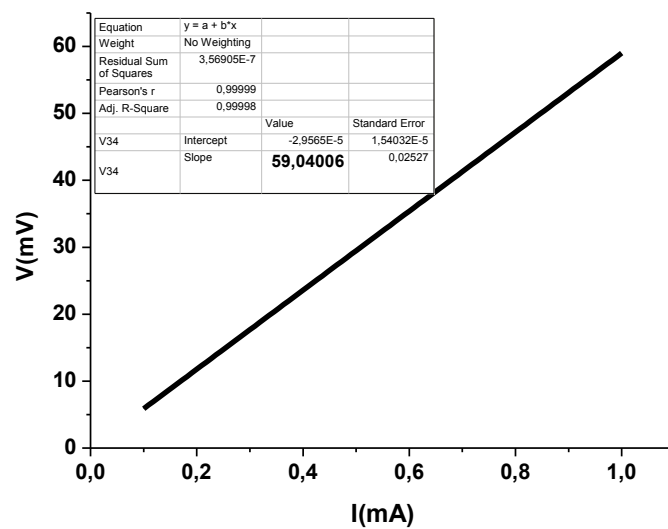


Figura 17- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência de folha 2

$$RSH2 = 4,53 \times 59,04 = 267,45 \, \Omega/\square$$

Com os dados obtidos, calcula-se a razão chamada de Função de Van der Pauw ( $F$ ), onde:

**“... mostra que o valor dessa função é normalmente muito próximo de 1 quando existe pouca diferença entre  $RSH1$  e  $RSH2$ ” (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)**

$$F = \frac{RSH1}{RSH2} = \frac{299,38}{267,45} = 1,12$$

Finalmente, determinamos a resistência de folha total ( $RSH_{TOTAL}$ ), substituindo as informações coletadas anteriormente:

$$RSH_{TOTAL} = \frac{(RSH1 + RSH2) \times F}{2} = \frac{(299,38 + 267,45) \times 1,00}{2} = 283,41 \, \Omega/\square$$

#### 4.1.1.4.2. Resistência Total da Linha (R):

Obteve-se a resistência total da linha através da curva característica do resistor de comprimento  $L=200 \, \mu\text{m}$ :

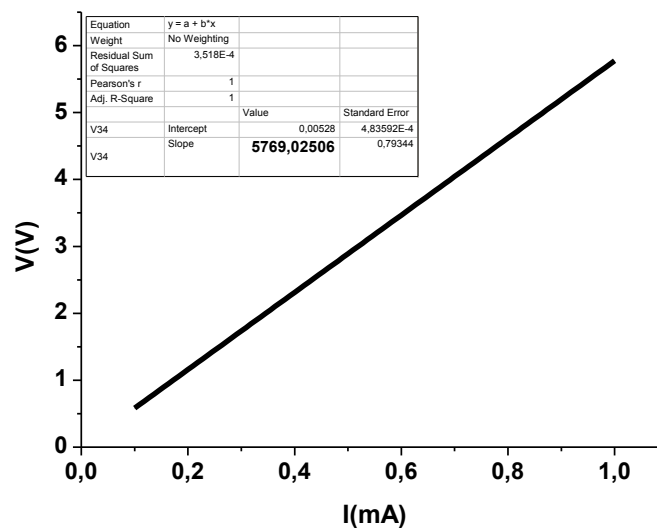


Figura 18- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência ponte de  $200 \, \mu\text{m}$

$$R = 5.769 \, \Omega$$

#### 4.1.1.4.3. Largura Efetiva de Linha ( $W_{eff}$ ):

Com os dados obtidos anteriormente determinamos a largura efetiva de linha, que esta relacionado com a resistência de folha total, comprimento do resistor ponte e a resistência física da ponte.

$$W_{eff} = RSH_{TOTAL} \times \frac{L}{R} = 283,41 \times \frac{200 \times 10^{-6}}{5.769} = 9,82 \mu m$$

#### 4.1.1.4.4. Variação da Largura de Linha ( $\Delta W$ ):

$$\Delta W = 10,00 - 9,82 = 0,18 \mu m$$

Foram feitos os mesmos passos anteriores descritos para cada uma das estruturas e cada um dos DIE's. E obtivemos os dados, conforme a tabela abaixo:

Tabela 5- Estrutura Cruz-Ponte: Dados extraídos para todos os DIE's

VAN DER PAWN		DIE's				
		1	2	3	4	5
VDP1 – Silício	RSH1 ( $\Omega/\square$ )	299,38	182,06	255,59	266,36	267,29
	RSH2 ( $\Omega/\square$ )	267,45	183,01	255,94	281,96	202,05
	RSHTOTAL ( $\Omega/\square$ )	283,41	182,53	255,76	274,16	233,50
	R-LINHA ( $\Omega$ )	5769,00	5854,50	6344,70	5223,10	4758,90
	W ( $\mu m$ )	9,83	6,24	8,06	10,50	9,81
	$\Delta W$ ( $\mu m$ )	0,17	3,76	1,94	-0,50	0,19
VDP2 – Região	RSH1 ( $\Omega/\square$ )	3,74	3,45	3,67	3,40	3,53
	RSH2 ( $\Omega/\square$ )	3,78	3,77	3,96	3,85	3,80
	RSHTOTAL ( $\Omega/\square$ )	3,76	3,61	3,81	3,63	3,66
	R-LINHA ( $\Omega$ )	65,91	66,07	66,74	78,60	66,61
	W ( $\mu m$ )	11,41	10,93	11,43	9,23	10,99
	$\Delta W$ ( $\mu m$ )	-1,41	-0,93	-1,43	0,77	-0,99
VDP3 - Alumínio	RSH1 ( $m\Omega/\square$ )	39,21	39,41	36,69	39,23	41,50
	RSH2 ( $m\Omega/\square$ )	39,00	37,92	35,56	38,82	43,72
	RSHTOTAL ( $m\Omega/\square$ )	39,11	38,66	36,13	39,03	42,61
	R-LINHA ( $m\Omega$ )	917,45	899,76	899,76	913,90	956,39
	W ( $\mu m$ )	8,52	8,59	8,03	8,54	8,91
	$\Delta W$ ( $\mu m$ )	1,48	1,41	1,97	1,46	1,09

#### 4.1.1.5. Resumo e Conclusões:

Com os dados da Tabela 5, calculamos uma média aritmética com seus respectivos desvios padrões para cada uma das estruturas Cruz-Ponte, assim temos a Tabela 6

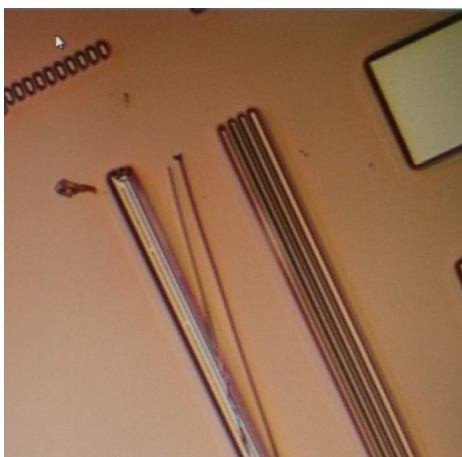
*Tabela 6- Estrutura Cruz-Ponte: Médias com seus respectivos desvios padrões*

MÉDIA	VDP1			VDP2			VDP3		
RSHTOTAL ( $\Omega/\square$ )	245	$\pm$	40	3,69	$\pm$	0,08	39 m	$\pm$	2 m
R-LINHA ( $\Omega$ )	5590	$\pm$	612	68	$\pm$	5	917 m	$\pm$	23 m
$\Delta W$ ( $\mu\text{m}$ )	1,11	$\pm$	1,55	-0,80	$\pm$	0,81	1,85	$\pm$	0,28

E através dos dados da tabela acima verificamos um  $\Delta W$  positivo (diferenças entre largura de linha de máscara e largura efetiva de linha) para as estruturas VDP1 e VDP3, ou seja, as larguras efetivas de linhas para as estruturas ficaram menores que a largura de linha de máscara. As mesmas também apresentaram um  $\Delta W$  alto, pois os processos associados para suas formações, litografia e corrosão, são extremamente dependentes de um operador. A litografia necessita que o usuário faça um bom alinhamento entre as diversas camadas litográficas e um bom controle do banho de revelação.

Mas para os processos de formação das estruturas Cruz-Ponte os erros associados as etapas litográficas devem ser devidos ao tempo de exposição ao banho no revelador. E como para cada estrutura foi utilizada uma única etapa litográfica, assim minimizamos os problemas de alinhamento gerados durante os processos litográficos (Zambom, 2012).

