

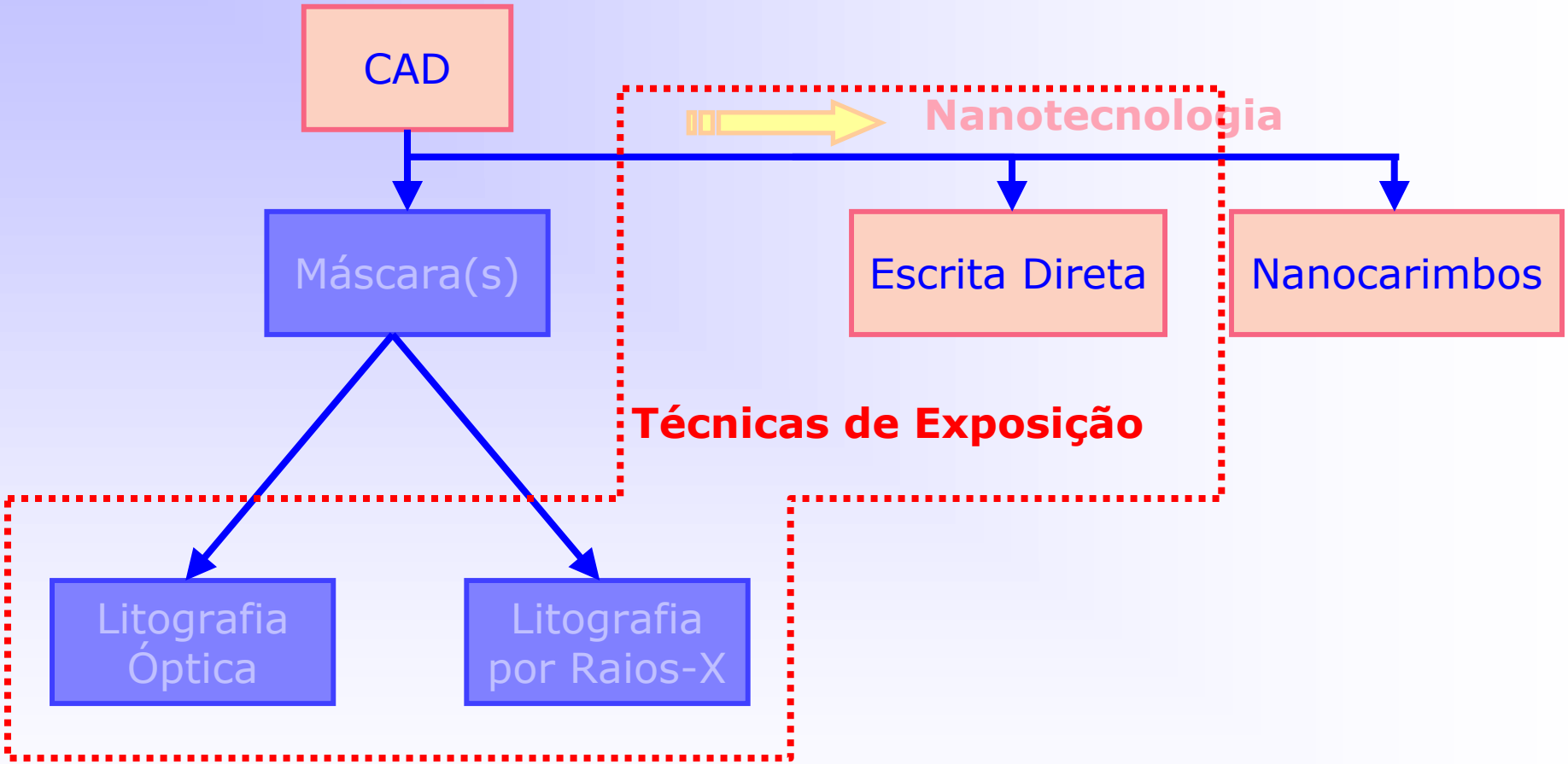


Fabricação de micro e nanoestruturas empregando litografia

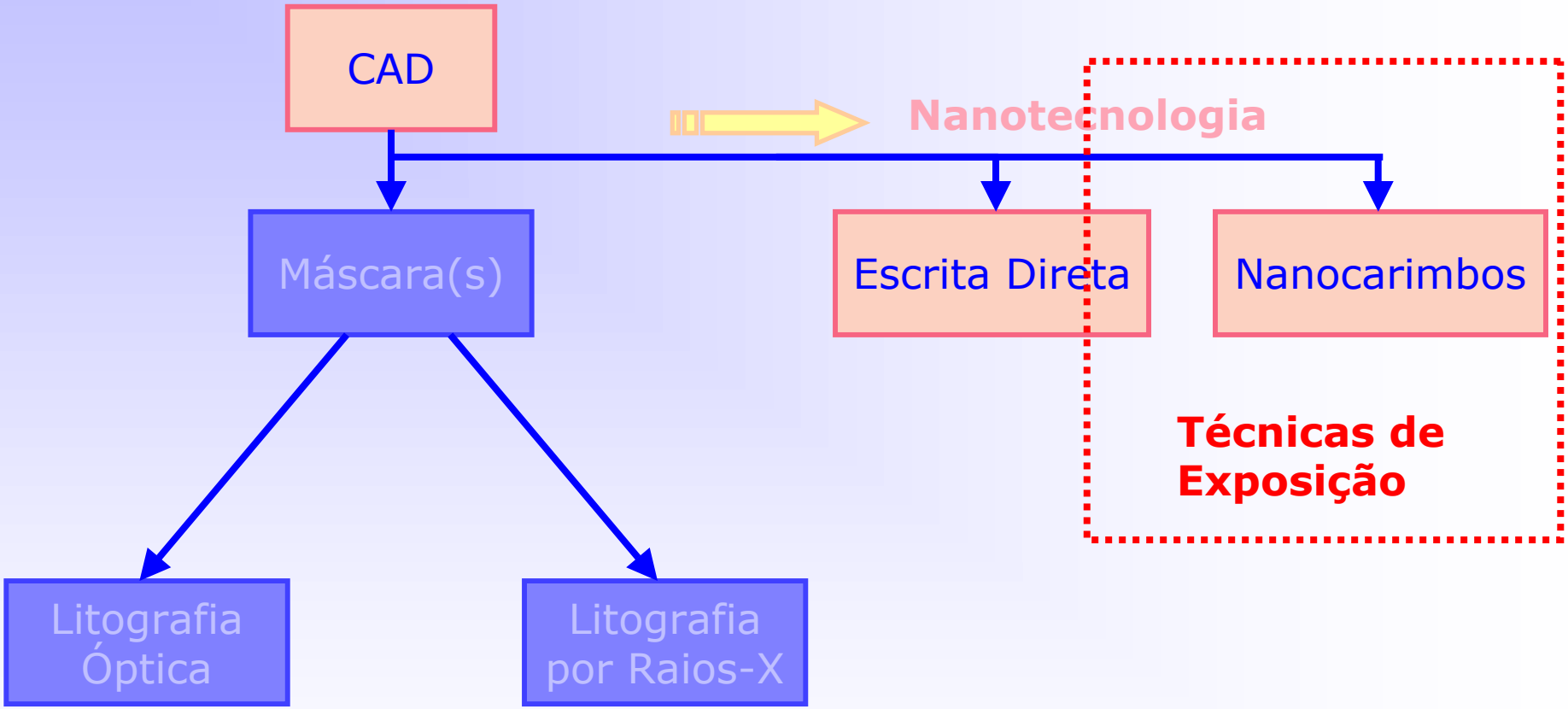
Parte III

Prof. Dr. Antonio Carlos Seabra
Dep. Eng. de Sistemas Eletrônicos
Escola Politécnica da USP
acseabra@lsi.usp.br

Ontem


CAD
Nanotecnologia
Máscara(s)
Escrita Direta
Nanocarimbos
Técnicas de Exposição
Litografia Óptica
Litografia por Raios-X

Hoje

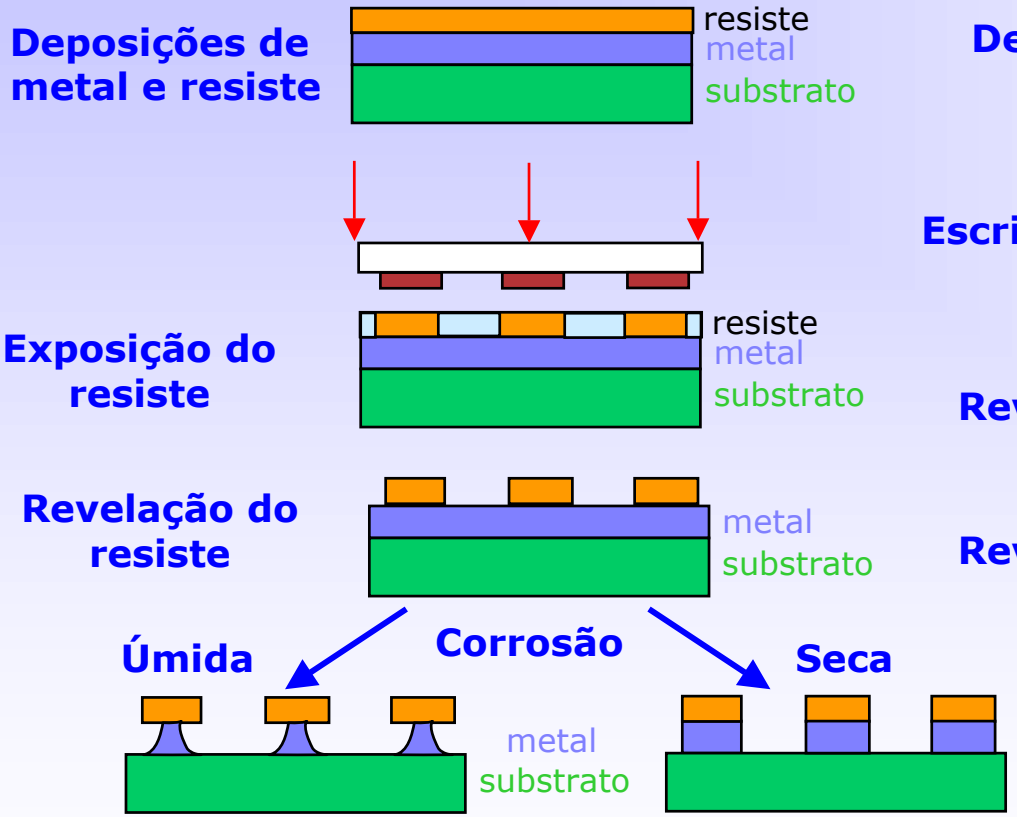

CAD
Nanotecnologia
Máscara(s)
Escrita Direta
Nanocarimbos
Técnicas de Exposição
Litografia Óptica
Litografia por Raios-X

