

Descrição do Processo MOS do CCS/UNICAMP

José Alexandre Diniz

O processo MOS consiste basicamente das etapas que estão apresentadas na Figura 1. Nos itens posteriores deste capítulo, as etapas são descritas e explicadas detalhadamente.

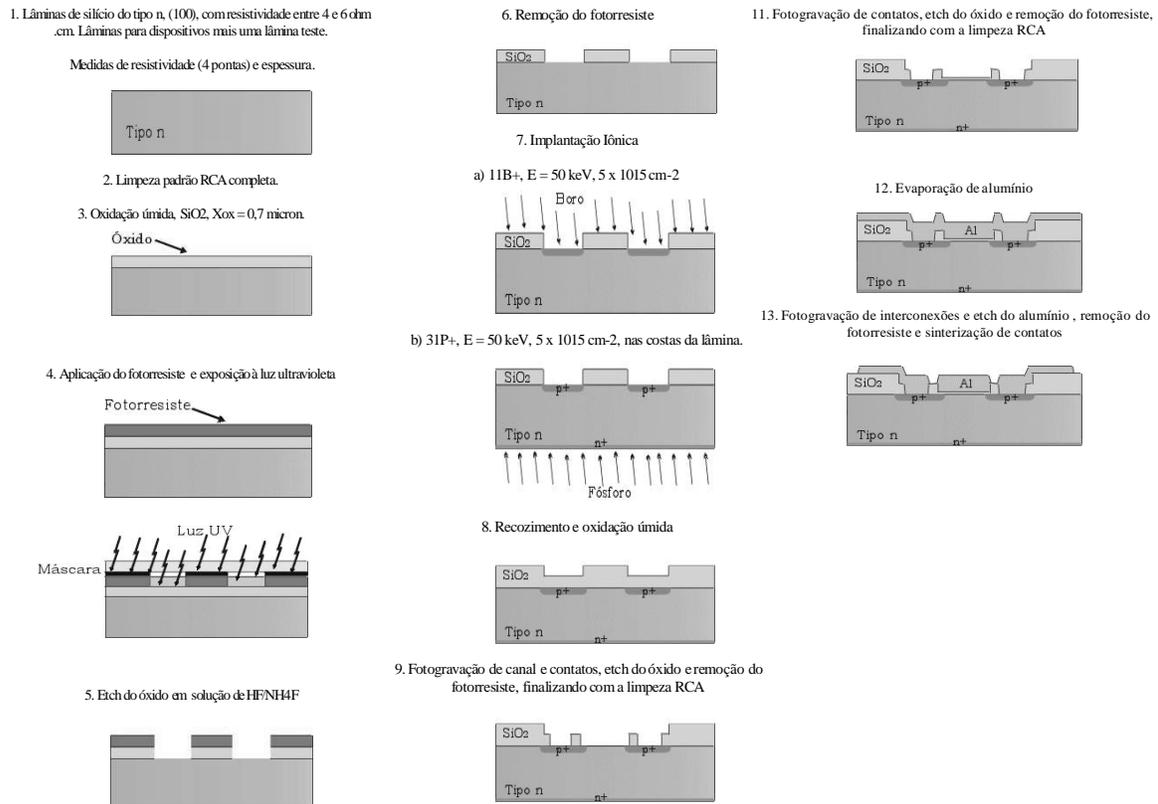


Figura 1- Processo pMOS do CCS/UNICAMP para fabricação do chip teste

1. O Substrato de Silício

O tipo de dopante, a orientação cristalina e a resistividade do substrato de Si, que será utilizado, são características importantes na fabricação e no desempenho dos dispositivos.

O tipo de dopante, p ou n, determina os portadores majoritários, lacunas ou elétrons, respectivamente, presentes no substrato e qual processo MOS, pMOS ou nMOS, que será empregado. Em lâminas tipo n, executa-se o processo pMOS, enquanto em tipo p, o nMOS, pois o canal de modo enriquecimento ou depleção do transistor MOS é formado por portadores minoritários presentes no substrato. Dispositivos nMOS apresentam mobilidade maior que os pMOS, pois a mobilidade de elétrons é cerca de três vezes maior que a de lacunas. O tipo de dopante pode ser determinado por um sistema de ponta-quente ou pela visualização do formato do substrato, como indicado na Figura 2.

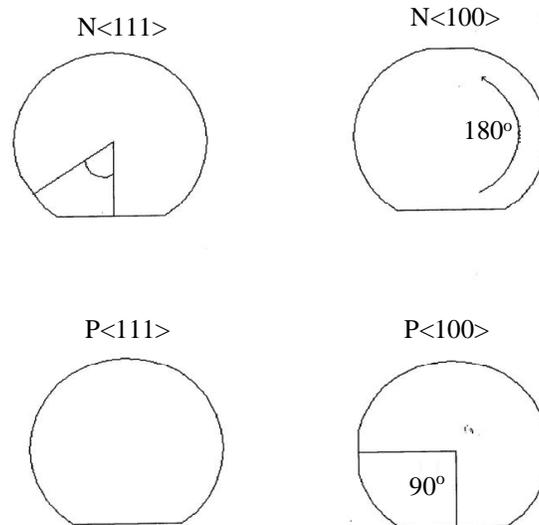


Figura 2 - Tipos de dopantes e as orientações Cristalográficas de Substratos de Si, vistos de cima.