Para as estruturas que foram utilizadas as máscaras de campo claro (VDP1 e VDP3) ocorreu um afinamento das linhas finais em relação as linhas de máscara, como podemos verificar na Figura 19, que após a corrosão úmida verificamos que houve uma corrosão por baixo do fotoressiste. E para as de campo escuro ocorreu um alargamento da linha, assim como podemos verificar na figura abaixo que foi realizada durante o processo de fabricação das estruturas.



*Figura 19- Lâmina utilizada no processo, após a etapa de corrosão úmida, verificamos que houve uma corrosão por baixo do fotoresiste, onde o fotoresiste levantou-se*

Já a corrosão úmida depende que o usuário tenha um bom controle do tempo de exposição ao banho de corrosão. As corrosões são processos com perfil de corrosão isotrópicos, ou seja, ocorrem tanto na vertical como horizontal igualmente, não garantindo um perfil vertical na formação das estruturas e assim gerando perdas de dimensões na transferência de padrões geométricos da máscara para o filme fino ou substrato. Como verificamos na Figura 20 os perfis de corrosão, para corrosão isotrópica e anisotrópica.

Na Figura 20.a verificamos um perfil antes da corrosão, para o perfil da corrosão úmida temos Figura 20.b onde verificamos um perfil isotrópico típico desta corrosão. Para que haja uma fidelidade na transferência de padrões, é necessário utilizar um processo de corrosão que seja anisotrópico, ou seja, que resulte em um perfil vertical, como na Figura 20.c. (Yamamoto R. K., 2012)

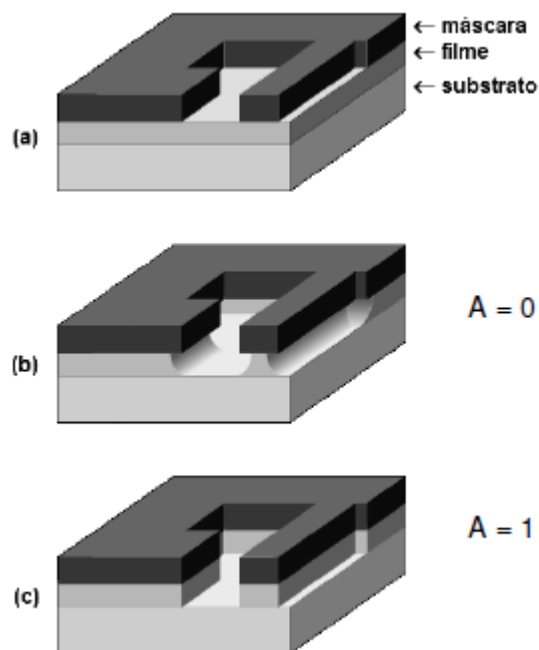


Figura 20- Perfil de Corrosão: a) amostra antes da corrosão; b) após uma corrosão isotrópica; c) após uma corrosão totalmente anisotrópica

Para a estrutura VDP1, constituída de silício amorfo, foi utilizado a corrosão por plasma (como podemos verificar no Capítulo, Parte Experimental- Processo de Fabricação: **Corrosão por plasma:**), que seria esperado um perfil anisotrópico de corrosão, como descrito acima. Mas a corrosão por plasma com gases fluorados pode apresentar um perfil isotrópico, pois quando entram em contato com o silício à temperatura ambiente geram uma reação espontânea resultando em um produto volátil  $\text{SiF}_4$  como na Figura 21. (Yamamoto R. K., 2012)

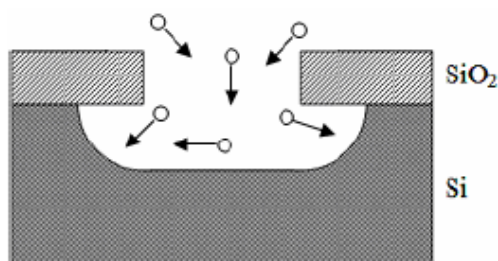


Figura 21- Corrosão: Perfil isotrópico resultante da corrosão seca de silício com gases fluorados

Para a estrutura VDP2 verificamos um  $\Delta W$  negativo, isto é, uma largura de linha efetiva maior que a de máscara, pois durante o processo de difusão do

fósforo houve uma difusão lateral dos dopantes. E um  $\Delta W$  menor que nas outras estruturas, devido ao processo de difusão ser um processo que depende de parâmetros pré-estabelecidos e ajustados no forno e menos dependentes do operador, como temperatura e tempo do processo. Conforme etapa realizada no Capítulo 3 Parte Experimental- Processo de Fabricação: **Difusão:**

Em relação as resistências de folha verificamos se levarmos em consideração os materiais finais, temos resistências de folhas conforme o “esperado”.

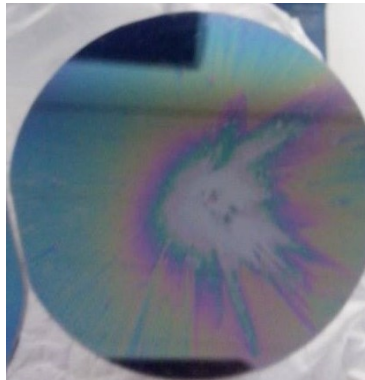
A estrutura VDP3 que é composta por um metal (alumínio), é um ótimo condutor, ou seja, tem uma resistência menor a passagem da corrente em comparação com as outras duas estruturas que são constituídas de um material semiconductor.

Já a estrutura VDP2 é formada de um semiconductor mas dopado com fósforo, após a etapa de difusão realizada no capítulo 3 os dopantes passam a fazer parte da rede cristalina, tornando-se ativos como impurezas doadoras. Portanto, a estrutura VDP2 têm uma resistência menor a passagem de corrente em relação a estrutura VDP1, como verificado na tabela Tabela 6.

Para a resistência de folha do alumínio obtemos valores próximos a outros trabalhos realizados no mesmo laboratório. Em que as etapas de evaporação do alumínio, descritas no capítulo 3, onde foram obtidas resistências de folha do alumínio entorno de 40 m $\Omega$ . (Rangel, 2014)

Para a estrutura VDP1 após o processo de deposição do filme fino de silício amorfo, fizemos cinco medidas no equipamento quatro pontas e foram obtidos valores que variam bastante ao longo da lâmina conforme Tabela 3 e verificado na Figura 22.





*Figura 22- Lâmina utilizada durante o processo*

#### **4.1.2. Estrutura Kelvin:**

As estruturas Kelvin são utilizadas para medir a resistência de contato entre duas camadas de materiais diferentes.

Para a realização das medidas devemos considerar os parâmetros estabelecidos para cada uma das 04(quatro) estruturas (K1, K2, K3 e K4) utilizadas, com os seguintes parâmetros:

##### **4.1.2.1. Parâmetros de Processo:**

- **K1 e K2:** Resistência de contato entre o alumínio e a região N+;
- **K3 e K4:** Resistência de contato entre o alumínio e o silício policristalino.

#### 4.1.2.2. Parâmetros de Máscara:

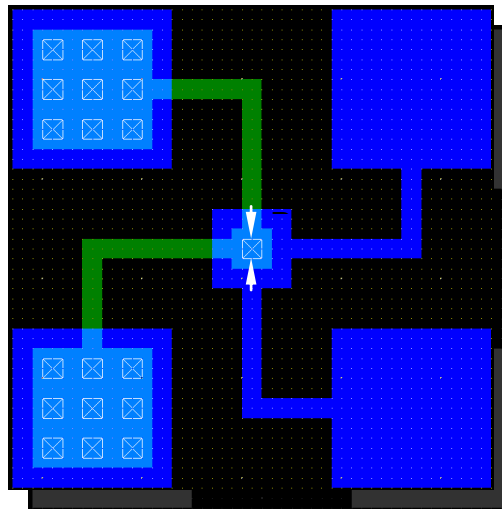


Figura 23- Estrutura Kelvin: Modelo de estrutura de medida elétrica (dos Santos, 2011)

**A1= 600  $\mu\text{m}$       A2= 150  $\mu\text{m}$**

- **K1 e K3:** Possuem a mesma área de contato A1;
- **K2 e K4:** Possuem a mesma área de contato A2.