Litografia Top-Down

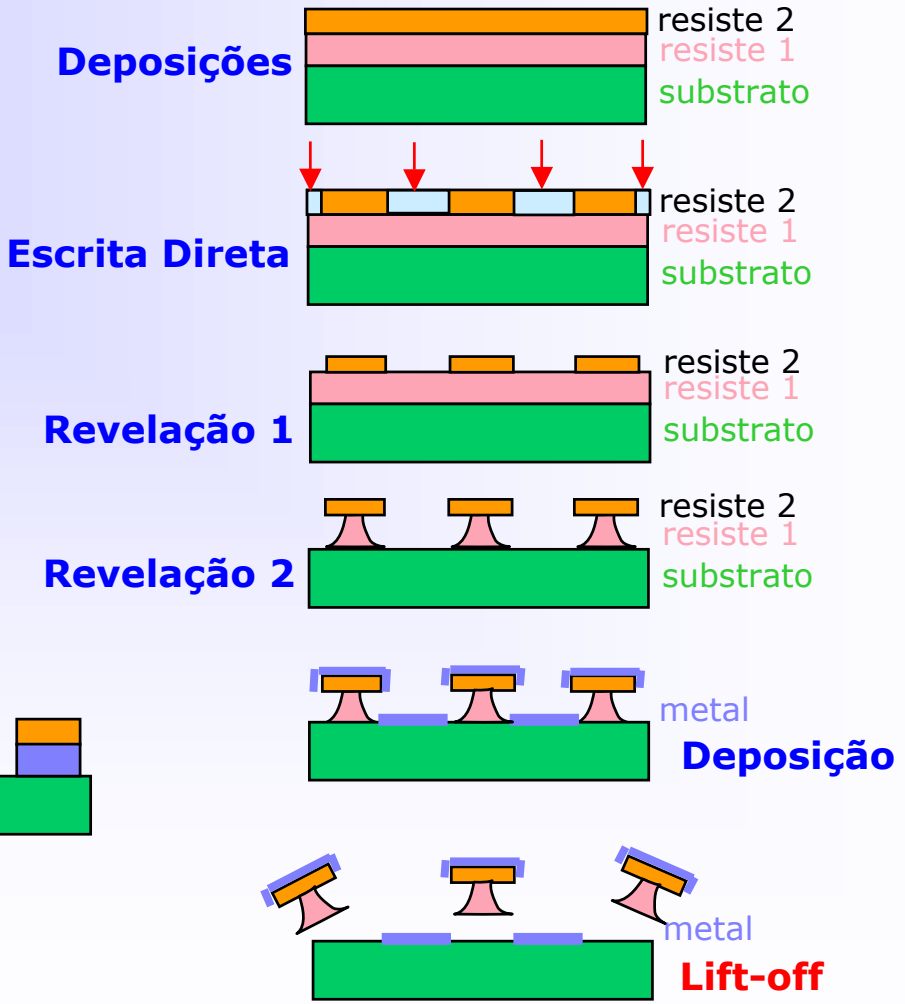
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
  - Litografia FE, FI, RX, Holografia
  - Processo Lift-off (com e sem sombreamento)
  - Processos de Máscara Embutida
  - Nanoimpressão
  - Varredura por Sonda
  - Processamento Litográfico
- Aplicações

Lift-off

- Processo Tradicional

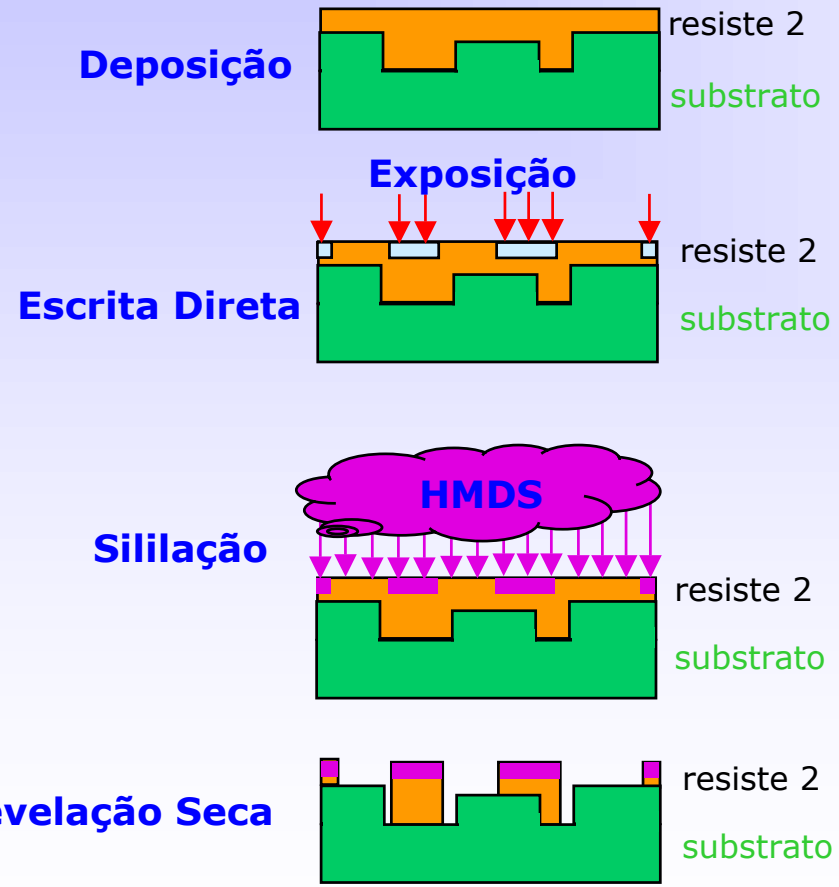


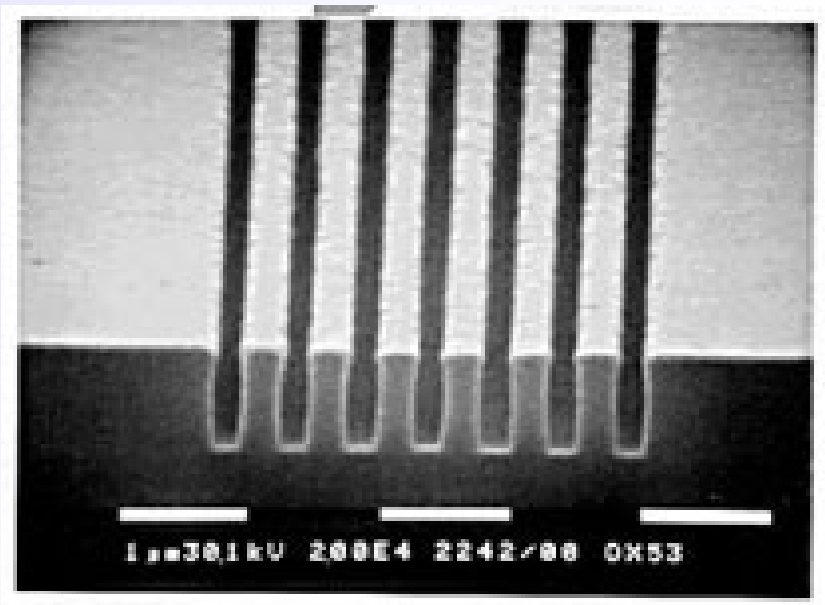
- Lift-off



Processos de Máscara Embutida (BIM)

- **Sililação**



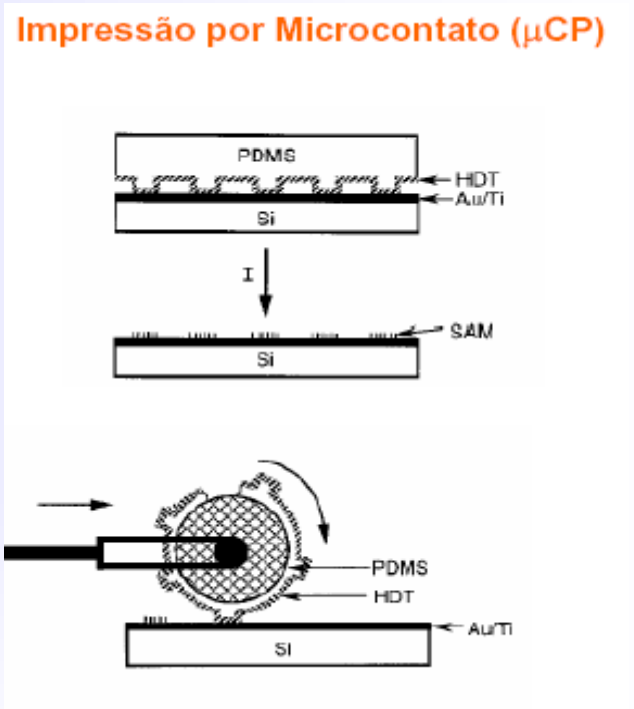


Nanoimpressão (nanocarimbos)

- Nanoimpressão é um tipo de impressão por contato onde as geometrias são geradas por deformação/transformação física ao invés de reações fotoquímicas
- Potencial
  - Produtividade
  - Resolução
- Dificuldades
  - Defeitos
  - Pouca capacidade de alinhamento

Nanoimpressão por Microcontato (μCP)

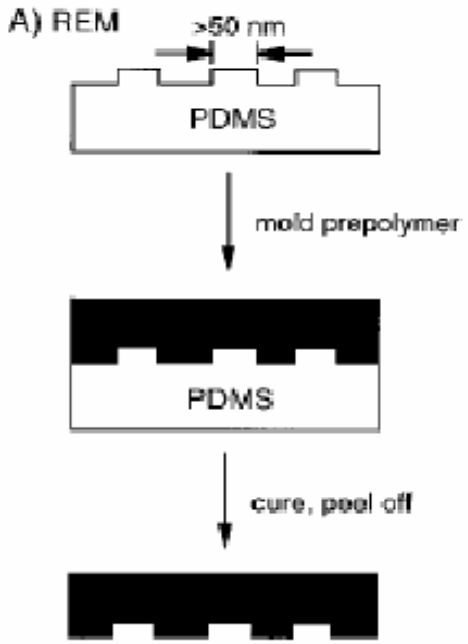




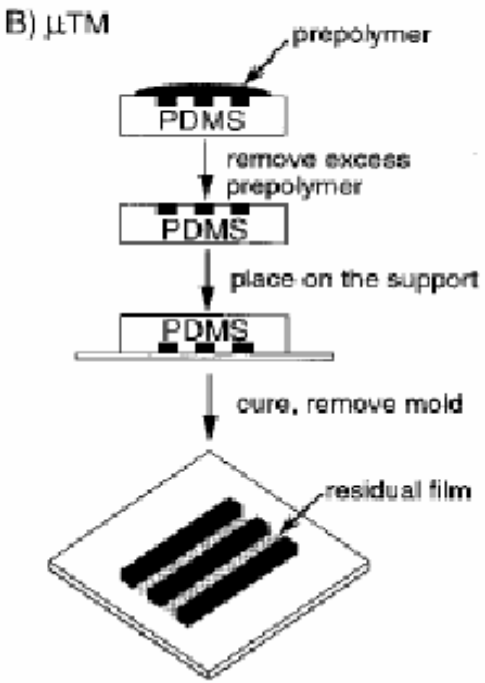
PDMS – Poly(DiMethylSiloxana) SAM – Monocamada Autoorganizada HDT – HexaDecanoThiol

Nanoimpressão por Microcontato (μCP)

Moldagem de Réplicas

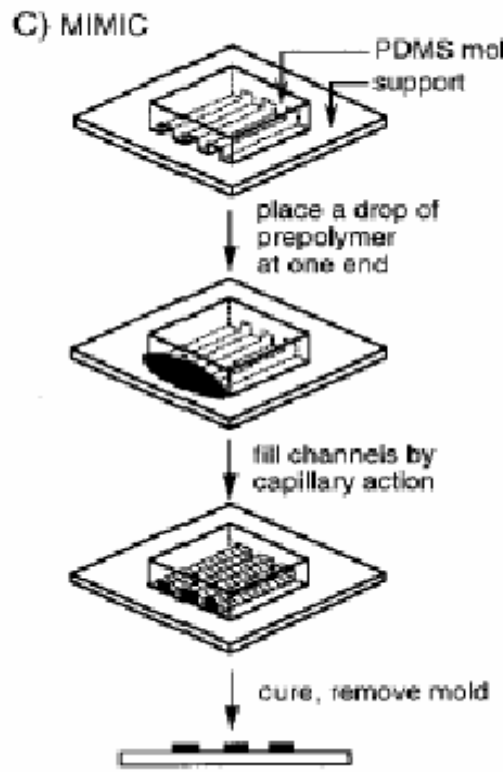


Moldagem por Microtransferência

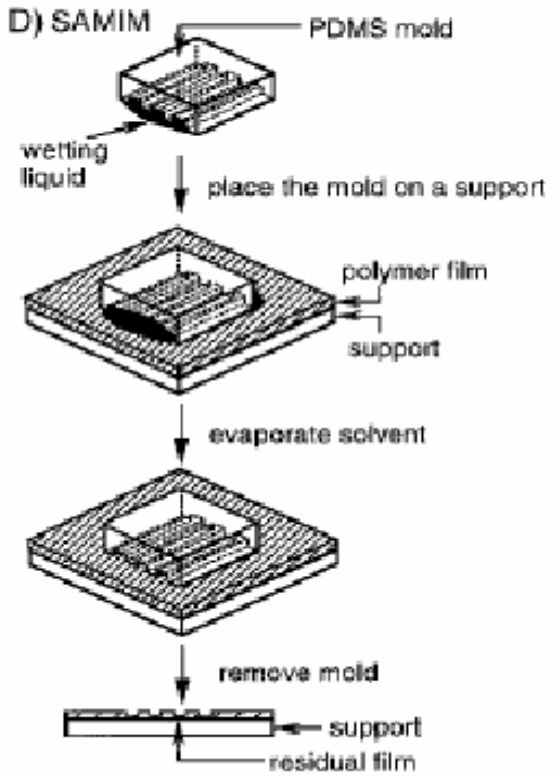


Nanoimpressão por Microcontato (μCP)

