

A TECNOLOGIA DO SILÍCIO, SILÍCIO GRAU ELETRÔNICO, PROCESSOS CZOCHRALSKI E FUSÃO ZONAL FLUTUANTE

Adnei Melges de Andrade

1. INTRODUÇÃO

O silício é a matéria prima básica mais importante da microeletrônica. Com este material são produzidos diodos, transistores e circuitos integrados. A par de ser o silício o elemento mais abundante na crosta terrestre, depois do oxigênio, é o fato de apresentar um óxido, o dióxido de silício, com características únicas, que faz com que seja o material da microeletrônica por excelência. O dióxido de silício é estável em condições extremas de temperatura, apresenta-se como material no qual os dopantes comuns tem baixos valores de coeficiente de difusão e é de fácil obtenção, permitindo o desenvolvimento da tecnologia planar, tecnologias MOS, etc. O silício para uso em microeletrônica que é utilizado na obtenção dos monocristais precisa ser de extrema pureza, contendo elementos estranhos a níveis raramente igualados nas outras áreas tecnológicas ou científicas. Tipicamente os níveis máximos permitidos estão em torno de um átomo de impureza para um bilhão de átomos de silício (ppba).

A tabela 1 mostra os requisitos de pureza para o silício grau eletrônico (Si-GE).

Tabela 1 - Requisitos de pureza para o Silício-GE

Elementos	Teor (ppba)
Elementos do Grupo III	< 0,3
Elementos do Grupo V	< 1,3
Metais Pesados	< 0,1
Carbono	< 300
Oxigênio	< 50
Outros Elementos	< 0,001

2. OBTENÇÃO DO SILÍCIO GRAU ELETRÔNICO

A figura 1 mostra as operações de maior importância do fluxograma do processo clássico de obtenção do silício grau eletrônico. Inicialmente o silício de grau metalúrgico é feito reagir com cloreto de hidrogênio anidro em um reator de leito fluidizado para produzir uma mistura de clorosilanos. Essa mistura, essencialmente de triclorosilano (TCS) e tetracloreto de silício é condensada e destilada para remover impurezas e separar subprodutos. O silício de pureza eletrônica é obtido a partir da triclorosilano em uma reação de redução, com hidrogênio, em um reator que será descrito nas seções seguintes.

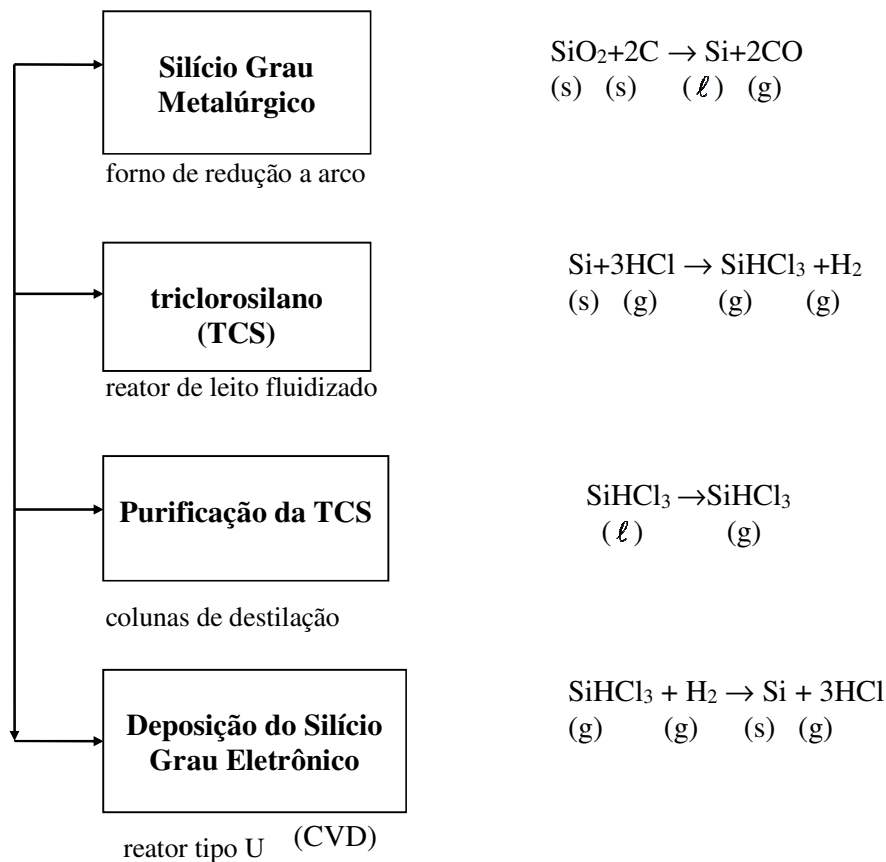
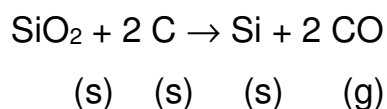


Fig. 1 - Fluxograma dos processos principais de obtenção do silício grau eletrônico

3. SILÍCIO GRAU METALÚRGICO

O silício chamado grau metalúrgico é comercializado tipicamente na faixa de pureza de 98 a 99%. Seus principais usos se situam na siderurgia e indústrias de alumínio e silicões.

O silício de grau metalúrgico (Si-GM) é obtido a partir de quartzito e uma mistura de lascas de madeira, coque de petróleo, carvão mineral ou carvão vegetal como agentes redutores. A reação de redução, feita em fornos elétricos a arco com eletrodos submersos, é a seguinte:



O silício-GM líquido é obtido juntamente com o monóxido de silício que se deposita nas partes altas do forno. O monóxido de silício pode ser recuperado. Os níveis típicos de impurezas do Si-GM assim obtido são mostrados na tabela 2. Pela seleção dos insumos e através de técnicas de injeção de gases reativos como por exemplo cloro, oxigênio ou uma mistura dos dois, durante o processo, pode-se obter sensível melhora no nível de pureza do Si-GM, particularmente no que se refere às impurezas Mg, Al e Ca.

Tabela 2 - Análise típica do Silício-GM

Impurezas	Conteúdo* (%)
Fe	0,35 a 0,51
Al	0,16 a 0,20
B	< 0,002
Mn	0,018 a 0,038
Cr	0,018 a 0,062
Ni	0,013 a 0,019
V	0,017 a 0,038
Ti	0,022 a 0,039
Ba, P, As, Cd, Ca	< 0,05
Hg, Sb	< 0,02
Cu	< 0,005
Pb, Sn	< 0,002
Bi, Be, Ag	<0,001

* em massa

Desta forma, Si-GM de pureza cerca de 99,5% pode ser obtido. As impurezas restantes devem ser quimicamente reduzidas até os níveis de partes por bilhão, conforme tabela 1, para que o silício possa ser utilizado pela indústria de semicondutores.

4. OBTENÇÃO DO TRICLOROSILANO

O silício de grau metalúrgico é moído para que apresente uma grande superfície, adequada para a reação com cloreto de hidrogênio anidro. Na forma de um pó de partículas muito finas o Si-GM é introduzido juntamente com o HCl num reator de leito fluidizado para a reação que deve ocorrer à temperatura de aproximadamente 300°C (figura 2).

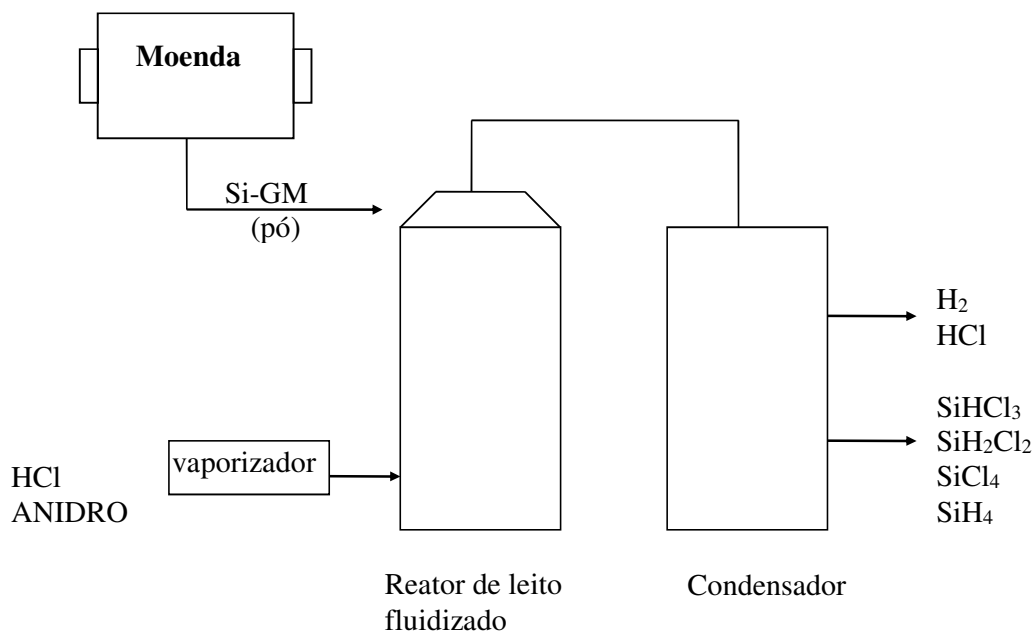
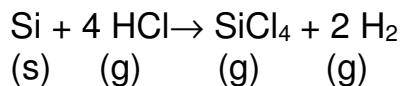
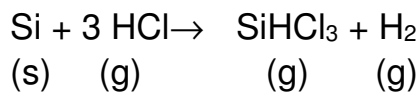


Fig. 2 - Esquema do Processo de Obtenção de triclorosilano

Dessa operação, o resultado é uma mistura de clorosilanos, principalmente a triclorosilano e o tetracloreto de silício que são produzidos via reações como:



As reações são altamente exotérmicas e parte do calor gerado deve ser removido para que se possa manter controle sobre o processo já que a temperatura em torno de 300°C favorece a produção do triclorosilano sobre os demais silanos formadas.

5. PURIFICAÇÃO DA TRICLOROSILANA

A mistura de clorosilanas da reação realizada no leito fluidizado é condensada e submetida a uma série de processos de destilação para separação da triclorosilano, tetracloreto de silício, diclorosilano e também para remover cloreto metálicos (como por exemplo AlCl_3), carbono (na forma de CO , CO_2 , metilclorosilanos, etc.) e principalmente cloreto de boro. O processo usado, de destilação fracionada, aproveita-se do baixo ponto de ebulição da triclorosilano, $31,8^\circ\text{C}$, que permite uma purificação muito eficiente já que praticamente todas as impurezas contidas na mistura de clorosilanas apresentam volatilidade muito baixa. A triclorosilano obtida por este processo é de pureza tal que os procedimentos químicos convencionais de análise não são capazes de detectar as impurezas presentes. O TCS neste ponto do processo apresenta um conteúdo de impurezas eletricamente ativas da ordem de uma parte por bilhão de átomos (~ 1 ppba). Além dos controles químicos nas etapas iniciais do processo, faz-se necessário depositar uma barra de silício a partir da TCS produzida para que se possa obter material monocristalino e medir suas propriedades elétricas. A tabela 3 mostra as especificações típicas de TCS grau eletrônico.

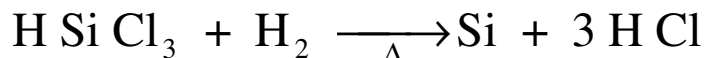
Tabela 3 - triclorosilano de grau eletrônico - Especificações

HSiCl_3	99,95 mínimo
SiCl_4	0,01% máximo
Boro	0,3 ppba máximo
Fósforo	1,5 ppba máximo
Arsênico	0,05 ppba máximo
Hidrocarbonetos	5 ppm (peso) máximo

6. DEPOSIÇÃO DE SILÍCIO POLICRISTALINO

Esta operação consiste na inversão do processo iniciado com a conversão do silício grau metalúrgico em clorosilanas.

Os materiais utilizados são: o triclorosilano e o hidrogênio, ambos de alta pureza. A reação de deposição, a partir da fase de vapor, é feita em reatores do tipo U, em que filamentos de silício montados em um arranjo na forma de ponte, (ver fig. 3), são aquecidos por corrente elétrica. O triclorosilano é reduzido pelo hidrogênio através da reação representativa:



Essa reação ocorre à temperaturas entre 1000^o e 1100^oC depositando o silício nos filamentos aquecidos. As estruturas em forma de U invertido vão se espessando com o continuar da reação que pode durar vários dias e que dão como resultado barras-U de cerca de 250 quilogramas. Os gases residuais e o cloreto de hidrogênio à saída do reator são coletados, separados e purificados para reaproveitamento. Após a necessária caracterização, o silício policristalino é cortado em barras de comprimento e diâmetro adequados para a transformação em monocristais pelo método de fusão zonal flutuante ou cortado ou ainda fragmentado em pedaços menores para utilização em crescimento de monocristais pelo método Czochralski.

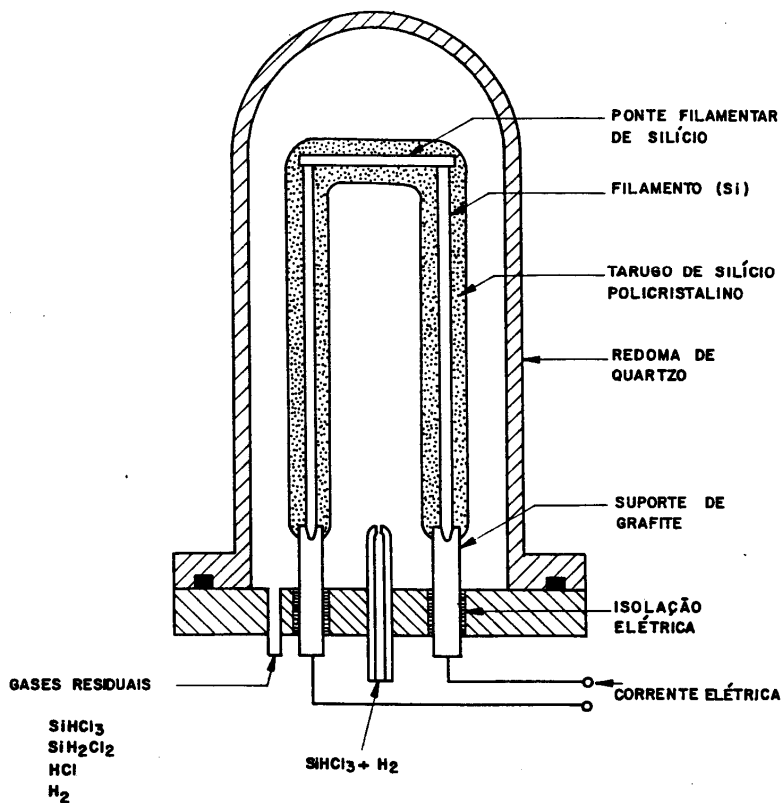


Fig. 3 - Reator tipo-U para deposição de silício policristalino

7. OBTENÇÃO DO MONOCRISTAL

Vários são os processos utilizados para obtenção do monocristal de silício, dependendo de seu uso final a seleção do processo a ser usado. No caso de aplicações fotovoltaicas, o material a ser utilizado pode eventualmente nem ser o monocristalino. Após descrever os processos clássicos, o de Fusão Zonal Flutuante e o de Czochralski, serão comentados os processos ora em uso para obtenção de substratos de silício com finalidades fotovoltaicas.

7.1. Método de Czochralski

Cerca de 80% do silício grau eletrônico produzido é utilizado para a fabricação de monocristais pelo método Czochralski (CZ).

No processo Czochralski, o crescimento do cristal é iniciado com a fusão de uma certa quantidade de silício em um cadinho de quartzo. Para a fusão, geralmente é utilizado um aquecedor resistivo de grafite de alta pureza. Os necessários gradientes de temperatura axial e radial são obtidos com o uso de escudos térmicos. A figura 4 mostra esquematicamente um puxador tipo Czochralski. Após a fusão do Si-GE, toca-se a superfície do Si-líquido com uma semente de orientação cristalográfica desejada. Nessa altura do processo, as condições já deverão ter sido ajustadas para que a temperatura da superfície esteja próximo da do ponto de solidificação. Com os gradientes de temperaturas corretos, inicia-se o puxamento da semente cristalina de tal maneira que o silício faça a transição de líquido para sólido cristalino, adquirindo a mesma orientação cristalina da semente. O diâmetro do lingote monocristalino pode ser ajustado pela velocidade de puxamento e controle da temperatura. Usualmente a semente e o cadinho giram, em direções opostas, durante o crescimento para homogeneizar a temperatura na fase líquida. Durante todo o processo é mantida uma atmosfera protetora na câmara de puxamento. Essa atmosfera pode ser de argônio à pressão ambiente ou argônio à pressão reduzida (10 a 15 torr).

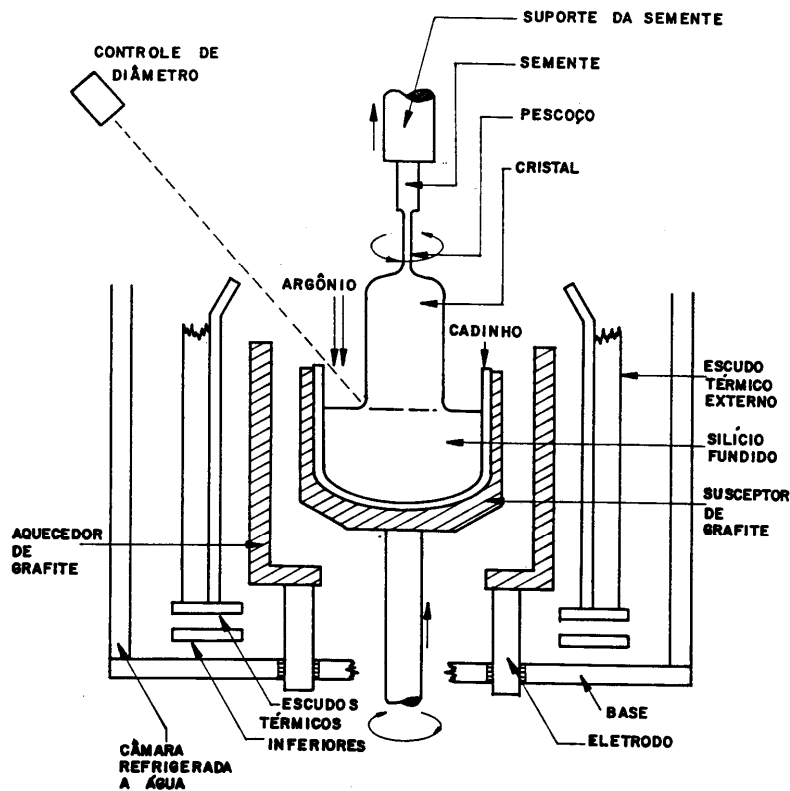


Fig. 4 - Puxador Czochralski em esquema

A primeira etapa do puxamento do cristal é a geração do “pescoço” do cristal, de diâmetro muito pequeno, cerca de 2 milímetros por hora. Essa operação, que visa crescer cristais livres de deslocamentos (discordâncias da rede cristalina) é decorrente dos trabalhos pioneiros de Dash. Com a utilização dessas altas velocidades de puxamento, inibe-se o mecanismo responsável pela migração das deslocações. Uma vez crescidos 20 ou 30 milímetros de “pescoço” inicia-se a formação do “ombro” do cristal que pelas técnicas atuais é feito o mais “plano” possível, ou seja, permite-se que o diâmetro aumente até o tamanho final antes que o puxamento do cristal seja continuado. Este procedimento permite aumentar a quantidade útil de silício no diâmetro desejado. As velocidades de puxamento do corpo de cristal são tipicamente de 50 a 120 milímetros por hora. Existem duas limitações para a velocidade de puxamento do cristal. Uma delas é devido ao tempo necessário para que os átomos da fase líquida do silício se difundam para um sítio adequado na rede cristalina em formação. A outra razão está ligada ao fato de que o calor latente de fusão deve ser removido do sistema sólido (cristal) - líquido. O puxamento continua até que apenas uma pequena parte da carga inicial reste no cadinho. Inicia-se então uma lenta redução no diâmetro do lingote para evitar choques térmicos, causadores de defeitos que se propagam para a porção já crescida do monocristal. Finalmente o cristal é deixado na câmara do puxador por um mínimo de duas a três horas para que esfrie lentamente após desligado o equipamento.

Dopagem - A condutividade σ devido às impurezas em um semicondutor é dada pela expressão:

$$\sigma = q N \mu$$

Onde: q = carga do elétron

N = número de impurezas ionizadas por volume

μ = mobilidade dos portadores de corrente.

A maioria das impurezas se encontra ionizada, contribuindo para a condutividade, para os dopantes comuns como boro, fósforo, alumínio, arsênico e antimônio quando o nível de concentração não ultrapassa a 5×10^{19} átomos $\times \text{cm}^{-3}$. Nessas condições a impureza ocupa um lugar substitucional na rede, isto é, ocupa o lugar de um átomo de silício.

Para modificar as características originais do silício, uma certa quantidade de dopante é adicionada alterando sua condutividade. No processo Czochralski geralmente essa quantidade de dopante é colocada junto a carga de silício no início do puxamento. Uma das dificuldades deste processo é que devido ao coeficiente de segregação das impurezas, o dopante não é incorporado no cristal em formação na mesma concentração existente na fase líquida. Esse fato determina um aumento da condutividade do cristal da região da semente para a região terminal.

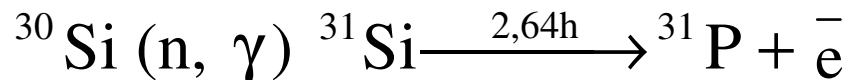
7.2 Métodos de Fusão Zonal Flutuante

O método de fusão zonal flutuante (FZ) é o mais importante depois do de Czochralski para a produção de monocristais de silício. Na maioria dos casos, o silício FZ é usado em aplicações em que o silício CZ não preenche os requisitos necessários. Os monocristais FZ são obtidos a partir de uma barra de silício policristalino suportada verticalmente. O policristal é aquecido e fundido localmente, por zonas, por meio de uma bobina aquecedora de rádio frequência que se desloca lentamente ao longo da barra partindo da semente. Durante o processo de puxamento (CZ), o silício fundido ($\sim 1420^{\circ}\text{C}$) reage com o cadinho de quartzo agregando oxigênio em sua estrutura. Do aquecedor resistivo de grafite, carbono é incorporado. Com o uso do processo de fusão zonal flutuante consegue-se evitar esse tipo de contaminação pois entre o cristal em formação a partir da semente e a barra a ser “cristalizada” existe apenas uma zona fluída suportada por tensão superficial e por forças magnéticas entre o campo de alta frequência e as correntes de Eddy induzidas no

silício fundido. Não há contato físico com cadinhos ou outros tipos de paredes verticais. A figura 5a mostra o arranjo barra (Si-Poli) - Cristal - Semente usado no processo FZ. A figura 5b esquematiza um equipamento para obtenção de silício monocristalino pelo processo FZ. No processo FZ barras de Si-Poli de 50 a 100 centímetros de comprimento são utilizadas em câmaras sob condições de vácuo ou atmosfera de argônio. A movimentação da bobina de RF ao longo da barra de Si-policristalino estabelece a estrutura cristalina da semente ao mesmo tempo em que purifica o silício. Movendo repetidas vezes a bobina de RF pelo silício, consegue-se atingir resistividades muitíssimo elevadas.

Dopagem - Os cristais FZ podem ser dopados a partir de barras de Si-policristalino que já contenham as impurezas em níveis adequados ou ainda pela introdução de gás contendo dopante (usualmente diborano ou fosfina) durante a passagem da bobina de RF pela barra de Si-Poli. Uma terceira possibilidade é a transmutação de átomos de silício em fósforo pelo bombardeio do silício por neutrons térmicos em um reator nuclear.

O processo NTD (Neutral Transmutation Doping) se baseia no fato de que o silício consiste dos isótopos ^{28}Si , ^{29}Si e ^{30}Si . Sendo bombardeados, estes isótopos mudam para ^{29}Si , ^{30}Si e ^{31}Si . O ^{31}Si é instável, emite uma partícula - β e se transforma no isótopo do fósforo ^{31}P . A reação nuclear representativa é:



Este método de dopagem oferece distribuição praticamente homogênea da resistividade elétrica quando comparado aos métodos anteriormente descritos. Requer, entretanto, uma operação de recozimento para eliminar os danos causados à rede cristalina pela radiação.

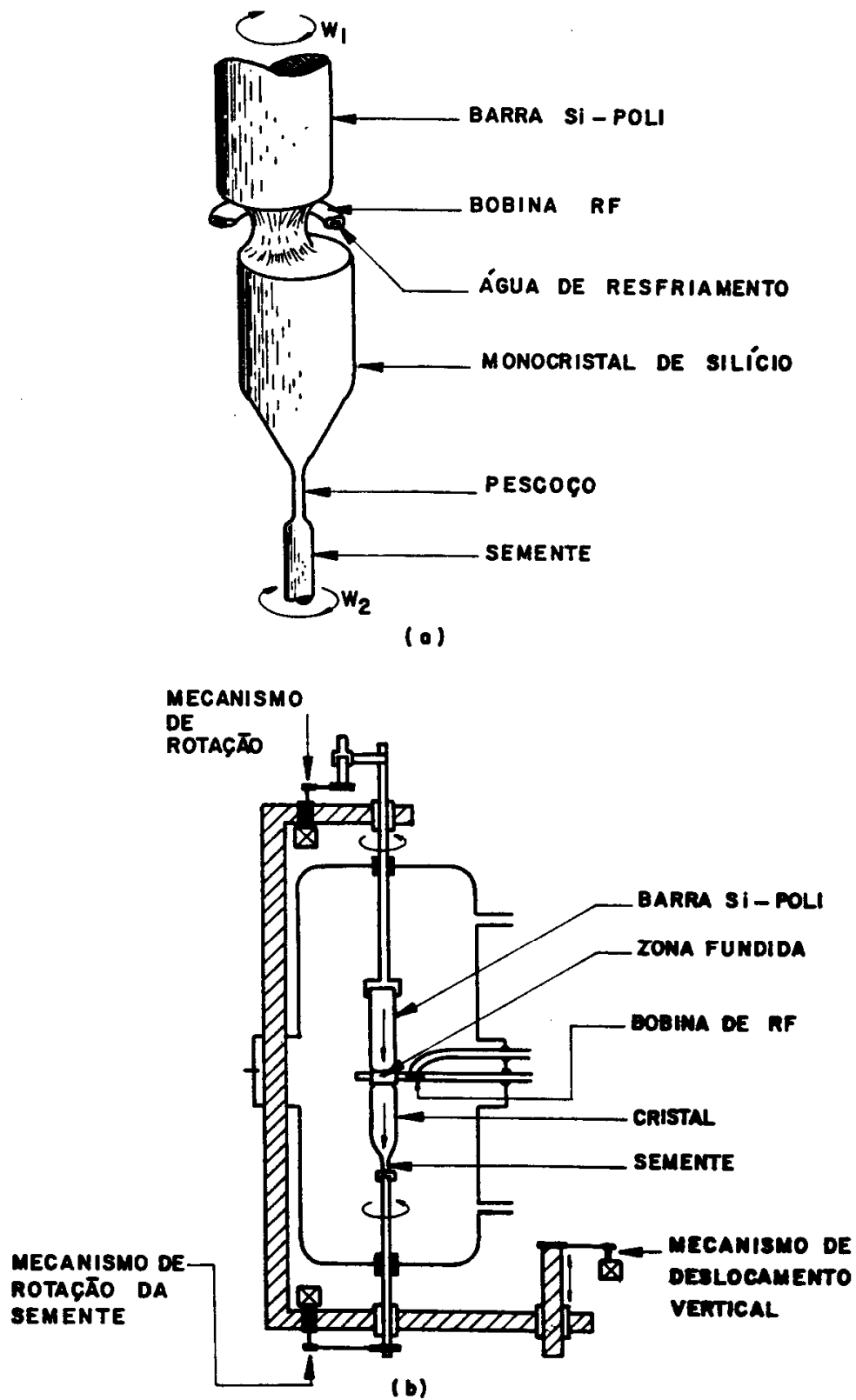


Fig. 5 - a) arranjo (Si-Poli) - Cristal - Semente no processo FZ; b) esquema de equipamento para FZ.

8. COMPARAÇÃO DOS CRISTAIS CZ E FZ

Os monocristais CZ encontram aplicação generalizada na indústria de circuitos integrados, dispositivos discretos de baixa potência e células solares. Os tiristores e diodos para altas correntes e tensões, detetores de estado sólido, CCDs, diodos P-I-N são geralmente construídos com monocristais FZ.

No caso de cristais crescidos pelo método CZ, devido à dissolução da sílica do cadinho no silício fundido, o conteúdo de oxigênio é cerca de duas ordens de grandeza maior que o conteúdo do mesmo elemento nos cristais FZ (cerca de 30 ppma x 0,3 ppma). Por essa razão, a maioria dos cristais CZ deve passar por um tratamento térmico para estabilizar o oxigênio eletricamente ativo. De maneira semelhante ao que ocorre com o oxigênio, os cristais CZ apresentam conteúdo de carbono superior aos dos cristais FZ, tipicamente uma ou duas ordens de grandeza maior. Os efeitos do oxigênio e do carbono no silício são estudados há muito tempo. Mais recentemente, muita atenção tem sido devotada ao estudo dos mecanismos de interação entre o oxigênio e o carbono e sua eficiência no monocristal hospedeiro.