#### 4.1.2.3. Parâmetros estabelecidos em laboratório:

Para as medições feitas em laboratório foram estabelecidos os seguintes parâmetros para medição no software (Agilmente Desktop EasyEXPERT):

Tabela 7- Estrutura Kelvin: Parâmetros Agilent Desktop

CHANNEL SETUP				
UNIT	V NAME	I NAME	MODE	FUNCTION
SMU1:HR	V1	I1	I	VAR1
SMU2:HR	V2	I2	V	CONST
VM1:HR	V3	I3	I	CONST
VM2:HR	V4	I4	I	CONST

MEASUREMENT SETUP	
UNIT	SMU1:HR
NAME	I1
START	10 $\mu\text{A}$

STOP	1 $\mu$ A
STEP	10 $\mu$ A
Nº DE STEP	100

#### 4.1.2.4. Cálculos:

Para a determinação da resistividade de contato de cada estrutura KELVIN, em um primeiro momento determinamos a medida de resistência de contato ( $RK$ ).

##### 4.1.2.4.1. Resistência de Contato ( $RK$ ):

$$RK = \frac{V}{I}$$

Onde  $\frac{V}{I}$ , foi obtido das curvas de resistências obtidas em laboratório.

##### 4.1.2.4.2. Resistência de Contato Específica ( $\rho_{co}$ ):

$$\rho_{co} = RK \times d^2$$

## Resistência de Contato ( $RK$ ):

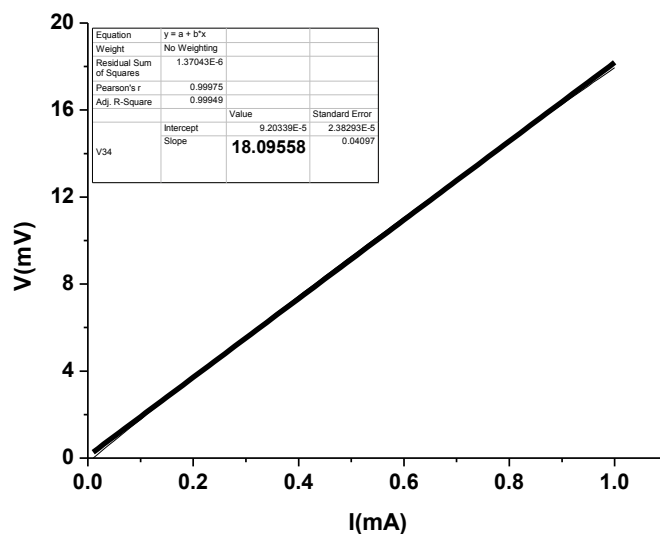


Figura 24- Curva Característica de resistência, obtida no laboratório para determinação da resistência ponte de contato

$$RK = 18,0956 \, \Omega$$

### 1. Resistência de Contato Específica ( $\rho_{CO}$ ):

$$\rho_{CO} = 18,0956 \times 150 = 2,71 \, K\Omega \cdot \mu m^2$$

Foram feitos os mesmos passos anteriores descritos para cada uma das estruturas e cada um dos DIE's. E obtivemos os dados, conforme a tabela 8:

Tabela 8- Estrutura Kelvin: Dados obtidos de todos os DIE's, com as resistividade de contato com as áreas de máscara e áreas efetivas

KELVIN		DIE's				
		1	2	3	4	5
K1	Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	2,71	1,32	1,64	6,92	1,15
	Pco-eff Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	3,83	1,67	2,33	5,59	1,48
K2	Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	4,91	4,05	4,14	13,97	5,12
	Pco-eff Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	5,88	4,57	4,97	12,59	5,82
K3	Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	102,23	74,47	68,47	61,17	73,28
	Pco-eff Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	97,54	20,82	38,23	69,60	69,68
K4	Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	156,75	176,38	177,32	215,28	207,24
	Pco-eff Pco ( $K\Omega \cdot \mu m^2$ )	153,13	100,35	134,83	229,84	235,73

#### 4.1.2.5. Resumo e Conclusões:

Com os dados da Tabela 8, calculamos uma média aritmética com seus respectivos desvios padrões para cada uma das estruturas Kelvin, assim temos a Tabela 9.

*Tabela 9- Estrutura Kelvin: Médias com seus respectivos desvios padrões*

MÉDIA	K1			K2			K3			K4		
Pco (K $\Omega$ . $\mu$ m <sup>2</sup> )	2,75	±	2,15	6,44	±	3,79	75,93	±	13,96	186,59	±	21,59
Pco-eff (K $\Omega$ . $\mu$ m <sup>2</sup> )	2,98	±	1,54	6,76	±	2,95	59,17	±	26,83	170,78	±	53,42

Verificamos resultados para as medidas de resistividade do contato( $\rho_{co}$ ) muito altas. Para as estruturas K1 e K2, pois não foram realizadas etapas de sinterização, promovendo assim um contato elétrico mais eficiente do alumínio como os filmes finos.

Com essas medidas, apenas podemos verificar que, para as estruturas K1 e K2, ocorreu um contato elétrico melhor entre o Alumínio- Região N+ do que com o Alumínio- Silício Poli cristalino.

#### 4.2. Dispositivos MOS:

##### 4.2.1. Transistores:

Para a caracterização elétrica dos transistores foram necessárias as extrações das curvas características ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ) e ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ), e a partir delas podemos verificar os tipos de transistores (NMOS ou PMOS), conforme ao portador de cargas predominantes (elétron ou lacunas) e ao modo de funcionamento (enriquecimento ou depleção), e a extração dos principais parâmetros dos transistores. Antes devemos considerar os seguintes parâmetros estabelecidos:

##### 4.2.1.1. Parâmetros de Processo:

- **Substrato: Tipo P;**
- **Fonte e Dreno: Silício dopado com fósforo (região N+).**

#### 4.2.1.2. Parâmetros de Máscara:

- **Transistores Isolados:**

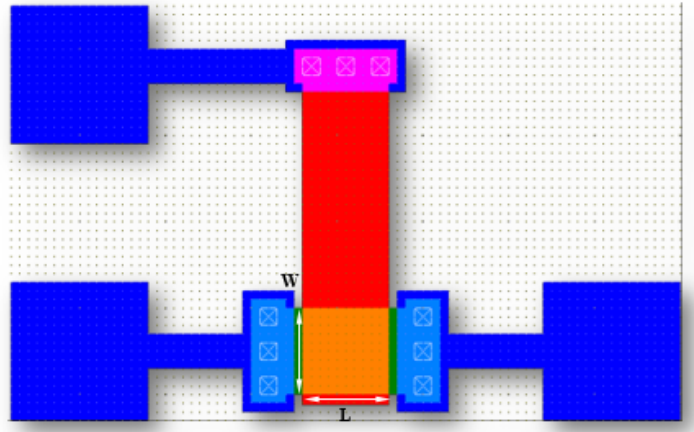


Figura 25- Transistores Isolados: Modelo de dispositivo (dos Santos, 2011)

- T1:  $W1 = 10 \mu\text{m}$  /  $L1 = 10 \mu\text{m}$ ;
  - T2:  $W2 = 10 \mu\text{m}$  /  $L2 = 5 \mu\text{m}$ ;
  - T3:  $W3 = 100 \mu\text{m}$  /  $L3 = 100 \mu\text{m}$ .
- **Cascatas de transistores:**

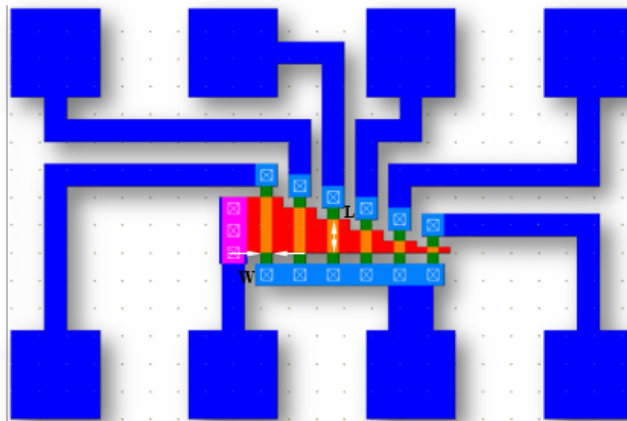


Figura 26- Transistores- Cascatas: Modelo de dispositivo (dos Santos, 2011)

- **TNL1, TNL2 e TNL3:** largura do canal constante  $W1 = W2 = W3 = 10 \mu\text{m}$ ;
- TNL1:  $L1 = 50, 40, 30, 20, 10$  e  $5 \mu\text{m}$ ;
- TNL2:  $L2 = 10, 5, 4, 3, 2$  e  $1 \mu\text{m}$ ;
- TNL3:  $L3 = 3, 2.5, 2, 1.5, 1$ , e  $0.5 \mu\text{m}$ ;

- **TNW4:** com comprimento de canal ( $L = 10 \mu\text{m}$ ) constante e larguras ( $W_4 = 10, 8, 6, 4, 2$  e  $1 \mu\text{m}$ ).