A Figura 2 mostra que a orientação cristalográfica e o tipo de semiconductor podem ser obtidos por inspeção visual do formato da lâmina. Normalmente, para o Si utilizam-se duas possibilidades de crescimento ou orientação direcional <111> ou <100>. O tipo n ou p de semiconductor pode ser identificado pela presença e pelo posicionamento dos chanfros laterais. A orientação cristalográfica pode influir principalmente na taxa de oxidação do substrato e na densidade de defeitos no óxido de Si crescido sobre a lâmina, que originam centros de armadilhamento de cargas no isolante. Estas cargas podem responder de forma indesejável ao campo elétrico aplicado ao dispositivo, reduzindo seu desempenho. Óxidos crescidos sobre lâminas com orientação <100> apresentam menos defeitos que os crescidos sobre substratos com orientação <111>. Para fabricação do Chip teste do CCS são utilizadas lâminas tipo n, para executar o processo pMOS, e com orientação <100>, o que resulta em menos defeitos nos óxidos crescidos.

A resistividade ρ indica qual a concentração de dopantes (portadores majoritários) do substrato de Si. É calculada pelas expressões (1) e (2), onde V/I é medido em um equipamento de quatro pontas, R_s é a resistência de folha e t é a espessura do substrato. Quanto maior a resistividade menor é a concentração de dopantes na lâmina. Normalmente, utilizam-se substratos com concentrações da ordem de 10^{14} a 10^{16} cm^{-3} , resultando em correspondentes resistividades de 1 a 22 $\Omega\cdot\text{cm}$. Para fabricação do Chip teste do CCS, utilizam-se lâminas com valores de resistividade entre 4 e 6 $\Omega\cdot\text{cm}$, com concentração de portadores da ordem de 10^{15} cm^{-3} .

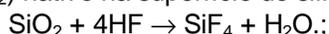
$$R_s = 4,53 \frac{V}{I} \quad (\text{Resistência de folha}) \quad (1)$$

$$\rho = R_s * t \quad (\text{Resistividade}) \quad (2)$$

2. Limpeza padrão RCA

A limpeza das lâminas de silício, representadas em corte lateral na Figura 3, é fundamental num processo de microfabricação. Para garantir uma limpeza eficaz, com a menor quantidade possível de impurezas, segue-se um processo padrão RCA que consiste na seguinte seqüência de etapas, mergulhando-se as lâminas em soluções de:

- $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (4:1) em 80°C por 10 min: esta solução denominada "piranha", utiliza-se para remover principalmente quantidades de gordura presentes na superfície das lâminas de silício;
- $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ (1:10) em temperatura ambiente por 10s: nesta etapa de limpeza remove-se o óxido de Si (SiO_2) nativo na superfície do silício. A reação química do processo é a seguinte:





- $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) em 80°C por 10 min: nesta etapa, removem-se a gordura e os metais do grupo IB e IIIB (Cu, Ag, Zn, Cd);
- $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) em 80°C por 10 min: nesta etapa dissolvem-se os íons alcalinos e hidróxidos de Fe^{+3} , Al^{+3} e Mg^{+3} das superfícies dos substratos.

Entre uma solução e outra, as lâminas são submetidas a um enxágüe com água DI (deionizada) $18\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ por 3min. A secagem destas lâminas é feita com jato de nitrogênio. No item 2.3 é apresentado o procedimento inteiro de limpeza RCA.



Figura 3- Representação da lâmina de Si em corte lateral

2.1 – Material Utilizado.

O material normalmente utilizado na limpeza de lâminas é listado abaixo:

- 3 béquers de vidro pyrex
- 1 béquer de polipropileno
- 1 "hot plate"
- 1 barqueta de quartzo
- 1 pinça de aço inoxidável
- 1 pinça de polipropileno
- 1 litro de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)
- 1 litro de Ácido Fluorídrico (HF)
- 1 litro de Hidróxido de Amônia (NH_4OH)
- 1 litro de Ácido Clorídrico (HCl)
- 1 litro de Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2)

Toda água utilizada é deionizada de $18\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ e todos os produtos químicos utilizados são de grau eletrônico.

2.2. Limpeza dos béquers, barquetas e pinças.

Antes do início da limpeza das lâminas, verifica-se se os recipientes e materiais que serão manipulados estão limpos. Caso contrário, ocorre duas etapas de limpeza destes materiais: a de pré-lavagem e a de retirada de gordura. A etapa de pré-lavagem é a seguinte: os béquers, as barquetas e as pinças são lavados com detergente apropriado. Outra possibilidade é que aos invés da lavagem com detergente, os béquers e as barquetas, que formam basicamente a parte de vidraria, podem ser mergulhados em uma solução de água régia (HCl/HNO_3 (3:1)) com posterior enxágüe em água DI (deionizada). Em seguida, executa-se a etapa de retirada da gordura dos materiais com o seguinte procedimento:

- Fazer uma solução de $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH}$ na proporção de 7:2:1;
- Enxaguar o béquer com água;
- Verificar visualmente se o béquer está realmente limpo (as gotas de água devem escorrer das paredes do vidro).

2.3. Procedimento para limpeza das lâminas de Silício

Em béquers separados prepare as soluções de:

- (I) $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ na proporção de 4:1 (solução "piranha");
- (II) HF + H_2O na proporção de 1:10 (solução para remoção do óxido nativo);
- (III) $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ na proporção de 1:1:5 (solução para remoção de gordura e metais do grupo IB e IIIB (Cu, Ag, Zn, Cd));
- (IV) $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ na proporção de 1:1:5 (solução para remoção de íons alcalinos e hidróxidos de Fe^{+3} , Al^{+3} e Mg^{+3});

Com estas soluções deve-se obedecer o seguinte procedimento:

- Aqueça as soluções à 80°C no "hot plate";
- Mergulhe a lâmina por 10 minutos na solução (I);
- Enxágüe em água corrente por 3 minutos e deixe mais 3 minutos dentro do béquer com água;



- Mergulhe a lâmina por 30 segundos na solução (II);
- Enxágüe em água corrente por 3 minutos e depois deixe as lâminas por mais 3 minutos dentro do béquer com água;
- Mergulhe a lâmina por 10 minutos na solução (III);
- Enxágüe novamente em água corrente por 3 minutos e depois deixe as lâminas por mais 3 minutos dentro do béquer com água;
- Mergulhe a lâmina por 10 minutos na solução (IV);
- Enxágüe novamente em água corrente por 3 minutos e depois deixe as lâminas por mais 3 minutos dentro do béquer com água;
- Seque as lâminas com Nitrogênio (N_2);
- Coloque as lâminas na caixa para transportá-las;
- Não exponha as lâminas limpas ao ambiente do laboratório.

IMPORTANTE: Neutralizar todas soluções antes de descartar na pia. Utilizar avental e luvas durante qualquer manipulação de produtos químicos e de lâminas.

3. Oxidação Úmida de Campo para Isolação de Dispositivos



Figura 4- Representação da lâmina de Si em corte lateral com óxido de campo crescido.

A oxidação úmida é realizada colocando-se as lâminas de Si no forno térmico convencional em alta temperatura de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ e em ambiente de H_2O (vapor) e de O_2 . Esta etapa é executada para formação do óxido de Si de campo, que isola um dispositivo do outro na lâmina. A Figura 4 representa o óxido de Si crescida sobre o substrato de Si. Para isso, a espessura do óxido de campo deve ser maior que $0.5\mu\text{m}$. Para controle do processo, clive uma lâmina teste em 4 partes denominadas T1, T2, T3 e T4. Coloque-as junto com as lâminas inteiras onde serão confeccionados os dispositivos. Com estas amostras teste pode-se fazer as medidas de espessura do óxido.

O procedimento de oxidação úmida no CCS/UNICAMP é o seguinte:

- Utilize o Forno de Penetração de Fósforo em temperatura de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Execute a entrada da barqueta de quartzo com as lâminas no forno em ambiente de N_2 , com fluxo de 1l/min , por um tempo maior que 3 min;
- Deixe as lâminas neste ambiente de N_2 por 10 min;
- Desligue a linha de N_2 , ligue a linha de O_2 , com fluxo de 1l/min , e deixe as lâminas neste ambiente por 10 min (oxidação seca);
- Ligue o sistema de borbulhador O_2/H_2O , com aproximadamente 63 gotas de H_2O/min , para manter as lâminas em ambiente úmido por 180 min (oxidação úmida);
- Desligue o sistema de borbulhador O_2/H_2O , ligue a linha de N_2 , com fluxo de 1l/min , e deixe as lâminas neste ambiente por 10 min (recozimento do óxido crescida);
- Execute a saída da barqueta de quartzo com as lâminas do forno em ambiente de N_2 , com fluxo de 1l/min , por um tempo maior que 3 min;

Observações: A espessura esperada do óxido é da ordem de $0.8\text{ }\mu\text{m}$.

4. Processo Fotolitográfico do Primeiro Nível de Máscara para Obtenção de Fonte/Dreno

A fotolitografia é a etapa de processo exigida para gravar padrões de uma máscara para o substrato onde é fabricado o chip. A Figura 5 mostra basicamente o processo fotolitográfico. Utilizando-se de um sistema de "spinner" em alta velocidade de rotação, maior que 3000 rpm , por centrifugação espalha-se sobre a camada do óxido uma resina foto-resistiva, que é um líquido orgânico polimérico,



denominado fotorresiste. Este resiste é colocado em uma estufa em temperatura de aproximadamente 100°C para secar. A Figura 5(a) mostra a representação do fotorresiste espalhado sobre o óxido de campo. Esta resina polimerizada não é solúvel em certos solventes, denominados reveladores. Executa-se a despolimerização por luz ultravioleta que passa através das aberturas da máscara que contém o padrão a ser transferido ao substrato, como representado na Figura 5(b). A parte opaca da máscara evita a exposição à luz ultravioleta das regiões do substrato que serão posteriormente processadas. Para remover a parte do resiste despolimerizada, utiliza-se o solvente revelador.

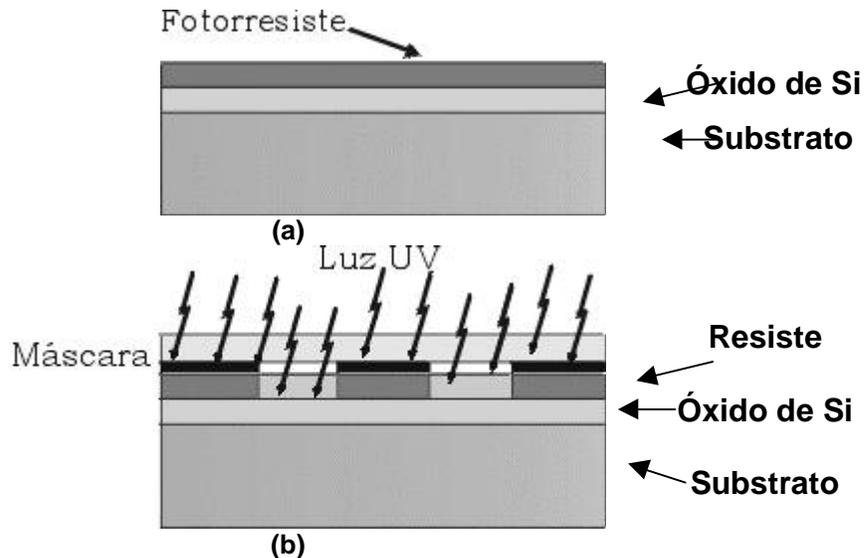


Figura 5- Representação da lâmina de Si em corte lateral com óxido de campo crescido. Representa-se em (a) o fotorresiste espalhado sobre o óxido e em (b) a despolimerização do resiste pela exposição à luz ultravioleta para transferência de padrão da máscara para o óxido.

Para o início da fotolitografia, estando a lâmina limpa e a umidade do ambiente abaixo de 50%, espalha-se sobre a amostra o promotor de aderência do resiste, denominado HMDS, em um spinner em alta velocidade de rotação de 7000 rpm por 40 segundos. Em seguida, uma camada de fotorresiste é aplicada sobre a lâmina com o HMDS espalhado. Para isso, deposita-se algumas gotas de fotorresiste (AZ 1350J) sobre a lâmina, espalha-se o fotorresiste através do spinner em alta velocidade de rotação de 7000 rpm por 40 segundos, coloca-se a lâmina na estufa para secagem e aderência do fotorresiste. Após a aderência do resiste, coloca-se a lâmina e a máscara em uma fotoalinhadora com fonte de luz ultravioleta. Na fotoalinhadora, alinha-se a máscara e a lâmina através do sistema óptico, e aciona-se a exposição aos raios ultra-violeta (UV) do substrato com resiste, em uma potência de $9\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ durante 20 segundos, despolimerizando as regiões expostas. A revelação do resiste é executada através da imersão das lâminas em solução MF-312/H₂O (1:1) por 60s. Para finalizar, coloca-se as lâminas na estufa em 90°C por 30 min para endurecimento do resiste não revelado.

5. Remoção do Óxido para Obtenção da Fonte/Dreno

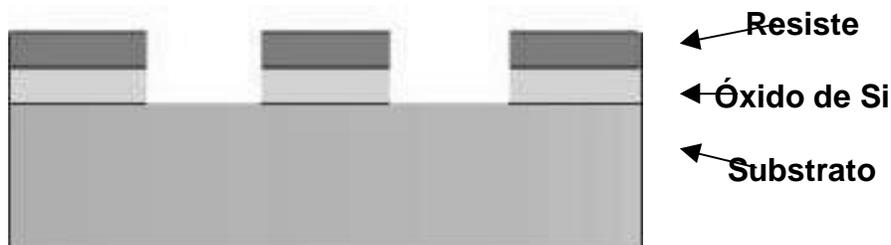


Figura 6- Representação da lâmina de Si em corte lateral com óxido de campo removido nas áreas sem proteção do resiste.



Como representado na Figura 6, a etapa de fotolitografia é utilizada para remover seletivamente o óxido de algumas regiões, que serão processadas posteriormente para a obtenção da fonte/dreno do transistor MOS. Executa-se a remoção do óxido mergulhando-se as lâminas em uma solução tampão ("Buffer") de HF e NH_4F . Para controle da remoção do óxido coloca-se junto nesta solução as amostras teste T3 e T4 com óxido crescido sobre os substratos. Esta solução corrói o óxido de silício a uma taxa de 100nm/min e não reage nem com o resiste e nem com o substrato de Si. Verifica-se que o óxido está totalmente removido quando estas áreas nas lâminas sem resiste de proteção ou as amostras teste T3 e T4 apresentar-se totalmente secas quando retiradas da solução "Buffer". Após a retirada do óxido, retira-se a camada protetora de fotorresiste com acetona. A Figura 7 mostra a lâmina sem a camada protetora de fotorresiste sobre o óxido e as áreas expostas do substrato.

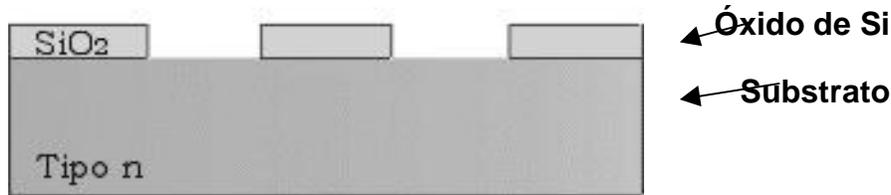


Figura 7- Representação da lâmina de Si em corte lateral sem a camada protetora de fotorresiste sobre o óxido e as áreas expostas do substrato.

6. Implantação de Íons de Boro e de Fósforo para Obtenção da Fonte/Dreno e de Contato Ôhmico Metal-Semicondutor na Base do Substrato, Respectivamente.

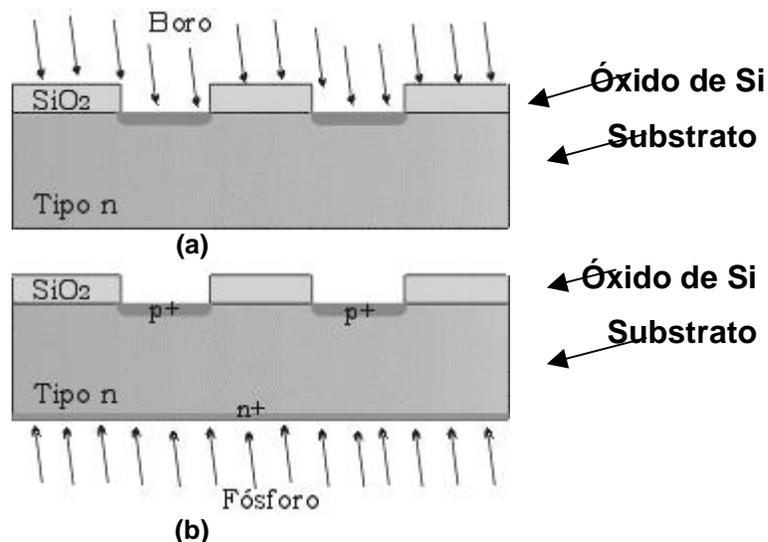


Figura 8- Representação da lâmina de Si em corte lateral com óxido de campo crescido protegendo as áreas do substrato que não devem ser implantadas. Representa-se em (a) a implantação de Boro para formação de fonte/dreno do transistor MOS e em (b) a implantação de Fósforo para obtenção de contato ôhmico metal-semicondutor na base do substrato.

Utiliza-se a implantação de íons para dopagem do tipo n, com Fósforo, ou p, com Boro, em substratos de Si. A Figura 8 mostra em (a) a implantação de Boro para formação de fonte/dreno do tipo p^+ do transistor MOS e em (b) a implantação de Fósforo para obtenção de contato ôhmico metal-substrato tipo n^+ na base do substrato. O óxido de Si serve como camada protetora contra a implantação de íons (Figura 8) no substrato.



O processo de implantação iônica permite controlar os seguintes parâmetros:

- i) a energia fornecida (pelo campo elétrico) aos íons, que determina a profundidade média de penetração em uma determinada estrutura atômica;
- ii) a carga total implantada (dose), que é fornecida pela corrente do feixe;
- iii) a espécie química implantada, que é selecionada por um espectrômetro de massa;
- iv) a contaminação mínima do substrato, que é estabelecida pelo alto vácuo (10^{-8} Torr) exigido nas câmaras de implantação e pela execução do processamento em temperatura ambiente (processo frio);
- v) a uniformidade lateral e a definição espacial da região implantada, que são monitoradas pelo sistema automático de varredura do feixe iônico sobre o alvo (sistema x-y com lentes eletrostáticas).

Desta maneira, o processo forma camadas implantadas com controle preciso da uniformidade, da definição espacial, da contaminação e do perfil de distribuição dos íons que depende da dose implantada e da energia do feixe iônico. Uma vez que a seleção do íon é feita por um espectrômetro de massa, não é necessária a utilização de fontes de materiais de alta pureza, para a geração de íons. No processo pMOS do CCS, para implantação de íons de Boro e de Fósforo emprega-se as fontes de Nitreto de Boro (BN) e de Fluoreto de Fósforo (PF_5), respectivamente. A implantação iônica é realizada em um implantador GA-4204 EATON. São implantados íons de Boro, para formação de regiões p+ nas áreas de fonte e dreno, e de Fósforo nas costas da lâmina, para obtenção de contato ôhmico metal-substrato tipo n+ na base do substrato. Para controle as amostras T3 e T4 também são implantadas. Os parâmetros de implantação são:

- íons $^{11}\text{B}^+$, com energia de 50 keV e com dose de $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ para as regiões p+;
- íons $^{31}\text{P}^+$ com energia de 50 keV e com dose de $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, para as regiões n+ nas costas da lâmina.

A lâmina é colocada no porta-substrato do implantador em ângulo de 7° com o feixe e girada sobre seu próprio eixo de 20° , para evitar a canalização de íons dentro do substrato semiconductor.

7. Recozimento para Ativação de Dopantes Implantados com Posterior Oxidação Úmida para Formação de Óxido na Região de Fonte/Dreno

O recozimento pós-implantação para reconstrução das camadas implantadas e ativação dos dopantes nas regiões n+ e p+ (Figura 9). Realiza-se o recozimento em forno convencional, em ambiente de N_2 , com temperatura de 1000°C e tempo de 20 min. A oxidação úmida posterior é realizada para a formação de óxido na região p+ de Fonte/Dreno. Realiza-se a oxidação também em forno convencional, em ambiente de O_2 , com temperatura de 1000°C e tempo de 100 min. O procedimento para o recozimento pós-implantação com posterior oxidação úmida é similar ao mostrado no item 3. A única diferença é que depois da entrada das lâminas no forno convencional ao invés de deixar os substratos em ambiente de N_2 por 10min, aumente este tempo para 20 min para a execução do recozimento. O restante do procedimento é o mesmo já apresentado. Para controle dos processos coloca-se junto com as lâminas, onde estão sendo fabricados os dispositivos, as amostras testes T1, T2, T3 e T4. Obtém-se a medida de espessura do óxido crescido sobre os cacos T1 e T3. Remove-se com solução "Buffer" de HF o óxido crescido sobre caco T4. Mede-se no mesmo caco T4, a resistência de folha R_s e a profundidade de junção da camada implantada X_j . A medida de R_s é feita pelo equipamento de quatro pontas com descrito no item 1. Para a medida de X_j , desbasta-se mecanicamente a lâmina teste e com um líquido revelador obtém-se o contraste de imagem (verificada por um microscópio óptico) entre a parte dopada e a não dopada, como mostra a Figura 10. O resultado esperado para a região p+ da fonte/dreno é da ordem de $1,4\mu\text{m}$.