Micromoldagem Capilar

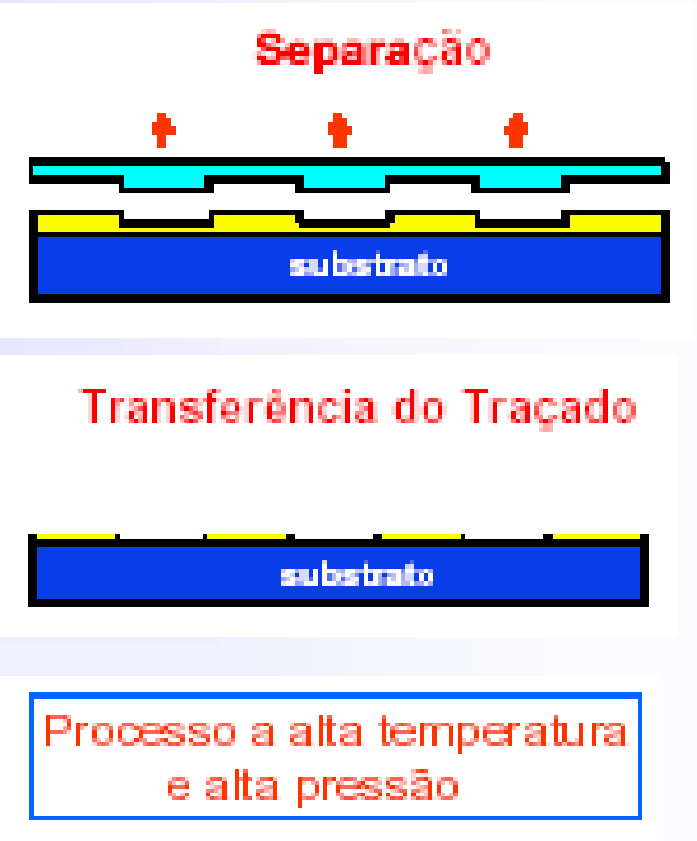


Micromoldagem assistida por Solvente



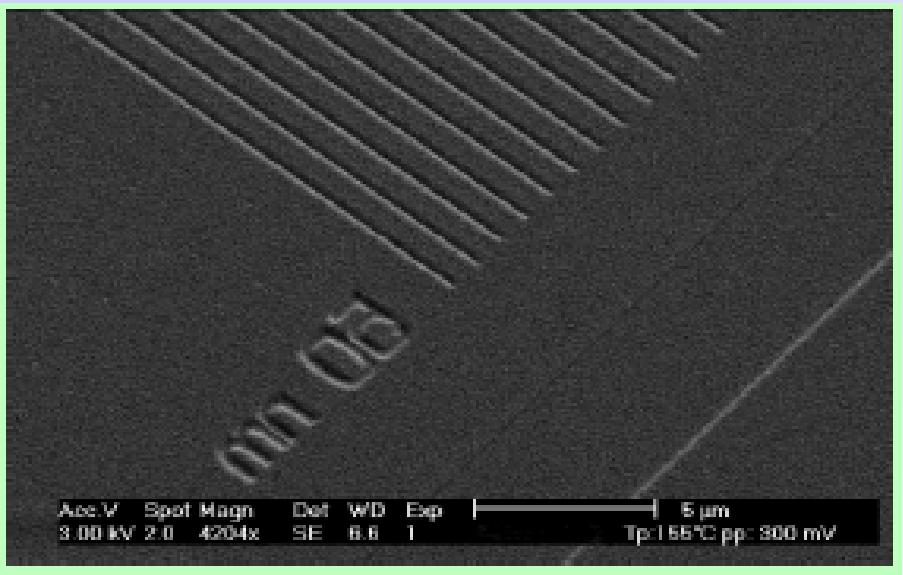
Litografia por Nanoimpressão (NIL)



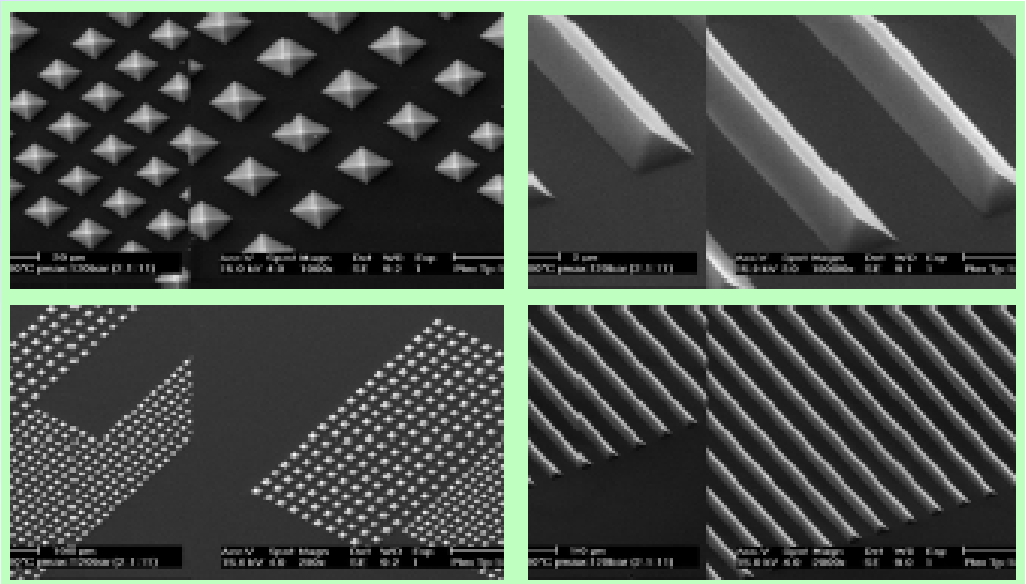


Resultados por Nanoimpressão (NIL)

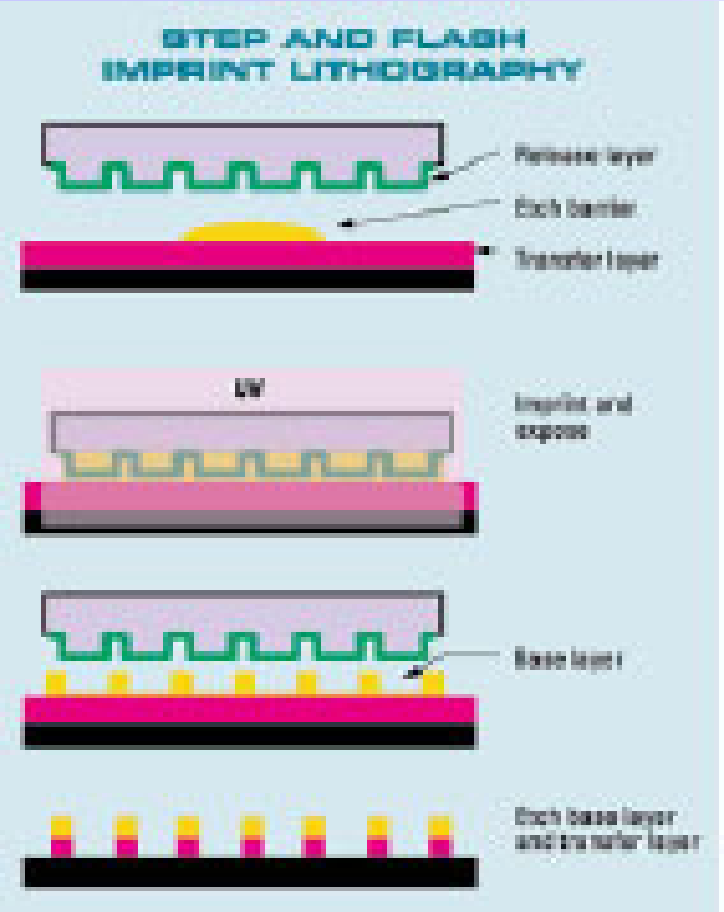
Linhas de 50nm



Estruturas 3D



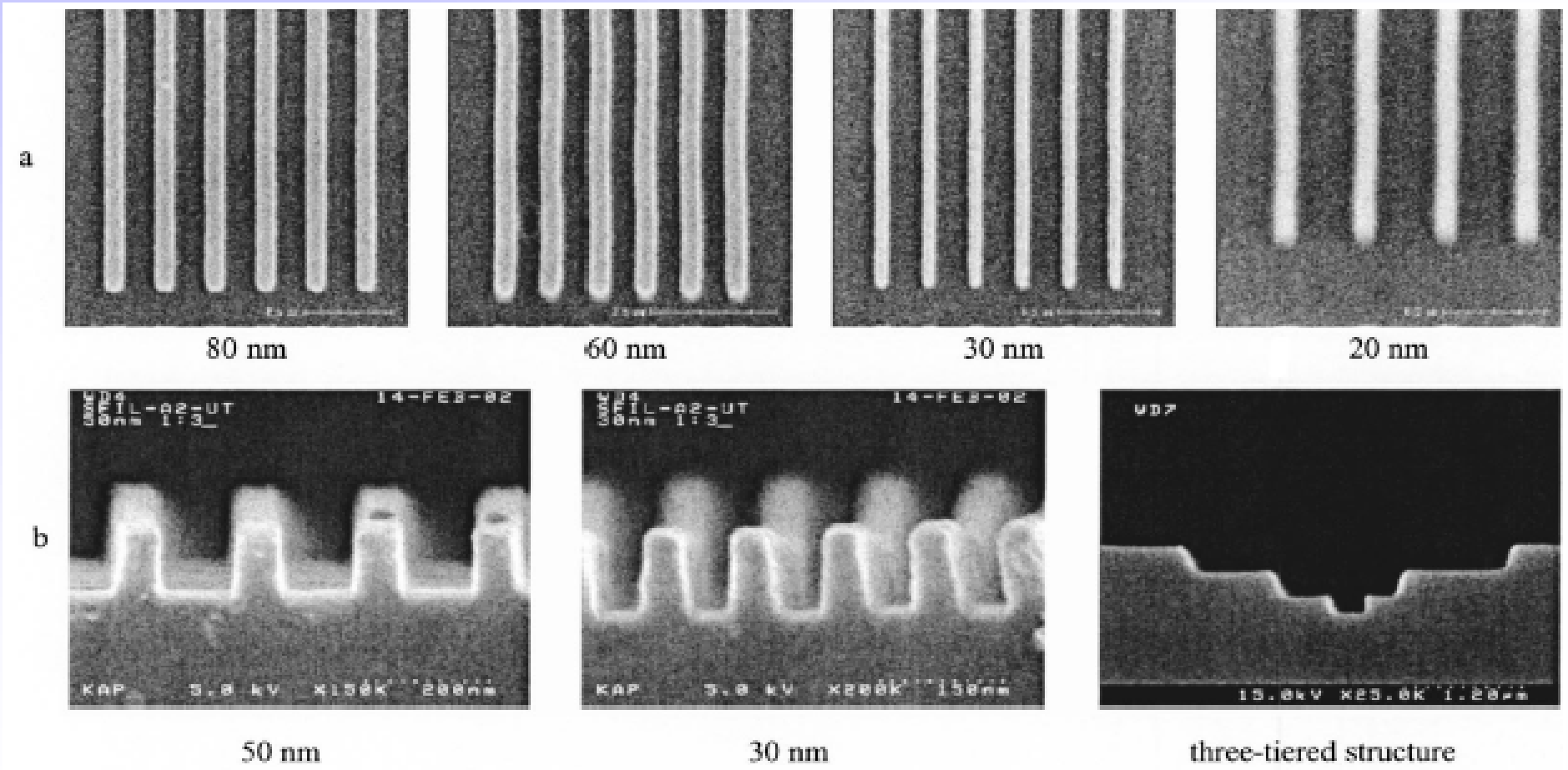
Litografia de Impressão por Passo e Exposição (SFIL)