#### 4.2.1.3. Parâmetros estabelecidos em laboratório:

Para as medições feitas em laboratório foram estabelecidos os seguintes parâmetros para medição no software (Agilmente Desktop EasyEXPERT):

*Tabela 10- Transistores: Parâmetros Agilent Desktop*

CHANNEL SETUP				
	V NAME	I NAME	MODE	FUNCTION
SMU1:HR	VG	IG	V	VAR1
SMU2:HR	VS	IS	V	CONST
SMU3:HR	VB	IB	COMMON	CONST
SMU4:HR	VD	ID	V	CONST

MEASUREMENT SETUP	
UNIT	SMU1:HR
NAME	VG
START	0 V
STOP	8 V
STEP	10 mV
Nº DE STEP	801

#### 4.2.1.4. Extração de parâmetros:

##### 4.2.1.4.1. Curva ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ):

O procedimento experimental para obtenção da ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ) dos transistores MOS se deu através do aterramento do substrato, enquanto que a tensão de dreno e fonte foi variada de 0 V até 5 V. No equipamento Agilent definimos a configuração conforme acima em (Parâmetros estabelecidos em laboratório:), e obtivemos os seguintes gráficos:

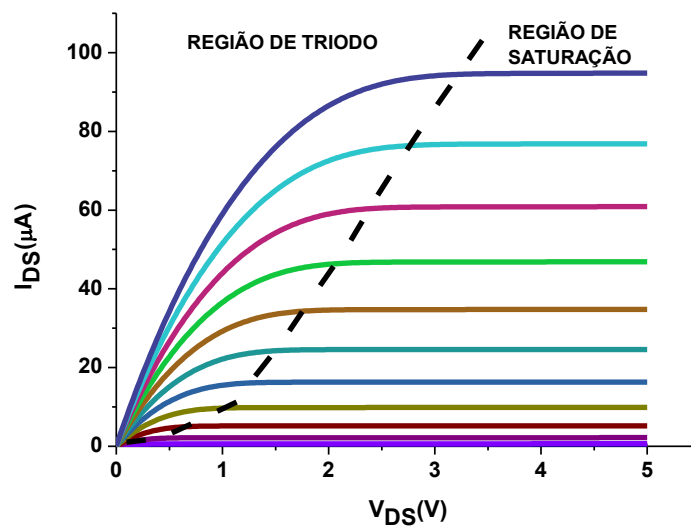


Figura 27- Transistores Isolados: T1 Curva ( $I_{DS} \times V_{DS}$ )

#### 4.2.1.4.2. Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ):

O procedimento experimental para obtenção da ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ) dos transistores MOS se deu através do aterramento do substrato e polarizando o dreno dos dispositivos com uma tensão de 100 mV, enquanto que a tensão de porta foi variada de -1 V até 8 V. No equipamento Agilent definimos a configuração conforme acima em (Parâmetros estabelecidos em laboratório:), e obtivemos os seguintes gráficos:



#### 4.2.1.4.2.1. Transistores Isolados:

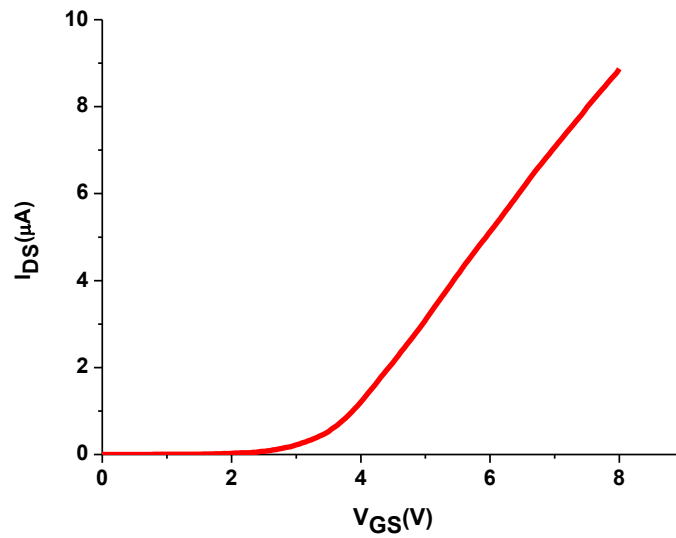


Figura 28- Transistores Isolados: T1- Curva ( $I_{DS}$  x  $V_{GS}$ ), comprimento e largura de canal de 10  $\mu m$

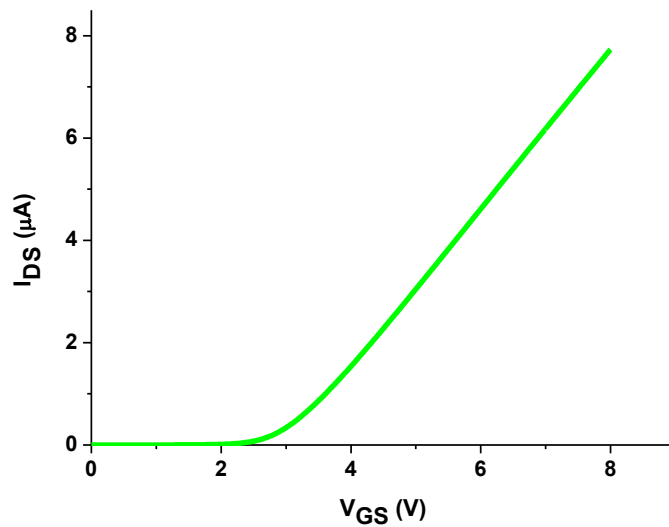


Figura 29- Transistores Isolados: T3- Curva ( $I_{DS}$  x  $V_{GS}$ ), comprimento e largura de canal de 100  $\mu m$

#### 4.2.1.4.2.2. Transistores- Cascata:

TNL1: Com largura (W) de canal constante e comprimento (L) variando:

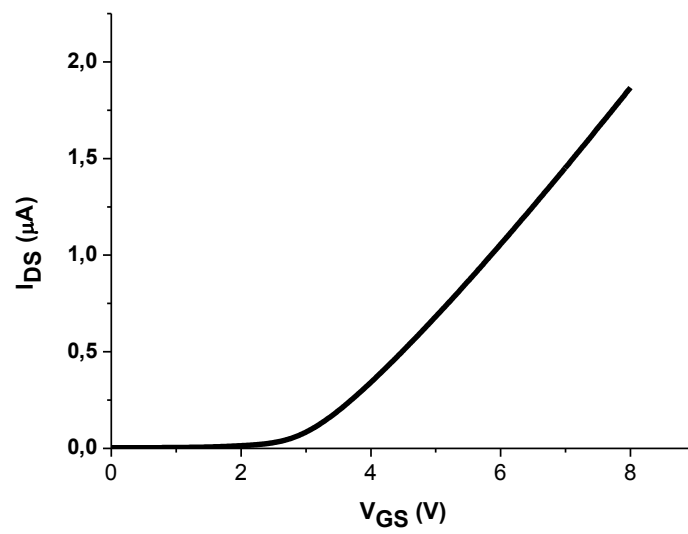


Figura 30- Transistores- Cascata: 1.TNL1 Curva ( $I_{DS}$  x  $V_{GS}$ ), comprimento de 50  $\mu m$

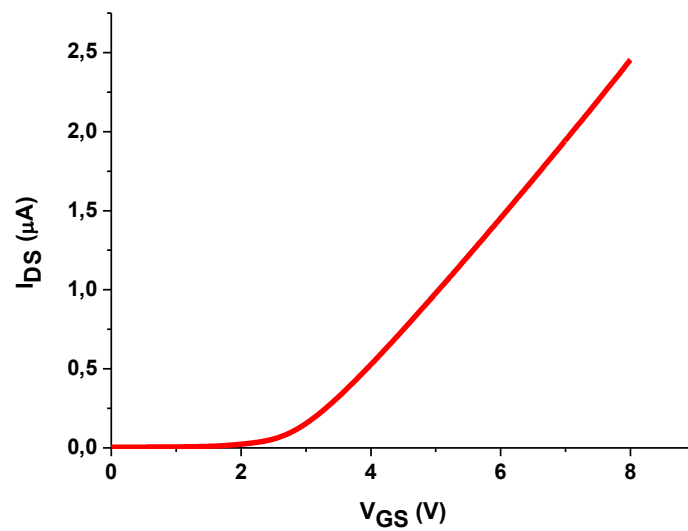


Figura 31- Transistores- Cascatas: 1.TNL2 Curva ( $I_{DS}$  x  $V_{GS}$ ), comprimento de 40  $\mu m$

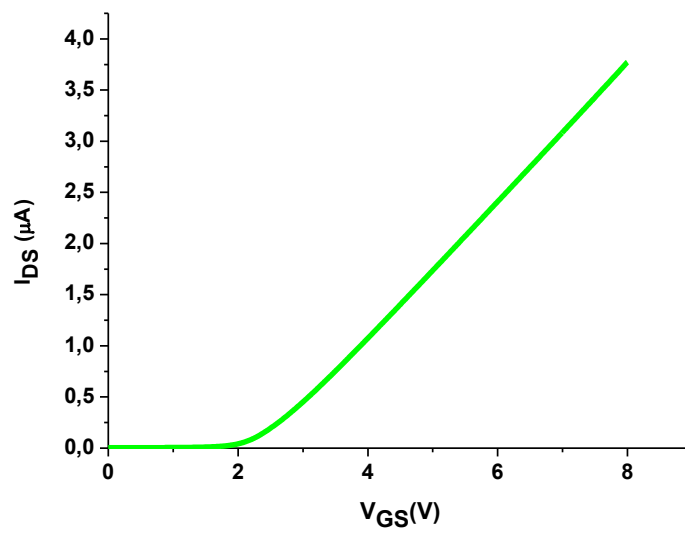


Figura 32- Transistores- Cascata: 1.TNL 3 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de  $30\ \mu\text{m}$

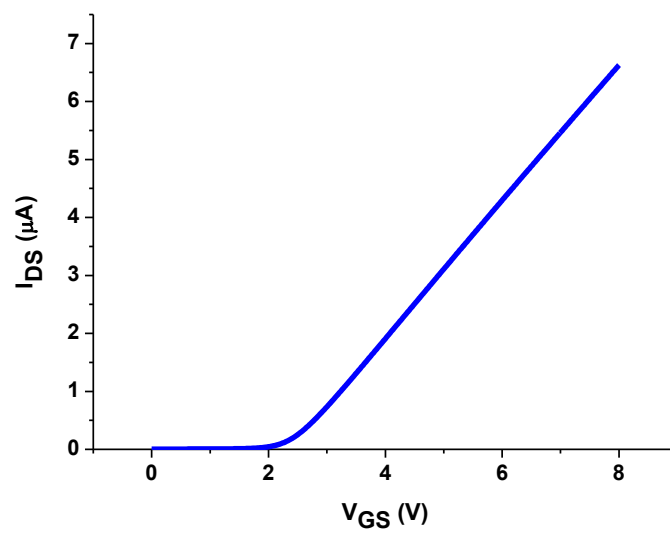


Figura 33- Transistores- Cascata: 1.TNL4 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), com comprimento de  $20\ \mu\text{m}$

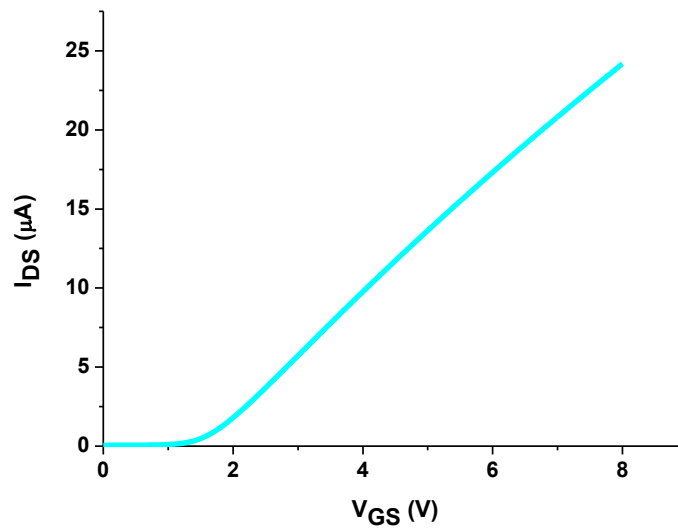


Figura 34- Transistores- Cascata: 1.TNL 5 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 10  $\mu m$

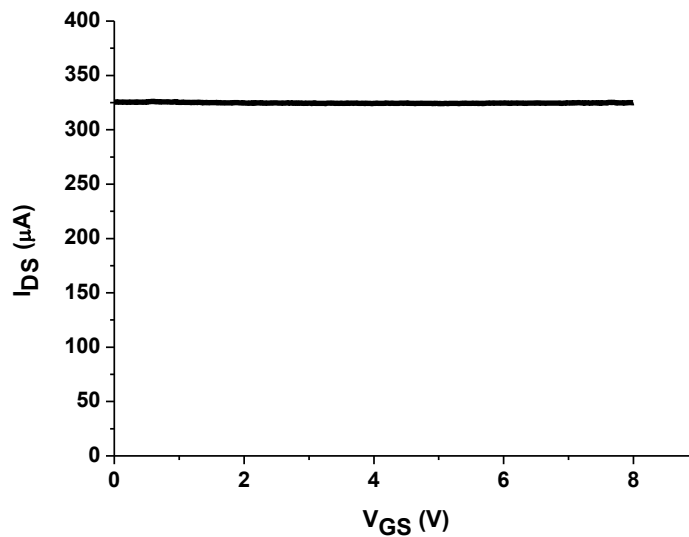


Figura 35- Transistores- Cascatas: 1.TNL6 Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), comprimento de 5  $\mu m$

#### 4.2.1.4.2.3. Resumos e análises:

Através das Curvas ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ) verificamos que os transistores se comportam como transistores NMOS tipo enriquecimento, pois necessitam da aplicação de tensão de porta ( $V_{GS}$ ) para induzir a camada de portadores de inversão, ou seja, possuem uma tensão de limiar positiva.

Nas curvas foi possível a visualização da região operacional de corte ou sublimiar. Onde  $V_{GS}$  deve ser menor que  $V_T$  ( $V_{GS} < V_T$ ). A corrente  $I_{DS}$  nesta

condição (da ordem de nA) é devida apenas à parcela difusional, variando exponencialmente com  $V_{GS}$ , independente da tensão  $V_{DS}$ .

Na região operacional de triodo,  $V_{GS}$  deve ser maior ou igual a  $V_T$  ( $V_G > V_T$ ), sendo que  $V_{DS}$  deve ser maior que 0 e menor ou igual que  $V_{GS} - V_T$ . Após a formação do canal, o aumento do potencial de porta  $V_{GS}$  aumenta a concentração de elétrons na região de canal, aumentando a corrente  $I_{DS}$ , até a condição onde ocorre o “*pinch-off*” que limita a corrente em seu valor máximo.

Na região operacional de saturação (“*pinch-off*”),  $V_{GS}$  deve ser maior ou igual a  $V_T$ . Dada combinação de  $V_{DS}$  e  $V_{GS}$ , para uma tensão de limiar, ocorrerá a condição onde  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ , que indica a situação de limiar de inversão na interface canal/dreno. Esta tensão é chamada de saturação ou “*pinch-off*”. O canal deixa de ser contínuo a partir deste limite, conforme a Figura 27.

Então podemos definir as regiões de operação dos transistores como corte, triodo e saturação, que correspondem as seguintes condições de operação: (Martino, Pavanello, & Verdonck, 2003)

**Região de Corte:**  $V_{GS} < V_T$  ou  $V_{GS} - V_T < 0$

$$I_{DS} \approx 0$$

**Região de Triodo:**  $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$

$$I_{DS} = \beta_N \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

**Região de Saturação:**  $0 < V_{GS} - V_T < V_{DS}$

$$I_{DS} = \beta_N \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2}$$

A partir das informações coletas anteriormente podemos extrair os principais parâmetros dos transistores como a seguir:

#### 4.2.1.4.3. Tensão de Limiar ( $V_T$ ):

Para a extração da tensão de limiar foi utilizado método descrito no Capítulo 1: **Transistores MOS: 2.1.1. Tensão de limiar ( $V_T$ ):**, utilizando o método da 2ª Derivada da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), para cada um dos transistores. Obtendo o seguinte gráfico:

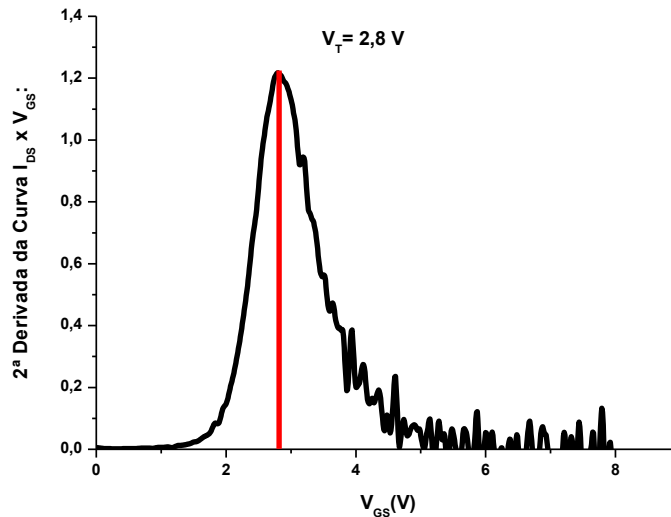


Figura 36- Modelo de obtenção da tensão de limiar, através da 2ª derivada da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )

#### 4.2.1.4.4. Transcondutância Máxima ( $g_{m-m\acute{a}x}$ ):

Através da 1ª Derivada da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ), podemos determinar a transcondutância máxima dos transistores, conforme no Transistores MOS: Transcondutância Máxima ( $g_{m-m\acute{a}x}$ ):

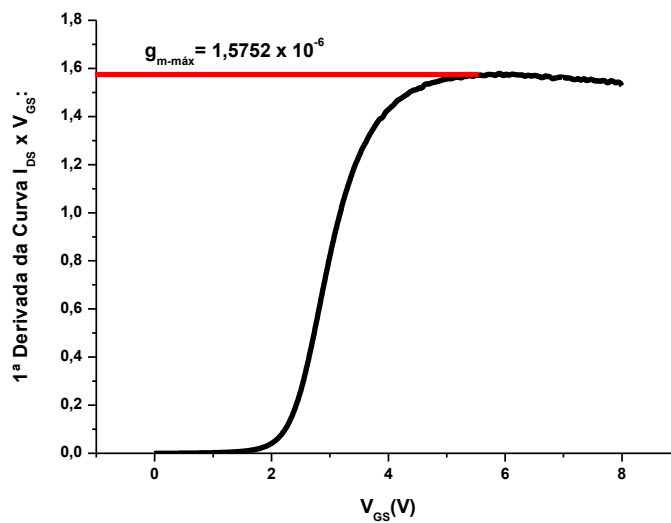


Figura 37- Modelo de obtenção da tensão de limiar, através da 1ª derivada da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )

#### 4.2.1.4.5. Inclinação de Sublimiar (S):

A inclinação de Sublimiar é obtida através do gráfico monologarítmico de  $I_{DS} \times V_{GS}$  e se obter S por meio do inverso do coeficiente angular da curva resultante. Como verificado no Capítulo 2: Transistores MOS: Inclinação de Sublimiar (S):

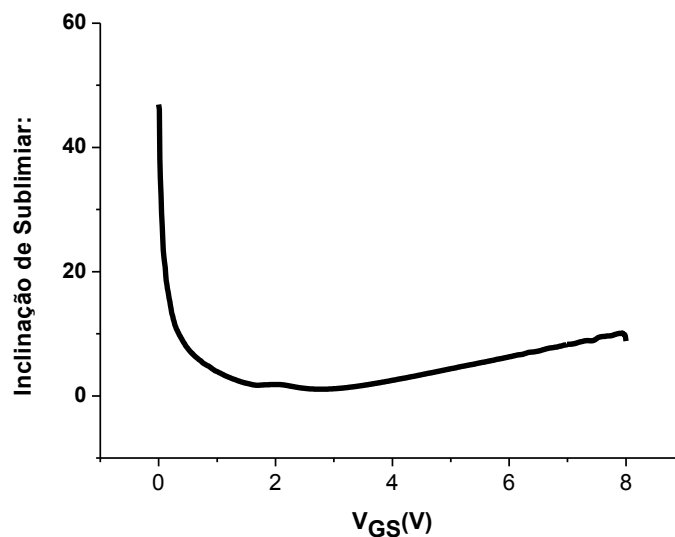


Figura 38- Modelo para extração da Inclinação de Sublimiar, a partir da curva monologarítmico da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )

Com a extração dos principais parâmetros das curvas características dos transistores de todos os DIE's obtivemos os dados das Tabela 11-

Transistores Isolados e Tabela 12- Cascata de Transistores. Mas não foi possível a extração destes parâmetros para os dispositivos T2, TNL2, TNL3 e TNW4, pois as mesmas possuíam um comprimento de canal inferior a 5  $\mu\text{m}$ .

Tabela 11- Transistores Isolados: Principais parâmetros extraídos a partir da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )

TRANSISTORES ISOLADOS		DIE's				
		1	2	3	4	5
T1	gm-máx (S)	2,03E-06	1,49E-06	4,31E-06	1,32E-06	2,42E-06
	VT (V)	3,46	2,87	2,70	3,32	3,90
	Sublimiar (mV/déc)	890,00	880	850	870	880
T3	gm-máx	1,57E-06	1,56E-06	1,58E-06	1,58E-06	1,55E-06
	VT (V)	2,82	3,04	2,73	2,68	2,77
	Sublimiar (mV/déc)	649	751	607	630	632

Tabela 12- Transistores- Cascatas: Principais parâmetros extraídos a partir da Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ )

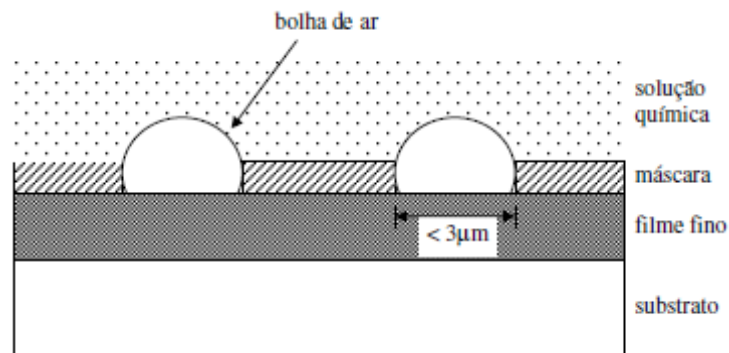
CASCATAS			DIE's				
			1	2	3	4	5
TNL1	50 $\mu\text{m}$	gm-máx (S)	3,70E-07	3,82E-07	4,64E-07	4,27E-07	4,18E-07
		VT (V)	2,85	2,67	2,66	2,78	2,7
		Sublimiar (mV/déc)	1,0778	858	817	902	837
	40 $\mu\text{m}$	gm-máx (S)	4,70E-07	4,90E-07	5,20E-07	5,22E-07	5,09E-07
		VT (V)	2,76	2,94	2,64	2,59	2,57
		Sublimiar (mV/déc)	1.102	1.036	899	943	653
	30 $\mu\text{m}$	gm-máx (S)	6,67E-07	7,09E-07	1,27E-06	7,10E-07	7,20E-07
		VT (V)	2,16	2,7	2,14	2,39	2,63
		Sublimiar (mV/déc)	659	873	707	773	650
	20 $\mu\text{m}$	gm-máx (S)	1,20E-06	1,25E-06	7,25E-07	1,26E-06	1,27E-06
		VT (V)	2,38	2,38	2,39	2,26	2,06
		Sublimiar (mV/déc)	618	723	773	671	1029
	10 $\mu\text{m}$	gm-máx (S)	4,09E-06	5,22E-06	4,50E-06	3,92E-06	8,51E-06
		VT (V)	1,53	1,9	1,36	1,59	2,50
		Sublimiar (mV/déc)	660	1062	523	489	660

Os possíveis erros associados a essas medidas podem ser:

- A difusão lateral do fósforo, que será melhor abordado no tópico sobre comprimento efetivo de canal.
- O limite de resolução da litografia é de 2  $\mu\text{m}$ ;
- As etapas de corrosão úmida para as definições das camadas, pois para dimensões muito pequenas as soluções químicas não

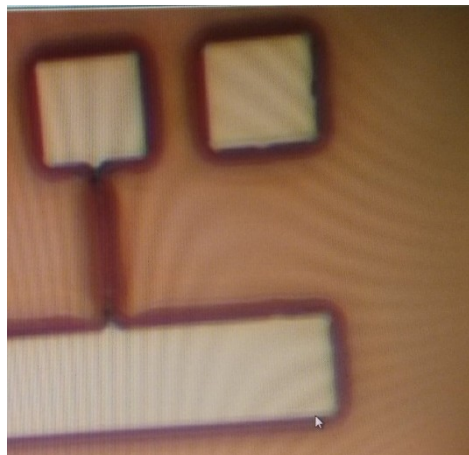


conseguem penetrar nas aberturas de janelas devido a tensão superficial do liquido como pode ser visualizado na Figura 39. (Yamamoto R. K., 2012)



*Figura 39- Problema da tensão superficial na corrosão úmida para dimensões de abertura reduzidas*

A seguir temos fotos que foram realizadas durante os processos de fabricação dos dispositivos. Onde podemos verificar falhas como linhas que não foram corroídas na Figura 40- Lâmina sem a definição de linhas abaixo de  $2\mu\text{m}$  e Figura 41- Lâmina com defeitos nas estruturas a) VDP3- não formou a linha da resistência ponte de  $5\mu\text{m}$ , b) TNL1- região de porta não formada para os transistor  $5\mu\text{m}$ .



*Figura 40- Lâmina sem a definição de linhas abaixo de  $2\mu\text{m}$*

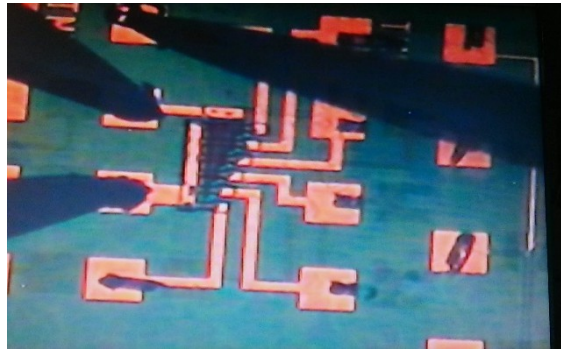


Figura 41- Lâmina com defeitos nas estruturas a) VDP3- não formou a linha da resistência ponte de 5  $\mu\text{m}$ , b) TNL1- região de porta não formada para os transistor 5  $\mu\text{m}$

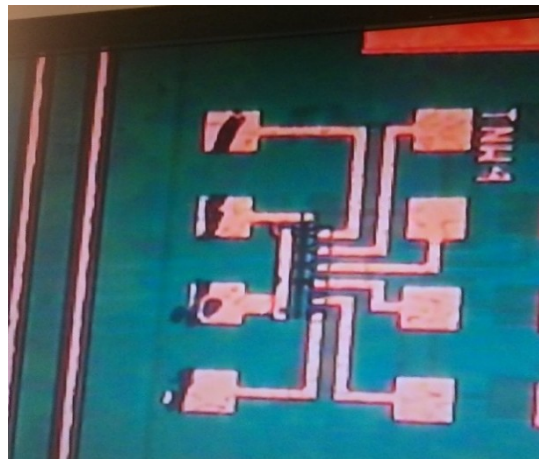


Figura 42- Lâmina com defeitos na estrutura TNW4: a) "curto-circuito" entre as linha de fonte e dreno; b) não há contato para os transistores de 2  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$

#### 4.2.1.5. Resumo e Conclusões:

Com os dados extraídos nas Tabela 11 e Tabela 12 calculou-se a média aritmética para todos os DIE's com seus respectivos desvios padrões:

Tabela 13- Transistores Isolados: Resumo dos principais parâmetros extraídos

TRANSISTORES ISOLADOS	T1			T3		
gm-máx (S)	2,32E-06	±	1,07E-06	1,57E-06	±	9,85E-09
VTH (V)	3,25	±	0,43	2,81	±	0,12
Sublimiar (mV/déc)	178	±	355	654	±	50

Tabela 14- Transistores Cascatas: Resumo dos principais parâmetros extraídos

CASCATAS					
TNL1	50 $\mu\text{m}$	gm-máx (S)	4,12E-07	±	3,36E-08
		VT (V)	2,73	±	0,07

	40 $\mu\text{m}$	Sublimiar (mV/déc)	930	$\pm$	90
		gm-máx (S)	5,02E-07	$\pm$	1,98E-08
		VT (V)	2,70	$\pm$	0,14
	30 $\mu\text{m}$	Sublimiar (mV/déc)	900	$\pm$	150
		gm-máx (S)	8,15E-07	$\pm$	2,28E-07
		VT (V)	2,40	$\pm$	0,23
	20 $\mu\text{m}$	Sublimiar (mV/déc)	760	$\pm$	80
		gm-máx (S)	1,14E-06	$\pm$	2,10E-07
		VT (V)	2,29	$\pm$	0,13
	10 $\mu\text{m}$	Sublimiar (mV/déc)	730	$\pm$	140
		gm-máx (S)	5,25E-06	$\pm$	1,69E-06
		VT (V)	1,78	$\pm$	0,40
	10 $\mu\text{m}$	Sublimiar (mV/déc)	680	$\pm$	200

A transcondutância obtida para os transistores foi conforme o esperado, pois sabemos que ela é inversamente proporcional ao comprimento de canal, ou seja, para canais menores temos uma transcondutância maior, e transistores com canais maiores a transcondutância tende a ser menor, como verificou-se na Figura 43. E conforme a equação a seguir:

$$g_m = \frac{W \cdot C_{OX} \cdot V_{DS}}{L} \times \mu_N$$

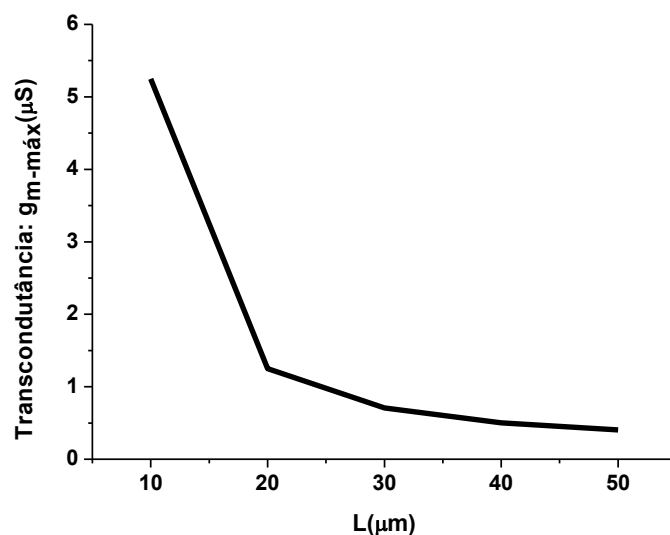


Figura 43- Cascata de Transistores: Relação da transcondutância em relação ao comprimento de canal

A inclinação de sublimiar obtida para os transistores ficaram muito altas chegando em alguns casos a quase 1 V/déc, ou seja, os transistores tinham

um comportamento muito lento, pois precisavam de uma variação acima de 500 mV/década para que a corrente aumentasse de 1 ordem de grandeza.

#### 4.2.1.5.1. Comprimento efetivo de canal:

O método para obtenção será o descrito no Capítulo 2 Transistores MOS: Extração de parâmetros: Comprimento efetivo de canal:

- 1) Extração das curvas ( $I_D \times V_G$ ), como feito anteriormente neste capítulo, Extração de parâmetros: Curva ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ):
- 2) Determina-se a máxima transcondutância ( $g_{m-m\acute{a}x}$ ) de cada transistor, como pode ser verificado na Tabela 14- Transistores Cascatas: Resumo dos principais parâmetros extraídos
- 3) Traça-se o gráfico de  $1/g_{m-m\acute{a}x}$  *versus* o comprimento de máscara  $L_M$ :

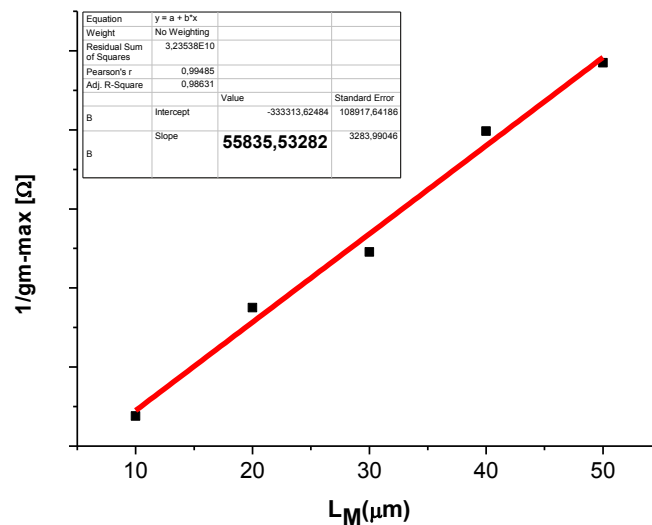


Figura 44- Curva  $1/g_{m-m\acute{a}x}$  em função do comprimento de canal de máscara

Podemos aproximar esta curva para uma reta, pois temos uma variação “linear”, assim obtemos a equação:

$$\frac{1}{g_{m-m\acute{a}x}} = 5,58 \times 10^4 \cdot \Delta L - 3,33 \times 10^5$$

- 4) Para a determinação do  $\Delta L$  adotamos  $\frac{1}{g_{m-m\acute{a}x}} = 0$ , portanto:

$$\Delta L = 5,97 \mu m$$

As etapas realizadas anteriormente foram realizadas para cada um dos DIE's e assim podemos determinar  $\Delta L$  como segue na tabela abaixo:

*Tabela 15-  $\Delta L$  obtido para cada um dos DIE's, através da cascata TNL1*

	DIE's				
	1	2	3	4	5
$\Delta L$ ( $\mu\text{m}$ )	6,16	6,82	6,07	4,61	6,79

Com o  $\Delta L$  para cada DIE podemos visualizar melhor o comprimento efetivo de canal para cada um dos transistores e assim compreender melhor porque não foi possível realizar as medidas para os transistores com comprimento de canal inferior a 5  $\mu\text{m}$ , conforme a tabela abaixo:

*Tabela 16- Cascatas de Transistores: comprimento efetivo de canal para cada um dos transistores em cada DIE's*

CASCATAS		DIE's				
	( $\mu\text{m}$ )	1	2	3	4	5
TNL1	50	43,84	43,18	43,93	45,39	43,21
	40	33,84	33,18	33,93	35,39	33,21
	30	23,84	23,18	23,93	25,39	23,21
	20	13,84	13,18	13,93	15,39	13,21
	10	3,84	3,18	3,93	5,39	3,21
	5	---	---	---	0,39	---
TNL2	10	3,84	3,18	3,93	5,39	3,21
	5	---	---	---	0,39	---
	4	---	---	---	---	---
	3	---	---	---	---	---
	2	---	---	---	---	---
	1	---	---	---	---	---
TNL3	3	---	---	---	---	---
	2,5	---	---	---	---	---
	2	---	---	---	---	---
	1,5	---	---	---	---	---
	1	---	---	---	---	---
	0,5	---	---	---	---	---

O comprimento efetivo de canal para as cascatas TNL2, TNL3 e o transistor de 5  $\mu\text{m}$  das cascatas TNL1 ficaram com valores negativos. O comprimento efetivo de canal é dado pelo comprimento de máscara da porta menos uma a componente  $\Delta L$ .

$$L_{ef} = L_M - \Delta L$$

Onde,  $L_M$  é comprimento de máscara e  $\Delta L$  é devido a difusão lateral dos dopantes das regiões de fonte e dreno para o interior do canal, e por imperfeições na litografia e corrosão como tratados anteriormente para as larguras efetivas de linhas, através das estruturas Cruz-Ponte.

Na curva característica ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ) do transistor de 5  $\mu m$  da cascata 1, verificou-se por intermédio da curva (Figura 35) que as regiões fonte e dreno estão em curto-circuito, devido a difusão lateral dos dopantes e acentuados por etapas posteriores como recozimento e oxidações.

A difusão lateral implica diretamente no comprimento efetivo do canal ( $L_{eff}$ ) e em dispositivos menores pode fazer com que ocorra um curto circuito da fonte e do dreno.

#### 4.2.1.5.2. Mobilidade efetiva dos portadores para baixo campo elétrico superficial:

Com os dados coletados anteriormente como transcondutância ( $g_m$ ), comprimento efetivo de canal, largura de canal e tensão de dreno e fonte  $V_{DS}=100Mv$ . Podemos determinar a mobilidade efetiva dos portadores para cada um dos transistores, através da fórmula:

$$\mu_N = \frac{W \cdot C_{OX} \cdot V_{DS}}{L} \times g_m$$

Assim temos a seguinte tabela com as mobilidades efetivas para cada um dos transistores:

TNL1					
	50 $\mu m$	40 $\mu m$	30 $\mu m$	20 $\mu m$	10 $\mu m$
$\mu_n$ ( $cm^2/Vs$ )	460	443	439	453	534

Figura 45- Mobilidade efetiva para cada um dos transistores da cascata

As mobilidades para os transistores foram satisfatórias mas não dentro dos padrões para a tecnologia MOS que é em torno de 200 a 300  $cm^2/Vs$ .



## 5. Conclusão:

Concluiu-se que o processo realizado com os parâmetros obtidos se considerados os objetivos educacionais foram satisfatórios, pois os dispositivos apresentaram um funcionamento regular e condizentes com a teoria.

As curvas ( $I_{DS} \times V_{DS}$ ) e ( $I_{DS} \times V_{GS}$ ) características dos transistores mostraram regiões de operação com boa definição. Apesar de apresentarem qualidade regular, não foi possível realizar medidas na maioria dos transistores cascatas. Devido a difusão lateral do fósforo das regiões de fonte e dreno no canal do transistor, consequentemente diminuindo o comprimento efetivo do mesmo, e assim não sendo possível fazer medidas em transistores de comprimento de canal inferiores 5 $\mu$ m.

A partir das estruturas Cruz-Ponte foi possível verificar as resistências de folha para cada um dos materiais e as larguras de linhas efetivas, verificando erros de processos. A resistência de folha para o silício policristalino apresentou um valor elevado e o filme não obteve uma boa uniformidade.

As estruturas Kelvin apresentaram valores elevados de resistividade de contato, mesmo fazendo as correções de áreas de contatos de acordo com os dados de largura de linha efetiva obtidos com as estruturas Cruz-Ponte, não foi possível obter valores satisfatórios. Pois durante as etapas de fabricação não foram realizadas etapas de processos de sinterização, que diminuiriam as resistências de contatos entre os diferentes materiais.

Como dito anteriormente, por serem processos educacionais foi possível obter os parâmetros mais importantes e abordados durante o curso. Sendo de forma didática muito satisfatório, pois assim podemos verificar a importância dos parâmetros de processo de cada etapa para um projeto final.



## 6. Referências Bibliográficas:

dos Santos, L. P. (2011). Dissertação. *Projeto de Máscaras com Dispositivos e Estruturas de Teste usando o Microwind*.

Manera, L. T. (2002). Dissertação. *Determinação de Regras de Projeto e de*. Campinas, São Paulo, Brasil.

Martino, J. A., Pavanello, M. A., & Verdonck, P. B. (2003). *Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

Millman, J., & Grabel, A. (1987). *Microelectrónica* (2ª Edição ed.). Lisboa, Portugal: McGRAW-HILL.

Nogueira, W. A. (2003). Estudo e obtenção de dielétricos de.

Rangel, R. C. (2014). Dissertação. *Sequência Simples de Fabricação de Transistores SOI NMOSFET*. São Paulo, SP, Brasil.

Sonnenberg, V. (2015). Apostila de Estruturas de Caracterização de Processos e Componentes-ECPC. São Paulo.

Swart, J. (s.d.). O Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor MOSFET. *O Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor MOSFET*. (UNICAMP, Ed.) Campinas. Acesso em 25 de 11 de 2015, disponível em <http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap06.pdf>

*Tecnologia de Fabricação de Circuitos Integrados (VLSI)*. (s.d.).

Yamamoto, K. R. (2013). *PFCS I: Contatos e Metalização*.

Yamamoto, R. K. (2012). *Apostilas de Etapas de Processo II*.

Zambom, L. d. (2012). *Apostila de Etapas de Processos I*.

Zurita, M. (2010). Transistores de Efeito de Campo. (UFPI, Ed.) Piauí, Piauí. Acesso em 25 de 11 de 2015, disponível em

[http://www.ufpi.br/subsiteFiles/zurita/arquivos/files/Eletronica-I\\_5-FET-parte-II-v1\\_01-prn.pdf](http://www.ufpi.br/subsiteFiles/zurita/arquivos/files/Eletronica-I_5-FET-parte-II-v1_01-prn.pdf)