Os cristais CZ podem ser obtidos com resistividades de até $60 \Omega \cdot \text{cm}$ ao passo que com técnicas especiais, podem ser conseguidos cristais FZ com resistividade superior a $30.000 \Omega \cdot \text{cm}$. Tanto os cristais CZ como os FZ apresentam variações radiais microscópicas de resistividade (conhecidas por "Striations") devido à taxas diferenciais localizadas de crescimento causadas por assimetria de temperaturas durante o processo de solidificação do silício. As assimetrias são mais pronunciadas no caso dos equipamentos de FZ e correspondentemente, as variações radiais de resistividade são maiores nos cristais FZ, $\pm 40\%$ contra $\pm 20\%$ no caso de cristais CZ. Para cristais FZ dopados com a técnica NTD, entretanto, as variações de resistividade são muito pequenas. A figura 6 mostra, para comparação, os perfis de resistividade típicos de lâminas de silício FZ obtidas por técnicas convencionais e pela técnica NTD. Devido aos processos de dopagem, os cristais FZ e FZ-NTD apresentam uma grande vantagem com relação aos cristais CZ; o perfil longitudinal de resistividades apresenta-se plano ao longo de todo o comprimento da barra monocristalina. Como havíamos visto, devido ao coeficiente de segregação, os cristais CZ apresentam valores crescentes de concentração de dopante, da semente ao término do cristal.

Quanto aos diâmetros, cristais CZ de diâmetro 200 milímetros são normalmente utilizados pela indústria de semicondutores ao passo que os cristais FZ são disponíveis comercialmente em diâmetros máximos de 150 milímetros.

A geometria das barras cristalinas tem influído nos custos por grama de monocristal e tipicamente os cristais FZ são mais caros que os CZ. A tabela 4 resume algumas das características dos cristais FZ e CZ.

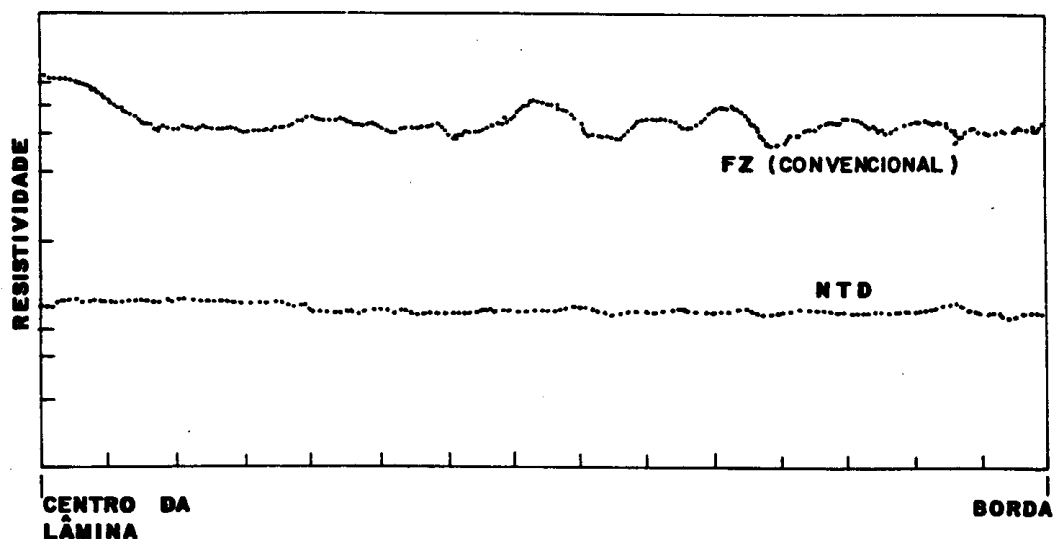


Fig. 6 - Perfis de resistividade de lâminas de silício FZ e FZ-NTD, como aparecem em medidas feitas por resistência de espreadimento ("Spreading Resistance Probe")

Tabela 4 - Comparação de algumas características de cristais FZ e CZ.

Parâmetro	Técnica de Obtenção	
	FZ	CZ
Diâmetro máximo (comercial)	150 mm	200 mm
Tempo de vida dos portadores minoritários	150 a 3.000 μ s	10 a 60 μ s
Conteúdo de oxigênio	$10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$10^{17} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Conteúdo de carbono	$10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Orientações cristalográficas mais usadas	[100] e [111]	[100] e [111]
Dopantes usuais	Boro, Fósforo	Boro, Fósforo, Antimônio, Arsênico
Resistividade (tipo p)	0,01 a 3.000 $\Omega \cdot \text{cm}$	0,005 a 60 $\Omega \cdot \text{cm}$
Resistividade (tipo n)	0,01 a 1.000 $\Omega \cdot \text{cm}$	0,005 a 60 $\Omega \cdot \text{cm}$

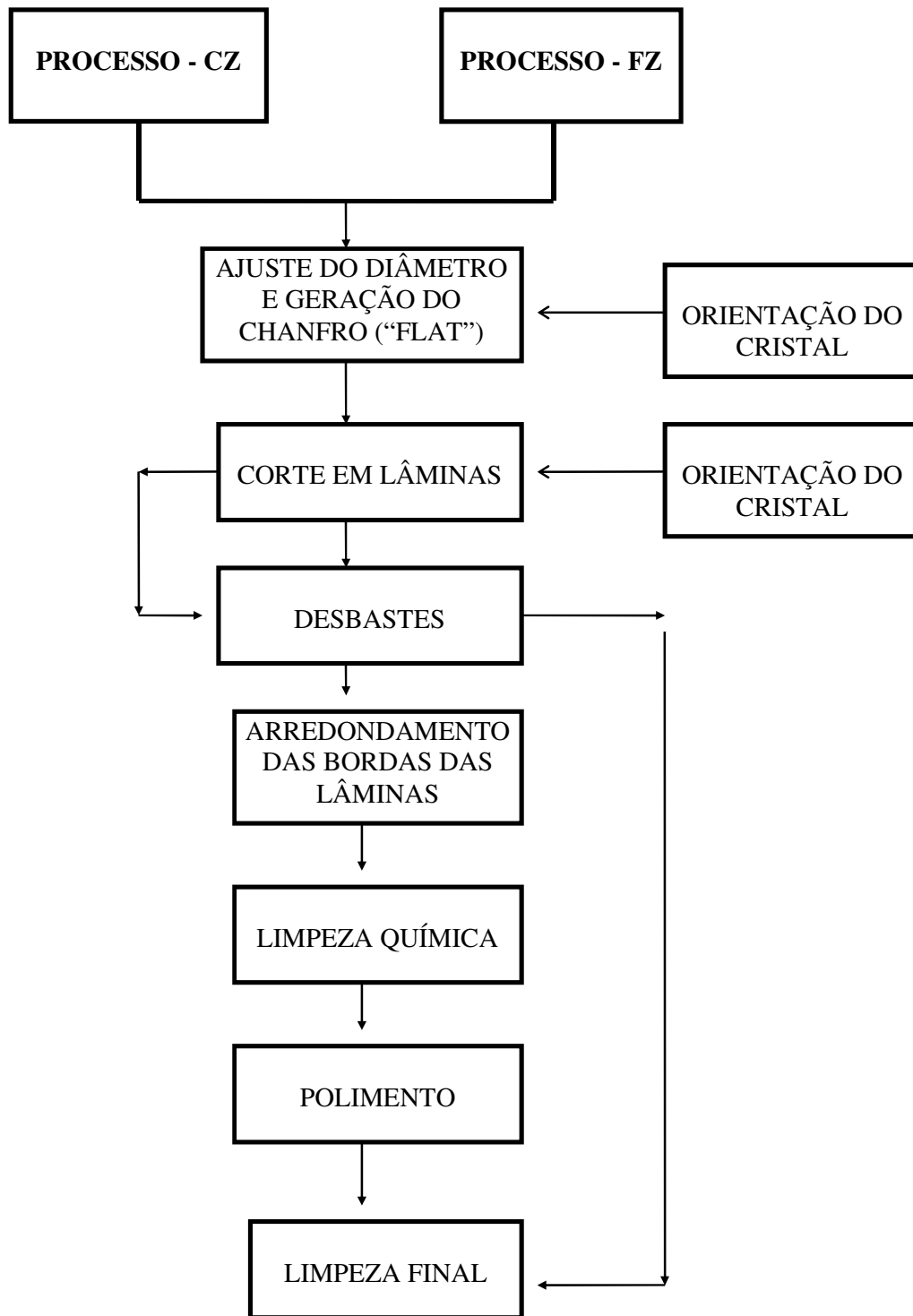


Fig. 7 - Fluxograma dos processos principais da preparação de lâminas de silício monocristalino

9. PREPARAÇÃO DAS LÂMINAS DE SILÍCIO

Após obtida a barra de silício monocristalino, uma série de processos mecânicos e químicos é conduzida para a obtenção dos substratos de silício a serem usados na preparação dos dispositivos semicondutores. A figura 7 mostra o fluxograma das principais operações desta fase.

A primeira operação é o ajuste do diâmetro da barra para que as lâminas dela obtidas estejam conformes com padrões estabelecidos e possam ser utilizadas em equipamentos automáticos que só podem aceitar lâminas dentro de certas tolerâncias. A esta operação, de usinagem mecânica, outra similar sucede, é a obtenção do chanfro de referência ("flat"). Este chanfro serve como referência mecânica para a orientação do cristal nas operações automáticas e é indispensável para o processo de separação das pastilhas de dispositivos com uso de riscagem por diamante e posterior clivagem ("scribing"). Essas duas operações de usinagem causam severos danos à rede cristalina, próximo da superfície. Para evitar a propagação dos defeitos criados quando da execução de processos de alta temperatura, costuma-se remover quimicamente o silício até a profundidade afetada.

A próxima etapa na preparação dos substratos é o corte em lâminas, feito com serras de aço em que a borda cortante é impregnada de grãos de diamante. Essas serras são geralmente anulares, sendo a superfície cortante aquela do diâmetro interno do anel. A figura 8 mostra esquematicamente a montagem do lingote monocristalino para o corte. De uma maneira geral o sistema lâmina de serra-tensionador tem apenas movimentos de rotação (2500 ~5000 RPM) e o lingote monocristalino, preso num suporte alimenta a serra para o corte num movimento de translação.

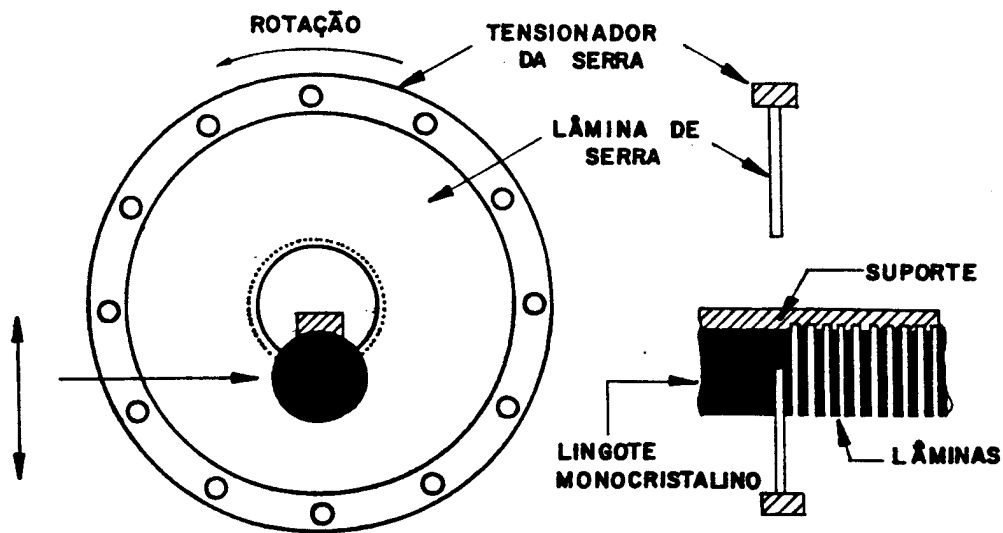


Fig. 8 -Esquema da montagem para o corte do lingote monocristalino

Três fatores são importantes na operação de corte; planicidade, paralelismo e ausência (ou baixa quantidade) de defeitos introduzidos na rede. A planicidade pode ser traduzida em termos da curvatura da superfície da lâmina. O paralelismo é medido em termos das duas superfícies da lâmina. Elas devem ser o mais paralelas possíveis. Esses dois fatores são críticos nos processos fotolitográficos de alta resolução. Os defeitos introduzidos na rede, deslocações ou discordância de rede, são geralmente deletérios no que diz respeito ao tempo de vida dos portadores minoritários.

Sempre que as lâminas de silício foram cortadas com espessuras superiores às desejadas ou principalmente quando se deseja otimizar a planicidade das lâminas, procede-se à operação de desbaste em que aquelas são montadas em blocos de referência e comprimidas contra a mesa rotatória da máquina de desbastes (também conhecida na indústria mecânica como lapidadora). Na mesa rotatória, próximo aos blocos contendo as lâminas, despeja-se abrasivo em suspensão líquida. Esse abrasivo, geralmente alumina, desgasta a superfície das lâminas até que se conformem com a superfície da mesa para obtenção de paralelismo e planicidade compatíveis com as necessidades de circuitos integrados de altas densidades, geralmente as duas faces das lâminas de silício são desbastadas.

Para reduzir as possibilidades de micro-quebras nas bordas das lâminas, aumentar a vida dos equipamentos e materiais de polimento, evitar o super-crescimento da camada de silício nas bordas durante operações de crescimento epitaxial (“edge-crowning”) e compensar o efeito de acúmulo do fotorresiste durante as operações de fotolitogravura, procede-se ao arredondamento das bordas das lâminas de silício (ver figura 9). Essa operação é geralmente realizada em equipamentos automáticos com ferramentas diamantadas.

Antes de ir para a etapa de polimento, as lâminas de silício são limpas para a remoção de contaminantes orgânicos e resíduos de abrasivos. Essa operação inclui uma etapa de desbaste químico, em que uma certa quantidade de silício é removida para eliminação de defeitos cristalinos superficiais causadas pelas operações precedentes. Essa limpeza pode ser cáustica ou ácida e sempre termina com uma cuidadosa lavagem em água deionizada de alta resistividade.

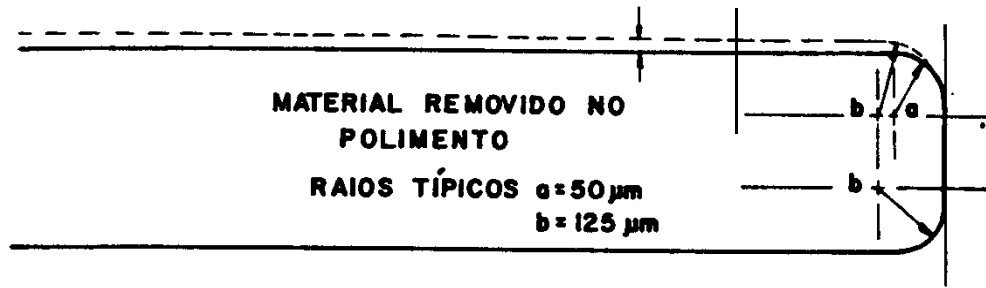


Fig. 9 - Características físicas típicas de uma lâmina de silício com arredondamento de bordas (perfil)

A etapa de polimento é feita com máquinas muito semelhantes às usadas nas operações de desbaste, diferindo daquelas apenas em detalhes. As lâminas, desbastadas ou não, dependendo das tolerâncias desejadas, são montadas em suportes com ceras de baixos pontos de fusão ou modernas técnicas que combinam aplicação de pressões e temperaturas elevadas para a fixação das lâminas em suportes flexíveis, geralmente de vinil sobre bases de materiais de compressibilidade uniforme. Esse último processo confere adesão adequada da lâmina de silício ao suporte para a operação de polimento sem usar o expediente de aplicação das ceras que implica em sofisticadas etapas posteriores de limpeza.

Da mesma maneira que na etapa de desbaste, as lâminas de silício são comprimidas sobre uma mesa rotatória. Neste caso revestidas com um material semelhante a um feltro de fibras com características especiais. Em lugar do abrasivo da operação precedente, utiliza-se sílica coloidal de partículas extremamente pequenas (15nm). O meio de suspensão tem o pH ajustado, em torno de 11,0 para esta operação de polimento mecano-químico. Como resultado desta etapa de polimento são obtidas lâminas de silício de acabamento especular numa das faces, sem os defeitos introduzidos pelas operações precedentes.

A etapa final é uma cuidadosa limpeza combinada com ataques químicos brandos para remover dióxido de silício da superfície. Essa operação é geralmente executada em ambientes limpos com temperatura e pureza do ar controladas como nas salas de processamento de circuitos integrados.

Para incluir, restam as diversas etapas da caracterização das lâminas de silício que deve ser feita em termos cristalográficos, elétricos, geométricos e de qualidade da superfície. As tabelas 5 e 6 mostram, sem detalhamento, as operações de caracterização ligadas aos parâmetros geométricos, cristalográficos, etc.

Tabela 5 - Etapas de caracterização cristalográfica e elétrica das lâminas de silício e métodos empregados.

Caracterização	Métodos
CRISTALOGRAFICA:	
Orientação	Difração de Raios-X, goniômetro ótico com luz de alta intensidade
Chanfro de Referência ("Flat")	Difração de Raios-X, goniômetro com luz de alta intensidade
Variações radiais de resistividade ("Striations")	ataque químico e observação com microscópio ótica
Outros defeitos cristalográficos "Swirls", "slip lines", etc.	Ataques químicos, medidas de resistência de espalhamento, técnicas de Raios-X.
ELÉTRICA:	
Tipo de condutividade	"Ponta quente", retificador:
Resistividade	Medida de 4 pontas, medida sem contato ("correntes de Eddy").
Variações de resistividade	Medida de 4 pontas, resistência de espalhamento.

Tabela 6 - Etapas de caracterização geométrica e de qualidade da superfície de lâminas de silício.

Caracterização	Métodos
GEOMÉTRICA:	
Espessura	Micrômetro mecânico, medidas de capacitância (sem contato)
Planicidade	Interferência ótica, varredura com laser
Paralelismo	Micrômetro mecânico, medidas de capacitância (sem contato).
Arredondamento de bordas	Perfilômetro ótico, microscopia ótica.
QUALIDADE DA SUPERFÍCIE	
Limpeza	Visual sob luz intensa
Riscos superficiais	Visual sob luz intensa
Manchas (névoa ou "haze")	Visual sob luz intensa
Bordas quebradas	Visual