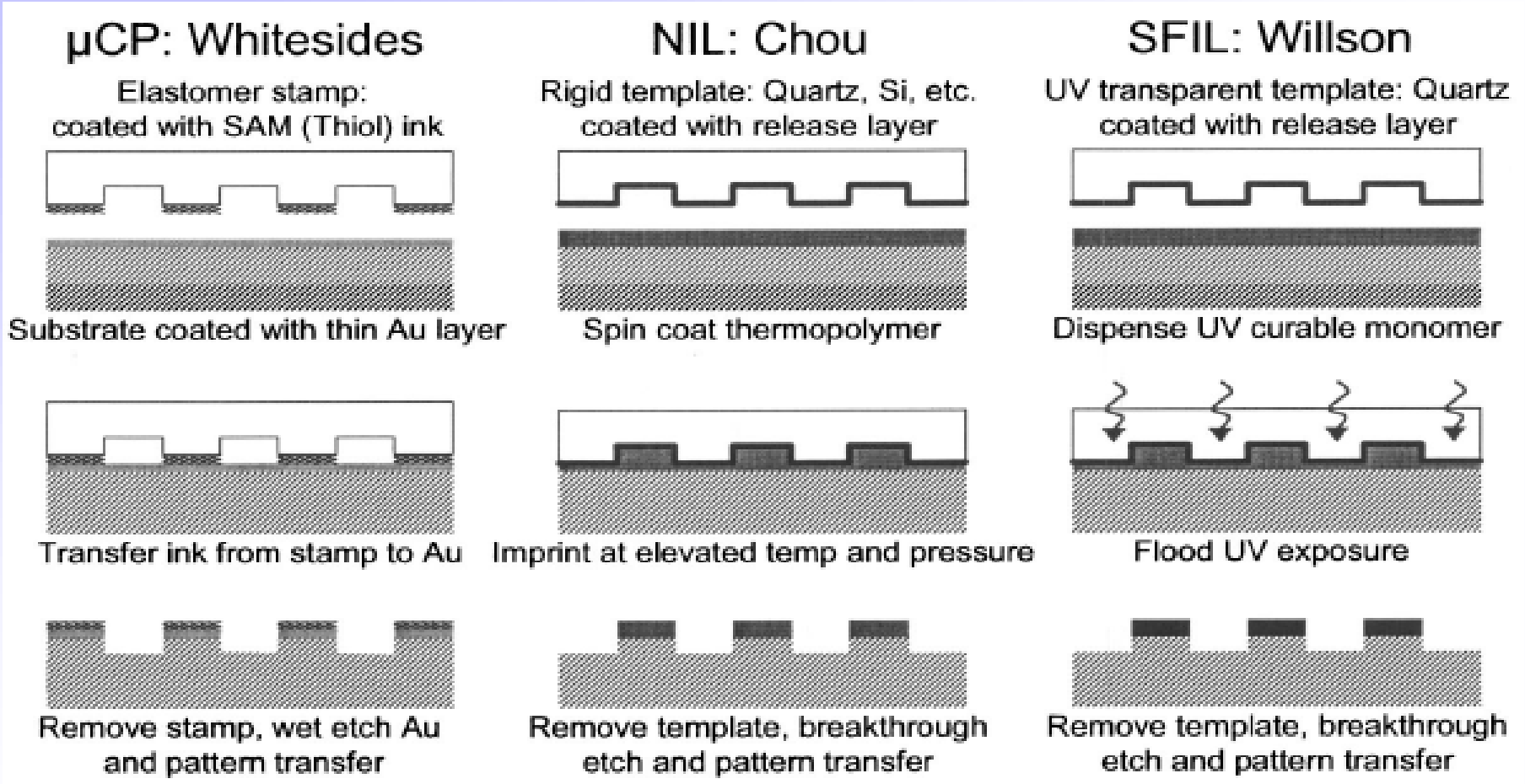
Processo a baixa pressão e baixa temperatura

Nanoimpressão (SFIL)

SFIL (Resnick, 2003)



As três Técnicas Principais de Nanoimpressão



Equipamentos comerciais para nanoimpressão

- Molecular Imprints

Research

IMPRIO 55 Lithography System

- Resolution: Sub-50 nanometers.
- Alignment: < 1 µm, 3σ (X, Y, and Rotation).
- Flexibility: Handles up to 200 mm wafers.
- Field size: up to 25 x 25 mm active print area.

The Imprio™ 55 system is literally shaping the future of nano-lithography. This entry level tool is based on the unique Step and Flash Imprint Lithography technology called S-FIL™.

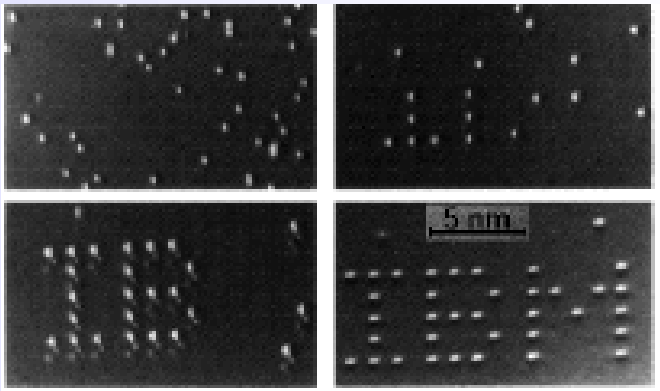
The Imprio 55 delivers high resolution, moderate alignment, and 3-dimensional replication to customers seeking an affordable, small size, sub-50 nanometer lithography tool. The Imprio 55 is the perfect 'e-beam amplifier'. E-beam systems can now be used as pattern generators to create imprint templates, which in turn, enable researchers to replicate critical experimental structures in minutes with S-FIL, rather than in days with e-beam lithography.

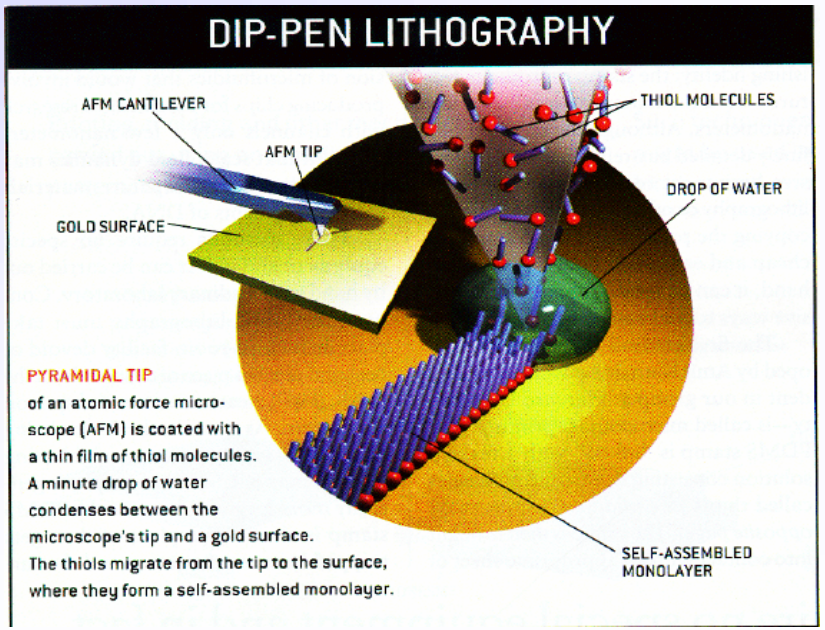
The Imprio 55 is a cost-competitive, research-oriented nano-imprinter for universities and small laboratories. This tool is specifically targeted towards researchers studying basic science in the area of nanotechnology.



Litografia por Varredura de Sonda

- AFM, STM (Eigler, 1990)
  - Arraste
  - Pinçagem
  - Exposição
  - Dip-pen (Mirkin, 1999)

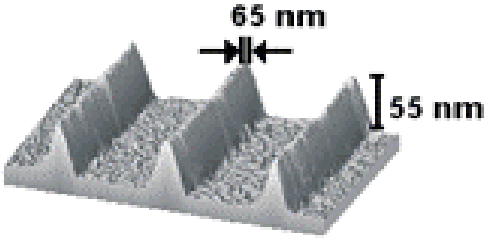




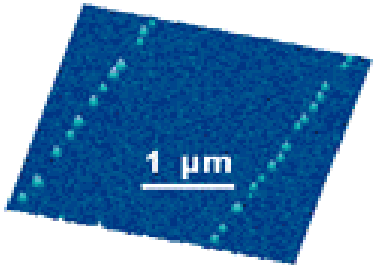
Litografia por Varredura de Sonda



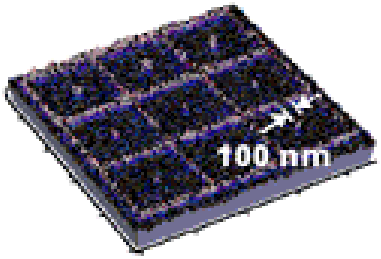
Conducting Polymers



Silicon Nanostructures

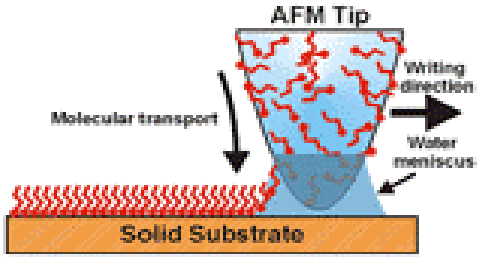


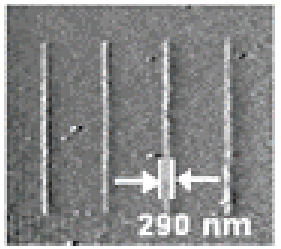
Single Nanoparticle Lines



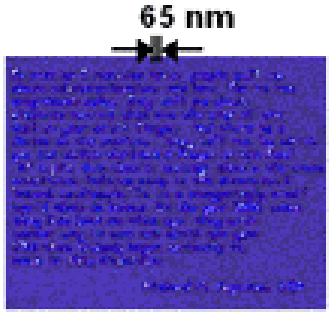
Protein Nanoarrays

Dip-Pen Nanolithograpy

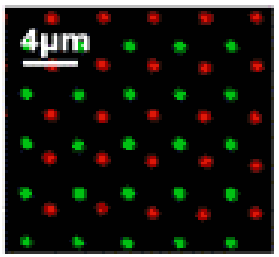




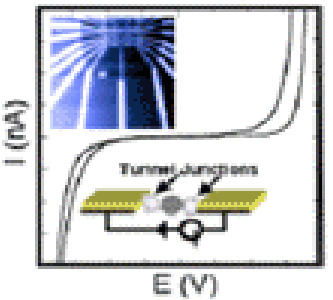
Sol Gel Templates



Small Organic Molecules



Ultrahigh Density DNA Arrays



Single Particle Devices

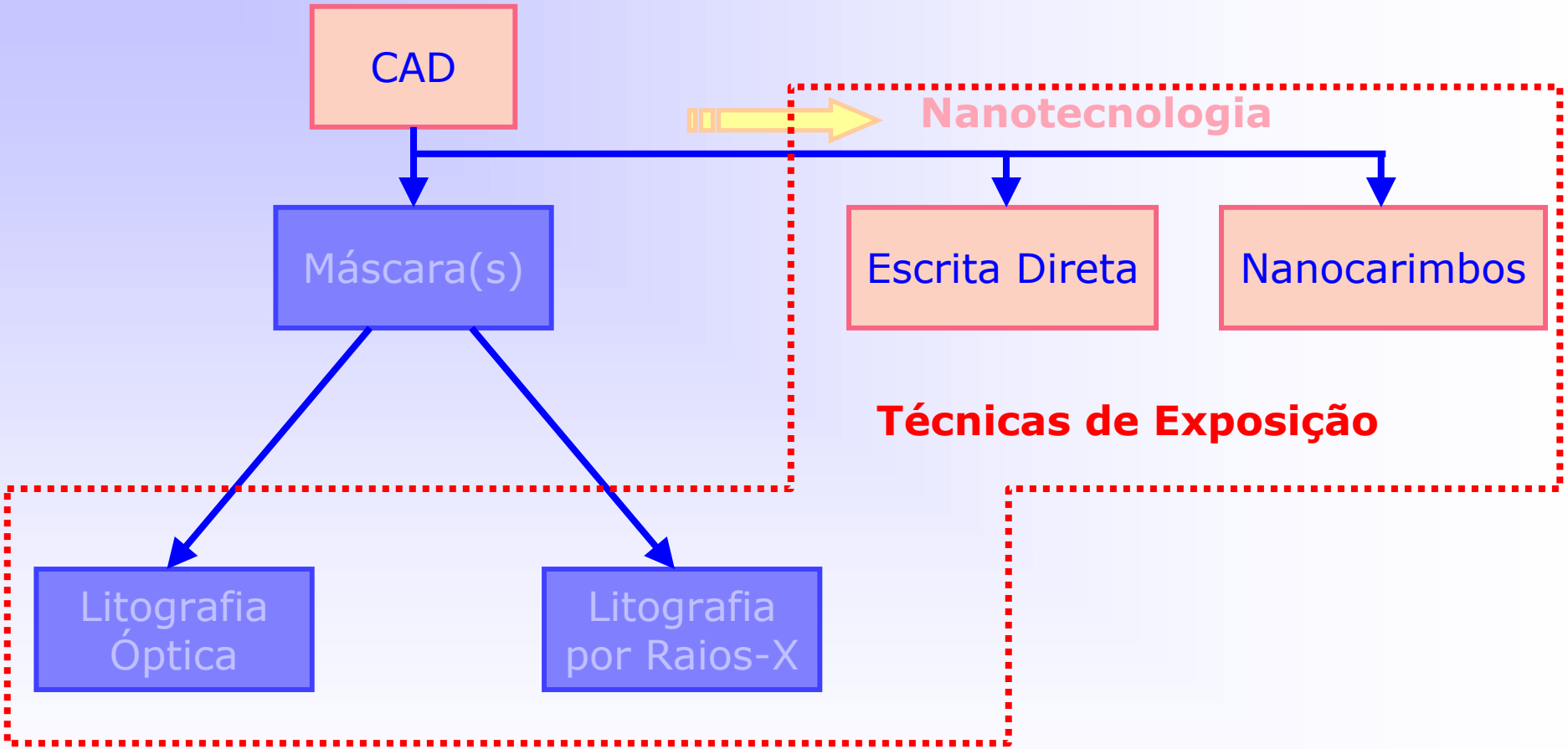
No Brasil

- Litografia por Feixe de Elétrons
  - Cenpra (feixe gaussiano, ~100nm, escrita direta?)
  - CCS-UNICAMP (feixe moldado, ~300nm)
- Holografia
  - Profa. Lucila Cescatto (IFGW-Unicamp)
- Microscópio Eletrônicos de Varredura Adaptados
  - USP
  - DEMA-UFSC
  - UFMG
  - UFPE

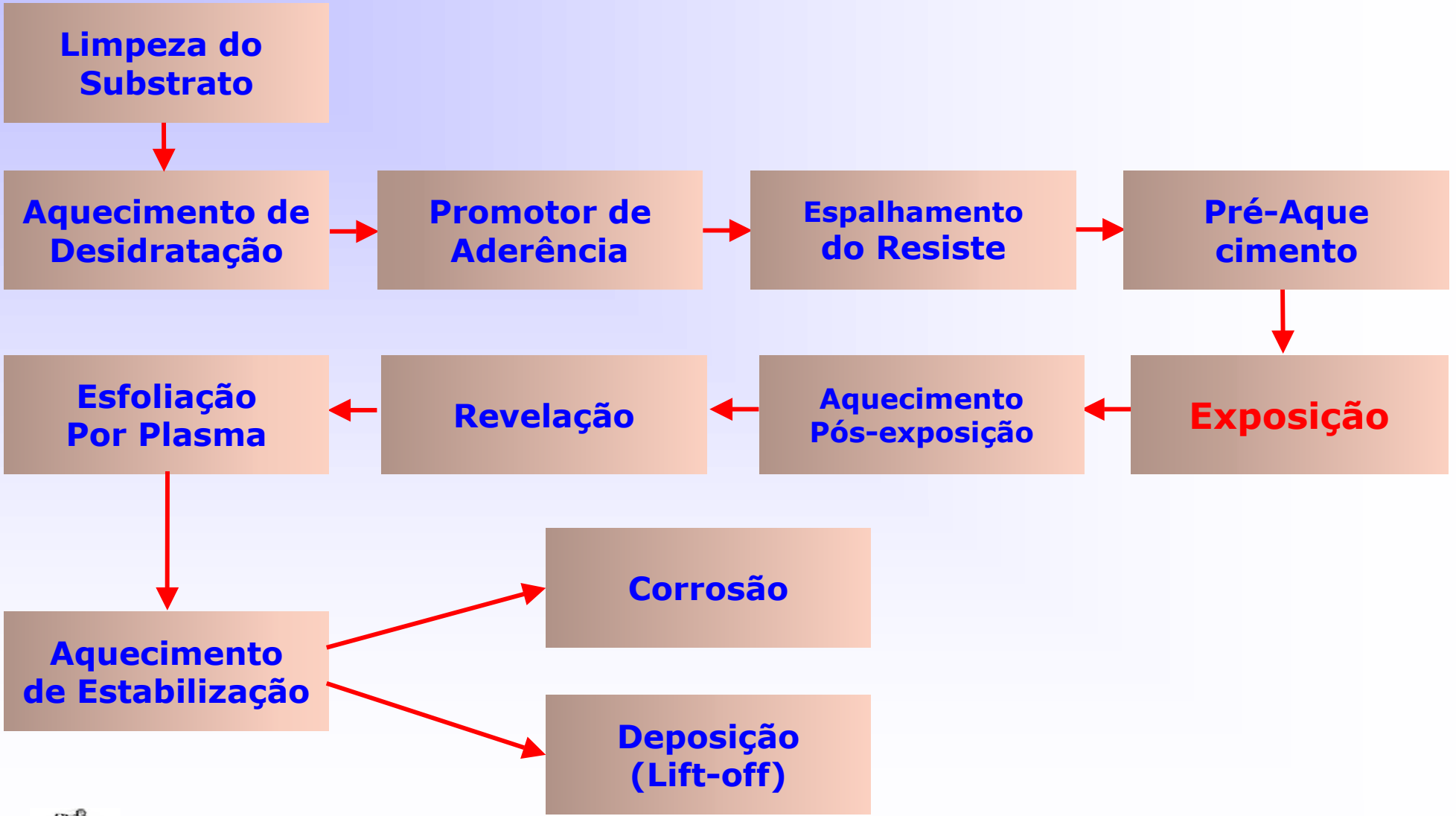
Litografia Top-Down

- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Preparação das amostras
- Recomendações
- Aplicações

Até agora


CAD
Nanotecnologia
Máscara(s)
Escrita Direta
Nanocarimbos
Técnicas de Exposição
Litografia Óptica
Litografia por Raios-X

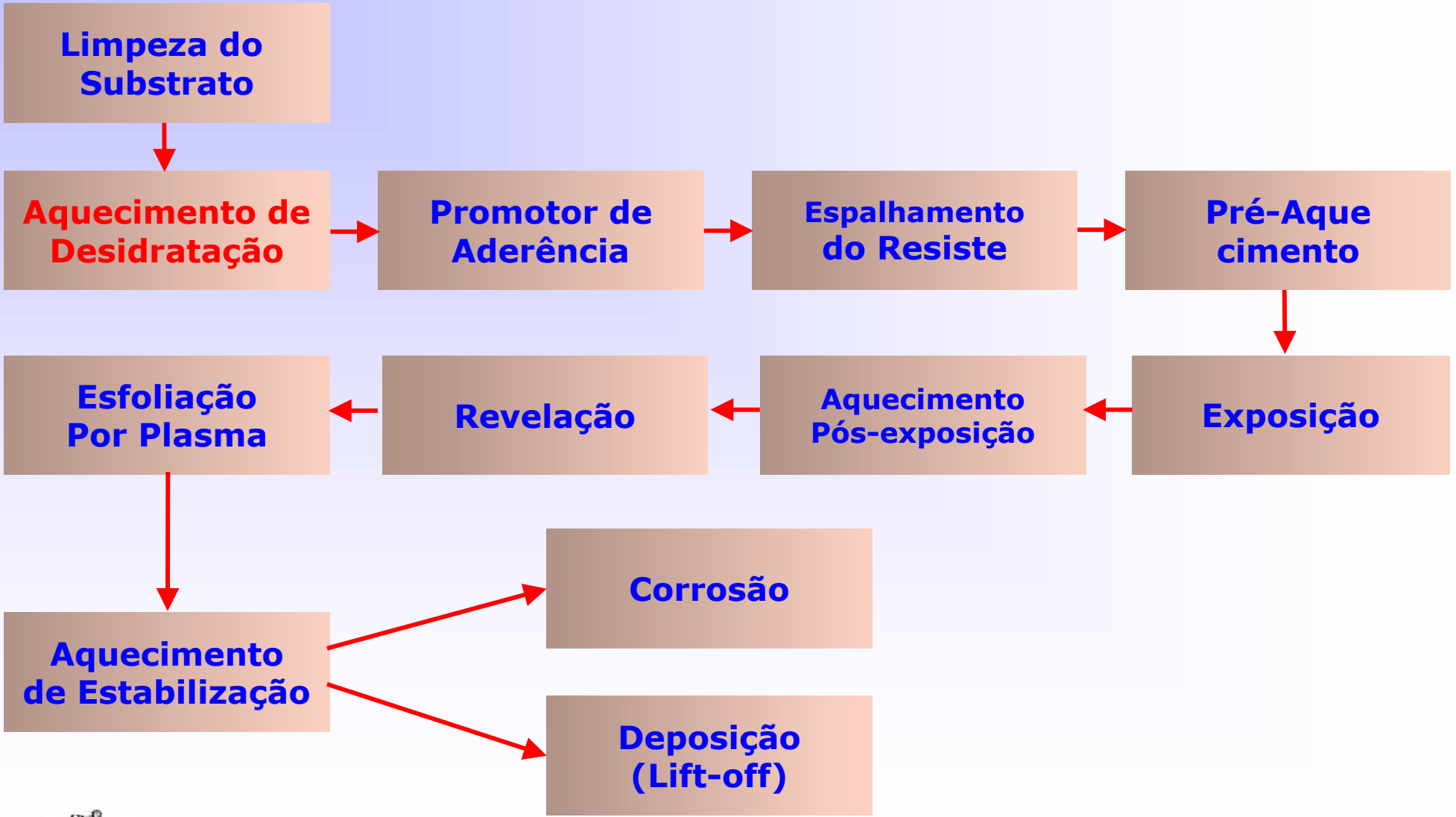
Processamento Litográfico



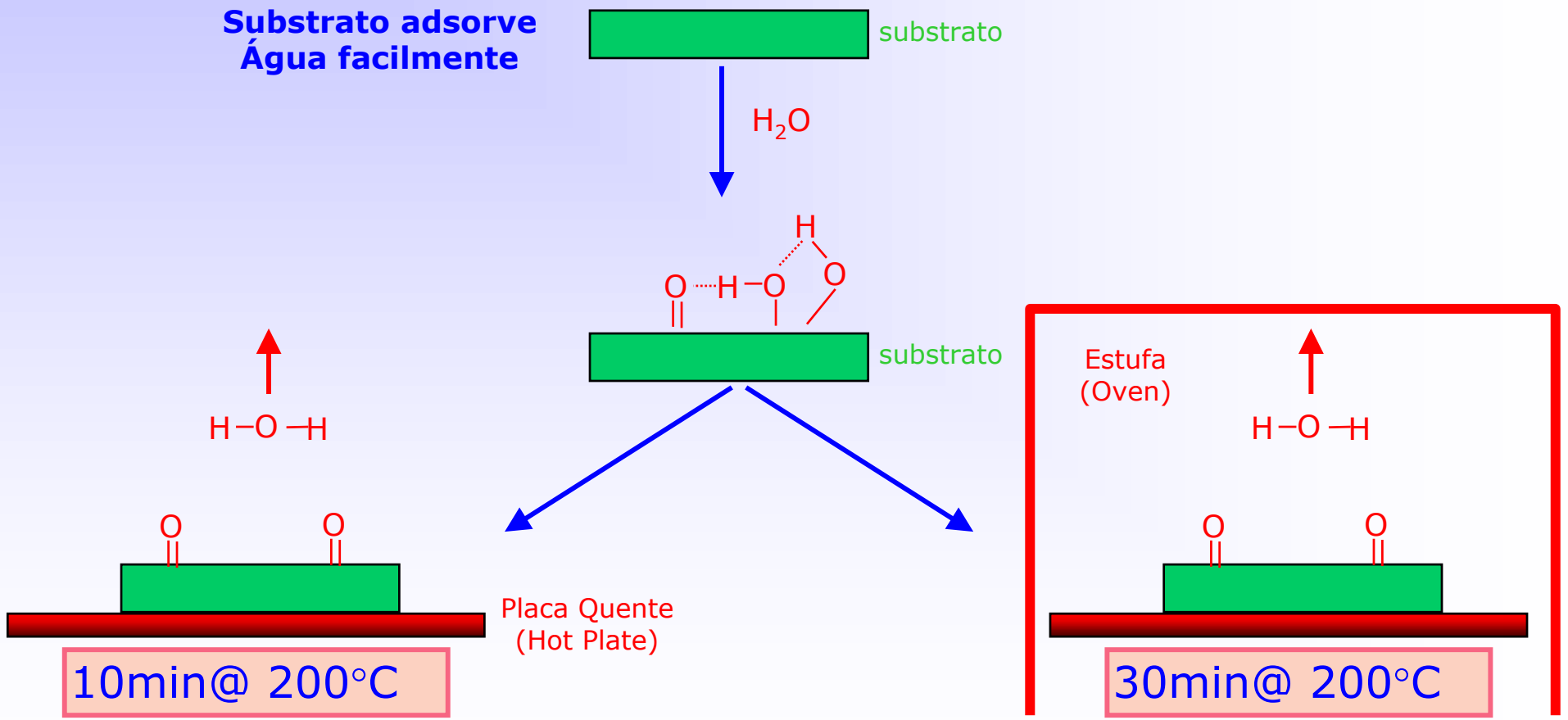
Limpeza do Substrato

- Lâmina
  - nova: álcool isopropílico 5min@ 80°C
  - Se não, Inpeção do substrato em microscópio óptico
- Remoção de óxido nativo (p.ex. BOE 5s para Si)
- Limpeza com solventes:
  - Acetona PA 5min@ 80°C +
    Álcool isopropílico 5min@ 80°C
- Se já foi processada com resiste
  - Remoção do resiste (Removedor apropriado / plasma de O_2)
  - Acetona PA 5min@ 80°C +
    Álcool isopropílico 5min@ 80°C
- Inspeção do substrato em microscópio óptico

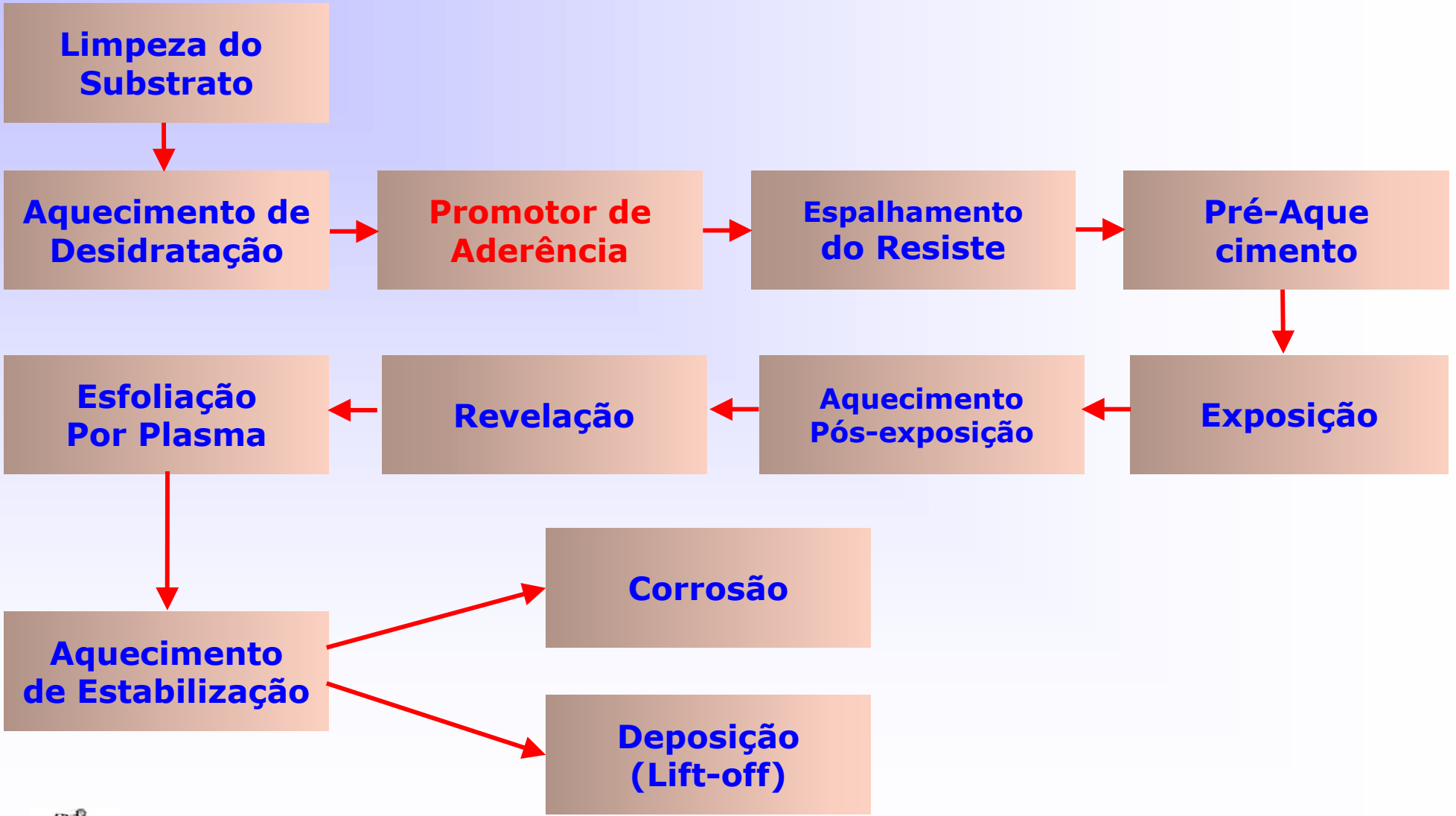
Processamento Litográfico



Aquecimento de Desidratação (Dehydration Bake)



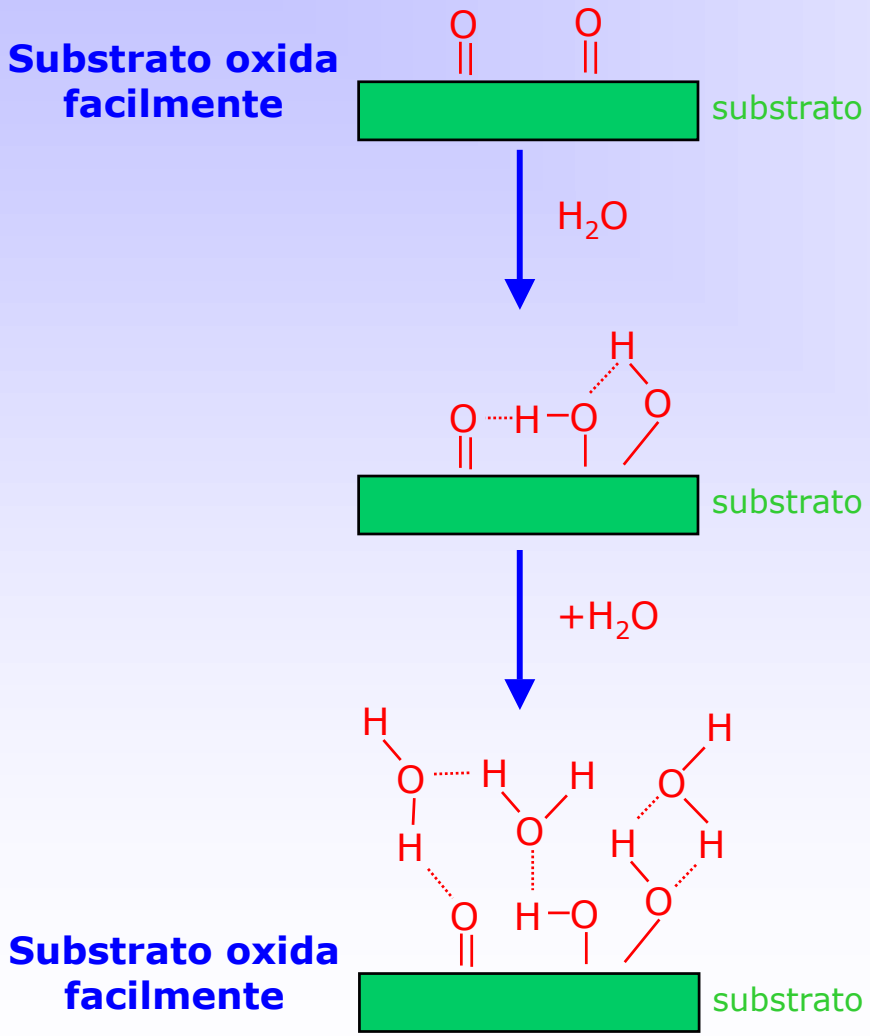
Processamento Litográfico



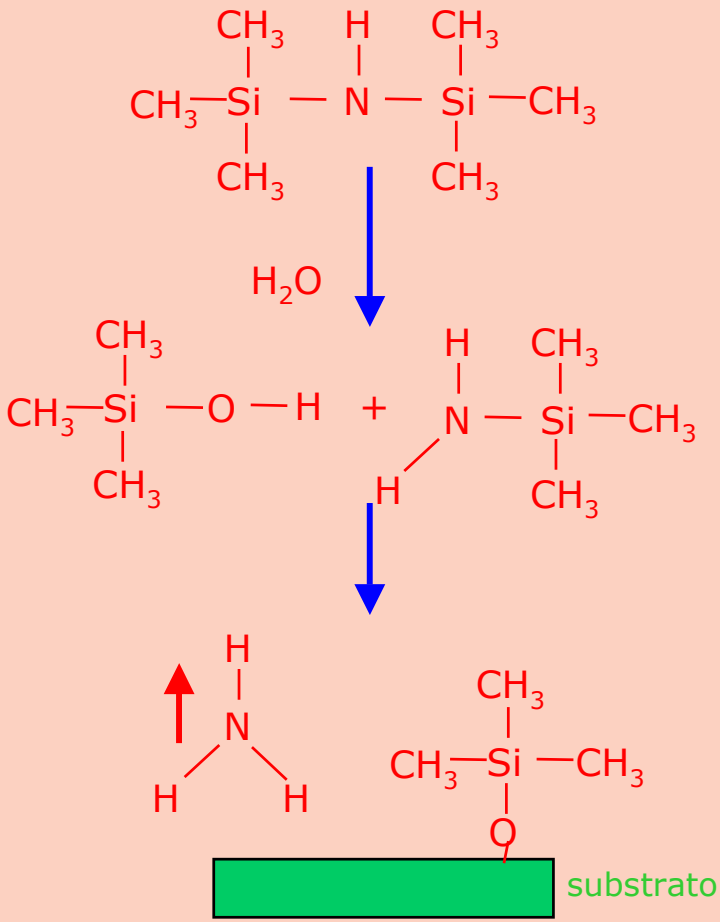
Promotor de Aderência (Adhesion Promoter)

- O HMDS é muito utilizado para Si
- Ele pode ser aplicado:
  - Na forma líquida, diluído em solvente (20% HMDS em PGMEA), sobre uma superfície **desidratada**, por spinning a frio (10~20s @1500rpm), imediatamente antes de de aplicar o resiste.
  - Na forma de vapor, em uma estufa (~ 35min@ 150°C), na forma pura. Esta forma é muito mais eficiente.
- Cuidado: dependendo da superfície, o tratamento pode variar

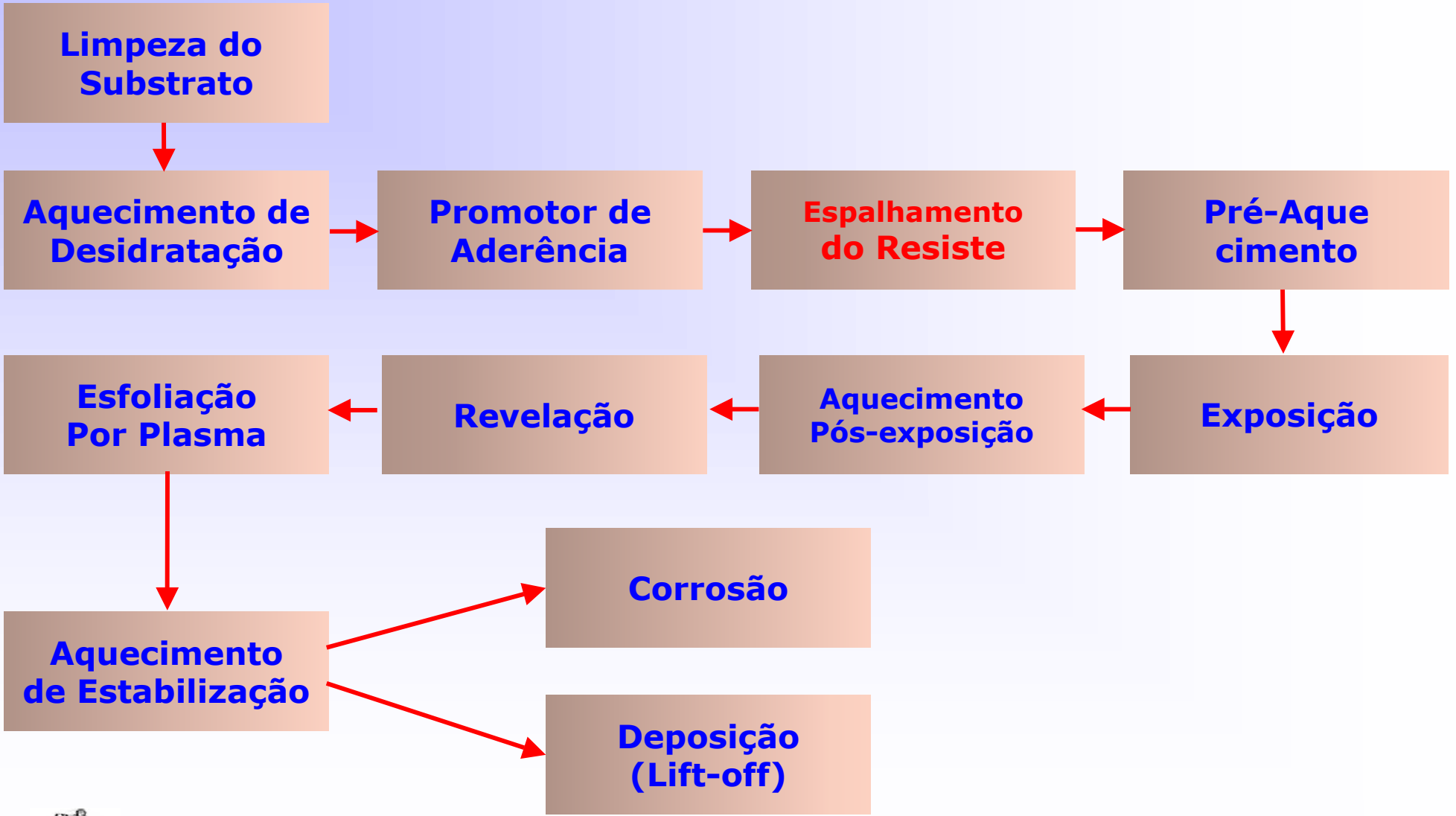
Promotor de Aderência



Aplicação de HMDS (Hexametildisilazana)

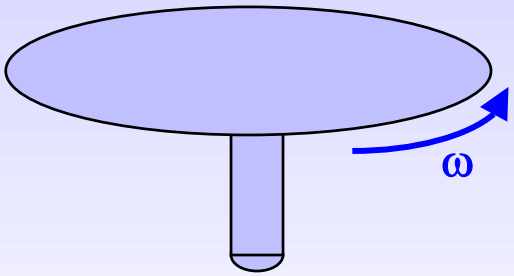


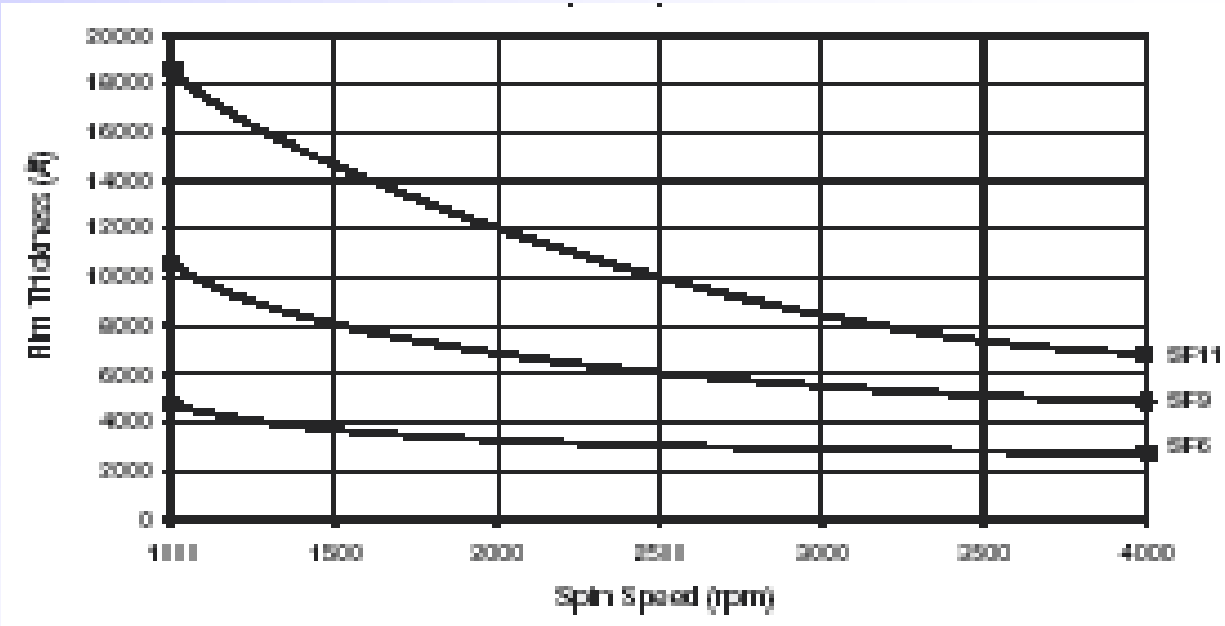
Processamento Litográfico



Espalhamento do Resiste (spinning)

- Seguir recomendação do fabricante, em geral na rotação adequada por 30 segundos



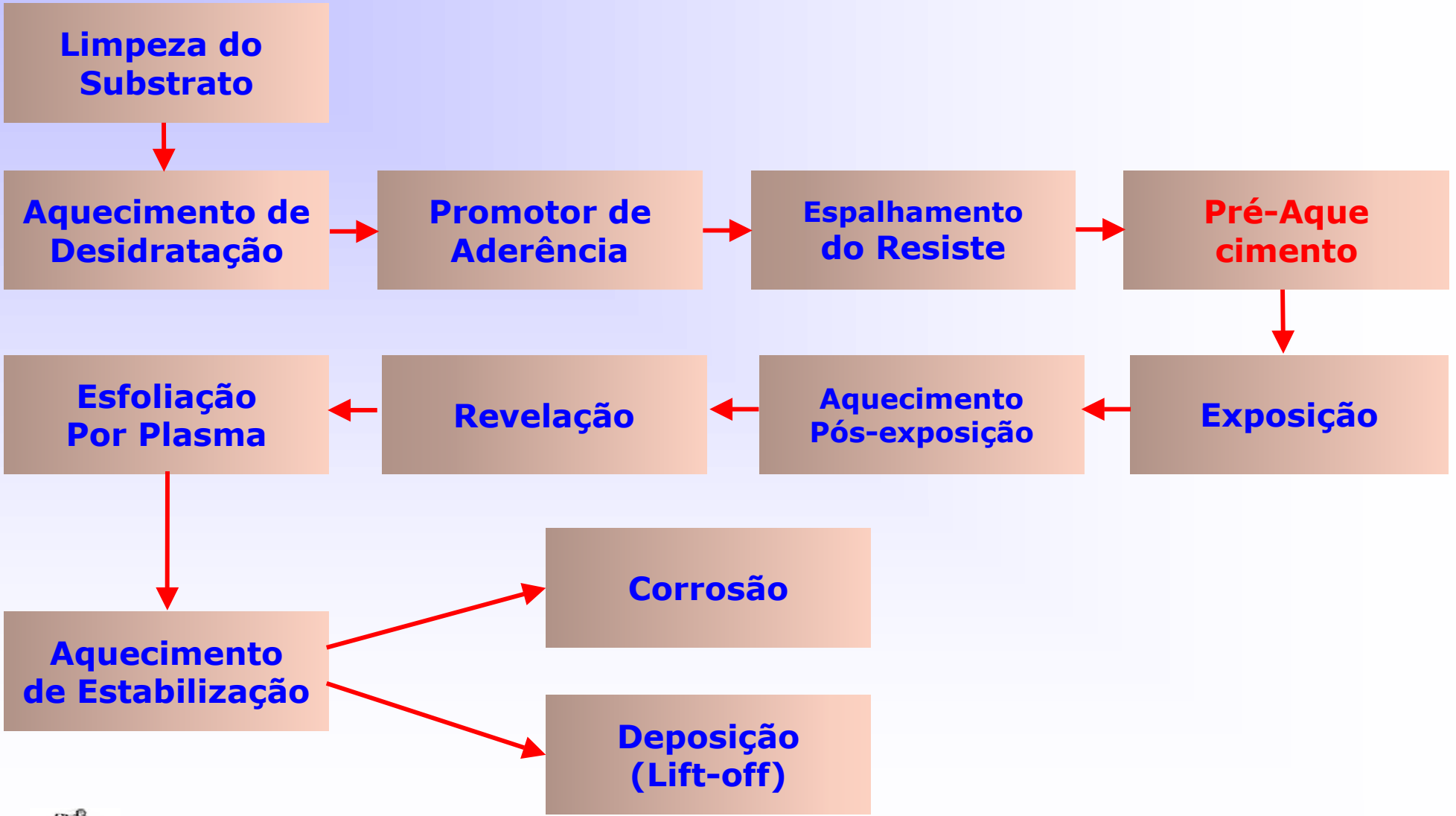


- A física de espalhamento do resiste é complicada e depende fortemente da taxa de evaporação do solvente utilizado. Por isso os fabricantes preferem utilizar sempre os mesmos solventes

Espalhamento do Resiste (spinning)

- Amostras com diâmetros menores que 10mm não permitem uma cobertura uniforme com resiste.
  - Em GaAs isso é um problema
  - Se possível evitar amostras pequenas

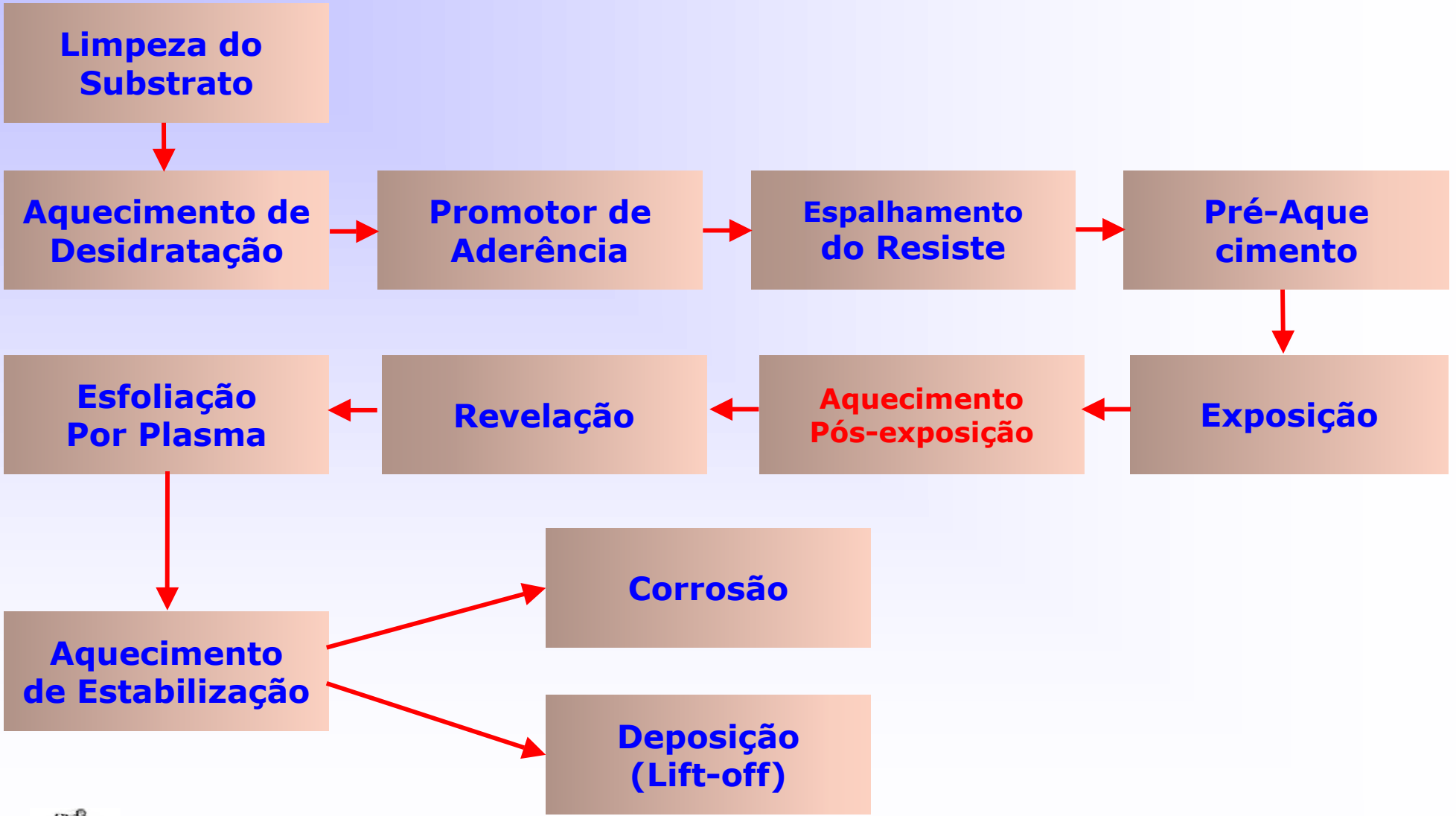
Processamento Litográfico



Aquecimento pré-exposição (prebake ou softbake)

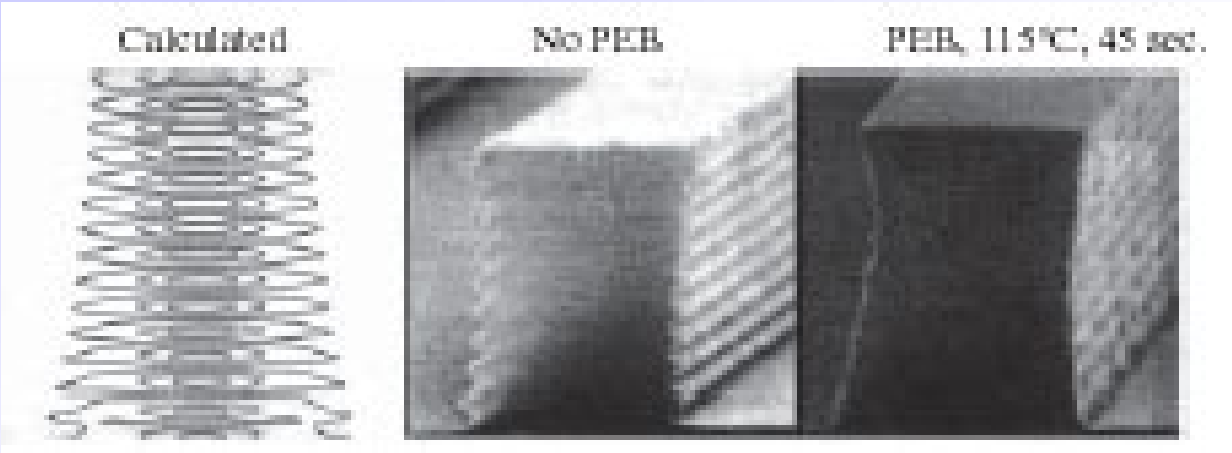
- Utilizado para evaporar eficientemente o solvente do resiste.
- Consulte o fabricante sobre as condições adequadas, mas tipicamente é realizado por 1min@ 90°C em placa quente ou 30min@ 90°C em estufa.
- Resistes espessos (> 5μm) requerem que a lâmina volte à temperatura ambiente de forma lenta, preferencialmente sobre a placa quente, para evitar rachaduras no resiste

Processamento Litográfico



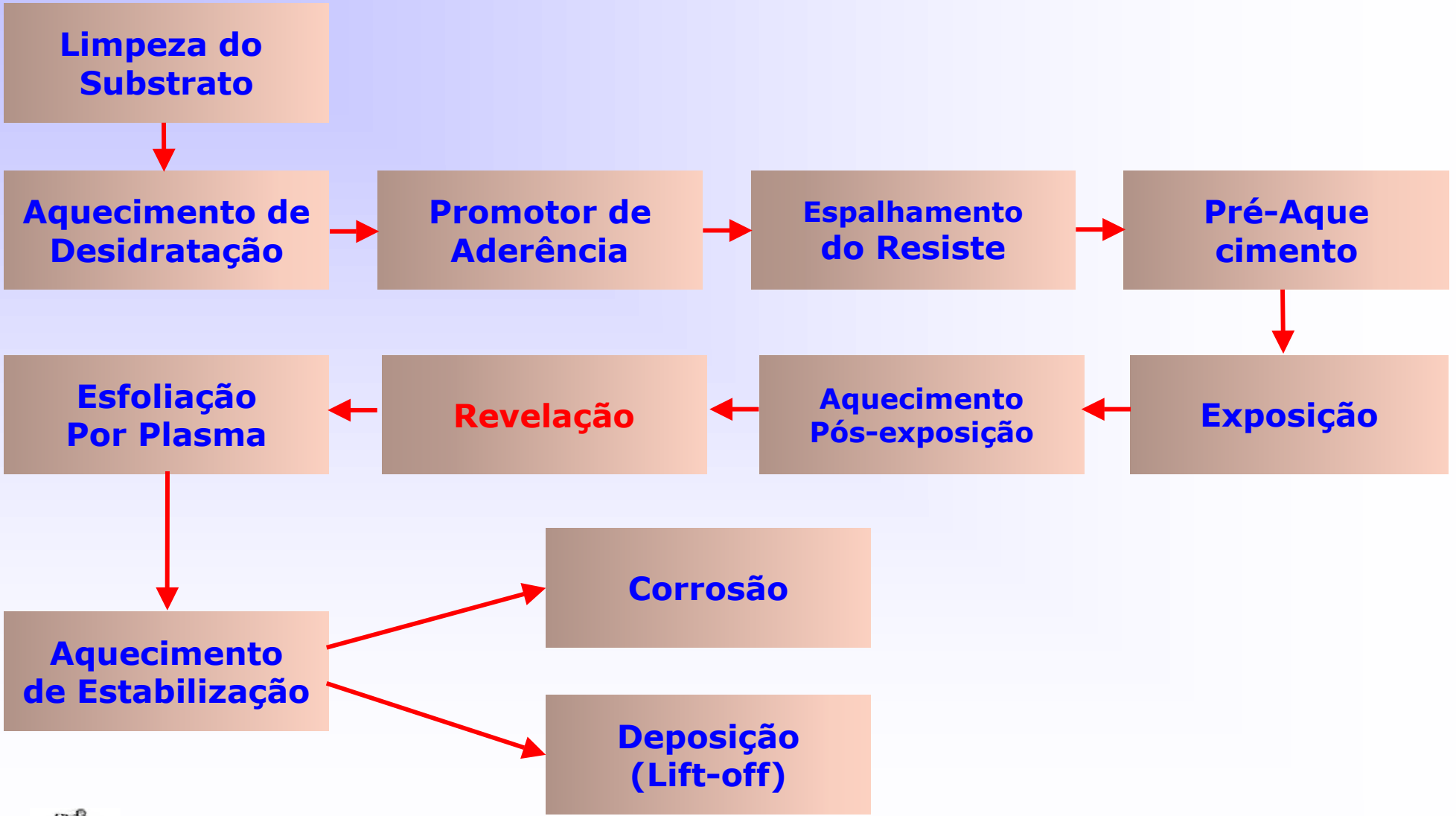
Aquecimento pós-exposição (post-exposure bake, PEB)

- