Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica

# ESTUDO DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE DIODO SCHOTTKY DE POTÊNCIA

Dissertação apresentada ao Departamento de Semicondutores, Instrumentação e Fotônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp como parte dos requisitos para a Obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Autor: Pablo Rodrigo de Souza Orientador: Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart

Banca examinadora: Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart Prof. Dr. José Alexandre Diniz Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho

Março 2003

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

So89e	Souza, Pablo Rodrigo Estudo de processo de fabricação de diodo Schottky de potência / Pablo Rodrigo de SouzaCampinas, SP: [s.n.], 2003.
	Orientador: Jacobus Willibrordus Swart. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	<ol> <li>Processos de fabricação.</li> <li>Schottky, Diodos de barreira de.</li> <li>Semicondutores de potência.</li> <li>Tungstênio.</li> <li>Alumínio.</li> <li>Microeletrônica.</li> <li>Swart, Jacobus Willibrordus.</li> <li>Universidade Estadual de Campinas.</li> <li>Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</li> <li>Título.</li> </ol>

A Gleice, meus pais Sebastião e Neuza e ao meu irmão Rhuan

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes entidades:

- Fapesp Auxílio Bolsa de Mestrado;
- CCS/Unicamp;
- DSIF/Unicamp;
- IFGW/Unicamp.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por sempre estar a meu lado ao longo de minha caminhada.

A meus Pais Sebastião e Neuza por sempre me apoiarem em todas os momentos da minha vida.

Ao professor Jacobus por ter me dado a oportunidade de trabalharmos juntos, pela amizade e as discussões produtivas.

Ao professor Diniz pelo apoio, atenção e amizade.

A Claudia e ao Prof. Stanislav pelas corrosões com plasma.

A todos os técnicos e funcionários do CCS, em especial ao Godoy, Mara e Eudoxio, cujo apoio foi determinante na conclusão do trabalho.

Ao pessoal do LPD-IFGW/UNICAMP, Antônio Celso Ramos e Antônio Augusto de Godoy von Zuben, que participaram da fabricação do diodo Schottky.

Ao CenPRA pela fabricação do conjunto de máscaras e pelas análises EDX.

Ao professor Sebastião G. dos Santos Filho(USP) pelas análises RBS.

Ao José Alfredo Frayman e Marcelo Assaoka Hayashi (Unicamp) pelas análises XRD.

A empresa Aegis pelo incentivo no trabalho.

Ao Gorni pela amizade e companhia durante estes anos na Unicamp.

A todos os professores que participaram de minha formação.

A todos os amigos da Escola de engenharia de Lins que também desenvolvem trabalhos no CCS.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

#### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo de processo de fabricação de diodo Schottky de potência. Foram construídos diodos com contato Schottky de Alumínio e Tungstênio. Os tipos de estrutura de diodo Schottky fabricados foram: Diodo Schottky Convencional, com sobreposição de metal, com anel de guarda e com grade de linhas de difusão. Para verificarmos o comportamento estático e dinâmico dos dispositivos, foram extraídos os parâmetros das curvas IxV e de transitório. Foram obtidos diodos Schottky de Tungstênio com fator de idealidade em torno de 1,03, corrente reversa de 48 $\mu$ A (para V=-20V), tensão de ruptura em torno de -20 Volts, queda de tensão direta de 0,49V (para I<sub>F</sub>=100mA) e altura de barreira Schottky de 0,67eV. Para avaliar a qualidade do diodo Schottky fabricado, foi feita uma comparação do mesmo com um diodo comercial.

## Abstract

This work is a study of fabrication process for power Schottky diode. Aluminum and Tungsten were used as metal Schottky contact. The types of fabricated Schottky diodes were: Convencional Schottky diode, with metal overlap, with p-n guard ring and with pn junction grid. Parameters from IxV and transient curves were extracted to verify the static and dinamic characteristics of the devices. Schottky diodes, with Tungsten as Schottky barrier metal, presented ideality factor about 1.03, leakage current of 48µA (with V=-20V), breakdown voltage about –20 volts, foward drop voltage of 0.49V (with I<sub>F</sub>=100mA) and barrier height of 0.67eV. A comparison with a comercial Schottky diode is made to evaluate the quality of the fabricated device.

## Lista de Símbolos

- V Tensão de polarização
- n Fator de idealidade
- I<sub>F</sub> Corrente de condução direta
- $E_g Banda de energia proibida$
- R<sub>s</sub> Resistência série
- $\phi_{\rm B}$  Altura de barreira de potencial do metal para o semicondutor
- $\chi$  Afinidade Eletrônica
- $\phi_S$  Função trabalho do semicondutor
- $\phi_M$  Função trabalho do metal
- E<sub>F</sub> Nível de Fermi
- E<sub>V</sub> Nível máximo de energia da banda de valência
- E<sub>C</sub> Nível mínimo de energia da banda de condução
- q Carga do elétron
- $\phi_0$  Nível de energia neutro dos estados de superfície do semicondutor
- $\phi_{Bn}$  Altura de barreira de potencial do metal para o semicondutor tipo n
- $\phi_{Bp}$  Altura de barreira de potencial do metal para o semicondutor tipo p
- $Q_{SS}$  Carga efetiva equivalente a estados de superfície do semicondutor
- Q<sub>M</sub> Carga no metal
- Q<sub>D</sub> Carga na região de depleção
- V<sub>bi</sub> Potencial interno da junção metal-semicondutor.
- $\delta$  Separação entre metal e semicondutor
- W Largura da região de depleção
- $\epsilon_s$  Permissividade elétrica do semicondutor
- V<sub>t</sub> Tensão térmica
- N<sub>A</sub> Concentração de impurezas aceitadoras
- N<sub>D</sub> Concentração de impurezas doadoras
- E<sub>M</sub> Campo elétrico máximo na superfície da junção metal-semicondutor
- N<sub>C</sub> Densidade efetiva de estados na banda de condução
- Q<sub>S</sub> Carga na região de depleção
- С
- C Capacitância da região de depleção
- V<sub>J</sub> Tensão na junção metal-semicondutor
- T Temperatura
- k Constante de Boltzman
- h Constante de Plank
- A Constante de Richardson ideal para interface metal-vácuo
- E Campo elétrico
- $\mu$  Mobilidade dos portadores de carga
- $v_R$  Velocidade de recombinação efetiva entre o máximo da barreira de potencial e a interface metal-semicondutor
- $v_D$  Velocidade de difusão efetiva na região de depleção na interface metal-semicondutor
- S Densidade de potência da lâmpada da fotoalinhadora
- X<sub>J</sub> Profundidade de junção da difusão
- P Potência

## Sumário

1 – Introdução Geral	1
1.1 – Introdução	1
1.2 – Objetivo da dissertação	6
1.3 – Organização da dissertação	6
2 – CARACTERÍSTICAS DE DIODO SCHOTTKY	7
2.1 – Introdução	7
2.2 – Contato Metal Semicondutor	7
2.3 – Polarização Da Junção Metal Semicondutor	.11
2.4 – Transporte da Corrente Elétrica através da junção Met	AL
SEMICONDUTOR	13
2.5 - Técnicas de otimização das características elétricas de dio	DO
SCHOTTKY	18
3 – Projeto do diodo Schottky	.24
3.1 – Introdução	.24
3.2 – Estruturas de diodo Schottky	.24
3.3 – DIMENSIONAMENTO DOS DIODOS A SEREM FABRICADOS	.26
3.4 – Projeto das máscaras	.32
3.5 – DEFINIÇÃO DOS DISPOSITIVOS A SEREM FABRICADOS	.36
4 – Processos envolvidos na construção do diodo Schottky	.38
4.1 – Introdução	.38
4.2 – LIMPEZA PADRÃO RCA	.38
4.3 – Oxidação térmica para obtenção de óxido de campo	.38
4.4 – Fotogravação do óxido de campo	.39
4.5 – Processos de corrosão de óxido de Silício	.39
4.6 - Obtenção da região do tipo p <sup>+</sup> e dopagem nas costas da lâmina pa	RA
FORMAÇÃO DE CONTATO ÔHMICO	.40
4.7 – Obtenção da região de contato metálico	.41
4.8 – Deposição de Tungstênio (W) por <i>Sputtering</i>	.42
4.9 – Obtenção do siliceto de Tungstênio (WSi <sub>2</sub> )	.43

4.10 – Deposição de Alumínio e Níquel por evaporação43
4.11– Legenda
4.12 – CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO
4.13 – Diodo Schottky convencional com Siliceto de Tungstênio
(DICONWSi2)
4.14 – Diodo Schottky convencional com Alumínio/Tungstênio
(DICONAIW)
4.15 – Diodo Schottky convencional com Níquel/Tungstênio
(DICONNiW)
4.16 – Diodo Schottky convencional com Alumínio (DICONAI)53
4.17 – Diodo Schottky com Sobreposição de Metal
4.18 – Diodos Schottky com anel de guarda e grade de linhas de
DIFUSÃO
4.19 – Diodo Schottky com implantação de Fósforo para diminuir a
RESISTÊNCIA DE CONTATO DO CÁTODO
5 – MEDIDAS ELÉTRICAS DOS DIODOS SCHOTTKY FABRICADOS
5.1 – Introdução
5.2 – Extração dos parâmetros do diodo Schottky utilizando as
CARACTERÍSTICAS I X V
5.3 – Medidas IxV
5.3.1 – Curvas do Diodo Schottky convencional DICONWS1266
5.3.2 – Curvas do Diodo Schottky convencional DICONALW68
5.3.3 – Curvas do Diodo Schottky convencional DICONNiW70
5.3.4 – Curvas do Diodo Schottky convencional DICONAL72
5.3.5 – Curvas do Diodo Schottky com sobreposição de metal
DISM
5.3.6 – Curvas do Diodo Schottky com Anel de guarda DIAG78
5.3.7 – Curvas do Diodo Schottky com grade de linhas de difusão
DIGLD
5.3.8 – Diodo Schottky com implantação de fósforo DIIMP85
5.4 – Medidas de transitório

5.5 – Comparação entre diodo Schottky DICONALW e diodo Schottky
COMERCIAL
6 – Conclusões
REFERÊNICAS
APÊNDICE A - FORÇA IMAGEM
APÊNDICE B - ESTUDO PARA OBTENÇÃO DE FILME DE SILICETO DE TUNGSTÊNIO (WSI2) PARA
CONTATO SCHOTTKYB.1
B.1 – IntroduçãoB.1
B.2 - Procedimento Experimental
B.3 – ANÁLISE DAS AMOSTRAS
B.4 – Conclusão das análises para caracterização do processo de
FORMAÇÃO DE SILICETO DE TUNGSTÊNIOB.4
APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO DIODO COMERCIALC.1

#### 1 – INTRODUÇÃO GERAL

#### 1.1 – Introdução

Os dispositivos semicondutores de potência desempenham um papel fundamental nos sistemas eletrônicos. Além de controlar valores elevados de potência é necessário que haja um bom rendimento destes dispositivos, aumentando a eficiência dos equipamentos para o melhor aproveitamento da energia elétrica, visto que esse também é um recurso limitado para os seres humanos. Estes dispositivos são aplicados em diversos tipos de sistemas, como ilustra a figura 1.1.1, que mostra os níveis de corrente e tensão para os diversos tipos de aplicações<sup>[1]</sup>. Para tensões abaixo de 100V, as principais aplicações são: fontes de alimentação para computadores e telecomunicações, e eletrônica automotiva.



Figura 1.1.1 – Níveis de tensão e corrente para diversos tipos de aplicações dos dispositivos de potência<sup>[1]</sup>.

O volume de dados processados pelos sistemas de informação, sistemas microprocessados, tem crescido muito nos últimos tempos, com estes sistemas operando em freqüências cada vez maiores. Com o aumento da frequência mais e mais corrente é drenada, com os níveis de corrente crescendo quase na mesma velocidade da freqüência. Para diminuir a potência dissipada nos dispositivos, é necessário diminuir a tensão de operação destes dispositivos (figura 1.1.2), pois como a potência é proporcional ao quadrado da tensão, diminuindo a tensão pela metade, a potência é diminuída de um quarto. Assim surgem sistemas trabalhando com tensões baixas (3.6V, 1.8V) controlando cargas de

algumas centenas de amperes, com tolerância de apenas algumas dezenas de milivolts, como por exemplo, a última geração dos processadores Intel que operam com mais de 100 amperes de corrente em plena carga<sup>[2]</sup>.



Figura 1.1.2 – Níveis de tensão e corrente de operação dos microprocessadores Intel em função do tempo<sup>[2]</sup>.

Com a proliferação de computadores pessoais, o aumento da eficiência das fontes de alimentação é essencial para reduzir perdas de energia, resultando na redução do tamanho e peso do equipamento, o que é atrativo para os consumidores<sup>[1]</sup>. Outra área que tem expandido muito nos últimos tempos é o uso de dispositivos de potência em eletrônica automotiva, impulsionado pela introdução de sistemas de controle de potência nas cargas que fazem parte do automóvel (lâmpadas, motores, etc). Estes sistemas operam em altas freqüências devido ao ganho de eficiência e redução do tamanho de certos componentes, como indutores e transformadores para fontes chaveadas. Com isso há a necessidade de dispositivos semicondutores que operem em alta freqüência, que sejam capazes de conduzir elevadas correntes e suportar tensões relativamente altas.

Retificadores de potência com capacidade de operar com tensões até 100V são necessários em fontes chaveadas e eletrônica automotiva. O primeiro dispositivo utilizado em tais aplicações foi o diodo de germânio<sup>[3]</sup>. Este dispositivo apresentava alguns problemas como uma alta corrente reversa, associada à pequena largura da banda de energia proibida ( $E_g=0,66eV$ ), levando à substituição deste dispositivo por diodos Pin.

Esse tipo de diodo apresenta alta quantidade de carga armazenada na transição da polarização direta para a reversa resultando numa alta corrente de transitório, da mesma ordem que a corrente na polarização direta. Este transitório resulta numa dissipação de potência que limita a freqüência de chaveamento deste dispositivo.

O diodo Schottky, nos anos 70, foi desenvolvido para suprir os problemas associados com o diodo Pin. Este dispositivo apresenta uma queda de tensão em polarização direta da ordem de 0,55V, reduzindo a potência dissipada no estado de condução direta do dispositivo, quando comparado com o diodo Pin, o qual apresenta uma queda de tensão da ordem de 1V nestas condições. Assim não há a necessidade de sistemas sofisticados de refrigeração, para que o componente não seja danificado. Além disso, o diodo Schottky tem a vantagem de trabalhar em alta freqüência por não apresentar corrente de transitório no chaveamento.

A queda de tensão no diodo é importante quando seu valor não pode mais ser considerado desprezível no circuito onde este dispositivo é empregado. Por exemplo, numa fonte chaveada de potência com tensão nominal de 5V, uma queda de tensão de 0,55V

representa uma perda de 10% em rendimento<sup>[4]</sup>. Este fato torna-se mais importante quando as tensões são ainda menores, da ordem de 3,6V e 1,8V, utilizadas na alimentação de processadores nos computadores pessoais e outras aplicações. Com isso fica claro que além de ter um dispositivo que opere em alta freqüência, é importante que a queda de tensão neste dispositivo seja mínima.

Uma limitação nas características do diodo Schottky é a alta corrente reversa, resultando em baixos valores de tensão reversa de ruptura. Algumas técnicas são utilizadas para aumentar o valor da tensão de ruptura, como a implementação de anel de guarda, tratamento da superfície do silício, ajuste nas características do processo de deposição do metal de contato Schottky, entre outras.

Diodos com elevado valor de tensão de ruptura podem ser obtidos utilizando outros materiais semicondutores como o arseneto de gálio (GaAs), carbeto de silício (SiC)<sup>[5]</sup>, e outros, devido ao valor maior da banda de energia proibida. Porém para aplicações de baixa tensão, menor que 100V, o diodo Schottky com substrato de silício é o mais adequado, devido ao menor custo do processo de fabricação e facilidade de trabalhar com o silício em relação com esses outros materiais.

Assim, o diodo Schottky de potência deve apresentar tensão de ruptura compatível com a aplicação onde será empregado, valores baixos de queda de tensão direta e de corrente de condução reversa. Estas duas últimas características do dispositivo são essenciais para sistemas de alto rendimento.

O diodo Schottky convencional, também conhecido como diodo de barreira Schottky, é formado pelo contato entre um metal e um substrato com uma camada epitaxial de baixa dopagem, onde será feito o contato Schottky (anodo do diodo). O substrato é altamente dopado para minimizar a resistência série do dispositivo e estabelecer um bom contato ôhmico no cátodo do diodo. Algumas características importantes deste dispositivo são: resistência série, altura da barreira de potencial e corrente de condução reversa.

A resistência série e a altura da barreira de potencial, também chamada de barreira Schottky, determinam a queda de tensão direta no diodo para determinado valor de corrente de condução. As figuras 1.1.3, 1.1.4 e 1.1.5 mostram a influência da resistência série e da altura da barreira nas características IxV direta e reversa do diodo.

As figuras mostram, que quanto maior o valor da resistência série do dispositivo, maior é a queda de tensão para um determinado valor de corrente de condução. No caso da altura da barreira de potencial, quanto menor seu valor menor é a queda de tensão direta. Porém a corrente de condução reversa é inversamente proporcional a altura da barreira de potencial, ou seja, quanto menor seu valor maior é a corrente de condução reversa. Assim é preciso estabelecer um compromisso, entre a queda de tensão direta e corrente de condução reversa, na escolha de uma barreira de potencial adequada, pois a potência dissipada no dispositivo depende desses valores, e é evidente que quanto menor forem, menos potência será dissipada no dispositivo, podendo este trabalhar com correntes mais elevadas.



Figura 1.1.3 – Curvas IxV de diodo Schottky para diferentes valores de resistência série.



Figura 1.1.4 – Curvas IxV de diodo Schottky para diferentes valores de altura de barreira Schottky.



Figura 1.1.5 – Curvas Log(I) x V reversa de diodo Schottky para diferentes valores de altura de barreira Schottky.

Outra característica importante do diodo Schottky é a possibilidade de operar em altas frequências, já que a corrente neste dispositivo é principalmente resultante do fluxo de portadores majoritários. A figura 1.1.5 compara um diodo PN e um diodo Schottky no chaveamento com uma onda quadrada de 5kHz.



Figura 1.1.5 – Curvas de transitório dos diodos PN e Schottky para onda quadrada de frequência de 5kHz.

Podemos observar que a parte crítica no comportamento dinâmico do diodo é no desligamento. O diodo Schottky acompanha a forma de onda do gerador, pois como não apresenta portadores minoritários o seu tempo de desligamento é muito rápido (da ordem de dezenas de nanosegundos). No caso do diodo PN, antes do diodo desligar é necessário remover os portadores minoritários armazenados, para que a tensão no diodo comece a cair<sup>[6]</sup>. Assim podemos observar na figura 1.1.5 que o diodo PN não é adequado para operar em alta frequência, pois, ele não consegue acompanhar a variação de tensão da fonte, conduzindo boa parte do semiciclo negativo, onde o dispositivo fica diretamente polarizado.

Maiores detalhes sobre os parâmetros do diodo Schottky serão estudados nos próximos capítulos.

#### 1.2 – Objetivo da dissertação

O objetivo deste trabalho é projetar e estabelecer uma sequência de processos de fabricação de diodo Schottky para aplicações de potência. As principais etapas do trabalho são: determinar o tipo de substrato, o metal de contato Schottky e a melhor estrutura a ser empregada. Após a fabricação, extrair os parâmetros elétricos e verificar o comportamento estático e dinâmico do dispositivo. Finalmente testar a repetibilidade fazendo uma segunda corrida com o melhor processo obtido.

#### 1.3 – Organização da dissertação

A dissertação foi dividida em seis capítulos. O capítulo 2 estuda os parâmetros do diodo Schottky, as diversas estruturas e as características de cada uma.

O capítulo 3 apresenta as etapas do projeto do diodo Schottky. Neste capítulo é feito o dimensionamento do substrato e o projeto das máscaras utilizadas no processo de fabricação do diodo.

O capítulo 4 descreve os processos de fabricação do diodo Schottky, detalhando cada etapa do processo, e apresenta o melhor processo de fabricação obtido.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos nas medidas elétricas, medidas IxV direta, reversa e medidas de transitório, para caracterização dos dispositivos fabricados.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

#### 2 – CARACTERÍSTICAS DO DIODO SCHOTTKY

#### 2.1 – Introdução

Neste capítulo serão estudadas as características do dispositivo de contato Schottky como a formação da barreira Schottky e suas propriedades, os fenômenos de transporte de corrente, a polarização da junção. Também serão vistas as diversas estruturas de diodo Schottky, destacando as propriedades de cada uma delas.

#### 2.2 – CONTATO METAL SEMICONDUTOR

As primeiras experiências feitas com contato retificador metal semicondutor datam de 1874, quando foi verificado que a resistência à passagem de corrente elétrica dependia da polaridade da tensão aplicada e das condições da superfície de contato. Desde 1904 o contato retificador, também conhecido como contato Schottky, encontrou várias aplicações, como por exemplo, o transistor de ponta<sup>[1]</sup>, diodo de barreira Schottky, transistor Mesfet e outros.

O contato metal semicondutor apresenta algumas características importantes como baixa queda de tensão quando em condução, alta velocidade de comutação e carga de portadores minoritários armazenada quase nula na comutação, o que proporciona sua utilização em aplicações de alta freqüência e sistemas que trabalham com baixo nível de tensão. Um dispositivo com estas características pode suprir várias necessidades como aplicações em telecomunicações, fontes de alto rendimento, células solares e outras. Devido à sua importância, o contato metal semicondutor tem sido extensivamente estudado.