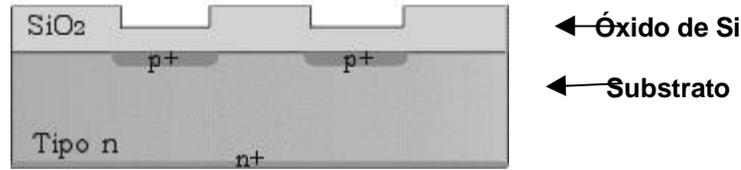


Figura 9- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao recozimento para ativação de dopantes implantados com posterior oxidação úmida para formação de óxido na região p⁺ de Fonte/Dreno

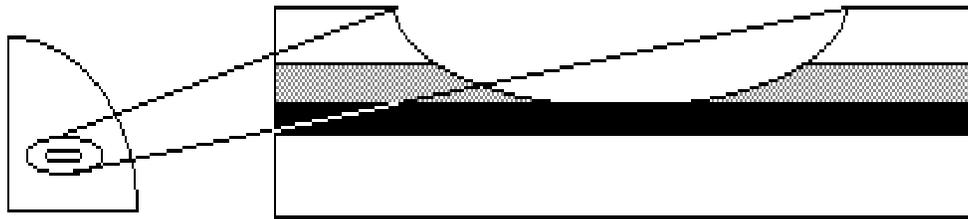


Figura 10 - Ranhura feita para medir profundidade de junção X_j

8. Processo Fotolitográfico do Segundo Nível de Máscara para Definição das Áreas de Porta e de Contatos Metálicos de Fonte/Dreno. Remoção do Óxido de Campo sobre a Fonte/Dreno seguida da Remoção do Fotorresiste, Finalizando com a Limpeza RCA.

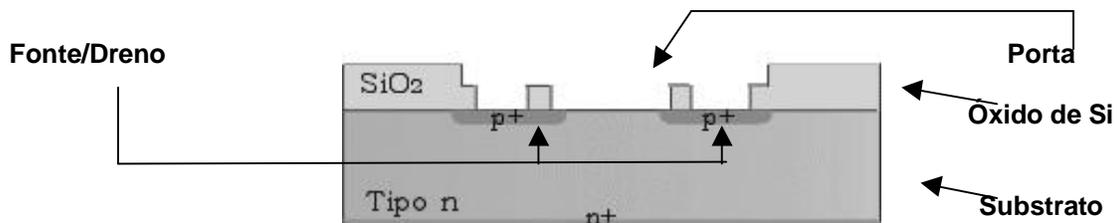


Figura 11- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao processo fotolitográfico do segundo nível de máscara para definição das áreas de porta e de contatos metálicos com posterior remoção do óxido da fonte/dreno seguido da remoção do fotorresiste, finalizando com a limpeza RCA.

O processo fotolitográfico do segundo nível de máscara é feito para a abertura no substrato das regiões de contatos metal-semicondutor de fonte/dreno e de porta, como mostra a Figura 11. O procedimento deste processo fotolitográfico é o mesmo apresentado no item 4. Para a abertura destas regiões no substrato, remove-se o óxido de campo crescido sobre a fonte/dreno com solução "Buffer" de HF, seguido da remoção do fotorresiste com as lâminas mergulhadas em acetona, finalizando com uma limpeza RCA completa. Os procedimentos destas etapas já foram descritos nos itens 5 e 2, respectivamente.



9. Oxidação Seca para Crescimento do Óxido Fino de Porta

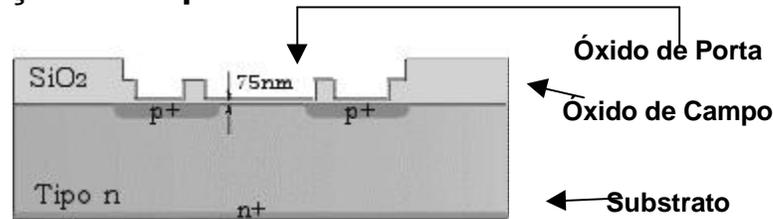


Figura 12- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao processo de oxidação seca para crescimento do óxido fino de porta com 75nm de espessura.

Executa-se esta etapa para o crescimento do óxido de Si de porta, que forma a estrutura principal do dispositivo metal-óxido-semicondutor. A Figura 12 representa o óxido de Si crescido sobre o substrato de Si. Para isso, a espessura do óxido de porta deve ser menor que 100nm. Realiza-se a oxidação seca colocando-se as lâminas de Si no forno térmico convencional em alta temperatura de 1000 °C e em ambiente oxidante com cloro. A presença do cloro na mistura na forma de tricloroetileno, TCE, neutraliza os íons alcalinos, como o Na^+ , que podem estar presentes no ambiente de processo e são cargas móveis nos óxido de Si. Estas cargas respondem rapidamente e descontroladamente ao campo aplicado na região de porta dos dispositivos MOS, danificando-os. Portanto, emprega-se o cloro para manter o controle de contaminantes no ambiente oxidante. Para controle do processo, coloque os cacos T1, T2 e T3 junto com as lâminas inteiras onde serão confeccionados os dispositivos. Com os cacos T1, T2 e T3 pode-se medir as espessuras dos óxidos da região de porta, de fonte/dreno e de campo, respectivamente.

O procedimento de oxidação seca no CCS/UNICAMP é o seguinte:

- Utilize o Forno de Oxidação com linha secundária de O_2 +TCE em temperatura de 1000 °C;
- Execute a entrada da barqueta de quartzo com as lâminas no forno em ambiente de N_2 , com fluxo de 1l/min, por um tempo maior que 3 min;
- Deixe as lâminas neste ambiente de N_2 por 5 min;
- Desligue a linha de N_2 , ligue a linha principal de O_2 , com fluxo de 1l/min, e deixe as lâminas neste ambiente por 5 min (oxidação seca sem cloro);
- Desligue a linha principal de O_2 e ligue a linha secundária de O_2 +TCE, com aproximadamente 1% de TCE na mistura, para manter as lâminas em ambiente oxidante com cloro por 30 min (oxidação seca com cloro);
- Desligue a linha secundária de O_2 +TCE e ligue a linha principal de O_2 , para manter as lâminas em ambiente oxidante sem cloro por 5 min (oxidação seca sem cloro);
- Ligue a linha de N_2 , com fluxo de 1l/min, e deixe as lâminas neste ambiente por 30 min (recozimento do óxido crescido);
- Execute a saída da barqueta de quartzo com as lâminas do forno em ambiente de N_2 , com fluxo de 1l/min, por um tempo maior que 3 min;

O óxido fino também cresce sobre a região exposta de fonte/dreno, como mostra a Figura 12. A espessura esperada do óxido de porta é da ordem de 75nm.



10. Processo Fotolitográfico do Terceiro Nível de Máscara para Definição das Áreas de Contatos Metálicos de Porta e de Fonte/Dreno. Remoção do Óxido Fino sobre a Fonte/Dreno seguida da Remoção do Fotorresiste, Finalizando com a Limpeza RCA.

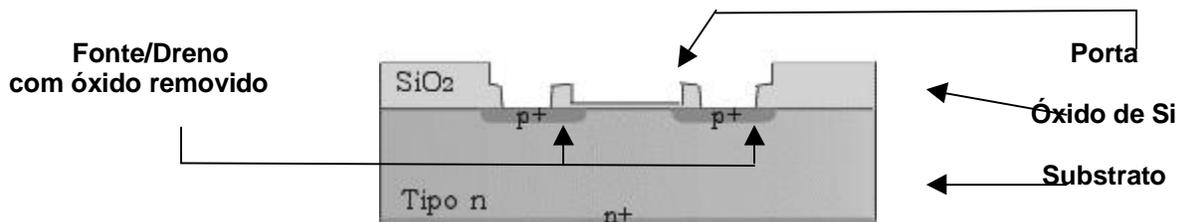


Figura 13- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao processo fotolitográfico do terceiro nível de máscara para definição das áreas de contatos metálicos de porta e de fonte/dreno, com posterior remoção do óxido fino sobre a fonte/dreno, seguido da remoção do fotorresiste, finalizando com a limpeza RCA.

Utilizando-se a terceira máscara, executa-se a fotogração dos locais de abertura dos contatos metálicos de porta e de fonte/dreno. O procedimento deste processo fotolitográfico é o mesmo apresentado no item 4. Para a abertura destas regiões no substrato, remove-se o óxido de campo crescido sobre a fonte/dreno com solução "Buffer" de HF, seguido da remoção do fotorresiste com as lâminas mergulhadas em acetona, finalizando com uma limpeza RCA completa. Os procedimentos destas etapas já foram descritos nos itens 5 e 2, respectivamente.

11. Evaporação de Alumínio para a Formação de Contatos Metálicos de Porta e de Fonte/Dreno

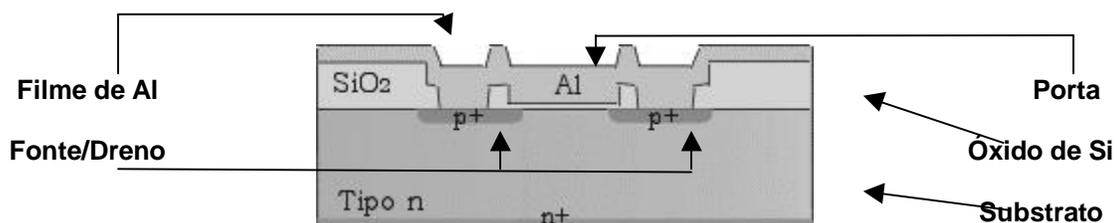


Figura 14- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao processo de evaporação de Alumínio para a formação de contatos metálicos de porta e de fonte/dreno

Para formação de contatos metálicos de porta e de fonte/dreno, evapora-se uma camada de Al de 1µm sobre toda a lâmina (Figura 14). No CCS/Unicamp, executa-se a evaporação introduzindo-se as lâminas em uma câmara de alto-vácuo com um sistema de feixe de elétrons, que é usado para fundir a fonte metálica, que se deseja depositar sobre o substrato. A fonte metálica utilizada é de Al com grau de pureza de 99,999%. A pressão de base para iniciar o processo é da ordem de 5×10^{-7} Torr, que é obtida através de um sistema de vácuo acoplado que contém duas bombas de vácuo do tipos mecânica e difusora. Durante a evaporação, a pressão é de aproximadamente 5.10^{-5} Torr.



12. Processo Fotolitográfico do Quarto Nível de Máscara para Corrosão de Alumínio. Formação de Contatos Metálicos de Porta e de Fonte/Dreno e de Interconexão Metálica de Dispositivos.

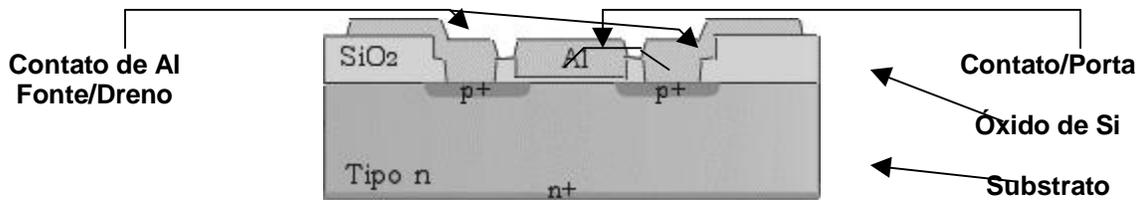


Figura 15- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao processo fotolitográfico do quarto nível de máscara para corrosão de Alumínio, obtendo-se a formação de contatos metálicos de porta e de fonte/dreno e de interconexão metálica entre dispositivos.

Utilizando-se a quarta máscara, executa-se a fotogração dos locais entre os contatos, onde o filme de Al deve ser removido para se separar os contatos e as interconexões (Figura 15). O procedimento deste processo fotolitográfico é o mesmo apresentado no item 4. Após a fotogração, executa-se a remoção do Al mergulhando-se as lâminas em solução de Ácido Orto Fosfórico + Ácido Nítrico (9,5:0,5). A taxa de corrosão do Al nestas condições é de 300nm/min. Em seguida, executa-se a remoção do fotorresiste com as lâminas mergulhadas em acetona, como descrito anteriormente.

13. Evaporação de Al para Formação de Contato Metálico nas Costas do Substrato. Sinterização dos Contatos de Al.

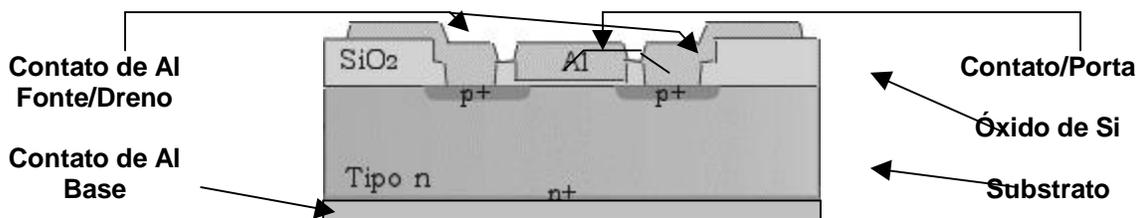


Figura 16- Representação da lâmina de Si em corte lateral submetida ao processo evaporação de Al para formação de contatos metálicos nas costas do substrato com posterior sinterização dos contatos de Al.

Para formação de contatos metálicos de base, evapora-se uma camada de Al de 1 μ m sobre as costas da lâmina (Figura 16). O procedimento de evaporação já foi descrito no item 11. Para terminar os dispositivos, executa-se o processo de sinterização. No processo de sinterização dos contatos de Al, executa-se o recozimento das estruturas metal/semicondutor ou metal/óxido/semicondutor em baixa temperatura de aproximadamente 450 $^{\circ}$ C e em ambiente inerte de N $_2$ e de H $_2$. Esta etapa serve para reestruturar as camadas e reduzir os defeitos nas interfaces das estruturas, que podem ter sido gerados durante a evaporação. Estes defeitos podem ser cargas superficiais de ligações incompletas nas interfaces. Estas ligações incompletas são saturadas pelo hidrogênio presente no ambiente. No CCS/UNICAMP, a fonte de hidrogênio no ambiente de sinterização é o vapor d'água que é arrastado do borbulhador para dentro do forno pelo gás N $_2$.

O procedimento de sinterização de contatos de Al no CCS/UNICAMP é o seguinte:

- Utilize o Forno de sinterização de contatos de Al em temperatura de 440 $^{\circ}$ C;
- Execute a entrada da barqueta de quartzo com as lâminas no forno em ambiente de N $_2$, com fluxo de 1l/min, mais vapor d'água por um tempo maior que 3 min;
- Deixe as lâminas neste ambiente de N $_2$ mais vapor d'água por 30 min;
- Execute a saída da barqueta de quartzo com as lâminas do forno em ambiente de N $_2$, com fluxo de 1l/min, mais vapor d'água por um tempo maior que 3 min.

Finalizada a fabricação, a próxima etapa é a da caracterização elétrica dos dispositivos.