O estudo das características do contato metal semicondutor pode ser feito através do diagrama de bandas de energia dos sólidos<sup>[2]</sup>. A figura 2.2.1 mostra o aspecto do diagrama de bandas do contato metal semicondutor ideal. A figura mostra que a função trabalho do metal  $\phi_M$  é maior que a função trabalho do semicondutor  $\phi_S = (\gamma + E_c)$  ou ainda, o nível de Fermi do semicondutor está em um nível mais alto de energia que o nível de Fermi do metal. Neste caso, antes do contato físico ser estabelecido, os elétrons do semicondutor estão em um nível de energia mais alto que os elétrons do metal. Quando os materiais são ligados através de um fio condutor, o sistema busca a situação de equilíbrio, onde os elétrons do semicondutor e do metal ficam num mesmo nível de energia, igualando os níveis de Fermi dos materiais. Assim, elétrons da superfície do semicondutor são transportados para o metal, deixando íons positivos para manter a neutralidade do sistema, formando uma região de depleção. Nesta região há uma concentração menor de elétrons do que no substrato, resultando numa inclinação das bandas de energia, de valência e de condução, na região de depleção. No caso de um semicondutor tipo n, as bandas de energia próxima à superfície, inclinam no sentido de que a banda de condução se afaste do nível de Fermi, indicando que a concentração de elétrons nesta região é menor. Se à distância entre os materiais for menor, mais elétrons são transportados para o metal. O aumento da concentração de elétrons que vieram do semicondutor faz com que a carga negativa da superfície do metal aumente, e ao mesmo tempo os elétrons que deixaram o semicondutor aumentam a carga positiva da região de depleção, aumentando a largura dessa região. Com isso, o encurvamento das bandas de energia aumenta. A situação limite é quando a distância entre os materiais for nula e então a quantidade máxima de elétrons foi transportada para o metal, resultando numa inclinação máxima das bandas de energia. Assim, pode se observar a formação de uma barreira de potencial que os elétrons devem vencer para passar do semicondutor para o metal. Observe que quanto maior for a função trabalho do metal, maior será a altura da barreira de potencial do metal para o semicondutor formada, pois neste caso os níveis de Fermi dos materiais ficam mais afastados. A altura máxima da barreira de potencial para o semicondutor tipo n e tipo p é dada pelas equações 1 e 2 respectivamente<sup>[2]</sup>.



Figura 2.2.1 – Diagrama de bandas da junção metal semicondutor sem estados de superfície, para semicondutor tipo n e metal com função trabalho maior que do semicondutor<sup>[2]</sup>.

No caso da junção metal-semicondutor real, existem estados na superfície do semicondutor, provenientes de defeitos cristalográficos, incluindo a descontinuidade da rede, ou impurezas absorvidas na superfície<sup>[2],[3]</sup>. A figura 2.2.2 mostra o diagrama de bandas da junção metal semicondutor com estados na superfície. Pode se observar na figura 2.2.2a que estes estados estão espalhados na superfície do semicondutor e possui um nível neutro,  $\phi_0$ , ou seja, a posição que o nível de Fermi deve ocupar para que a carga efetiva dos estados de interface seja nula. Se  $\phi_0$  estiver acima do nível de Fermi, os estados da superfície apresentam uma carga efetiva (Q<sub>SS</sub>) positiva. No balanço de cargas do sistema, carga no metal(Q<sub>M</sub>), carga na região de depleção(Q<sub>D</sub>) e carga na superfície(Q<sub>SS</sub>), temos que:  $Q_M + Q_D + Q_{SS} = 0$ . Portanto se  $Q_{SS}$  tem valor positivo,  $Q_D$  tem valor menor para balancear a carga negativa na superfície do metal. Com isso a largura da região de depleção é menor e consequentemente o encurvamento das bandas de energia é menor. Como a altura da barreira de potencial (q.V<sub>bi</sub>) é proporcional ao encurvamento das bandas, ela também é menor. Essa redução na barreira de potencial equivale ao nível  $\phi_0$  ser "puxado" para baixo para se igualar ao nível de Fermi. Se em outro caso  $\phi_0$  estiver abaixo do nível de Fermi, os estados da superfície apresentam uma carga efetiva negativa. Neste caso é necessário uma carga positiva, Q<sub>D</sub>, maior para balancear a carga negativa. Dessa forma a região de depleção e o encurvamento das bandas é maior, resultando no aumento da altura da barreira de potencial (q.V<sub>bi</sub>). Se a densidade de estados na superfície for muito alta, Q<sub>SS</sub> será suficiente para compensar a carga negativa do metal. Assim a altura da barreira de potencial é dada pela equação 3.

$$\phi_B = \frac{E_g}{q} - \phi_o \qquad \qquad \text{Equação 3}$$

Neste caso o nível de Fermi é fixo no nível  $\phi_0$  e a altura da barreira de potencial é independente da função trabalho do metal, sendo função das características da superfície do semicondutor. Este caso é conhecido como o limite de Bardeen.



Figura 2.2.2 – (a) Nível neutro ( $\phi_o$ ) dos estados de superfície<sup>[3]</sup>. (b) Diagrama de bandas da junção metal semicondutor com estados de superfície, para semicondutor tipo n<sup>[2]</sup>.

A tabela 1 mostra a função trabalho ( $\phi_M$ ) de alguns metais e a altura da barreira de potencial medida em barreiras Schottky formadas com Silício (Si), Germânio (Ge) e Arseneto de Gálio (GaAs)<sup>[4]</sup>.

Tabela 1 – Função trabalho dos metais e a altura de barreira Schottky medida em Germânio, Silício e Arseneto de Gálio.

	Ag	Al	Au	Cr	Ni	Pt	W	WSi <sub>2</sub>
$\phi_{M}(V)$	4,30	4,25	4,80	4,50	4,50	5,30	4,60	-
n-Ge	0,54	0,48	0,59	-	0,49	-	0,48	-
p-Ge	0,50	-	0,30	-	-	-	-	-
n-Si	0,78	0,72	0,80	0,61	0,61	0,90	0,67	0,65
p-Si	0,54	0,58	0,34	0,50	0,51	-	0,45	-
n-GaAs	0,88	0,80	0,90	-	-	0,84	0,80	-
p-GaAs	0,63	_	0,42	-	-	_	-	_

Podemos perceber que os valores da tabela 1 para a altura da barreira Schottky não coincidem com os valores obtidos se usarmos as equações 1 ou 2. Por exemplo, de acordo com a equação 2, para o tungstênio em silício tipo n a altura da barreira de potencial é 0,55V ( $\phi_B = 4,60 - 4,05 = 0,55$ , onde 4,05 é a afinidade eletrônica do Silício). Isto ocorre porque estas equações consideram que os materiais que formam a junção são puros, que não ocorre interação e nem a formação de uma camada na interface devido à reação química entre o semicondutor e o metal, e que há ausência de estados na superfície do

semicondutor( $Q_{SS}=0$ ). Como na junção real isto não é verdadeiro, há uma diferença entre a altura de barreira de potencial calculada e a medida<sup>[4]</sup>.

A largura da região de depleção formada na junção metal semicondutor é dada pela equação 4<sup>[2]</sup>.

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_s}{q \cdot N_D} \cdot (V_{bi} - V - V_t)}$$
 Equação 4

Onde:

V<sub>bi</sub>- potencial interno da junção metal semicondutor.

 $\varepsilon_s$  – permissividade elétrica do semicondutor.

q – carga elétrica.

V<sub>t</sub> – Tensão térmica (25,9 mV, para T=300K)

V – tensão aplicada no dispositivo.

N<sub>D</sub>- Concentração de impurezas doadoras.

O campo elétrico máximo na superfície (E<sub>M</sub>) pode ser calculado pela equação 5.

$$E_{M} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_{D}}{\varepsilon_{s}} \cdot \left(V_{bi} - V - V_{t}\right)}$$
 Equação 5

Onde  $V_{bi}$ é o potencial interno da junção dado pela equação 6.

$$V_{bi} = \phi_B - V_t \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$
 Equação 6

 $N_C$  – Densidade efetiva de estados na banda de condução (2,82e19 cm<sup>-3</sup>,para silício à temperatura ambiente)

A carga e a capacitância na região de depleção por unidade de área é dada respectivamente pelas equações 7 e  $8^{[2]}$ .

$$Q_{SC} = \sqrt{2 \cdot q \cdot N_D \cdot \varepsilon_s \cdot (V_{bi} - V - V_t)}$$
 Equação 7

$$C = \frac{dQ_{sc}}{dV} = \sqrt{\frac{q \cdot \varepsilon_s \cdot N_D}{2 \cdot (V_{bi} - V - V_t)}} = \frac{\varepsilon_s}{W}$$
Equação 8

Se a equação 8 for escrita na forma  $1/C^2$  e então for derivada, podemos determinar a concentração de impurezas doadoras (N<sub>D</sub>) pela equação  $9^{[2]}$ .

$$N_D = \frac{2}{q \cdot \varepsilon_s} \cdot \left[ -\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right]$$
 Equação 9

Desta maneira a concentração de impurezas no substrato pode ser obtida através da derivada do gráfico  $1/C^2xV$ , e para N<sub>D</sub> constante na região de depleção, o gráfico obtido é uma reta.

#### 2.3 – POLARIZAÇÃO DA JUNÇÃO METAL SEMICONDUTOR

Quando uma tensão é aplicada na junção Schottky, ocorre uma mudança no valor da altura da barreira de potencial do semicondutor para o metal ( $V_J$ ). A figura 2.3.1 ilustra esta situação para a junção Schottky polarizada diretamente<sup>[5]</sup>.



Figura 2.3.1 – Polarização direta da junção Schottky. A linha pontilhada refereÀse a banda de energia do semicondutor sem polarização na junção e a linha continua representa as bandas de energia com polarização na junção<sup>[5]</sup>.

Para a junção Schottky polarizada diretamente,  $V_J$  diminui, aumentando a quantidade de elétrons com energia suficiente para passar do semicondutor para o metal. No caso dos elétrons que fluem do metal para o semicondutor, a altura da barreira de potencial não muda de valor (desconsiderando os efeitos de diminuição da barreira de potencial), e a corrente que flui neste sentido não muda de valor. Portanto, para uma junção polarizada diretamente, a corrente elétrica na junção aumenta rapidamente com a tensão aplicada, devido ao aumento do fluxo de elétrons do semicondutor para o metal.

No caso da junção polarizada reversamente,  $V_J$  aumenta. A figura 2.3.2 ilustra esta situação.



Figura 2.3.2– Polarização reversa da junção Schottky. A linha pontilhada refereÀse a banda de energia do semicondutor sem polarização na junção e a linha continua representa as bandas de energia com polarização na junção<sup>[5]</sup>.

Neste caso a energia necessária para os elétrons do semicondutor vencerem a barreira de potencial aumenta e a quantidade de elétrons com esta energia diminui. Desta maneira a quantidade de elétrons que fluem do semicondutor para o metal com energia suficiente para vencer esta barreira de potencial é muito pequena. Assim a corrente resultante na junção polarizada reversamente é predominantemente devida ao fluxo de elétrons do metal para o semicondutor. Se a altura da barreira de potencial do metal para o semicondutor tivesse valor fixo, a corrente elétrica na junção deveria assumir um valor constante. Porém isto não ocorre, ou seja, com o aumento da tensão reversa aplicada na junção ocorre a diminuição da altura da barreira de potencial ( $\phi_B$ ), aumentando o valor da corrente reversa. Este comportamento de não saturação da corrente reversa foi explicado inicialmente como sendo resultado do efeito da força imagem (apêndice A). Mas experimentos revelaram que apenas o efeito da força imagem seria insuficiente para explicar este aumento da corrente reversa e outros efeitos foram constatados influenciar na diminuição do valor da barreira de potencial do metal para o semicondutor<sup>[6]</sup>. A densidade de estados na superfície do semicondutor e a presença de uma camada semi-isolante de óxido ou outro contaminante na junção entre semicondutor e metal não reagente, (Al, Au e outros), influenciam no valor da altura da barreira de potencial ( $\phi_B$ ). A altura da barreira de potencial pode ser calculada pela equação  $10^{[6]}$ .

$$\phi_B = \gamma (\phi_M - \chi_S) + (1 - \gamma) \cdot (E_g - \phi_0) - \alpha \cdot E_M \qquad \text{Equação 10}$$

O fator  $\gamma$  na equação acima leva em consideração os efeitos da densidade de estados na superfície do semicondutor. Além disso, estão incorporados nos fatores de correção  $\gamma$  e  $\alpha$  as propriedades da camada na interface no contato metal/semicondutor. Estes fatores são dados pelas equações 11 e 12<sup>[6]</sup>.

$$\gamma = \left(1 + \frac{2 \cdot q \cdot d \cdot n_s}{\varepsilon_i}\right)^{-1}$$
Equação 11  
$$\alpha = \gamma \cdot d \cdot \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_i}$$
Equação 12

Onde  $\varepsilon_s$  é a permissividade do semicondutor, d é a espessura e  $\varepsilon_i$  é a permissividade da camada na interface metal semicondutor. Esta camada deve ser bem fina para que os elétrons possam tunelar através dela. Podemos observar na equação 11 que quanto mais alto o valor da densidade de estados na superfície do semicondutor (n<sub>s</sub>) o fator  $\gamma$  se aproxima do zero. Da mesma maneira, na equação 10 quando o fator  $\gamma$  se aproxima do zero, a altura da barreira de potencial é predominantemente determinada pelo 2° termo da equação, ou seja, a altura da barreira de potencial fica independente da função trabalho do metal, pois neste caso o nível de Fermi é fixo num valor  $\phi_0$  acima da banda de valência. Por outro lado, quanto mais baixa a densidade de estados na superfície do semicondutor, mais o fator  $\gamma$  se aproxima de 1 e a altura da barreira de potencial é predominantemente determinada pelo 1° termo da equação 10, ou seja, o valor da altura da barreira de potencial é dependente da função trabalho do metal.

#### 2.4 – TRANSPORTE DA CORRENTE ELÉTRICA ATRAVÉS DA JUNÇÃO METAL SEMICONDUTOR

Os principais agentes responsáveis pelo transporte da corrente elétrica na junção metal semicondutor são os portadores majoritários, elétrons para semicondutores tipo n e lacunas para os semicondutores tipo p. O fluxo de corrente na junção é resultado de vários fenômenos de transporte de portadores: 1) emissão termiônica, ou seja, transporte de portadores do semicondutor para o metal sobre a barreira de potencial; 2) tunelamento (efeito da mecânica quântica); 3) recombinação de portadores na região de carga espacial; 4) injeção de portadores minoritários do metal para o semicondutor, o que equivale ao movimento de elétrons do semicondutor para o metal, deixando uma lacuna no semicondutor que se recombina com um elétron na região neutra. A figura 2.4.1 ilustra os quatro processos de transporte de corrente<sup>[7]</sup>.

Para o caso de semicondutor moderadamente dopado (para Si  $\leq 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>) operando em temperaturas moderadas (temperatura em torno de 300K), a corrente elétrica na junção é predominantemente resultante dos elétrons que atravessam a junção sobre a barreira de potencial (figura 2.4.1 caso 1). Esse fenômeno é descrito pela teoria de emissão termiônica e pela teoria da difusão. Uma análise generalizada que considera os dois efeitos da origem a teoria termoionica-difusão.



Figura 2.4.1 – Fenômenos de transporte de corrente na junção metal semicondutor.
1) transporte de portadores sobre a barreira de potencial; 2) tunelamento; 3) recombinação de portadores na região de carga espacial; 4)injeção de portadores minoritários<sup>[7]</sup>.

A teoria da emissão termiônica proposta por Bethe faz algumas considerações: a altura da barreira de potencial  $\phi_B$  é muito maior que a energia térmica kT; equilíbrio térmico na junção (plano que determina a emissão); e a existência de um fluxo de corrente não perturba este equilíbrio. A corrente que flui na junção metal semicondutor é resultante da soma de duas parcelas de corrente: uma corrente no sentido do metal para o semicondutor e uma corrente no sentido do semicondutor para o metal.

A corrente que flui do semicondutor para o metal depende da concentração de portadores com energia suficiente para vencer a barreira de potencial. Essa corrente é dada pela equação 13<sup>[7]</sup>.

Onde  $E_F + q\phi_B$  é a energia mínima requerida para a emissão de portadores do semicondutor para o metal, e  $v_x$  é a velocidade do portador. Esta equação resulta na expressão  $14^{[7]}$ .

$$J_{S \to M} = A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right) \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right)$$
Equação 14

Onde  $\phi_B$  é a altura da barreira de potencial V é a tensão aplicada no diodo e  $A^*$  é a constante efetiva de Richardson para a emissão termiônica numa junção metal semicondutor ideal. Esta constante é dada pela equação  $15^{[7]}$ .

$$A^* = \frac{4 \cdot \pi \cdot q \cdot m^* \cdot k^2}{h^3}$$
 Equação 15

Esta equação não considera os efeitos de espalhamento dos fônons e os efeitos quânticos de reflexão. Para o elétron livre, a constante efetiva de Richardson  $A^*$  tem valor de 120A/cm<sup>2</sup>/K<sup>2</sup>. A tabela 2 mostra a relação A<sup>\*</sup>/A para diversos semicondutores<sup>[8]</sup>.

Tabela 2 – Valores de $A^*/A$						
Semicondutor	Ge	Si	GaAs			
tipo - p	0.34	0.66	0.62			
tipo - n <111>	1.11	2.2	0.068 ( campos fracos) 1.2 (campos intensos)			
tipo - n <100>	1.19	2.1	0.068 ( campos fracos) 1.2 (campos intensos)			

No caso da corrente elétrica que flui do metal para o semicondutor, a barreira de potencial para estes elétrons é a mesma (desconsiderando os efeitos de diminuição da barreira Schottky) e assim, a corrente não depende da tensão aplicada. Portanto esta corrente deve ser igual à corrente que flui do semicondutor para o metal  $(J_{S \to M})$  com V = 0.

Assim a corrente elétrica que flui do metal para o semicondutor é descrita pela equação 16<sup>[7]</sup>.

$$J_{M \to S} = -A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right)$$
 Equação 16

Com isso a densidade de corrente total que atravessa a junção metal semicondutor é dada pela equação 17<sup>[7]</sup>.

$$J_{\rm m} = J_{\rm S, s, t} + J_{\rm M, s, s}$$
 Equação 17.a

$$J_n = A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1\right]$$
 Equação 17.b

$$J_{ST} = A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right)$$
 Equação 17.c

$$J_n = J_{ST} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right]$$
 Equação 17.d

Onde  $J_{ST}$  é a densidade da corrente de saturação na junção dada pela teoria da emissão termiônica.

A teoria de difusão proposta por Schottky faz algumas considerações: inclusão do efeito das colisões dos elétrons dentro da região de depleção; a altura da barreira de potencial  $\phi_B$  é muito maior que kT; a concentração de elétrons dentro da região de depleção não é afetada pelo fluxo de corrente; e o semicondutor é não degenerado. Assim a corrente dentro da região de depleção é dada pela equação 18, que é a soma da corrente devido à

ação do campo elétrico (deriva) com a corrente devido ao gradiente de concentração de portadores majoritários (difusão), dentro da região de depleção<sup>[7]</sup>.

$$J_n = q \cdot \left[ n(x) \cdot \mu \cdot E + D_n \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \right]$$
 Equação 18

Onde  $D_n$  é o coeficiente de difusão dos elétrons. Esta equação resulta na expressão 19 que fornece o valor da corrente de elétrons na junção, dada pela teoria da difusão<sup>[7]</sup>.

$$J_{n} = \left\{ \frac{q^{2} \cdot D_{n} \cdot N_{c}}{k \cdot T} \cdot \left[ \frac{q \cdot (V_{bi} - V) \cdot 2 \cdot N_{D}}{\varepsilon_{s}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_{B}}{k \cdot T}\right) \right\} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad \text{Equação 19}$$
$$J_{n} = J_{SD} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad \text{Equação 20}$$

Onde  $J_{SD}$  é a corrente de saturação resultante da teoria de difusão e dada pela equação  $21^{[7]}$ .

$$J_{SD} = \frac{q^2 \cdot D_n \cdot N_c}{k \cdot T} \cdot \left[ \frac{q \cdot (V_{bi} - V) \cdot 2 \cdot N_D}{\varepsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right) \qquad \text{Equação 21}$$

Observe que as equações 17.d e 20 são quase idênticas, exceto pelos termos  $J_{ST}$  e  $J_{SD}$ . Analisando as equações 21 e 17.c, podemos observar que  $J_{SD}$  varia mais rapidamente com a tensão, mas, é menos sensível a variação da temperatura comparada com  $J_{ST}$ .

Uma síntese dessas duas teorias, emissão termiônica e difusão, foi proposta por Crowell e Sze, denominada teoria difusão-termiônica.

Se os efeitos de espalhamento dos fônons, reflexão e tunelamento quântico forem incluídos na análise da corrente na junção metal semicondutor, a expressão completa das características J-V é dada pela equação 23<sup>[7]</sup>.

$$J_n = J_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right]$$
 Equação 23

Onde a corrente de saturação  $J_{\rm S}$  é dada pela expressão  $24^{[7]}$ .

$$J_{S} = A^{**} \cdot T^{2} \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_{B}}{k \cdot T}\right)$$
 Equação 24

O termo A\*\* é a constante de Richardson para uma junção metal semicondutor real, ou seja, considera os efeitos quânticos e de espalhamento dos fônons. Esta constante é calculada pela equação 25<sup>[7]</sup>.

$$A^{**} = \frac{f_P \cdot f_Q \cdot A^*}{1 + f_P \cdot f_Q \cdot \frac{v_R}{v_D}}$$
Equação 25

Onde  $f_P$  e  $f_Q$  são respectivamente a probabilidade de um elétron ser emitido por cima da barreira de potencial e a razão entre a corrente que flui considerando os efeitos quânticos e a corrente que flui sem considerar tais efeitos. Para campos elétricos na faixa de  $10^4$  a  $2.10^5$  V/cm e o semicondutor com concentração  $N_D$  (dopagem do substrato) de  $10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, operando em temperatura ambiente (T=300K), A\*\* $\cong$  110 A/cm<sup>2</sup>/K<sup>2</sup> para semicondutor tipo n e A\*\* $\cong$  30 A/cm<sup>2</sup>/K<sup>2</sup> para semicondutor tipo p.

Para semicondutores muito dopados ou para dispositivos operando em baixas temperaturas, a corrente de tunelamento torna-se o processo dominante no transporte da corrente elétrica na junção metal semicondutor. A alta dopagem faz com que o semicondutor seja degenerado e assim a largura da região de depleção se torna muito pequena, ficando fácil o elétron tunelar através da barreira de potencial. Assim a expressão que calcula a corrente elétrica na junção metal semicondutor, considerando outros fenômenos de transporte de corrente, além da emissão termiônica, recebe o coeficiente n no denominador da exponencial da equação 23, chamado de fator de idealidade<sup>[7]</sup>.

$$J_n = J_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]$$
 Equação 26

E para V > (k.T/q) a exponencial fica muito maior do que 1 e assim a equação 26 pode ser aproximada para a equação  $27^{[7]}$ .

$$J_n = J_s \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}\right)$$
Equação 27

O fator de idealidade é dado pela equação  $28^{[7]}$ .

$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{\partial V}{\partial(\ln J)}$$
 Equação 28

A figura 2.4.2 mostra um gráfico que fornece o fator de idealidade para diversos valores de temperaturas e níveis de dopagem no semicondutor, para uma junção Au/n-Silício.

O fator de idealidade é um indicativo de quais processos atuam no valor total da corrente na junção. Para n=1, a corrente é devido ao processo de emissão termiônica e para  $n \neq 1$ , outros processos contribuem no valor da corrente na junção. Quanto mais próximo de 1 for o fator de idealidade melhor é o desempenho do dispositivo, pois os outros processos de transporte de corrente na junção, além da emissão termiônica, não são bem controlados, levando o dispositivo a apresentar características não desejáveis, como por exemplo, alta corrente de fuga.

O diodo de barreira Schottky é um dispositivo cujo transporte de corrente é devido aos portadores majoritários. Porém para valores de tensão direta suficientemente alto aplicado na junção, ocorre um aumento na taxa de injeção de portadores minoritários devido ao crescimento da componente de deriva que se torna muito maior que a componente de difusão da corrente na junção. Em dispositivos que operam com tensões baixas, este fenômeno não é muito relevante, mas para dispositivos de potência, a corrente devido à injeção de portadores minoritários pode representar uma significante parcela do valor total da corrente que atravessa a junção Schottky<sup>[9]</sup>.



Figura 2.4.2 – Fator de idealidade em função da dopagem para vários valores de temperatura numa junção Au/n-Silício<sup>[7]</sup>.

A densidade de corrente que atravessa a junção reversamente polarizada pode ser obtida pela equação 29 (para tensão maior que 3kT/q)<sup>[10]</sup>.

$$Jr = A^{**}T^{2} \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{q\sqrt{qE_{M}/4\pi\varepsilon_{s}}}{kT}\right)$$
Equação 29

Onde  $\phi_{B0}$  é o valor da barreira de potencial para campo elétrico igual a zero.

#### 2.5 - TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO DAS CARACTERISTICAS ELÉTRICAS DO DIODO SCHOTTKY

As principais vantagens do diodo Schottky em relação a outros tipos de diodos são: operação em aplicações de alta frequência, devido ao não armazenamento de cargas minoritárias na comutação, e o baixo valor de tensão de joelho (V $\gamma$ ) proporcionando uma baixa queda de tensão direta. Porém este tipo de dispositivo fabricado em substrato de silício apresenta alta corrente reversa e baixa tensão de ruptura. Mas existem algumas técnicas utilizadas no projeto deste diodo para melhorar seu desempenho, obtendo valores maiores de tensão de ruptura e diminuindo a corrente reversa, aumentando assim seu campo de aplicação. Algumas técnicas utilizadas são: construção do dispositivo utilizando lâminas com camada epitaxial de baixa dopagem, técnicas de passivação de estados na superfície da lâmina de silício onde é feito o contato Schottky, utilização de sobreposição de metal e anel de guarda, otimização da relação área/perímetro do dispositivo e utilização de grade de difusão p.

Na junção metal semicondutor do diodo Schottky, há uma região de depleção dos portadores para balancear a carga do metal. Aplicando uma tensão reversa nesta junção, a largura da região de depleção aumenta, e seu valor pode ser calculado pela equação 4 (item 2.2). Desta equação, podemos concluir que para um mesmo valor de tensão aplicada na junção (V), quanto menor a dopagem ( $N_D$ ) maior é o valor da largura da região de depleção de depleção (W).

O campo elétrico na junção metal semicondutor é dado pelas equações 5 ou 30.

$$E_M = \frac{2 \cdot (V_{bi} - V - V_T)}{W}$$
 Equação 30

A equação 30 mostra que o campo elétrico na junção metal semicondutor é inversamente proporcional à largura da região de depleção. Assim quanto maior for a largura da região de depleção (W), menor será o campo elétrico nesta região. Portanto o campo elétrico máximo suportado na junção sem que o diodo entre em ruptura será atingido para um valor maior de tensão aplicada na junção metal semicondutor, resultando num dispositivo com uma tensão de ruptura maior.

Na equação 5 do apêndice A, temos que a variação da altura da barreira de potencial é diretamente proporcional à intensidade do campo elétrico na junção. Assim com um campo elétrico menor este efeito também será menor.

Porém, se por um lado o substrato com baixa dopagem aumenta o valor da tensão reversa do dispositivo, por outro lado, um substrato com baixa dopagem apresenta uma resistividade relativamente elevada, aumentando o valor da resistência de corpo, fazendo com que o dispositivo dissipe mais potência, comprometendo o rendimento do circuito onde este dispositivo será empregado. O que é feito então é usar um substrato com alta dopagem (~10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>) com uma camada epitaxial de baixa dopagem (~10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>) onde o contato Schottky é construído.

Além da dopagem da camada epitaxial outro fator importante dessa região é sua espessura. A região de depleção cresce até atingir o substrato altamente dopado, pois analisando a equação 32, quando N<sub>D</sub> tem valor muito alto, W é muito pequeno. Assim a região de depleção não cresce mais com a tensão reversa aplicada e o campo elétrico na junção começa a crescer rapidamente levando o diodo à ruptura. No caso da condução direta, a parcela da resistência série devida a esta camada é diretamente proporcional a largura dessa região. Assim é preciso estabelecer um compromisso entre tensão de ruptura e resistência série no dimensionamento do substrato do dispositivo.

A presença de estados na superfície do semicondutor, devido à interrupção da perfeita periodicidade da rede cristalina, representa uma quantidade de estados e cargas na superfície ( $Q_{ss}$ ), que pode ser positiva ou negativa. Para ( $Q_{ss}$ ) com valor positivo, ocorre uma diminuição na altura da barreira de potencial, o que é indesejável para o dispositivo. Assim é necessário que estes estados sejam minimizados para que eles não influenciem muito no valor da altura da barreira de potencial.

Tem se estudado o comportamento do hidrogênio em silício cristalino<sup>[11]</sup>, num prétratamento da superfície da lâmina de silício antes da deposição do metal de contato Schottky. A altura da barreira de potencial pode ser incrementado, expondo a superfície da lâmina em plasma de hidrogênio. Esta exposição cria uma camada amorfa na superfície do silício, resultando na formação do contato Schottky entre esta camada amorfa e o metal depositado. O hidrogênio passiva eletricamente as ligações incompletas na superfície do semicondutor, diminuindo a densidade de estados. Na figura 2.5.1 podemos observar que dispositivos expostos em plasma de hidrogênio apresentam altura de barreira de potencial maior que os dispositivos construídos sem a utilização desta técnica (controle).

Quando o diodo Schottky é polarizado reversamente há um aumento da região de depleção dos portadores de carga. A figura 2.5.2 mostra o aspecto dessa região.

Podemos observar nesta figura que a região de depleção é uniforme em quase toda a região de contato Schottky e apresenta um encurvamento nas bordas do dispositivo. Como o campo elétrico é inversamente proporcional à largura da região de depleção, nas bordas do dispositivo o campo elétrico é mais intenso, fazendo com que o diodo atinja a região de ruptura prematuramente. Assim é necessário que haja mecanismos para diminuir o campo elétrico nas bordas do dispositivo.



Figura 2.5.1 – Dependência da altura da barreira de potencial e do fator de idealidade com relação a potência do plasma RF (metal de contato Schottky Alumínio)<sup>[11]</sup>.

A sobreposição de metal é formado pela passivação da superfície do semicondutor nas bordas, utilizando uma camada de óxido de silício. A figura 2.5.3 representa o diodo Schottky com sobreposição de metal.

A sobreposição de metal é utilizado para suavizar a região de depleção nas bordas do diodo Schottky, acabando com a terminação abrupta dessa região que pode ser observada no diodo Schottky convencional (Figura 2.5.2)<sup>[12]</sup>. Desta maneira a sobreposição de metal diminui a concentração de linhas de campo elétrico nas bordas do dispositivo. A medida que a tensão de polarização reversa aumenta, a região sob a sobreposição de metal pode inverter, ou seja, ocorre um acumulo de lacunas nesta região, fazendo com que a região de depleção termine abruptamente nas bordas do dispositivo, como ocorre no diodo Schottky convencional. Desta forma o campo elétrico nesta região sofre um aumento considerável, resultando na ruptura do diodo.

Outro mecanismo utilizado para resolver este problema é a utilização de anel de guarda formado por uma difusão p (Boro) em substrato tipo  $n^{[13],[14],[15]}$ . O diodo Schottky com anel de guarda está representado na figura 2.5.4.

Neste caso o anel de guarda elimina a terminação abrupta nas bordas da região do contato Schottky (figura 2.5.4), através da formação da região de depleção da junção p/n. Além disso, com o diodo polarizado diretamente há uma injeção de portadores minoritários, lacunas da região do anel de guarda, na região de baixa dopagem da camada epitaxial, diminuindo a resistividade nesta região, pois com o aumento da concentração de lacunas na região epitaxial, a concentração de elétrons também deve aumentar mantendo a neutralidade de cargas na região neutra. Porém esta estrutura apresenta a desvantagem de possuir tempo de recuperação reversa, na mudança de estado (conduzindo/cortado) do diodo e capacitância parasita nas junções p/n.



Figura 2.5.2 – Aspecto da região de depleção de um diodo Schottky polarizado reversamente.



Figura 2.5.3 – Aspecto da região de depleção de um diodo Schottky com sobreposição de metal polarizado reversamente.



Figura 2.5.4 – Aspecto da região de depleção do diodo Schottky com anel de guarda polarizado reversamente.

A corrente de fuga do diodo Schottky esta relacionada com o perímetro do dispositivo<sup>[16],[17]</sup>, pois a quantidade de defeitos existentes nas limitações do dispositivo

(resultantes do corte da lâmina para encapsulamento dos dispositivos, tratamentos químicos, geração de portadores pelos estados de superfície na lateral, etc) é diretamente proporcional ao perímetro do dispositivo construído. Assim, quando estabelecida a área do dispositivo, é necessário projetá-lo para que ele possua o menor perímetro possível. A figura geométrica que possui a menor relação perímetro/área é o circulo, porém dispositivos de área circular não são viáveis economicamente devido à grande perda da área da lâmina de silício. Assim, a figura geométrica que apresenta o melhor resultado é o quadrado, já que para um mesmo valor de área ele apresenta o menor perímetro, comparado com outras figuras retangulares possíveis de serem formadas.

Além de projetar dispositivos com o menor perímetro possível, o arredondamento dos cantos elimina o efeito das pontas, ou seja, a alta concentração de campo elétrico nesta região pode resultar em correntes de fuga. Assim arredondando os cantos do contato metálico, diminuímos este efeito de degradação do dispositivo. A figura 2.5.5 ilustra este caso.



Figura 2.5.5 – Contato metálico com cantos arredondados para supressão do campo elétrico (efeito das pontas) nas pontas do contato.

Uma das causas da ruptura precoce do diodo Schottky é o efeito da diminuição da barreira de potencial quando uma tensão reversa é aplicada na junção Schottky. Para suprimir este efeito, pode ser utilizado uma grade de linhas paralelas de difusão tipo p ao longo do dispositivo<sup>[18]</sup>. A figura 2.5.6 ilustra o aspecto deste dispositivo.



Figura 2.5.6 – Diodo Schottky com grade de difusão tipo p para suprimir o efeito de diminuição da barreira de potencial.

Quando uma tensão reversa é aplicada no dispositivo, o diodo formado pela difusão p e o substrato tipo n fica reversamente polarizado e assim a região de depleção deste diodo aumenta, e num determinado instante as regiões de depleção de duas difusões p adjacentes

se cruzam sob o contato Schottky. Essa barreira de potencial formada suporta qualquer incremento da tensão reversa, pois ela não sofre o efeito Schottky. Desta maneira a corrente reversa é "estrangulada" pelo encontro destas regiões de depleção, e o diodo só rompe quando o campo elétrico for intenso suficiente para causar o efeito avalanche no dispositivo.

A desvantagem de se utilizar esta técnica para melhorar as características I-V reversas do diodo Schottky é que boa parte da região de contato Schotty é perdida sendo utilizada para a formação da grade de linhas de difusão, e que aumenta a tensão de joelho do dispositivo.

#### 3 - Projeto do diodo Schottky

#### 3.1 – Introdução

Existem várias estruturas de diodo Schottky, desde o diodo Schottky convencional formado apenas por um contato metálico na superfície do silício, até estruturas mais complexas que possuem anel de guarda e sobreposição de metal para melhorar as características elétricas do dispositivo. O objetivo do projeto é obter o processo de fabricação do diodo Schottky com níveis de corrente e tensão para aplicações de potência, baixa dissipação de energia e com estabilidade física em função das etapas de recozimento durante o processo de fabricação. A seguir temos a sequência do projeto do diodo, desde a definição das estruturas a serem fabricadas até a confecção das máscaras ópticas.

#### 3.2 – ESTRUTURAS DE DIODO SCHOTTKY

#### a) Diodo Schottky convencional

Nesta estrutura o diodo é formado apenas por um contato metálico no semicondutor. Este tipo de dispositivo geralmente possui características I-V direta e reversa não muito boas, apresentando alta corrente de fuga e baixa tensão de ruptura. A figura 3.2.1 mostra o esquema deste dispositivo.

#### b) Diodo Schottky com sobreposição de metal

A sobreposição de metal é utilizado nesta estrutura para eliminar os efeitos de borda para baixas tensões de polarização reversa do diodo Schottky. Esta estrutura pode ser formada utilizando-se óxido de silício nas bordas do diodo para formar sobreposição de metal. A figura 3.2.2 mostra o esquema deste dispositivo.

#### c) Diodo Schottky com anel de guarda

Este diodo Schottky possui anel de guarda em sua estrutura para eliminar os efeitos de borda do dispositivo. O anel de guarda é formado por uma difusão do tipo p no substrato tipo n. A junção p/n formada pelo anel de guarda e o substrato resolve o problema da terminação abrupta da região de depleção na borda do diodo convencional, podendo assim o dispositivo trabalhar com tensões mais elevadas. Como este dispositivo possui alto valor de tensão de ruptura, ele é o mais adequado para aplicações de potência. O esquema deste dispositivo esta representado na figura 3.2.3.

#### d) Diodo Schottky com grade de linhas de difusão.

Neste dispositivo, a grade é formada por linhas paralelas de difusão do tipo p, ao invés de ter um anel de guarda na periferia do dispositivo como no caso anterior. A figura 3.2.4 mostra o esquema deste dispositivo.

Abaixo temos a legenda para os esquemas dos dispositivos.





Figura 3.2.1 – Diodo Schottky convencional



Figura 3.2.2 – Diodo Schottky com sobreposição de metal



Figura 3.2.3 – Diodo Schottky com anel de guarda e sobreposição de metal


Figura 3.2.4 – Diodo Schottky com grade de linhas de difusão.

### 3.3 – DIMENSIONAMENTO DOS DIODOS A SEREM FABRICADOS

A primeira etapa no projeto do diodo Schottky foi dimensionar a lâmina de silício utilizada no processo de fabricação dos dispositivos. Para a construção de dispositivos de potência a lâmina deve ter duas partes: o substrato com alta dopagem, para ter bom contato ôhmico e baixa resistência de corpo, e uma camada epitaxial de baixa dopagem para suportar o campo elétrico na polarização reversa, proporcionando valores de tensão de ruptura e corrente reversa adequados. A seguir faremos uma análise da resistência da região epitaxial e da corrente reversa no dispositivo em função da resistividade e espessura da camada epitaxial, e da resistência de contato ôhmico em função da dopagem do substrato.

Podemos calcular a resistência da camada epitaxial pela equação 1.

$$R_{ep} = \rho_{ep} \cdot \frac{L_{ep}}{\acute{A}rea}$$
 Equação 1

Onde  $R_{ep}$  é a resistência,  $\rho_{ep}$  é a resistividade e  $L_{ep}$  é a largura da região epitaxial. A figura 3.3.1 mostra a variação da resistência da região epitaxial em função de sua resistividade para vários valores de espessura desta camada.

A densidade de corrente que atravessa a junção reversamente polarizada pode ser obtida pela equação 29 do capitulo 2 (item 2.4). Nesta equação podemos observar que a densidade de corrente reversa é proporcional à exponencial do campo elétrico máximo na superfície. Contudo, esse campo elétrico, dado pela equação 5 do capítulo 2 (item 2.2), depende da dopagem (N<sub>D</sub>) da região de contato Schottky (região da camada epitaxial). Como a resistividade do semicondutor é função da dopagem, podemos relacionar o campo elétrico com a resistividade da região da camada epitaxial. A figura 3.3.2 mostra curvas de corrente reversa em função da tensão aplicada para alguns valores de resistividade da camada epitaxial.



Figura 3.3.1 – Resistência da camada epitaxial em função de sua resistividade para diferentes valores de espessura desta camada.



Figura 3.3.2 – Densidade de corrente reversa na junção em função da tensão aplicada para diferentes valores de resistividade da região epitaxial.

Com relação ao contato ôhmico, a resistência do contato depende da dopagem do substrato e do metal a ser utilizado neste tipo de contato. A figura 3.3.3 mostra o gráfico para resistência de contato em função da dopagem do substrato.



Figura 3.3.3 – Curvas de resistência de contato para PtSi-Si e Al-Si<sup>[1]</sup>.

Analisando as figuras 3.3.1 e 3.3.2 podemos concluir que a resistência da região epitaxial aumenta quanto maior sua resistividade e espessura. Porém a corrente de fuga diminui com o aumento da resistividade, e como já foi visto no capítulo 2 (item 2.5) a tensão de ruptura do dispositivo é diretamente proporcional à espessura dessa região. Assim tendo como objetivo projetar um diodo Schottky com baixa resistência série e um nível aceitável de corrente de fuga, a lâmina utilizada na fabricação do diodo Schottky tem a seguintes a especificação:

Substrato: Diâmetro: 76mm Tipo/Dopante: tipo n/Sb Orientação: <100> +/- 1 Espessura: 356 - 406μm Resistividade: 0.008 - 0.020 Ω.cm
Camada epitaxial: Tipo/Dopante: tipo n/P Espessura: 4μm +/- 10% Resistividade: 1.1 Ω.cm +/- 10% Com esses valores de resistividade e espessura da camada epitaxial, temos uma baixa resistência, em torno de  $2m\Omega$  para área de  $0,2116cm^2$ , mantendo a corrente reversa em níveis adequados (da ordem centenas de micro amperes), de acordo com as figuras 3.3.1 e 3.3.2. Além da análise feita acima, os valores da região epitaxial da lâmina de silício teve como base dados de referências bibliográficas<sup>[2],[3]</sup>. A lâmina utilizada nos diodos fabricados na referência 2 tem espessura de 3µm-5µm e resistividade 1,5-1,9Ω.cm, e os diodos da referência 3 tem 3µm de espessura e com resistividade de 0,5Ω.cm.

Para o dimensionamento do diodo Schottky, com relação à largura, distância à borda, profundidade de junção e dopagem do anel de guarda foi utilizado o software de simulação de dispositivos PISCES-2ET. A simulação teve o objetivo de verificar os valores de corrente direta para V=0.6(V), corrente reversa para V=-40(V) e tensão reversa de ruptura para cada dispositivo. As características dos dispositivos simulados são as seguintes:

- Diodo Schottky com anel de guarda
- Área do contato Schottky: 30x30µm (para reduzir número de pontos e tempo de simulação)
- Largura do anel de guarda (LAG): 5 a 12µm
- Distância do anel de guarda à borda do diodo (DAGB): 5 a 12µm
- Tipo/concentração da difusão p(Boro) (N<sub>A</sub>): 5E15 a 1E17cm<sup>-3</sup>
- Profundidade da junção da difusão p (X<sub>J</sub>): 0.5 a 2.0µm
- Espessura da camada epitaxial: 4µm.
- Espessura do substrato: 360µm
- Dopagem do substrato: 1.5E18cm<sup>-3</sup>
- Dopagem da camada epitaxial: 2E15cm<sup>-3</sup>

A figura 3.3.4 mostra o esquema do dispositivo simulado com as dimensões:LAG e DAGB, descritas acima.



Figura 3.3.4 – Esquema do dispositivo simulado com as dimensões LAG e DIAGB.

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos variando a largura do anel de guarda, tendo como parâmetros:  $N_A = 1E16cm^{-3}$ ,  $DAGB = 5\mu m$ ,  $X_J = 1\mu m$ . Tabela 1 – Variação das características elétricas em função da largura do anel de guarda.

·····}··· ···· ······· ···· ··· ···· ·			
	$I_F(A)(V=0.6(V))$	$I_{R}(\mu A) (V=-40(V))$	$V_{BD}(V)$
$LAG = 5\mu m$	0.00581	0.00416	60
$LAG = 6\mu m$	0.00629	0.00455	58
$LAG = 8\mu m$	0.00796	0.06730	55
$LAG = 10 \mu m$	0.01520	0.85100	50
$LAG = 12 \mu m$	0.01050	1.04000	48

Nesta tabela podemos observar que à medida que a largura do anel de guarda aumenta, a tensão de ruptura diminui e a corrente reversa aumenta. O aumento da corrente direta é devido a injeção de portadores minoritários, lacunas da região p, na região epitaxial diminuindo sua resistividade, como foi visto no capítulo 2 (item 2.5).

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos variando a distância do anel de guarda à borda do dispositivo, tendo como parâmetros:  $N_A = 1E16cm^{-3}$ ,  $LAG = 5\mu m$ ,  $X_J = 1\mu m$ .

	$I_F(A)(V=0.6(V))$	$I_{R}(\mu A) (V=-40(V))$	$V_{BD}(V)$
$DAGB = 5\mu m$	0.00581	0.0416	60
$DAGB = 6\mu m$	0.00629	0.0455	56
$DAGB = 8\mu m$	0.00730	0.0541	54
$DAGB = 10 \mu m$	0.00838	0.0636	48
$DAGB = 12 \mu m$	0.01040	0.9030	46

Tabela 2 – Variação das características elétricas em função da distância do anel de guarda a borda do diodo.

Podemos observar nesta tabela que à medida que o anel de guarda fica mais distante da borda, a tensão de ruptura diminui e as correntes reversa e direta aumentam. Com o afastamento do anel de guarda da borda, a região de depleção volta a terminar abruptamente, e o anel de guarda perde a função de suavizar essa região, tendo como resultado a degradação das características reversas do dispositivo.

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos variando a profundidade do anel de guarda (X<sub>J</sub>) do dispositivo, tendo como parâmetros:  $N_A = 1E16cm^{-3}$ , LAG = 5µm, DAGB = 5µm.

	$I_F(A)(V=0.6(V))$	$I_{R}(\mu A) (V=-40(V))$	$V_{BD}(V)$
$X_J = 0.5 \mu m$	0.00584	0.0417	56
$X_J = 1.0 \mu m$	0.00581	0.0416	60
$X_J = 1.5 \mu m$	0.00534	0.0389	60
$X_J = 2.0 \mu m$	0.00437	0.0366	60

Tabela 3 – Variação das características elétricas em função da profundidade da junção do anel de guarda.

Podemos observar na tabela 3 que a partir de 1 $\mu$ m a profundidade da junção não interfere nas características reversas do diodo Schottky. A degradação da tensão de ruptura para  $X_J = 0.5 \mu$ m é devido a barreira de potencial obtida com junções rasas, o que faz surgir um alto campo elétrico na junção Schottky com a tensão reversa aplicada<sup>[3]</sup>.

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos variando o valor da dopagem do anel de guarda, tendo como parâmetros:  $X_J = 1.0 \mu m$ , LAG = 5 $\mu m$ , DAGB = 5 $\mu m$ .

Tabela 4 – Variação das características elétricas em função da dopagem da região do anel de guarda.  $I_F(A)(V=0.6(V)) \quad I_R(\mu A) (V=-40(V)) \quad V_{BD}(V)$   $N_A = 5E15cm^{-3} \quad 0.00584 \quad 0.0417 \quad 60$ 

	$I_F(A)(V=0.6(V))$	$I_{R}(\mu A) (V=-40(V))$	$V_{BD}(V)$
$N_{\rm A} = 5 E 15 {\rm cm}^{-3}$	0.00584	0.0417	60
$N_{\rm A} = 1E16 {\rm cm}^{-3}$	0.00581	0.0416	60
$N_{\rm A} = 5 E 16 {\rm cm}^{-3}$	0.00534	0.0389	60
$N_{A} = 1E17 cm^{-3}$	0.00437	0.0366	60

Podemos observar que a dopagem apresentou pouca influência nas correntes direta e reversa do diodo Schottky, sendo que quanto menor a dopagem, maiores são os valores dessas correntes.

As dimensões dos diodos fabricados foram definidas a partir dos resultados das simulações, baseado em artigo publicado<sup>[2]</sup> e com dimensões de valores intermediários entre os outros dois. As figuras 3.3.4, 3.3.5 e 3.3.6 mostram os esquemas, sem escala, das estruturas a serem fabricadas com suas dimensões.



Figura 3.3.4 – Diodo Schottky com sobreposição de metal com as dimensões: largura da sobreposição de metal(LSM) e largura do contato Schottky (LCSH).



Figura 3.3.5 – Diodo Schottky com anel de guarda com as dimensões: LSM, largura do anel de guarda(LAG), distância do anel de guarda à borda do diodo (DAGB) e LCSH.



Figura 3.3.6 – Diodo Schottky com grade de linhas de difusão com as dimensões: largura da linha de difusão, espaçamento entre as linhas, distância da linha à borda do diodo e largura do dispositivo (LCD).

A tabela 5 mostra os valores das dimensões das figuras acima. Os valores DAGB, LAG e SM estão dispostos na sequência: diodo projetado, diodo da referência 1 e diodo com valores intermediários.

Tabela 5 – Características dos diodos Schottky projetado, da referência 1 e com valores intermediários respectivamente.

	LCSH	LCD	DAGB	LAG	SM
	(µm)	(µm)	(µm)	(µm)	(µm)
DICON	4600,4620,4810,4900	-	-	-	-
DISM	4600,4590,4590,4550	-	-	-	5, 15, 110, 175
DIAG	- ,4600,4600,4600	-	5, 5, 100	5, 100, 50	7, 7, 105
DIGLD	-	4600	-	-	-

DICON: Diodo Schottky Convencional; DISM: Diodo Schottky com Sobreposição de Metal; DIAG: Diodo Schottky com Anel de Guarda; DIGLD: Diodo Schottky com Grade de Linhas de Difusão.

### 3.4 – Projeto das máscaras

Definidas as dimensões dos dispositivos a serem fabricados, foram projetadas 4 máscaras:

- Máscaral para definir a região do anel de guarda e grade de linhas de difusão.
- Máscara2A para definir a região do contato Schottky dos dispositivos com anel de guarda.
- Máscara2B para definir a região do contato Schottky dos dispositivos com sobreposição de metal.
- Máscara 3 para definir o contato metálico de cada dispositivo.
- A tabela 6 mostra as máscaras utilizadas na construção de cada dispositivo.

Tabela 6 – Máscaras utilizadas na fabricação dos dispositivos.

	Máscara1	Máscara2A	Máscara2B	Máscara3
DICON				Х
DISM			Х	Х
DIAG	Х	Х		Х
DIGLD	Х	Х		Х

Cada máscara contém 9 células, onde cada célula é um conjunto de quatro dispositivos: diodos com grade de linhas de difusão e com anel de guarda com L=5 $\mu$ m, L=100 $\mu$ m e L=50 $\mu$ m.

Nas figuras 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4, temos os *layout* de uma célula do conjunto de máscaras que foram feitos utilizando o AutoCad 2000. A célula possui 4 dispositivos: DIGLD, diodo projetado, diodo da referência 1 e diodo intermediário.

Além dos diodos, no layout de cada máscara estão incluídas marcas de alinhamento e uma estrutura em cruz para medir a resistência de contato do sistema de metalização.



Figura 3.4.1 – Layout da mascará 1 para definir a região do anel de guarda e grade de linhas de difusão.



Figura 3.4.2 – Layout da máscara 2A para definir a sobreposição de metal do diodo com anel de guarda.



Figura 3.4.3 – Layout da máscara 2B para definir a sobreposição de metal dos diodos com sobreposição de metal.



Figura 3.4.4 – Layout da mascará 3 para definir o metal de contato Schottky dos dispositivos.



Figura 3.4.5 – Layout da estrutura em cruz para medir a resistência de folha do metal de contato Schottky.

Com o *layout* das máscaras pronto, foram gerados arquivos .dxf (extensão de arquivo compatível com o sistema de geração das máscaras) e enviados para o CenPRA(Centro de Pesquisas Renato Archer), para a confecção das máscaras. As máscaras foram feitas em um substrato de material transparente, no caso vidro, e os padrões gerados no *layout* foram transferidos para este substrato com um material opaco (cromo). Todas as máscaras são de campo escuro, ou seja, o padrão a ser transferido pelo *layout* das máscaras é transparente e o restante é coberto com o material opaco. Desta maneira no processo de fotogravação, a luz da fotoalinhadora atravessa a região desenhada na máscara. Os detalhes do processo de fotogravação serão vistos no capitulo 4. Abaixo temos as fotos das máscaras construídas.



Figura 3.4.5 – Máscara 1.



Figura 3.4.6 – Máscara 2A.



Figura 3.4.7 – Máscara 2B.



Figura 3.4.8 – Máscara 3.

3.5 - Definição dos dispositivos a serem fabricados

Os dispositivos a serem fabricados são os seguintes:

- a) Diodo Schottky convencional com siliceto de Tungstênio: DICONWSI2.
- b) Diodo Schottky convencional com Alumínio/Tungstênio: DICONAIW.
- c) Diodo Schottky convencional com Níquel/Tungstênio:DICONNIW.
- d) Diodo Schottky convencional com Alumínio:DICONAl.
- e) Diodo Schottky com sobreposição de metal: DISM.
- f) Diodo Schottky com grade de linhas de difusão: DIGLD.

- g) Diodo Schottky com anel de guarda: DIAG.h) Diodo Schottky convencional com implantação de fósforo:DIIMP.

A descrição do processo de fabricação dos dispositivos é o assunto do próximo capítulo.

### 4 – Processos envolvidos na construção do diodo Schottky

### 4.1 – Introdução

Neste capítulo temos uma breve explanação teórica sobre cada processo envolvido na fabricação dos diodos Schottky<sup>[1],[2]</sup>. Em seguida serão descritos os procedimentos experimentais de cada etapa do processo de fabricação.

# 4.2 - LIMPEZA PADRÃO RCA<sup>[3]</sup>

A limpeza das lâminas de silício é fundamental num processo de microfabricação, pois nesta etapa são reduzidas ao menor número possível a quantidade de impurezas e contaminante na superfície do substrato de silício onde ocorrerão os processos subsequentes. As principais impurezas removidas por esta limpeza são:

- gorduras
- óxido nativo
- metais
- íons alcalinos
- partículas

A qualidade e desempenho dos dispositivos dependem fortemente desta etapa no processo de fabricação.

### 4.3 – Oxidação térmica para obtenção de óxido de campo

O processo de oxidação do silício é uma das etapas fundamentais no processo de fabricação de dispositivos. O óxido de silício  $(SiO_2)$  tem diversas funções como:

- máscara contra difusão ou implantação de impurezas
- isolação entre dispositivos (óxido de campo)
- dielétrico para estruturas MOS
- isolação entre multiníveis de metal
- As principais técnicas para a obtenção do óxido são:
- oxidação térmica (oxidação úmida, oxidação seca e RTP Rapid Thermal Process)
- anodização úmida
- deposição química em fase vapor (CVD)
- oxidação por plasma

O processo de oxidação térmica ocorre com a superfície do silício exposta em ambiente oxidante, formando uma camada de óxido de Silício, devido à reação do oxigênio com o silício. Há dois tipos de oxidação térmica: oxidação térmica úmida e seca. O processo de oxidação úmida é realizado utilizando vapor d'água como espécie oxidante. Este processo de oxidação é mais rápido que o processo de oxidação seca, porém o óxido produzido é poroso devido à presença de hidrogênio. Contudo o óxido obtido atende as necessidades de aplicações como óxido de campo e óxido de mascaramento. O processo de oxidação seca utiliza oxigênio seco como espécie oxidante. Este processo de oxidação seca oficação de campo e óxido de mascaramento. O processo de oxidação seca utiliza oxigênio seco como espécie oxidante.

mais lento que o anterior, porém o óxido obtido é de melhor qualidade, mais denso, proporcionando uma densidade de cargas efetivas menor, necessário em certas aplicações. Junto com o oxigênio pode ser utilizado o gás TCE (Tricloroetileno), ou outra fonte de cloro, que reage com certas impurezas como os íons alcalinos, principalmente o sódio que é uma partícula móvel no óxido.

### 4.4 – FOTOGRAVAÇÃO DO ÓXIDO DE CAMPO

Na construção do diodo Schottky utilizaremos o óxido de campo para delimitar as regiões  $P^+$  dopadas com Boro para formação de anel de guarda e linhas de grade de difusão, e para definição da região de contato Schottky. Para selecionarmos estas regiões onde o óxido de campo deve ser removido, utilizamos o processo de fotolitografia.

No processo de fotolitografia ou fotogravação, primeiramente uma substância sensível à exposição em luz UV, denominada fotorresiste, é aplicada na superfície da lâmina. Com o fotorresiste espalhado, a lâmina é levada para uma estufa ou colocada numa placa quente (*hot plate*) para a cura do resiste, evaporando o solvente do produto. Feito a cura do resiste, a lâmina é levada para a fotoalinhadora, onde será exposta à radiação UV. A máscara é alinhada com a lâmina e inicia-se a exposição à luz UV. Esta luz atravessa as partes transparentes da máscara, sensibilizando o fotorresiste. A luz ultravioleta emitida sensibiliza o fotorresiste, despolimerizando a região exposta, fotorresiste positivo, ou polimerizando esta região, fotorresiste negativo. Então o fotorresiste sensibilizado é revelado, expondo certas regiões na lâmina onde será feito a corrosão do óxido. Esta corrosão pode ser por processos de corrosão úmida, quando é feita utilizando-se soluções químicas como ácidos ou bases, ou pode ser por processos de corrosão seca utilizando-se plasma reativo.

É muito importante certificar-se de que não há partículas na lâmina e na máscara. A presença dessas partículas causa problemas na revelação do fotorresiste e quando encontrada na máscara pode bloquear a passagem de radiação UV comprometendo a transferência dos padrões geométricos da máscara para a lâmina. Assim é recomendado limpar a lâmina, antes de depositar o fotorresiste, e a máscara, antes de expor o fotorresiste a radiação ultravioleta, com jato de nitrogênio.

# 4.5 – Processos de corrosão de óxido de Silício

A remoção do óxido de silício pode ser feita por processos de corrosão úmida ou seca. O processo de corrosão úmida é bastante utilizado nos processos de microeletrônica, por ser uma tecnologia bem estabelecida, além de proporcionar alta seletividade entre a camada subjacente e a máscara. No entanto este tipo de processo é tipicamente isotrópico e para corrosão de padrões onde a espessura do filme é comparável às dimensões mínimas, ocorre a corrosão do filme por debaixo da máscara (*undercuting*). A figura 4.5 ilustra o processo de *undercuting*.



Figura 4.5 – Corrosão úmida de padrão de dimensão muito pequena, resultando na corrosão total do filme sob a máscara.

No caso de estruturas de alguns micrômetros, é necessário a utilização de um processo de corrosão anisotrópica, ou seja, onde a corrosão na direção horizontal seja praticamente nula. Este processo pode ser obtido utilizando processo de corrosão por plasma, onde o ajuste dos parâmetros determinam as características do processo de corrosão.

4.6 – Obtenção da região do tipo  $\text{p}^+$  e dopagem nas costas da lâmina para formação de contato ôhmico

Regiões dopadas no silício podem ser obtidas através de processos de difusão ou de implantação iônica das espécies dopantes. A técnica de implantação iônica proporciona melhor controle da profundidade de junção e da concentração de dopantes, em comparação com a técnica de difusão. Porém, o implantador de íons é um aparelho de custo elevado e sua aplicação se torna primordial em aplicações que necessitam de um alto grau de controle sobre estas variáveis. Para a fabricação do diodo Schottky, a técnica de difusão é a mais apropriada, pela simplicidade do processo e baixo custo. Contudo, pela disponibilidade do implantador de íons e pelo domínio da técnica de implantação iônica, esta também será utilizada na fabricação do diodo Schottky.

Esta técnica consiste basicamente na formação de um feixe de íons do elemento a ser implantado sendo manipulado, através de campos eletrostáticos horizontais e verticais, para fazer uma varredura xy na lâmina a ser implantada, obtendo assim uma concentração uniforme de impurezas após a implantação. A lâmina fica dentro de um copo de Faraday conectado a um integrador de corrente elétrica. Desta forma cada íon que entra dentro do copo de Faraday é contado e assim podemos obter uma precisão muito grande do número de íons implantados na lâmina. Dividindo o número de íons implantados pela área da abertura do copo, podemos obter a concentração de dopantes por unidade de área.

Os íons ao incidirem na superfície da lâmina irão penetrar na rede cristalina e se chocar com os núcleos dos átomos dessa rede, perdendo velocidade até atingir a posição de repouso. Em adição, ocorre freiamento pela interação entre os elétrons do íon implantado e do material. Os choques nucleares resultam em defeitos na rede cristalina e dependendo da quantidade de defeitos resultantes da implantação, a matriz originalmente cristalina pode tornar-se amorfa. Além disso, os íons implantados estão na forma intersticial na rede cristalina, e, portanto, precisam receber energia térmica para se tornarem substitucionais para se comportarem como dopantes no cristal. Assim, para eliminar os defeitos e ativar os

dopantes implantados, após a implantação iônica é feito um recozimento térmico em ambiente com gás inerte  $(N_2)$ .

Os parâmetros que caracterizam o processo de implantação iônica são: tipo de íon, a energia e a dose dos íons a serem implantados.

# 4.7 – Obtenção da região de contato metálico

O processo de *liftoff* pode ser utilizado para definir as regiões de contato metálico no diodo Schottky. Esta técnica consiste na deposição do fotorresiste sobre a superfície da lâmina e por processo fotolitografico, expor as regiões da lâmina onde serão estabelecidos os contatos metálicos. É muito importante que o fotorresiste revelado tenha um perfil negativo, para que ao depositar o filme metálico, este apresente descontinuidade entre a superfície da lâmina e a superfície do resiste. Desta maneira, ao removermos o fotorresiste, o metal sobre o fotorresiste é removido junto, ficando somente o metal em contato com a superfície da lâmina. Na Figura 4.7<sup>[4]</sup> temos fotos do processo de *liftoff* para obter contatos de Alumínio. Podemos perceber que a descontinuidade no filme metálico depositado e o perfil negativo do fotorresiste são muito importantes para que o processo funcione.

Preparada a lâmina com o fotorresiste, o filme metálico pode ser depositado. Finalmente o resiste é removido mergulhando-se as lâminas em acetona.

Observe que a definição dos contatos metálicos é feita através da remoção do fotorresiste que carrega junto o metal sobre ele. Esta técnica é muito interessante, pois não há a necessidade de se preocupar com uma substância que reaja com o metal depositado para fazer a corrosão, pois a substância deve reagir com o fotorresiste, e para remover fotorresiste podemos utilizar acetona. Assim independentemente do metal depositado, utilizando a técnica de *liftoff*, podemos obter os contatos metálicos utilizando a mesma substância, no caso a acetona.

Na construção do diodo Schottky, a técnica de *liftoff* é utilizada para definir as regiões de contato Schottky do diodo.

Além da técnica de *liftoff*, as regiões de contato metálico podem ser definidas pelo processo de fotogravação convencional, assim como o usado para obter as regiões de anel de guarda e contato Schottky descritos anteriormente (item 4.4). Neste caso, o fotorresiste cobre a superfície da lâmina deixando expostas somente as regiões onde se deseja remover o metal. Assim, utilizando uma substância adequada para remover determinado tipo de metal, podemos definir os contatos Schottky.



Figura 4.7 – a) Perfil negativo do fotorresiste revelado, b) Descontinuidade do metal, entre o fotorresiste e o substrato, depositado sobre a superfície da lâmina, c) Metal sobre a superfície da lâmina após a remoção do fotorresiste<sup>[4]</sup>.

## 4.8 – DEPOSIÇÃO DE TUNGSTÊNIO (W) POR SPUTTERING

O processo de *Sputtering* consiste na remoção de átomos de uma superfície, no caso o alvo, pela colisão de partículas de alta energia. Normalmente as partículas que colidem no alvo são geradas através de plasma de um gás nobre, sendo o mais utilizado o Argônio. As partículas ionizadas chocam-se contra o alvo transferindo energia e momento para os átomos<sup>[2]</sup>. Como resultado, alguns átomos do alvo são removidos ficando livres para se depositar em todo o interior da câmara, inclusive sobre a lâmina em processo. Esta técnica de deposição propicia a obtenção de filmes com propriedades diferenciadas de outras técnicas, como evaporação e CVD. O filme depositado apresenta boa aderência ao substrato devido à alta energia dos átomos removidos do alvo, que formam o filme. A taxa de deposição é repetitiva sendo apenas necessário o ajuste do tempo de deposição para se obter um filme com determinada espessura. Na deposição por Sputtering o filme é formado átomo por átomo, resultando em um filme não poroso, obtendo assim superfícies finais que reproduzem a do substrato. As desvantagens desta técnica de deposição de filmes finos é a baixa taxa de deposição, de 5 a 300 nm/min, e pelo processo não ser realizado em pressões muito baixas, por volta de alguns mTorr, o que permite que contaminante presentes durante o processo, originados de impurezas presentes no gás ou alvo, sejam incorporadas ao filme.

# 4.9 – Obtenção do Siliceto de Tungstênio (WSI2)

O Siliceto de Tungstênio pode ser obtido depositando-se Tungstênio puro sobre a lâmina de Silício e posteriormente fazendo o recozimento do filme depositado<sup>[4],[5]</sup>. Desta forma o Tungstênio reage com o Silício do substrato, onde a composição do filme formado depende da condição de recozimento térmico (temperatura e tempo de processo). Como o processo é feito em alta temperatura,  $650^{\circ}C^{[6]}$ , é muito importante que o gás utilizado no recozimento não contenha oxigênio, pois a presença deste elemento oxida o filme de Tungstênio.

# 4.10 – Deposição de Alumínio e Níquel por evaporação

A evaporação é uma técnica muito utilizada para obtenção de filmes metálicos em processos de microeletrônica. O processo ocorre numa câmara em alto vácuo onde o aquecimento de uma fonte de metal forma um vapor deste material que é transportado e depositado no substrato. O vácuo na câmara é menor que 10<sup>-5</sup> torr durante a deposição. Com esse nível de vácuo, o vapor do metal não sofre colisão com partículas do gás residual dentro da câmara, podendo percorrer o caminho entre a fonte metálica até o substrato livremente.

A evaporação do metal pode ser feita de três maneiras: por aquecimento resistivo, aquecimento indutivo ou bombardeio de feixe de elétrons. No nosso caso, a fabricação do diodo Schottky, o método de aquecimento da fonte metálica é por bombardeio de feixe de elétrons. Nesta técnica um feixe de elétrons (5KV – 10KV) é direcionado, através de campo magnético, bombardeando a fonte metálica. A temperatura do metal pode chegar a mais de 3000°C, possibilitando o uso desta técnica para depositar filmes de metais refratários.

Depois de feita a deposição do metal é necessário que seja feito um recozimento térmico, para estabelecer o contato entre o metal e o substrato de silício, eliminando o óxido nativo presente na interface logo após a deposição.

# 4.11– Legenda.

-

Antes da descrição de cada processo de fabricação foram feitas figuras que representam as etapas envolvidas nestes processos.





# 4.12 – CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO

Para a construção dos dispositivos foram utilizados substratos de silício  $n^+$  com camada epitaxial  $n^-$  com as seguintes especificações:

Substrato: Diâmetro: 76mm Tipo/Dopante: tipo n/Sb Orientação: <100> +/- 1
Espessura: 356 - 406μm
Resistividade: 0.008 - 0.020Ω.cm
Camada epitaxial: Tipo/Dopante: tipo n/P
Espessura: 4μm +/- 10%
Resistividade: 1.1Ω.cm +/- 10%

4.13 – DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL COM SILICETO DE TUNGSTÊNIO (DICONWSi2)

Os silicetos de metais refratários apresentam boas características para formação da barreira Schottky, como: baixa resistividade, boa estabilidade em altas temperaturas e alta resistência a eletromigração<sup>[7]</sup>. Um metal refratário apropriado para formação de barreira Schottky para diodos de potência é o tungstênio<sup>[8]</sup>. O siliceto formado (WSi<sub>2</sub>) apresenta altura de barreira de potencial (0,65eV) adequada para dispositivos que operam com tensões até 60(V), com queda de tensão direta menor que dispositivos construídos utilizando silicetos formados com outros metais como PtSi (siliceto de Platina) com altura de barreira de potencial de 0,84eV. Assim, o tungstênio é um dos metais mais indicados para a formação de contato Schottky de siliceto para dispositivos de potência que não necessitam de tensões de ruptura muito elevadas. No Apêndice B apresentamos os resultados obtidos no estudo para obtenção de siliceto de Tungstênio.

A figura 4.13 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.



Figura 4.13 – Ilustração da sequência de processos do diodo Schottky convencional com siliceto de tungstênio.

### A – LIMPEZA RCA.

Esta limpeza é feita seguindo-se um procedimento padrão RCA, que consiste nas seguintes etapas mergulhando as lâminas em soluções de:

- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (4:1) em 80°C por 10 minutos. Esta solução é conhecida como piranha e utilizada para remover principalmente quantidades de compostos orgânicos presentes na superfície das lâminas de silício;
- 2) HF/H<sub>2</sub>O (1:10) em temperatura ambiente por 10 segundos. Esta solução remove o óxido nativo na superfície do silício;
- NH<sub>4</sub>OH/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (1:1:5) em 80°C por 10 minutos. Esta solução remove a gordura e os metais do grupo IB e IIIB (Cu, Ag, Zn, Cd);
- HCl/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (1:1:5) em 80°C por 10 minutos. Esta solução dissolve os íons alcalinos (Na, K) e hidróxidos de Fe<sup>+3</sup>, Al<sup>+3</sup> e Mg<sup>+3</sup> das superfícies dos substratos.

Entre uma etapa e outra, as lâminas de silício são enxaguadas com água deionizada (18 M $\Omega$ .cm) durante 3 minutos e deixadas mais 3 minutos dentro do béquer com água, e novamente enxaguadas. Depois de realizadas todas as etapas, as lâminas são secas com nitrogênio, colocadas num recipiente especifico para seu transporte e não são mais expostas ao ambiente de laboratório.

B-FOTOGRAVAÇÃO para preparação da lâmina para processo de  ${\it liftoff}.$ 

Para obtermos o perfil adequado para realizarmos o processo de *liftoff*, foi feito o seguinte procedimento:

- 1) Secagem das lâminas na estufa com temperatura de 90°C durante 10 minutos.
- 2) Aplicação do fotorresiste AZ5214 com umidade relativa do ar de 45% e temperatura de 22°C na sala. A velocidade do Spinner é de 3000 rpm com tempo de 30seg.
- 3) Pré-cura do fotorresiste numa placa quente (*hot plate*) com temperatura de 90°C durante 4 minutos.
- 4) Exposição em luz ultravioleta (S=9mW/cm<sup>2</sup>) do fotorresiste durante 0,8 segundos no modo CI-II (ajuste da fotoalinhadora) sem máscara.
- 5) Cura do fotorresiste numa placa quente (*hot plate*) com temperatura de 110°C durante 1 minuto e 45 segundos.
- 6) Exposição em luz ultravioleta (S=9mW/cm<sup>2</sup>) do fotorresiste durante 80 segundos no modo CI-II (ajuste da fotoalinhadora) com a máscara Mask3.
- 7) Revelação do fotorresiste sensibilizado com solução reveladora: H<sub>2</sub>O/MIF312 (1:1). O tempo de revelação foi de aproximadamente 3 minutos e 20 segundos.

C – DEPOSIÇÃO DE FILME DE TUNGSTÊNIO POR PROCESSO DE *SPUTTERING*.

O equipamento de *sputtering* usado é do tipo DC magnetron. O alvo de Tungstênio tem forma circular com 4 polegadas de diâmetro e pureza de 99,999%. O equipamento opera com uma fonte DC de 5000W de potência e possui um Magnetron, imãs permanentes colocados sob o alvo para aumentar a densidade dos íons no plasma sobre o alvo.

Antes de carregar as amostras na câmara de processo, mergulhou-se a lâmina em solução buffer de HF (BOE) durante aproximadamente 5 segundos seguido de enxágue durante 1 minuto. Isto é feito para remover o óxido nativo da superfície da lâmina onde será depositado o metal de contato Schottky.

Os parâmetros do processo de deposição do filme de Tungstênio por Sputtering são:

- Gás: Argônio
- Potência: 200W
- Pressão base: 5.10<sup>-6</sup> mbar
- Pressão: 1.10<sup>-2</sup> mbar
- Espessura do filme: 100nm.

D – *Liftoff* do Tungstênio depositado para definição das regiões de contato de catodo do diodo Schottky.

Para a definição das regiões de contato Schottky, as lâminas foram mergulhadas em um béquer com acetona durante 2 horas para que o fotorresiste fosse removido levando junto o metal depositado sobre o fotorresiste. Para remover qualquer resíduo de fotorresiste, utilizou-se o aparelho de ultra-som durante 30 segundos.

E – LIMPEZA ORGÂNICA DAS LÂMINAS.

Esta limpeza consiste nas seguintes etapas, mergulhando as lâminas em soluções de:

- 1) Acetona: Temperatura 80°C durante 10 minutos
- 2) Isopropanol: Temperatura 80°C durante 10 minutos
- 3) Enxágue: Água DI (resistividade =  $18 \text{ M}\Omega$ )
- 4) Secagem com jato de  $N_2$

F – RECOZIMENTO DO FILME DE TUNGSTÊNIO PARA FORMAÇÃO DE SILICETO.

O processo foi realizado em forno térmico com a entrada do forno selada. O processo é realizado com temperatura de 650°C. A sequência de passos durante o recozimento do filme de Tungstênio é a seguinte:

- A entrada do forno é aberta com nitrogênio circulando no interior do forno com fluxo de 1 litro por minuto.
- A amostra é colocada na entrada do forno e em seguida fechada.
- A linha de gás verde (8%H<sub>2</sub>/92%N<sub>2</sub>) é ligada com fluxo de 1 litro por minuto, e a amostra permanece na entrada do forno durante 5 minutos para homogeneizar o ambiente no interior do forno com gás verde.
- A amostra é colocada no meio do forno, ponto onde a temperatura é de 650°C, durante 15 minutos.
- A amostra é trazida para a entrada do forno.
- Desliga-se a linha de gás verde e liga-se a linha de nitrogênio com fluxo de 1 litro por minuto.
- Depois de 5 minutos, tempo para que a tampa do forno esfrie, a lâmina é retirada do forno.

A lâmina é colocada e retirada do forno em ambiente de nitrogênio, pois o gás verde contém uma parte de hidrogênio, e assim a abertura do forno expondo este gás a sala onde ocorre o processo pode resultar num acumulo de hidrogênio. Isto deve ser evitado, pois o hidrogênio é um gás explosivo e seu acumulo pode resultar em acidente.

# $G-Evaporação\,$ de filme de alumínio para formação de contato ôhmico.

Para a evaporação do filme de Alumínio foi utilizada uma evaporadora da marca EDWARDS E19E do tipo e-beam.

Antes de carregar as amostras na câmara de processo, na superfície onde foi depositado o metal, foi aplicada solução *buffer* de HF (BOE) seguido de enxágue durante 1 minuto. Isto é feito para remover o óxido nativo da superfície da lâmina onde será depositado o metal de contato ôhmico.

Os parâmetros do processo de deposição do filme de Alumínio por evaporação são:

- Pressão base: 2.10<sup>-6</sup> mTorr
- Pressão: 4.10<sup>-5</sup> mTorr
- Taxa de deposição: 2nm/s
- Espessura do filme: 200nm.

H – SINTERIZAÇÃO DO FILME DE ALUMÍNIO PARA FORMAÇÃO DE CONTATO ÔHMICO.

O processo foi realizado em forno térmico com a entrada do forno selada. O processo foi realizado com temperatura de 450°C. A seqüência de passos durante o recozimento do filme de Alumínio foi a seguinte:

- A entrada do forno foi aberta com nitrogênio circulando no interior do forno com fluxo de 1 litro por minuto.
- A amostra foi colocada na entrada do forno e em seguida fechada.
- A linha de gás verde  $(8\%H_2/92\%N_2)$  foi ligada com fluxo de 1 litro por minuto, e a amostra permaneceu na entrada do forno durante 5 minutos para homogeneizar o ambiente no interior do forno com gás verde.
- A amostra foi colocada no meio do forno, ponto onde a temperatura foi calibrada em 450°C, durante 30 minutos.
- A amostra foi trazida para a entrada do forno.
- Desligou-se a linha de gás verde e ligou-se a linha de nitrogênio com fluxo de 1 litro por minuto.
- Após 5 minutos, a lâmina foi retirada do forno.

### 4.14 – DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL COM ALUMÍNIO/TUNGSTÊNIO (DICONAIW)

As amostras para obtenção do siliceto de tungstênio (Apêndice B) apresentaram óxido nas análises XRD do filme formado. Assim, nesta corrida utilizamos o Tungstênio para substituir o siliceto de Tungstênio, usado anteriormente como metal do contato Schottky. Para evitar a oxidação do filme de tungstênio durante o processo de recozimento do contato ôhmico, depositamos um filme de Alumínio sobre o filme de Tungstênio. Dessa maneira isolamos o Tungstênio do ambiente de recozimento térmico, evitando a formação do óxido de Tungstênio. A seguir estão descritas as etapas de fabricação dos diodos com Alumínio/Tungstênio.

A figura 4.14 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.



Figura 4.14 – Ilustração da sequência de processos do diodo Schottky convencional com Alumínio/Tungstênio.

A – LIMPEZA RCA.

O procedimento para limpeza RCA está descrito na etapa A do item 4.13.

B – DEPOSIÇÃO DE FILME DE TUNGSTÊNIO POR PROCESSO DE SPUTTERING.

Antes de carregar as amostras na câmara de processo, mergulhou-se a lâmina em solução buffer de HF (BOE) durante aproximadamente 5 segundos seguido de enxágue durante 1 minuto.

Os parâmetros do processo de deposição do filme de Tungstênio por Sputtering são:

- Gás: Argônio
- Potência: 200W
- Pressão base: 4,2.10<sup>-6</sup> mbar
- Pressão: 1.10<sup>-2</sup> mbar
- Espessura do filme: 200nm.

C – Evaporação de filme de alumínio

Para a evaporação do filme de Alumínio foi utilizada uma evaporadora da marca EDWARDS E19E do tipo e-beam.

Antes de carregar as amostras na câmara de processo, mergulhou-se a lâmina em solução buffer de HF (BOE) durante aproximadamente 5 segundos seguido de enxágue durante 1 minuto.

Os parâmetros do processo de deposição do filme de Alumínio por evaporação são:

- Pressão base: 2.10<sup>-6</sup> mTorr
- Pressão: 4.10<sup>-5</sup> mTorr
- Taxa de deposição: 10nm/s
- Espessura do filme: 1µm.

 $D-\ Fotogravação\ para\ definição\ do\ contato\ Schottky.$ 

As etapas do processo de fotolitografia invertida para definição do contato Schottky são as seguintes:

- Aplicação do fotorresiste AZ5214 com umidade relativa do ar de 50% e temperatura de 25°C na sala. A velocidade do Spinner é de 4500 rpm com tempo de 40seg.
- 2) Pré-cura do fotorresiste numa placa quente (*hot plate*) com temperatura de 90°C durante 4 minutos.
- 3) Exposição em luz ultravioleta (S=9mW/cm<sup>2</sup>) do fotorresiste durante 16 segundos no modo CI-II (ajuste da fotoalinhadora) com a máscara Mask3.
- 4) Cura do fotorresiste numa placa quente (*hot plate*) com temperatura de 118°C durante 1 minuto e 45 segundos.
- 5) Exposição em luz ultravioleta (S=9mW/cm<sup>2</sup>) do fotorresiste durante 40 segundos no modo CI-II (ajuste da fotoalinhadora) sem máscara.
- Revelação do fotorresiste sensibilizado com solução reveladora: H<sub>2</sub>O/MIF312 (1:1). O tempo de revelação foi de aproximadamente 1 minuto e 10 segundos.

### E – CORROSÃO DO ALUMÍNIO EXPOSTO PELA FOTOGRAVAÇÃO.

A remoção do Alumínio foi feita mergulhando-se a lâmina fotogravada em solução de  $H_3PO_4/HNO_3$  9,5:0,5 aquecida a 30°C. O tempo de corrosão foi de aproximadamente 1 minuto. Depois de feita a corrosão as lâminas foram enxaguadas em água DI (resistividade = 18M $\Omega$ .cm).

### F - REMOÇÃO DO FOTORRESISTE NÃO REVELADO.

O fotorresiste foi retirado da lâmina com acetona, álcool isopropanol e água DI (resistividade =  $18M\Omega$ .cm). Em seguida, foi feita uma limpeza orgânica utilizando-se o mesmo procedimento descrito na etapa E do item 4.13.

### G – Corrosão Tungstênio exposto pela corrosão do Alumínio.

O Tungstênio foi removido mergulhando-se a lâmina em solução de  $NH_4OH/H_2O_2$ 1:1. O tempo de corrosão foi de aproximadamente 4 minutos. Depois de feita a corrosão as lâminas foram enxaguadas em água DI (resistividade =  $18M\Omega$ .cm). Em seguida foi feita uma limpeza orgânica utilizando-se o mesmo procedimento descrito na etapa E do item 4.13.

### H – Evaporação de filme de alumínio

Para a evaporação do filme de Alumínio foi utilizada uma evaporadora do tipo e-beam.

Antes de carregar as amostras na câmara de processo, na superfície onde foi depositado o metal, foi aplicada solução buffer de HF (BOE), esfregando com cotonete, seguido de enxágue durante 1 minuto.

Os parâmetros do processo de deposição do filme de Alumínio são os mesmos descritos na etapa C deste item (4.14).

I – SINTERIZAÇÃO DO FILME DE ALUMÍNIO PARA FORMAÇÃO DE CONTATO ÔHMICO.

O processo foi realizado em forno térmico convencional com temperatura de 450°C. A seqüência de passos do processo de sinterização do contato de Alumínio é a seguinte:

- Entrada da barqueta de quartzo no forno, em ambiente de gás verde (8%H<sub>2</sub>/92%N<sub>2</sub>) com fluxo de 11/min, por tempo maior que 3 minutos.
- Manter a amostra neste ambiente durante 30 minutos.
- Retirada da barqueta de quartzo do forno, em ambiente de gás verde (8%H<sub>2</sub>/92%N<sub>2</sub>) com fluxo de 11/min, por tempo maior que 3 minutos.

### 4.15 – DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL COM NÍQUEL/TUNGSTÊNIO (DICONNiW)

Nesta corrida foram feitos diodos Schottky com Tungstênio, como metal de contato Schottky, coberto por Níquel. O Níquel foi necessário, por ser um metal compatível com o processo de encapsulamento dos diodos fabricados. Além disso, nesta corrida testamos a repetibilidade do processo, já que o metal utilizado como contato Schottky é o Tungstênio.

A figura 4.15 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.



Figura 4.15 – Ilustração da sequência de processos do diodo Schottky convencional com Níquel/Tungstênio.

A – LIMPEZA RCA.

O procedimento para limpeza RCA está descrito na etapa A do item 4.13.

B – DEPOSIÇÃO DE FILME DE TUNGSTÊNIO POR PROCESSO DE *SPUTTERING*.

O procedimento para deposição do filme de Tungstênio para contato Schottky está descrito na etapa B do item 4.14.

### C – Evaporação de filme de Níquel.

Para a evaporação do filme de Níquel foi utilizada uma evaporadora do tipo e-beam. Antes de carregar as amostras na câmara de processo, mergulhou-se a lâmina em solução buffer de HF (BOE) durante aproximadamente 5 segundos seguido de enxágue durante 1 minuto. Os parâmetros do processo de deposição do filme de Níquel por evaporação são:

- Pressão base: 2.10<sup>-8</sup> mTorr.
- Taxa de deposição: 0,8Å/s.
- Espessura do filme: 100nm.

 $D-\ Fotogravação\ para\ definição\ do\ contato\ Schottky.$ 

As etapas do processo de fotolitografia invertida para definição do contato Schottky são as mesmas descritas na etapa D do item 4.14.

E – DENSIFICAÇÃO DO FOTORRESISTE.

Para tornar o fotorresiste mais resistente ao processo de corrosão do níquel, foi feito um processo de densificação do fotorresiste com plasma de SiCl<sub>4</sub>/Ar. Os dados do processo são:

- Pressão base:2mTorr
- Pressão processo:50mTorr
- Fluxo(sccm): 15SiCl<sub>4</sub>/10Ar
- Potência RF: 80W
- Tensão DC: 449(V)
- Tempo: 10 minutos

F – Corrosão do Níquel exposto pela fotogravação.

A remoção do Níquel foi feita mergulhando-se a lâmina fotogravada em solução de  $HF/HNO_3$  (1,5ml/40ml) em temperatura ambiente. O tempo de corrosão foi de aproximadamente 5 segundos. Depois de feita a corrosão as lâminas foram enxaguadas em água DI (resistividade =  $18M\Omega$ .cm).

G - Remoção do fotorresiste não revelado.

O procedimento para remoção do fotorresiste não revelado é o mesmo descrito no na etapa F do item 4.14.

H – Corrosão Tungstênio exposto pela corrosão do Níquel.

O procedimento para corrosão do Tungstênio é o mesmo descrito na etapa G do item 4.14.

I – Evaporação de filme de Níquel para formação de contato ôhmico

O procedimento para evaporação do filme de Níquel é o mesmo descrito na etapa C deste item (4.15).

J-Sinterização do filme de Níquel para formação de contato ôhmico.

O processo foi realizado em forno térmico com a entrada do forno selada. O processo foi feito com temperatura de 400°C. A seqüência de passos durante o recozimento do filme de Níquel foi a seguinte:

- A entrada do forno foi aberta com nitrogênio circulando no interior do forno com fluxo de 1 litro por minuto.
- A amostra foi colocada na entrada do forno e em seguida fechada.
- A linha de gás verde (8%H<sub>2</sub>/92%N<sub>2</sub>) foi ligada com fluxo de 1 litro por minuto, e a amostra permaneceu na entrada do forno durante 5 minutos para homogeneizar o ambiente no interior do forno com gás verde.
- A amostra foi colocada no meio do forno, ponto onde a temperatura foi calibrada em 400°C, durante 5 minutos.
- A amostra foi trazida para a entrada do forno.
- Desligou-se a linha de gás verde e ligou-se a linha de nitrogênio com fluxo de 1 litro por minuto.
- Após 5 minutos, a lâmina foi retirada do forno.

# 4.16 – DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL COM ALUMÍNIO (DICONAI)

Para verificarmos a influência do metal de contato Schottky no comportamento do dispositivo foram construídos diodos com Alumínio como metal de contato Schottky. A seguir temos o processo de fabricação deste dispositivo.

A figura 4.16 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.



Figura 4.16 – Ilustração da sequência de processos do diodo Schottky convencional com Alumínio.

A – Obtenção do contato Schottky de Alumínio

O procedimento para obtenção do contato Schottky de Alumínio consiste nas seguintes etapas:

- Limpeza RCA (etapa A item 4.13)
- Evaporação de Alumínio para contato Schottky (etapa C item 4.14)
- Fotogravação para definição do contato Schottky (etapa D item 4.14)
- Corrosão do Alumínio exposto pela fotogravação (etapa E item 4.14)
- Remoção do fotorresiste não revelado (etapa F item 4.14)

B – Obtenção de contato ôhmico de catodo do diodo Schottky.

O procedimento para obtenção do contato ôhmico do cátodo do diodo Schottky consiste nas seguintes etapas:

- Evaporação de Alumínio (etapa H item 4.14)
- Sinterização do filme de Alumínio para formação de contato ôhmico (etapa I item 4.14).

4.17 – DIODO SCHOTTKY COM SOBREPOSIÇÃO DE METAL.

Foram fabricados dois tipos de diodo Schottky com sobreposição de metal, onde um diodo (DISM\_OU) tem sobreposição de metal com oxido obtido por processo de oxidação úmida e o outro (DISM\_OS) por processo de oxidação seca. Primeiramente foi utilizado o óxido obtido por processo de oxidação úmida. Porém como os dispositivos fabricados não apresentaram boas características IxV, mudamos o processo de oxidação para oxidação seca, pois este produz um óxido de melhor qualidade com densidade de cargas inferior ao obtido pelo processo de oxidação úmida. Além disso, Foram utilizados WSi2 e AlW como metal de contato Schottky dos dispositivos DISM OU e DISM OS respectivamente.

A figura 4.17 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.



Figura 4.16 – Ilustração da sequência de processos do diodo Schottky convencional com Alumínio.

A – LIMPEZA RCA.

O procedimento para limpeza RCA está descrito na etapa A do item 4.13.

# B - OXIDAÇÃO DE CAMPO.

# B.1 – OXIDAÇÃO ÚMIDA

- 1) Ajuste da temperatura do forno em 1000°C.
- 2) Entrada da barqueta de quartzo com as lâminas no forno em ambiente de  $N_2$  com fluxo de 11/min por tempo maior que 3 minutos.
- 3) Deixar as lâminas no ambiente de N<sub>2</sub> por 15 minutos.
- 4) Desligar a linha de  $N_2$ , ligar a linha de  $O_2$  com fluxo de 11/min, e deixar as lâminas neste ambiente por 5 minutos.
- 5) Ligar o sistema de borbulhador O<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>O com 63 gotas de H<sub>2</sub>O/min, para manter as lâminas em ambiente com vapor d'água por 80 minutos.
- 6) Desligar o sistema de borbulhador  $O_2/H_2O$ , ligar a linha de  $N_2$  com fluxo de 11/min, e deixar as lâminas neste ambiente por 60 minutos.
- Executar a saída da barqueta de quartzo com as lâminas de forno em ambiente de N<sub>2</sub>, com fluxo de 11/min por tempo maior que 3 minutos.

A espessura do óxido medida com interferômetro é 0.45µm. Dispositivo processado: DISM\_OU.

# B.2- OXIDAÇÃO SECA.

O processo é realizado em forno térmico convencional e ocorre da seguinte maneira:

- 1) Ajuste da temperatura do forno em 1100°C.
- 2) Entrada da barqueta de quartzo com as lâminas no forno em ambiente de  $N_2$  com fluxo de 11/min por tempo maior que 3 minutos.
- 3) Deixar as lâminas no ambiente de  $N_2$  por 5 minutos.
- 4) Desligar a linha de  $N_2$ , ligar a linha de  $O_2$  com fluxo de 11.min, e deixar as lâminas neste ambiente por 5 minutos.
- 5) Ligar a linha de  $O_2$  + TCE(0,2%), para manter as lâminas em ambiente de oxidação seca por 4 horas.
- 6) Desligar a linha de  $O_2$  + TCE(0,2%), mantendo ligada a linha de  $O_2$  principal com fluxo de 11/min, e deixar as lâminas neste ambiente por 5 minutos.
- 7) Desligar a linha de  $O_2$ , ligar a linha de  $N_2$  com fluxo de 11.min, e deixar as lâminas neste ambiente por 30 minutos.
- 8) Executar a saída da barqueta de quartzo com as lâminas de forno em ambiente de N<sub>2</sub>, com fluxo de 11/min por tempo maior que 3 minutos.

A espessura do óxido medida com interferômetro é 0.43µm.

Dispositivo processado: DISM\_OS.

### C~- Fotogravação para obtenção da região de contato Schottky.

As etapas do processo de fotolitografia para obtenção da região de contato Schottky são as seguintes:

- Aplicação do fotorresiste AZ1518 com umidade relativa do ar de 45% e temperatura de 22°C na sala. A velocidade do Spinner é de 7000 rpm com tempo de 40seg.
- 2) Cura do fotorresiste na placa quente com temperatura de 100°C durante 1 minuto.
- 3) Exposição em luz ultravioleta (P=200W) do fotorresiste durante 25segundos no modo CP (ajuste da fotoalinhadora) com a máscara Mask2B.
- Revelação do fotorresiste sensibilizado com solução reveladora: H<sub>2</sub>O/MIF312 (1:1). O tempo de revelação foi de aproximadamente 40 segundos.
- 5) Pós cura do fotorresiste na estufa com temperatura de 118°C durante 30 minutos. Dispositivos processados: DISM OU e DISM OS.

D-CORROSÃO do óxido de campo exposto pela fotogravação.

A remoção do óxido de campo foi feita mergulhando-se a lâmina fotogravada em buffer de HF (BOE) até remover todo o óxido das costas da lâmina. O tempo de corrosão do óxido foi de aproximadamente 3 minutos. Depois de feita a corrosão as lâminas foram enxaguadas em água DI (resistividade =  $18M\Omega$ .cm).

Dispositivos processados: DISM\_OU e DISM\_OS.

E – Remoção do fotorresiste não revelado.

O procedimento para remoção do fotorresiste não revelado é o mesmo descrito na etapa F do item 4.14. Dispositivos processados: DISM\_OU e DISM\_OS.

Dispositivos processados: DISM\_OU e DISM\_OS.

F – Obtenção do contato Schottky de WSi2.

O procedimento para a definição do contato Schottky consiste na seguinte sequência de processos:

- Limpeza RCA (etapa A item 4.13).
- Fotogravação para preparação da lâmina para processo de *Liftoff* (etapa B item 4.13).
- Deposição de filme de Tungstênio por processo de *sputtering* (etapa C item 4.13).
- *Liftoff* do Tungstênio depositado para definição das regiões de contato de catodo do diodo Schottky (etapa D item 4.13).
- Limpeza orgânica das lâminas (etapa E item 4.13).
- Recozimento do filme de Tungstênio para formação de siliceto (etapa F item 4.13). Dispositivo processado: DISM\_OU.

# G - Obtenção do contato Schottky de Al/W.

O procedimento para a obtenção do contato Schottky de Al/W compreende seguinte sequência de processos:

- Limpeza RCA (etapa A item 4.13).
- Deposição de filme de Tungstênio por processo de *sputtering* (etapa B item 4.14).
- Evaporação de filme de alumínio (etapa C item 4.14).
- Fotogravação para definição do contato Schottky (etapa D item 4.14).
- Corrosão do alumínio exposto pela fotogravação (etapa E item 4.14).
- Remoção do fotorresiste não revelado (etapa F item 4.14).
- Corrosão Tungstênio exposto pela corrosão do Alumínio (etapa G item 4.14). Dispositivo processado: DISM OS.

G-Obtenção de contato ôhmico de catodo do diodo Schottky.

O procedimento para obtenção do contato ôhmico de catodo do diodo Schottky para o dispositivo DISM\_OU compreende a seguinte sequência de processos:

- Evaporação de filme de alumínio (etapa G item 4.13).
- Sinterização do filme de Alumínio para formação de contato ôhmico (etapa H item 4.13).

Para o dispositivo DISM\_OS:

- Evaporação de filme de alumínio (etapa H item 4.14).
- Sinterização do filme de Alumínio para formação de contato ôhmico (etapa I item 4.14).

4.18 - Diodos Schottky com anel de guarda e grade de linhas de difusão.

Nesta etapa foram fabricados diodos com anel de guarda e com grade de linhas de difusão, variando a concentração de boro. O objetivo foi fazer um estudo da variação das características elétricas do dispositivo em função deste parâmetro.

A figura 4.18 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.



(j) Figura 4.18 – Ilustração da sequência de processos do diodo Schottky com anel de guarda e grade de linhas de difusão.

A – LIMPEZA RCA.

O procedimento para limpeza RCA está descrito na etapa A do item 4.13.

B – Oxidação de campo.

O procedimento para obtenção do óxido de campo é o mesmo descrito na etapa B.2 do item 4.17.

C – Fotogravação para obtenção das regiões de anel de guarda e Grade de linhas de difusão.

As etapas do processo de fotolitografia para obtenção da região de contato Schottky são as seguintes:

- Aplicação do fotorresiste AZ1518 com umidade relativa do ar de 45% e temperatura de 22°C na sala. A velocidade do Spinner é de 7000 rpm com tempo de 40seg.
- 2) Cura do fotorresiste na placa quente com temperatura de 100°C durante 1 minuto.
- 3) Exposição em luz ultravioleta (P=200W) do fotorresiste durante 25segundos no modo CP (ajuste da fotoalinhadora) com a máscara Mask1.
- Revelação do fotorresiste sensibilizado com solução reveladora: H<sub>2</sub>O/MIF312 (1:1). O tempo de revelação foi de aproximadamente 40 segundos.
- 5) Pós cura do fotorresiste na estufa com temperatura de 118°C durante 30 minutos.

D-CORROSÃO do óxido de campo para obtenção da região de anel de guarda.

Para os dispositivos com anel de guarda, o óxido de campo foi corroído utilizando o mesmo procedimento descrito na etapa D do item 4.17.

E-CORROSÃO do óxido de campo para obtenção da grade de linhas de difusão.

Para os dispositivos com grade de linhas de difusão, a remoção do óxido de campo foi feita utilizando processo híbrido de plasma reativo. Os dados do processo de corrosão do óxido de Silício são os seguintes:

- 1) Corrosão do óxido
- Gases: 15SF<sub>6</sub>/30Ar
- Potência RF: 80W
- Pressão: 60mTorr
- Tempo: 7minutos.
- 2) Corrosão seletiva de óxido de Silício em substrato de Silício
- Gases: 15CF<sub>4</sub>/6H<sub>2</sub>/5Ar
- Potência RF: 75W
- Pressão: 40mTorr
- Tempo: 10minutos.

O motivo da utilização do processo de corrosão por plasma para este dispositivo, é o tamanho e o espaçamento das linhas da grade de difusão. Como as dimensões são muito pequenas, espessura das linhas e espaçamento entre elas de 2µm, no processo de corrosão úmida as linhas foram quase totalmente removidas, devido a característica isotrópica desse processo de corrosão. O processo de corrosão por plasma tem uma característica anisotrópica, o que proporcionou a obtenção das linhas da grade de difusão. As figuras 4.18.1 e 4.18.2 mostram o resultado dos processos de corrosão úmida e por plasma.



Figura 4.18.1 – Linhas de grade de difusão quase totalmente corroídas por processo de corrosão úmida do óxido de campo.





F – Remoção do fotorresiste não revelado.

O procedimento para remoção do fotorresiste não revelado é o mesmo descrito na etapa F do item 4.14. Em seguida foi feita uma limpeza RCA utilizando o mesmo procedimento descrito na etapa A do item 4.13.

G – obtenção das regiões  $P^+$ .

A região de anel de guarda foi obtida utilizando os processos de implantação iônica e de difusão de dopantes (Spin On Glass).

G.1 – SOG (SPIN ON GLASS)

As características do processo de deposição do dopante são as seguintes:

- Fonte de dopante:Boron A.
- Velocidade do Spinner=2000rpm.
- Tempo de Spinner=20 segundos.

O tratamento térmico para difusão dos dopantes foi feito em forno térmico convencional com temperaturas de 1100°C, durante 30 minutos em ambiente de  $0.75N_2 + 0.25O_2$  com fluxo de 1 litro por minuto.

O valor de Rs para a região  $P^+$  obtida com SOG foi de 16,97 $\Omega$ /sqr.

Após o tratamento térmico para difusão dos dopantes, o SOG foi removido com ácido fluorídrico (HF) aquecido à temperatura de 55°C. O tempo de remoção foi de aproximadamente 7 minutos.

G.2 – Implantação Iônica

Foi utilizada quatro doses diferentes de íons de Boro ( $^{11}B^+$ ), para verificarmos o comportamento do dispositivos em relação a esse parâmetro. Os dados do processo de implantação iônica são os seguintes:

Dispositivos Processados	Dose de Íons Implantada (cm <sup>-3</sup> )	Energia (Kev)
DIAG_12	$1.10^{12}$	40
DIGLD_12		
DIAG_13	$1.10^{13}$	20
DIGLD_12		
DIAG_14	$1.10^{14}$	20
DIGLD_14		
DIAG_15	$1.10^{15}$	40

Antes das lâminas serem submetidas ao processo de difusão térmica dos dopantes implantados, é feita uma limpeza RCA (etapa A do item 4.13.). O tratamento térmico para difusão dos dopantes foi feito em forno térmico convencional com temperatura de 1000°C durante 30 minutos em ambiente de N<sub>2</sub> com fluxo de 1 litro por minuto.
H – OBTENÇÃO DA REGIÃO DE CONTATO SCHOTTKY.

As etapas do processo de fotolitografia para obtenção da região de contato Schottky são as seguintes:

- Aplicação do fotorresiste AZ1518 com umidade relativa do ar de 40% e temperatura de 22°C na sala. A velocidade do Spinner é de 7000 rpm com tempo de 40seg.
- 2) Cura do fotorresiste na placa quente com temperatura de 100°C durante 1 minuto.
- 3) Exposição em luz ultravioleta (P=200W) do fotorresiste durante 25segundos no modo CP (ajuste da fotoalinhadora) com a máscara Mask2A.
- 4) Revelação do fotorresiste sensibilizado com solução reveladora: H<sub>2</sub>O/MIF312 (1:1). O tempo de revelação foi de aproximadamente 40 segundos.
- 5) Pós cura do fotorresiste na estufa com temperatura de 118°C durante 30 minutos.

A corrosão do óxido de campo foi feita utilizando o mesmo procedimento descrito na etapa D do item 4.17. Em seguida foi removido o fotorresiste não revelado (etapa f do item 4.14).

I - Obtenção do contato Schottky.

O procedimento para a obtenção do contato Schottky de Al/W compreende seguinte sequência de processos:

- Limpeza RCA (etapa A item 4.13).
- Deposição de filme de Tungstênio por processo de *sputtering* (etapa B item 4.14).
- Evaporação de filme de alumínio (etapa C item 4.14).
- Fotogravação para definição do contato Schottky (etapa D item 4.14).
- Corrosão do alumínio exposto pela fotogravação (etapa E item 4.14).
- Remoção do fotorresiste não revelado (etapa F item 4.14).
- Corrosão Tungstênio exposto pela corrosão do Alumínio (etapa G item 4.14).

J-Obtenção de contato ôhmico de catodo do diodo Schottky.

O procedimento para obtenção do contato ôhmico de catodo consiste na seguinte sequência de processos:

- Evaporação de filme de alumínio (etapa H item 4.14).
- Sinterização do filme de Alumínio para formação de contato ôhmico (etapa I item 4.14).

4.19 – Diodo Schottky com implantação de Fósforo para diminuir a resistência de contato do cátodo.

Para diminuir a resistência de contato do terminal de cátodo do diodo Schottky, foi feita uma implantação de fósforo nas costas da lâmina para diminuir a resistividade desta região.

A figura 4.19 ilustra a sequência de etapas do processo de fabricação deste dispositivo. Logo em seguida apresentamos a descrição de cada etapa.





## A – LIMPEZA RCA.

O procedimento para limpeza RCA está descrito na etapa A do item 4.13.

## B~- Dopagem da região de contato ôhmico

Os dados do processo de implantação iônica de fósforo  $({}^{31}P^{+})$ são os seguintes:

Dose de Íons Implantada (cm <sup>-3</sup> )	Energia (Kev)
$5.10^{15}$	40

Antes das lâminas serem submetidas ao processo de difusão térmica dos dopantes implantados, é feita uma limpeza RCA (etapa A do item 4.13). O tratamento térmico para difusão dos dopantes foi feito em forno térmico convencional com temperatura de 1000°C durante 30 minutos em ambiente de N<sub>2</sub> com fluxo de 1 litro por minuto.

 $C \ - Obtenção do contato Schottky.$ 

O procedimento para a obtenção do contato Schottky de Al/W compreende a seguinte sequência de processos:

- Limpeza RCA (etapa A item 4.13).
- Deposição de filme de Tungstênio por processo de *sputtering* (etapa B item 4.14).
- Evaporação de filme de alumínio (etapa C item 4.14).
- Fotogravação para definição do contato Schottky (etapa D item 4.14).
- Corrosão do alumínio exposto pela fotogravação (etapa E item 4.14).
- Remoção do fotorresiste não revelado (etapa F item 4.14).
- Corrosão Tungstênio exposto pela corrosão do Alumínio (etapa G item 4.14).

## D – Obtenção de contato ôhmico de catodo do diodo Schottky.

O procedimento para obtenção do contato ôhmico de catodo consiste na seguinte sequência de processos:

- Evaporação de filme de alumínio (etapa H item 4.14).
- Sinterização do filme de Alumínio para formação de contato ôhmico (etapa I item 4.14).

#### 5 – MEDIDAS ELÉTRICAS DOS DIODOS SCHOTTKY FABRICADOS

#### 5.1 – Introdução

Neste capítulo apresentaremos os resultados obtidos da caracterização elétrica dos dispositivos fabricados. Os parâmetros fator de idealidade ( $\eta$ ), corrente de saturação (Is) e altura da barreira de potencial ( $\phi_B$ ), podem ser extraídos da curva Log(I)xV do diodo. A resistência série(R<sub>S</sub>), a queda de tensão direta (V<sub>F</sub>) e a densidade de corrente reversa(J<sub>r</sub>) do diodo são extraídas da curva IxV. Além das curvas IxV e log(I)xV, foram obtidas curvas de transitório para verificar o comportamento dinâmico dos dispositivos. No final do capítulo apresentaremos uma comparação entre os resultados obtidos com parâmetros de um diodo Schottky comercial.

# 5.2- Extração dos parâmetros do diodo Schottky utilizando as características I x V

As características corrente versus tensão de um diodo ideal, onde toda corrente que atravessa a junção é devida à emissão termiônica, é expressa pela equação 1<sup>[1]</sup>.

$$I = I_{S} \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{V_{T}}\right) - 1 \right]$$
 Equação 1

Onde:

I: corrente que atravessa a junção.

Is: corrente de saturação.

V: tensão aplicada entre os terminais do diodo.

Os diodos reais apresentam um desvio desse comportamento ideal, ou seja, outros fenômenos como tunelamento e injeção de portadores minoritários contribuem na corrente do diodo. Assim na equação 1 é introduzido um fator que corrige este desvio do comportamento ideal. A relação corrente versus tensão considerando o dispositivo não ideal é expressa pela equação  $2^{[1]}$ .

$$I = I_{S} \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{\eta \cdot V_{T}}\right) - 1 \right]$$
Equação 2

Na equação 2,  $\eta$  é o fator de idealidade.

Em geral a exponencial da equação 2, dentro do par colchetes, é muito maior que 1 e assim a equação 2 pode ser escrita como:

$$I = I_{S} \cdot \exp\left(\frac{V}{\eta \cdot V_{T}}\right)$$
 Equação 3

Fazendo algumas manipulações na equação 3 podemos obter o fator de idealidade da curva Log(I) versus V.

$$\eta = \frac{\frac{d(\log(I))}{d(V)}}{\ln(10) \cdot V_T}$$
 Equação 4

Na equação 4,  $ln10.V_T=59,4mV$ . Assim podemos obter o fator de idealidade dividindo a inclinação da parte linear da curva log(I)xV por 60mV.

Traçando uma reta auxiliar tangente à parte linear da curva  $log(I) \times V$ , o ponto onde a reta cruza o eixo vertical fornece o valor da corrente de saturação (Is) do dispositivo.

A altura da barreira de potencial é obtida pela equação 10, onde:

$$\phi_B = -V_T \cdot \ln\left(\frac{Is}{A \cdot A^{**} \cdot T^2}\right)$$
 Equação 10

Onde:

-  $\phi_{\rm B}$ : altura da barreira de potencial.

- A: Área do dispositivo(=0,2116cm<sup>2</sup>).
- $A^{**}$ : Constante de Richardson(=110cm<sup>-2</sup>K<sup>-2</sup>A)<sup>[2]</sup>.

A resistência série do diodo Schottky pode ser extraída da inclinação ( $\Delta V/\Delta I$ ) da parte linear da curva I x V, para valor de tensão positivo.

Traçando a curva IxV reversa, podemos medir a corrente para V=-5V e determinar a densidade de corrente para este valor de tensão.

5.3 – Medidas IXV

As curvas e a extração dos parâmetros apresentados a seguir foram feitas utilizando o analisador de parâmetros HP4145B. Foram feitas medidas IxV com corrente de 100mA, medidas IxV com corrente de 2A e medidas de transitório.

5.3.1 – CURVAS DO DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL DICONWSI2.

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para 5 dispositivos da mesma lâmina (WSi2 A, WSi2 B, WSi2 C, WSi2 D e WSi2 E).



Figura 5.3.1.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos WSi2 A, WSi2 B, WSi2 C, WSi2 D e WSi2 E.



Figura 5.3.1.2 – Curvas log(I)xV dos dispositivos WSi2 A, WSi2 B, WSi2 C, WSi2 D e WSi2 E.



Figura 5.3.1.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos WSi2 A, WSi2 B, WSi2 C, WSi2 D e WSi2 E.

A tabela 1 mostra os parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos.

	Rs	(Ω)	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (mA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
WSi2 A	5,	73	0,74	1,15	1,190	0,200	0,60
WSi2 B	5,	78	0,70	1,27	1,580	0,470	0,57
WSi2 C	5,	10	0,73	1,10	0,342	0,026	0,65
WSi2 D	5,	54	0,74	1,07	0,996	0,140	0,60
WSi2 E	5,	45	0,73	1,18	1,110	0,100	0,65
Média		5,52	0,73	1.15	1,044	0,187	0,61
Desvio pa	drão	0,27	0,016	0.078	0,449	0,170	0,035

Tabela 1 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky convencional com WSi2 como metal de contato Schottky.

Os dispositivos fabricados apresentaram resistência série (Rs) elevada. Isto pode ser resultado do óxido de Tungstênio formado, o qual foi identificado nas análises de raios-X, na etapa de obtenção do siliceto (Apêndice B). A corrente reversa dos dispositivos estão bem acima dos valores pretendidos no projeto, dezenas de micro amperes. Isto pode ter contribuído para a baixa tensão de ruptura dos diodos, que foi em torno de -35 Volts. Quanto à altura da barreira de potencial houve uma variação considerável entre os dispositivos medidos, indicando que a reação entre o Tungstênio e o Silício não foi uniforme ao longo da lâmina.

## 5.3.2 – Curvas do Diodo Schottky convencional DICONALW.

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para 5 dispositivos da mesma lâmina (AlW A, AlW B, AlW C, AlW D e AlW E).



Figura 5.3.2.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos AlW A, AlW B, AlW C, AlW D e AlW E.



Figura 5.3.2.2 – Curvas log(I)xV dos dispositivos AlW A, AlW B, AlW C, AlW D e AlW E.



Figura 5.3.2.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos AlW A, AlW B, AlW C, AlW D e AlW E.

A tabela 2 mostra os parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos.

	Rs	(Ω)	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	$Jr(V=-5V) (\mu A / cm2)$	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
AlW A	2,	,64	0,46	1,03	552,9	8,06	0,68
AlW B	2,	,88	0,52	1,01	68,34	2,37	0,71
AlW C	2	2,7	0,50	1,05	63,61	2,96	0,70
AlW D	2	2,6	0,50	1,02	64,60	2,53	0,71
AlW E	2,	,43	0,48	1,06	114,74	2,8	0,71
Média		2,65	0,49	1,03	172,84	3,74	0,70
Desvio p	adrão	0,16	0,02	0,02	213,53	2,42	0,01

Tabela 2 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky convencional com Al/W como metal de contato Schottky.

Os diodos fabricados com Tungstênio como metal de contato Schottky apresentaram um bom desempenho, se tratando de um diodo Schottky convencional. A resistência série diminuiu para metade do valor medido para os dispositivos WSi2. Isto é resultado da proteção do Alumínio contra a oxidação do filme de Tungstênio. A corrente reversa dos dispositivos está um pouco acima dos valores pretendidos no projeto, dezenas de micro amperes. Porém para tensão de trabalho em torno de –20 Volts, os dispositivos fabricados apresentaram bons resultados com corrente reversa bem próxima ao diodo comercial (ver item 5.5 no final do capítulo). O fator de idealidade ficou próximo da unidade, indicando que o principal meio de transporte de corrente é devido à emissão termiônica

#### 5.3.3 – CURVAS DO DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL DICONNIW.

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para 5 dispositivos da mesma lâmina (NIW A, NIW B, NIW C, NIW D e NIW E).



Figura 5.3.3.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos NIW A, NIW B, NIW C, NIW D e NIW E.



Figura 5.3.3.2 – Curvas log(I)xV dos dispositivos NIW A, NIW B, NIW C, NIW D e NIW E.



Figura 5.3.3.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos NIW A, NIW B, NIW C, NIW D e NIW E.

A tabela 3 mostra os parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos.

	Rs	(Ω)	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	$Jr(V=-5V) (\mu A / cm2)$	Is $(\mu A)$	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
NiW A	2,	46	0,49	1,02	43,73	3,94	0,67
NiW B	2,	46	0,49	1,03	48,39	4,44	0,67
NiW C	2,	36	0,48	1,05	64,82	4,64	0,67
NiW D	2,	48	0,49	1,02	46,57	4,66	0,67
NiW E	2,	45	0,48	1,01	66,87	5,31	0,66
Média		2,44	0,49	1,03	54,08	4,59	0,67
Desvio p	adrão	0.047	0,0055	0,015	10,89	0,49	0,0045

Tabela 3 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky convencional com Ni/W como metal de contato Schottky.

Com os diodos Ni/W pudemos comprovar a repetibilidade do processo de fabricação do diodo Schottky Convencional, com Tungstênio como metal de contato Schottky. Os parâmetros medidos nestes diodos ficaram bem próximos dos valores medidos nos dispositivos Al/W, inclusive os valores de densidade de corrente reversa ficaram melhores. Os valores medidos para altura da barreira de potencial foram praticamente constantes, indicando uniformidade da junção Schottky ao longo da lâmina de Silício.

5.3.4 – CURVAS DO DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL DICONAL.

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para 5 dispositivos da mesma lâmina (Al A, Al B, Al C, Al D e Al E).



Figura 5.3.4.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos Al A, Al B, Al C, Al D e Al E.



Figura 5.3.4.2 – Curvas log(I)xV dos dispositivos Al A, Al B, Al C, Al D e Al E.



Figura 5.3.4.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos Al A, Al B, Al C, Al D e Al E.

	Rs	(Ω)	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	$Jr(V=-5V) (\mu A / cm2)$	Is (nA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
Al A	2,	68	0,7	1,1	1597	3,86	0,88
Al B	2,	67	0,7	1,05	2731	2,27	0,89
Al C	2,	64	0,7	1,04	121	2,30	0,89
Al D	2,	88	0,71	1,04	1597	2,59	0,89
Al E	2,	78	0,72	1,04	112	2,15	0,89
Média		2,73	0,71	1,05	1231	2,63	0,89
Desvio p	adrão	0,10	0,009	0,03	1118	0,70	0,0045

A tabela 4 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos. Tabela 4 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky convencional com Alumínio como metal de contato Schottky.

Os diodos fabricados com Alumínio como metal de contato Schottky apresentaram queda de tensão direta maior do que a medida nos diodos com Tungstênio. Isto se deve ao aumento da altura da barreira de potencial, de 0,67eV para 0,89eV. Se considerarmos a equação 2 do capítulo 2 (ítem2.2), que calcula a altura da barreira de potencial, e substituirmos o valor da função trabalho do Alumínio, encontramos o valor de  $\phi_B = 0,20eV$ , o que é um valor muito pequeno para formação da barreira Schottky. O que ocorre é que o contato formado pelo Alumínio em Silício tipo n<sup>-</sup> não é realmente um contato Schottky<sup>[3]</sup>. Podemos dizer que é formada uma junção PN, devido à presença de uma fina camada de Silício do tipo p, formada durante o processo de sinterização. Como a solubilidade sólida do Alumínio no Silício é aproximadamente 1E18cm<sup>-3</sup>, para a temperatura utilizada no processo de sinterização, parte deste metal se comporta como dopante tipo p na camada epitaxial de Silício. No caso das características reversas, a densidade de corrente também foi maior para estes dispositivos, porém a tensão de ruptura obtida, maior que 60 volts, é bem maior que a dos dispositivos com Tungstênio, em torno de 25 volts.

5.3.5 – Curvas do Diodo Schottky com sobreposição de metal DISM (com AL/W como metal de contato Schottky).

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para os dispositivos com sobreposição de metal, com óxido obtido por processo de oxidação úmida.



Figura 5.3.5.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos com sobreposição de metal de 5µm,15µm,110µm e 175µm.



Figura 5.3.5.2 – Curvas log(I)xV dos dispositivos com sobreposição de metal de 5µm,15µm,110µm e 175µm.



Figura 5.3.5.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos com sobreposição de metal de 5μm,15μm,110μm e 175μm.

oblido poi p	ondo por processo de oxidação unida.							
SM_OU	Rs $(\Omega)$	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (mA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$		
5µm	5,94	0,80	2,00	>472	0,355	0,58		
•	5,92	0,75	1,31	223	0,360	0,58		
15µm	5,11	0,70	2,11	>474	0,619	0,57		
	6,16	0,75	1,74	>474	0,128	0,61		
110µm	6,41	0,93	1,35	>474	0,500	0,57		
	5,64	0,68	1,90	>474	0,105	0,61		
175µm	6,13	0,78	1,78	218	0,610	0,57		
	5,98	0,74	1,75	>483	0,988	0,55		

Tabela 5 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky com sobreposição de metal, com óxido

A tabela 5 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos.

abtida par processo de avidação úmida

O diodo com sobreposição de metal apresentou características IxV muito pior do que o diodo convencional. Alguns dispositivos apresentaram fator de idealidade de 2 e altura da barreira de potencial menor que 0,6eV. A diminuição da altura da barreira de potencial indica a presença de estados na superfície do semicondutor, que podem ter resultado do processo de oxidação, como foi visto no capítulo 2 (item 2.2). Além disso, não foi possível verificar a influência da largura da sobreposição do metal nos dispositivos, devido ao desvio do comportamento retificador encontrado. Uma tentativa para eliminar este problema foi obter o óxido de Silício, para a sobreposição de metal, por processo de oxidação seca, pois o óxido produzido neste tipo de processo é de qualidade melhor.

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para os dispositivos com sobreposição de metal obtida por processo de oxidação seca.



Figura 5.3.5.4 – Curvas IxV direta dos dispositivos com sobreposição de metal de 5µm,15µm,110µm e 175µm.



Figura 5.3.5.5 – Curvas log(I)xV dos dispositivos com sobreposição de metal de 5µm,15µm,110µm e 175µm.



Figura 5.3.5.6 – Curvas IxV reversa dos dispositivos com sobreposição de metal de 5µm,15µm,110µm e 175µm.

A tabela 6 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos.

	$\operatorname{Rs}(\Omega)$	$V_{F}(I=100 \text{mA}) (V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
OM5	3,11	0,52	2,1	205,81	263	0,59
	3,17	0,51	1,98	326,99	184	0,60
OM15	3,16	0,50	2,33	199,62	365	0,58
	3,23	0,50	1,83	109,65	153	0,60
OM110	2,77	0,48	2,15	>521,00	239	0,59
	2,81	0,48	2,10	230,76	247	0,59
OM175	2,92	0,51	2,22	>553,00	288	0,59
	3,00	0,50	1,83	178,05	134	0,61

Tabela 6 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky com sobreposição de metal, com óxido obtido por processo de oxidação seca.

O diodo com sobreposição de metal de óxido seco apresentou as mesmas características IxV do diodo com óxido úmido. Desta maneira podemos concluir que as características IxV dos dispositivos foram degradadas com o processo de oxidação, já que a única diferença entre os processos de fabricação do diodo convencional e os diodos com sobreposição de metal é a etapa de oxidação. O que pode ter ocorrido foi o surgimento de estados na superfície do semicondutor, decorrido de defeitos no óxido ou da presença de espécies contaminante, como íons alcalinos e metais, durante o processo de oxidação, degradando a junção Schottky.

5.3.6 – Curvas do Diodo Schottky com Anel de guarda DIAG (com Al/W como metal de contato Schottky).

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para os dispositivos com largura do anel de guarda de 5µm. Cada gráfico apresenta três curvas com diferentes doses de implantação iônica, e uma com região p obtida pelo processo de SOG.



Figura 5.3.6.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos com largura do anel de guarda de 5µm.



Figura 5.3.6.2 – Curvas Log(I)xV dos dispositivos com largura do anel de guarda de 5µm.



Figura 5.3.6.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos com largura do anel de guarda de  $5\mu m$ .

A tabela 7 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos.

	Rs $(\Omega)$	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
I/I 1E12	2,83	0,47	1,22	242,25	29,5	0,64
	2,93	0,48	1,03	>473,00	13,4	0,67
I/I 1E13	2,86	0,50	1,02	363,99	6,85	0,68
	2,78	0,49	1,08	>473,00	5,65	0,69
I/I 1E14	2,96	0,47	1,13	15,12	26,0	0,65
	2,73	0,46	1,08	197,87	17,9	0,66
SOG	2,44	0,43	1,04	2,31	8,8	0,68
	2,55	0,44	1,03	4,74	10,4	0,67

Tabela 7 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky com largura de anel de guarda de  $5\mu m$ .

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para os dispositivos com largura do anel de guarda de 50 $\mu$ m.



Figura 5.3.6.4 – Curvas IxV direta dos dispositivos com largura do anel de guarda de 50µm.



Figura 5.3.6.5 – Curvas Log(I)xV dos dispositivos com largura do anel de guarda de 50µm.



Figura 5.3.6.6 – Curvas IxV reversa dos dispositivos com largura do anel de guarda de  $50 \mu m$ .

A tabela 8 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos.

Tabela 8 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos	Schottky con	n largura de ai	nel de guarda de 50	)µm
---	--------------	-----------------	---------------------	-----

	Rs $(\Omega)$	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
I/I 1E12	3,21	0,48	1,21	83,32	27,8	0,65
	3,29	0,52	1,09	336,77	15,5	0,66
I/I 1E13	2,63	0,46	1,08	380,34	6,15	0,68
	2,43	0,46	1,17	>473,00	14,50	0,66
I/I 1E14	2,48	0,46	1,09	25,80	11,0	0,67
	2,57	0,44	1,15	>473,00	31,0	0,64
SOG	2,62	0,44	1,07	23,68	12,6	0,67
	2,71	0,46	1,05	35,42	9,7	0,67

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para os dispositivos com largura do anel de guarda de 100 $\mu$ m.



Figura 5.3.6.7 – Curvas IxV direta dos dispositivos com largura do anel de guarda de 100µm.



Figura 5.3.6.8 – Curvas Log(I)xV dos dispositivos com largura do anel de guarda de 100µm.



Figura 5.3.6.9 – Curvas IxV reversa dos dispositivos com largura do anel de guarda de 100µm.

A tabela 9 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos.

Tabela 9 – Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky com largura de anel de guarda de 100µm.

	Rs $(\Omega)$	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
I/I 1E12	3,02	0,50	1,01	>473	11,5	0,67
	3,02	0,50	1,06	65	12,3	0,67
I/I 1E13	2,47	0,46	1,02	367	6,92	0,68
	2,57	0,47	1,03	>473	6,13	0,69
I/I 1E14	2,54	0,44	1,08	>473	20,7	0,65
	3,08	0,48	1,06	>473	37,9	0,64
SOG	2,41	0,44	1,02	0,9	9,77	0,67
	2,56	0,46	1,08	1,3	10,92	0,67

O anel de guarda foi introduzido nos dispositivos com o objetivo de eliminar os efeitos de borda do diodo Schottky, melhorando as características IxV em relação ao diodo Schottky convencional. Porém, analisando as curvas e os parâmetros obtidos, podemos concluir que houve uma degradação das características IxV desses dispositivos. O fator de idealidade e a altura de barreira de potencial apresentaram valores adequados, porém a corrente reversa medida nos dispositivos apresentou valores muito elevados, para baixos valores de tensão reversa. Além disso, a máxima tensão de ruptura obtida com esses dispositivos foi de –9 Volts (L=100µm dopado com SOG). O que pode ter ocorrido foi algum tipo de contaminação com metais (Cobre) durante as etapas do processo de obtenção do anel de guarda.

5.3.7 – Curvas do Diodo Schottky com grade de linhas de difusão DIGLD (com AL/W como metal de contato Schottky).

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, log(I)xV e IxV reversa, para os dispositivos com grade de linhas de difusão.



Figura 5.3.7.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos com grade de linhas de difusão.



Figura 5.3.7.2 – Curvas Log(I)xV dos dispositivos com grade de linhas de difusão.



Figura 5.3.7.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos com grade de linhas de difusão. A tabela 10 mostra os parâmetros extraídos da curva IxV dos diodos.

	$\operatorname{Rs}(\Omega)$	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
I/I 1E12	3,63	0,52	1,03	40	6,35	0,68
	3,23	0,52	1,03	39,51	6,35	0,68
I/I 1E13	3,13	0,67	1,25	165	0,24	0,77
	3,25	0,68	1,23	233,32	0,17	0,78
I/I 1E14	3,81	0,78	1,15	1,56	0,03	0,83
	3,71	0,77	1,23	6,33	39,4n	0,82
SOG	2,66	0,60	1,02	1,05E-3	0,07	0,80
	2,61	0,59	1,06	10,21E-3	0,05	0,81

Tabela 10 - Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos Schottky com grade de linhas de difusão.

A altura da barreira de potencial para os dispositivos com grade de linhas de difusão indica que para baixa dopagem (dose de implantação iônica de 1E12cm<sup>-3</sup>) a região tipo P não influencia no comportamento do dispositivo, pois os parâmetros medidos apresentaram valores muito próximos às dos dispositivos sem difusão tipo P. Já para os dispositivos com implantação de 1E14cm<sup>-3</sup> e SOG, a região P formada aumentou o valor da altura da barreira de potencial. Assim podemos concluir que para a região tipo P atuar no comportamento do dispositivo, é necessária uma dose de implantação em torno de 1E14cm<sup>-3</sup>. Contudo, mesmo os dispositivos onde a região tipo P atuou, apresentaram baixa tensão de ruptura, bem menor que a encontrada no diodo convencional. Este fato reforça a idéia de ter ocorrido algum problema de contaminação durante as etapas do processo de obtenção da região tipo P.

5.3.8 – Diodo Schottky com implantação de fósforo DIIMP (com Al/W como metal de contato Schottky).

Abaixo temos os gráfico das curvas IxV direta, Log(I)xV e IxV reversa, para 5 dispositivos da mesma lâmina (DIIMP A, DIIMP B, DIIMP C, DIIMP D e DIIMP E).



Figura 5.3.8.1 – Curvas IxV direta dos dispositivos DIIMP A, DIIMP B, DIIMP C, DIIMP D e DIIMP E.



Figura 5.3.8.2 – Curvas log(I)xV dos dispositivos DIIMP A, DIIMP B, DIIMP C, DIIMP D e DIIMP E.



Figura 5.3.8.3 – Curvas IxV reversa dos dispositivos DIIMP A, DIIMP B, DIIMP C, DIIMP D e DIIMP E.

	R	s (Ω)	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	Jr(V=-5V) (mA/cm2)	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
DIIMP A	1,97		0,42	1,39	331,33	39,5	0,64
DIIMP B	1	,99	0,42	1,17	83,60	14,7	0,66
DIIMP C	2	2,02	0,42	1,21	156,52	19,8	0,65
DIIMP D	2	2,00	0,42	1,07	182,14	10,7	0,67
DIIMP E	1	,93	0,41	1,12	133,32	11,7	0,67
Média		1,98	0,42	1,19	177,38	19,28	0,66
Desvio padrão		0,03	0,0045	0,12	93,40	11,84	0,013

<b>m</b> 1 1 1		D 4	1	1		* * *	1	1. 1	<b>C</b> 11	• •
Tabela	_	Parametros	extraidos	das	curvas	Ix V	dos	diodos	Schoffky	z convencional
I accia i		i aranien oo	entimate ob	aus	ear rab	177 4	aob	aroaos	Denotin	conveneronan.

Com a implantação de fósforo nas costas da lâmina, houve uma diminuição da resistência série medida nos dispositivos, proporcionando um valor de queda de tensão direta menor. Porém o fator de idealidade apresentou um desvio considerável da unidade, comparando com o diodo convencional, com Tungstênio como metal de contato Schottky, sem implantação de fósforo. Além disso, os dispositivos apresentaram alta corrente reversa. Mais uma vez, os resultados levam a concluir que houve algum problema, contaminação com íons metálicos, na etapa de obtenção da região de alta dopagem nas costas do dispositivo.

#### 5.4 – Medidas de transitório

Para a análise das características de comutação dos dispositivos fabricados, foram feitas medidas de transitório dos diodos DICONAIW e DICONAL, dispositivos que apresentaram boas características IxV. Os demais dispositivos construídos mostraram-se incapazes de suportar a tensão de polarização reversa, devido à alta corrente de fuga.. As medidas foram feitas utilizando-se o circuito retificador de meia onda, como mostra a figura 5.4.1. Para medirmos a tensão, foi aplicada uma onda quadrada, com um gerador de sinais HP, de amplitude +5 /-5 Volts com 3 valores de frequência: 10kHz, 100kHz e 200 kHz. Para medirmos a corrente foi aplicada uma onda quadrada de amplitude +5 /-5 Volts com frequência de 500Hz.. As formas de onda foram analisadas com um osciloscópio Tektronics.



Figura 5.4.1 – Circuito utilizado para análise de transitório dos dispositivos fabricados.

Abaixo temos as curvas de transitório de tensão com frequência de 10kHz, 100kHz e 200kHz, e de corrente para o diodo DICONAIW.



Figura 5.4.2 – Curva de transitório de tensão com frequência de (a)10kHz e (b) 100kHz do diodo DICONAIW.



Figura 5.4.3 – Curva de transitório de (a) tensão (com frequência de 200kHz) e (b) corrente do diodo DICONAIW.

Abaixo temos as curvas de transitório de tensão com frequência de 10kHz, 100kHz e 200kHz , e de corrente para o diodo DICONAl



Figura 5.4.4 – Curva de transitório de tensão com frequência de (a)10kHz e (b) 100kHz do diodo DICONAl.



Figura 5.4.5 – Curva de transitório de (a) tensão (com frequência de 200kHz) e (b) corrente do diodo DICONAl.

A tabela 12 mostra os parâmetros extraídos das curva de transitório dos diodos.

Tabela 12 – Parâmetros extraídos da curvas de transitório dos diodos DICONAIW e DICONAI.

Dispositivo	Queda de	Corrente	Corrente	Tempo	Tempo
1	tensão direta	direta	reversa	de	de descida
				subida	
DICONAIW	0,26(V)	7,39(mA)	65,58(µA)	360(ns)	1(µs)
DICONAl	0,55(V)	7,04(mA)	167(µA)	450(ns)	1(µs)

As curvas de transitório de tensão mostram um bom comportamento dos dispositivos até a frequência de 100 kHz. A partir deste valor o tempo de descida do diodo (1µs) não é mais desprezível, com relação ao período do sinal de entrada. Porém, além do tempo de descida relativo ao diodo Schottky, é preciso considerar as impedâncias parasitas do circuito utilizado para as medidas. Com relação aos tempos de subida e descida ambos dispositivos apresentaram valores bem próximos. Quanto aos valores de tensão e corrente, podemos observar que os dispositivos, com Tungstênio como metal de contato Schottky, tem melhor desempenho que os diodos com Alumínio, devido a menor queda de tensão direta e menor valor de corrente reversa. Os picos nas curvas de tensão para frequência de 100kHz e 200kHz são devido ao circuito ressonante formado pela resistência série do diodo, capacitância da junção e indutância parasita do circuito utilizado para as medidas.

5.5 – COMPARAÇÃO ENTRE DIODO SCHOTTKY DICONALW E DIODO SCHOTTKY COMERCIAL.

Para compararmos os valores dos parâmetros do diodo fabricado com um diodo comercial, foi utilizado um diodo Schottky comercial. Este diodo tem a estrutura e dimensões descritas no Apêndice C.

Abaixo temos as curvas IxV e de transitório dos diodos DICONAIW e comercial.



Figura 5.5.1 – Curvas IxV direta comparando os diodos DICONAIW e comercial.



Figura 5.5.2 – Curvas Log(I)xV comparando os diodos DICONAIW e comercial.



Figura 5.5.3 – Curvas IxV reversa comparando os diodos DICONAIW e comercial.



Figura 5.5.4 – Curva de transitório de tensão com frequência de (a)10kHz e (b) 100kHz comparando os diodos DICONAIW e comercial.





A tabela 13 mostra os parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos.

	$\operatorname{Rs}(\Omega)$	$V_{F}(I=100mA)(V)$	η	$Jr(V=-5V) (\mu A / cm2)$	Is (µA)	$\phi_{\rm B}~({\rm eV})$
DICONAIW	2,7	0,50	1,05	63,61	2,96	0,70
Comercial	1,7	0,49	1,02	40,00	0,25	0,77

Tabela 13 - Parâmetros extraídos das curvas IxV dos diodos DICONAIW e Comercial.

A tabela 14 mostra os parâmetros extraídos das curva de transitório dos diodos.

Dispositivo	Queda de	e Corrente Corrente		Tempo	Tempo
-1	tensão direta	direta	reversa	de subida	de descida
DICONAIW	0,26(V)	7,1(mA)	65(µA)	360(ns)	1(µs)
Comercial	0,26(V)	7,2(mA)	56(µA)	331(ns)	1(µs)

Tabela 14 - Parâmetros extraídos da curvas de transitório dos diodos DICONAIW e Comercial

Comparando os valores dos parâmetros do diodo fabricado e do diodo comercial, podemos verificar que para tensão de trabalho até -20 volts, o diodo fabricado apresenta características quase idênticas do diodo comercial. No caso da característica IxV direta, o diodo comercial apresenta resistência série menor que o diodo fabricado, porém isto pode ser solucionado utilizando um substrato com resistividade menor ou com processo de difusão, tipo n, nas costas da lâmina. As curvas de transitório mostram que as características dinâmicas, tempos de subida e descida e quedas de tensão direta e reversa, de ambos os dispositivos são praticamente as mesmas. Assim podemos concluir que as características elétricas do dispositivo projetado e fabricado são compatíveis com a dos dispositivos vendidos no mercado.

#### 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O diodo Schottky convencional com Tungstênio como metal de contato Schottky, apresentou bons resultados com fator de idealidade em torno de 1,03, corrente reversa de 48µA (para V=-20V), tensão de ruptura em torno de -20 Volts, queda de tensão direta de 0,49V (para I<sub>F</sub>=100mA) e altura de barreira Schottky de 0,67eV. Para o diodo convencional com Alumínio como metal de contato Schottky, obtivemos fator de idealidade de 1,04, corrente reversa de 616µA (V=-20V), tensão de ruptura por volta de -60 volts, queda de tensão direta de 0,71V (para I<sub>F</sub>=100mA) e altura de barreira Schottky 0,89eV. Comparando estes dois dispositivos podemos concluir que o Tungstênio apresenta melhores características como metal de contato Schottky que o Alumínio, pois ambos os valores de queda de tensão direta e corrente reversa são menores para os dispositivos com Tungstênio. Quanto menor forem estes valores, o dispositivo dissipa menos potência, podendo ser utilizado com níveis de corrente e tensão maiores. É importante observar que os dispositivos com Alumínio apresentaram tensão de ruptura maior, em torno de -60 volts, porém apresentando nível de corrente da ordem de 7mA, quase mil vezes maior que a corrente dos dispositivos com Tungstênio (para tensão de -20 volts).

Os diodos com sobreposição de metal não apresentaram bom comportamento retificador, com fator de idealidade por volta de 2. Isto indica a presença de estados na superfície do semicondutor, decorrido de defeitos no óxido ou da presença de espécies contaminante, como íons alcalinos e metais, durante o processo de oxidação, degradando as características retificadoras da junção Schottky.

Os dispositivos com anel de guarda e com grade de linhas de difusão apresentaram corrente reversa muito elevada, degradando as características IxV desses diodos. Alguns dispositivos apresentaram características IxV reversa, na região de ruptura, próxima à do diodo PN, onde, ao ocorrer a ruptura do dispositivo, a corrente cresce abruptamente, diferente do diodo Schottky convencional, que apresenta ruptura suave. Porém o valor de tensão de ruptura para estes dispositivos foi muito baixa, em torno de -10 volts. Isto pode ter resultado da contaminação com metais durante o processo de obtenção das regiões dopadas tipo p, ou do processo de oxidação. Quanto à dopagem da região tipo p, foi possível observar que para doses de implantação iônica menor que 1E13 cm-2 o anel de guarda teve pouca influência nas características dos dispositivos. O valor adequado para dose de implantação foi de 1E14 cm<sup>-3</sup>.

Para diminuir a resistência do contato de cátodo do diodo Schottky, foi feita uma implantação com íons de fósforo nas costas da lâmina, na construção do diodo Schottky convencional com Tungstênio. Os dispositivos obtidos apresentaram resistência série menor, diminuindo de aproximadamente 2,6 $\Omega$  para 2,0 $\Omega$ , indicando a eficácia desta técnica para este fim. Porém a corrente reversa medida apresentou valores muito elevados, comparando com os diodos sem implantação de fósforo nas costas, aumentando de 48,74µA para um valor maior que 20mA. Este resultado nos leva a concluir que houve algum tipo de contaminação durante o processo de obtenção da região de alta dopagem nas costas da lâmina, já que esta é a única diferença entre os processos de fabricação dos dois tipos de dispositivo. Assim, como os diodos Schottky são muito sensíveis a defeitos e contaminante, o controle sobre estes dois fatores é de fundamental importância nos processos de fabricação, para o bom funcionamento dos dispositivos.

Podemos concluir que o objetivo principal deste trabalho foi atingido com o estabelecimento da sequência de processos de fabricação de diodo Schottky convencional com tungstênio, onde em duas corridas (DICONAIW e DICONNiW) os dispositivos apresentaram características bem semelhantes, confirmando a repetibilidade do processo.

Como sugestão para trabalhos futuros, podemos citar:

- verificar as fontes de defeitos e contaminação nos processos de fabricação dos diodos com sobreposição de metal, com anel de guarda, com grade de linhas de difusão e com dopagem nas costas da lâmina.
- Repetir o estudo dos dispositivos com sobreposição de metal, com anel de guarda, com grade de linhas de difusão e com dopagem nas costas da lâmina.
- Encapsulamento dos diodos fabricados, para medidas com alta corrente de condução direta.
- Submeter os dispositivos a testes de confiabilidade.

**REFERÊNCIAS:** 

CAPÍTULO 1

1 – B. J. Baliga, "Trends in power semiconductor devices", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 43, n°10, pp. 1717-1730, october 1996.

2 – A. Lidow, D. Kinzer, G. Sheridan and D. Tam, "The semiconductor roadmap for power management in the new millennium", Proceedings of the IEEE, pp. 803-812, june 2001.

3 – R. N. Hall, "Power Rectifier and Transistors", Proc. IRE, 40, pp. 1512-1518, november 1952.

4 – C. Blake, D. Kinzer, P. Wood. "Syncronous rectifier versus Schottky diodes." IEEE Applied Power Eletronics Conf. 1994, pp. 17-22.

5 – D. T. Morriset et al., "Static and dinamic characterization of large-area high current density SiC Schottky diodes", IEEE Transactions on Electron Devices, vol.48, n°2, pp. 349-352, february 2001.

6 – J. A. Pomilio, Eletrônica de Potência, DSCE/FEEC Unicamp, 1998.

CAPITULO 2

1 – J. Bardeen, W. H. Brattain, "The transistor, a semiconductor triode", Phys. Rev., 74, pp. 230-231, 1948.

2 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp. 246-249, 1981.

3 - Marcio Favoretto, Deposição e caracterização de filmes finos de W e WSi<sub>x</sub> e estudo da estabilidade térmica do contato Schottky sobre GaAs, Tese de mestrado, Faculdade de engenharia elétrica, Unicamp, 1992.

 $4 - \underline{http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/chapter3/ch3\_2.htm}$ 

5 – Gerold W. Neudeck, The PN junction diode, 2<sup>nd</sup> ed., volume II, Addison Wesley Publishing Company, pp. 134-140, 1989.

6 – J. M. Andrews, M.P. Lepselter, "Reverse current-voltage characteristics of metalsilicide Schottky diodes", Solid State Eletronics, Vol. 13, p.p. 1011-1023, 1970.

7 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp. 254-270, 1981.

8 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp. 257, 1981.

9 – Dallas T. Morissete et al, "Static and dynamic characterization of large-area highcurrent-density SiC Schottky Diodes", Trans. On Electron Devices, Vol. 48, N°. 2, february 2001.

10 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp. 281, 1981.

11 – Hiroaki Iwakuro et al, "High-barrier Schottky diodes on n-type Si(100) due to hydrogen plasma", Journal of Applied Physics, vol 30, No. 2B, pp.L255-L257, February 1991.

12 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp. 297-304, 1981.

13 – M. H. Joo, "Effects of ion implantation on the electrical properties of Au/n-Si Schottky diodes", Materials Science and Engineering, B71, pp. 224-228, 2000.

14 – B. W. Liou, C. L. Lee, "Characteristics of high breakdown voltage Schottky barrier diodes using p+ polycristaline silicon diffused guard ring", Solid State Electronics, 44, pp.631-638, 2000.

15 – S.F. Gilmartin, A.F.J. Muray, W.A. Lane, "A 1000 V merged pn/Schottky high speed low loss power rectifier", power eletronics and variable speed drives, conference publication 456 © IEE 1998.

16 – V. F. Drobny, "Relationship between junction radius and reverse leakage of silicide Schottky barrier diodes", IEEE Transactions on Electron Devices, vol ed-31, No.7, pp. 895-899, July 1984.

17 – F. L. Via et al, "Dependence of PtSi Schottky diode electrical behavior on the platinum film thickness and on the annealing process", Thin Solid Films, 161, pp. 13-20, 1988.

18 – M. Mehrotra, B. J. Baliga, "Low forward drop JBS rectifiers fabricated using submicron technology", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, no. 9, September 1994.

CAPITULO 3

1 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp. 305, 1981.

2 – A. Pintar, J. Razinger, "Metalization of power schottky diodes", Vacuum, vol. 40, nº. 1/2, pp. 205-207, 1990.

3 – M. Mehrotra, B. J. Baliga, "Low forward drop JBS rectifiers fabricated using submicron technology", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, no. 9, September 1994.

## CAPITULO 4

1 – Livro texto do curso de extensão: Oficina de Microfabricação: Projeto e construção de CI's MOS, CCS e DSIF/FEEC Unicamp.

2 – S.Wolf, R.N. Tauber, Silicon Processing for the VLSI Era, Vol. 1, Lattice Press, 1986.

3 – W.A. Cody, M. Varadarajan, "RCA clean replacement", J. Eletrochem. Soc., Vol 143, 6, junho, 1996.

4 – N. G. Einspruch, S. S. Cohen, G. SH. Gildenblat, VLSI Eletronics, Vol .15, Academic Press, 1987.

5 – S. P. Murarka, Silicide for VLSI applications, Academic Press, 1983.

6 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, pp.292, 1981.

7 – J. W. Swart, "Interconexões e contatos em circuitos integrados", em Processos de microeletrônica, editor V.Baranauskas, 1990.

8 – A. Pintar, J. Razinger, "Metalization of power schottky diodes", Vacuum, vol. 40, n°. 1/2, pp. 205-207, 1990.

CAPITULO 5

1 - S. K. Cheung, N.W. Cheung, "Extraction of diode parameters from forward current-voltage characteristics", App. Phys. Lett., vol. 49, n°.2, pp. 85-87, 1986.

2 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York Wiley, 1981.

3 – T.M. Reith, J. D. Schick, "The electrical effect on Schottky barrier diodes of Si crystalization from Al-Si metal films", Applied Physics Letters, Vol.25, nº. 9, pp.524-526, 1974.

APÊNDICE A

1 – S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York Wiley, pp. 246-249, 1981.

2 - Marcio Favoretto, Deposição e caracterização de filmes finos de W e WSi<sub>x</sub> e estudo da estabilidade térmica do contato Schottky sobre GaAs, Tese de mestrado, Faculdade de engenharia elétrica, Unicamp, 1992.

## APÊNDICE B

1 – J. W. Swart, "Interconexões e contatos em circuitos integrados", em Processos de microeletrônica, editor V.Baranauskas, 1990.

2 – A. Pintar, J. Razinger, "Metalization of power schottky diodes", Vacuum, vol. 40, n°. 1/2, pp. 205-207, 1990.

3 – S. Kumar, S. Dasguota, H. E. Jackson and J. T. Boyd, "Raman Scattering from rapid thermally annealed tungsten silicide", Applied Physics Letter, 50 (6) pp. 323-325, february 1987.
### APÊNDICE A - FORÇA IMAGEM

Um elétron localizado a uma distância x da superfície do semicondutor induz uma carga positiva na superfície do metal na posição  $-x^{[1]}$ . A força de atração entre estas duas cargas é a força de Coulomb dada pela equação1.

$$F = -\frac{q^2}{4 \cdot \pi \cdot (2x)^2 \cdot \varepsilon_s}$$
 Equação 1

A energia potencial deste elétron é dada pela equação 2.

$$\psi(x) = \int_{\infty}^{x} F \cdot dx = \frac{q^2}{16 \cdot \pi \cdot x \cdot \varepsilon_s}$$
 Equação 2

Quando um campo elétrico E é aplicado, a energia potencial total é dada pela equação 3.

$$\psi(x) = \frac{q^2}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon_s \cdot x} + q \cdot E \cdot x$$
 Equação 3

Onde E é o campo elétrico máximo na interface metal/semicondutor.

A diminuição da altura da barreira de potencial ( $\Delta \phi$ ) e a localização do ponto  $x_m$  são resultante da condição d( $\psi(x)$ )/dx = 0, ou seja, o ponto onde a energia potencial do elétron é máxima. A figura 1 mostra a diminuição da altura da barreira de potencial. O ponto  $x_m$  e a diminuição da altura da barreira de potencial ( $\Delta \phi$ ) são dadas pelas equações 4 e 5 respectivamente.

$$x_{m} = \sqrt{\frac{q}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{s} \cdot E}}$$
Equação 4

$$\Delta \phi = \sqrt{\frac{q \cdot E}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_s}} = 2 \cdot E \cdot x_m$$
 Equação 5

A variação da altura da barreira de potencial resultante da força imagem é chamada de efeito Schottky<sup>[2]</sup>.



Figura 1 – Diagrama de bandas de energia entre a superfície de um metal e o vácuo, ilustrando o efeito de diminuição da barreira de potencial quando um campo elétrico é aplicado na junção.

# Apêndice B - Estudo para obtenção de filme de siliceto de Tungstênio (WSi2) para contato Schottky

## B.1-INTRODUÇÃO

Os silicetos de metais refratários apresentam boas características para formação da barreira Schottky, como: baixa resistividade, boa estabilidade em altas temperaturas e alta resistência a eletromigração<sup>[1]</sup>. Um metal refratário apropriado para formação de barreira Schottky para diodos de potência é o tungstênio<sup>[2]</sup>. O tungstênio é um metal refratário, possuindo temperatura de fusão de 3422°C e temperatura de ebulição de 5555°C. Devido à alta temperatura requerida para processar o tungstênio, este metal pode ser depositado por processo de pulverização catódica (*sputtering*) ou por CVD. O siliceto formado (WSi<sub>2</sub>) apresenta altura de barreira de potencial (0.65eV) adequada para dispositivos que operam com tensões até 60(V), com queda de tensão direta menor que dispositivos construídos utilizando PtSi. Assim, o tungstênio é um dos metais mais indicados para a formação de contato Schottky de siliceto para dispositivos de potência que não necessitam de tensões de ruptura muito elevadas.

## **B.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

A seguir temos as etapas dos experimentos feitos para a análise da temperatura adequada para formação do siliceto de Tungstênio (WSi2) utilizando o processo de recozimento rápido RTA (Rapid Thermal Annealing)<sup>[3]</sup>.

- 1) As características da lâmina de silício utilizada são:
- Substrato:
  - Diâmetro: 76mm Tipo/Dopante: tipo n/Sb
  - Orientação: <100> +/-1
  - , Espessura: 356 – 406µm
  - Resistividade:  $0.008 0.020\Omega$ .cm
- Camada epitaxial: Tipo/Dopante: tipo n/P Espessura: 4μm +/- 10% Resistividade: 1.1Ω.cm +/- 10%
- 2) Limpeza padrão RCA
- 3) Dip em Buffer de HF para remoção do óxido nativo.
- 4) Deposição de filme de Tungstênio por processo de *Sputtering*. As características do processo de deposição do filme de Tungstênio são:
- Pressão: 10<sup>-2</sup> mbar
- Gás: Ar
- Pressão base: 4,2.10<sup>-6</sup> mbar
- Potência: 200 W
- Tempo de deposição: 5 minutos
- Espessura: 200 nm
- 5) Corte da lâmina em amostras quadradas de 1cm x 1cm.

6) Recozimento das amostras para formação do siliceto de Tungstênio (WSi2).

O processo foi realizado em forno de recozimento térmico rápido (RTA), com as seguintes temperaturas:

Amostra	Tempo de processo (s)
T40	40
T80	80
T120	120

A sequência de passos durante o processo de recozimento do filme de Tungstênio é a seguinte:

- Carregar as amostras na câmara de processo com fluxo de nitrogênio de 8 l/min.
- Deixar as amostras neste ambiente por 1 minuto.
- Pré aquecer o forno com temperatura de 800°C, durante 40 segundos com fluxo de gás nitrogênio de 21/min.
- Aquecer o forno com temperatura do processo de 960°C, durante 40 segundos com fluxo de gás nitrogênio de 21/min.
- Desligar o forno mantendo o fluxo de nitrogênio e aguardar 3 minutos para retirar a amostra da câmara de processo.
- Mudar o fluxo de nitrogênio para 8 l/min para abrir a câmara e retirar as amostras.

O procedimento descrito acima foi feito para a amostra t40, cujo tempo de recozimento é 40 segundos. Para as amostras t80 e t120 este mesmo procedimento foi feito duas e três vezes respectivamente.

### B.3 – ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Para analisarmos a formação do siliceto no processo descrito acima, foram feitas medida de quatro pontas e medida de difração de raio X.

O resultado da medida de quatro pontas do filme de Tungstênio foi V/I = 0,21 $\Omega$ , resultando numa resistividade de 19 $\mu\Omega$ .cm. Para as amostras t40, t80 e t120 o valor V/I medido foi maior que 1 k $\Omega$ .

As análises de difração de raios-X foram feitas no IFGW da Unicamp. Os dados das análises são os seguintes:

- Difratometro de raio-X Philips PW 1730/10
- Potência do tubo de raios-X: 40kV, 30mA.
- Radiação Cu
- Passo angular: 0,02 graus
- Tempo de amostragem: 1 segundo por ponto

Abaixo temos os gráficos dos resultados obtidos das análises feitas nas amostras do filme de Tungstênio depositado e das amostras t40, t80 e t120.



Figura B.3.1 – Resultado da análise raios-X feita na amostra do filme de Tungstênio.



Figura B.3.2 - Resultado da análise raios-X feita na amostra t40.



Figura B.3.3 – Resultado da análise raios-X feita na amostra t80.



Figura B.3.4 – Resultado da análise raios-X feita na amostra t120.

B.4 – CONCLUSÃO DAS ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE SILICETO DE TUNGSTÊNIO.

O resultado da medida de quatro pontas do filme de tungstênio apresentou baixa resistividade (19µΩ.cm), próximo do valor encontrado na literatura<sup>[1]</sup> (5,65µΩ.cm). Porém nas amostras submetidas ao processo de recozimento, a medida indicou através do resultado V/I maior que 1 kΩ, a formação de um filme com resistividade muito alta para ser utilizado como condutor. Este resultado foi comprovado com as medidas de difração de raios-X , o qual mostra que o tungstênio foi consumido formando óxido de siliceto de tungstênio.

A oxidação do filme de tungstênio durante o processo de recozimento rápido pode ter ocorrido devido a presença de umidade no gás nitrogênio, já que o gás utilizado não é ultra-seco.

Como o filme de Tungstênio apresentou boas características, resolvemos substituir o siliceto de tungstênio pelo tungstênio como metal de contato Schottky. Para isolarmos o filme do ambiente do processo de recozimento térmico, necessário na última etapa da fabricação do diodo Schottky (Recozimento do filme de Alumínio para formação do contato ôhmico), foi depositado um filme de Alumínio sobre o filme de Tungstênio. A figura B.4 ilustra o esquema de construção do diodo.



Figura B.4 – Diodo Schottky convencional com tungstênio como metal de contato Schottky protegido com filme de Alumínio.

Assim, não conseguimos obter o filme de siliceto de tungstênio devido a falta de condições requeridas para este tipo de processo, porém conseguimos solucionar o problema da escolha do metal adequado para contato Schottky, utilizando o Tungstênio e protegendo este filme do ambiente de recozimento térmico, com o filme de Alumínio.

APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO DIODO COMERCIAL

Para determinarmos o aspecto geométrico do contato Schottky do diodo comercial, foi utilizado um microscópio óptico, e para identificar os metais que formam os contatos Schottky e ôhmico, foram feitas análise EDX .

O dispositivo possui geometria quadrada com cantos arredondados, e o contato Schottky é envolvido por um anel de guarda. A figura C.1 mostra um desenho esquemático da vista superior do dispositivo.



Figura C.1 – Desenho esquemático do diodo Schottky comercial.

A área do contato Schottky é de  $5000\mu$ mx $5000\mu$ m, a largura do anel de guarda tem  $100\mu$ m, a distância do anel de guarda a borda do dispositivo tem  $50\mu$ m e a distância do anel de guarda ao contato metálico tem  $25\mu$ m.

A análise EDX (Energy Dispersive X-Ray) é feita bombardeando a amostra com um feixe de elétrons e analisando o raio-X emitido. Conhecendo a faixa de energia em que cada elemento emite a radiação, podemos identificar os elementos presentes na amostra. A seguir temos os gráficos obtidos da análise feita no diodo comercial.



Figura C.2 - Análise EDX feita no terminal de catodo (contato ôhmico) do diodo Schottky Comercial



Figura C.3 - Análise EDX feita no terminal de anodo (contato Schottky) do diodo Schottky Comercial.

Nas figuras C.2 e C.3, podemos verificar a presença de Tungstênio, no contato Schottky. No contato ôhmico, foi encontrado Titânio, Prata e Níquel.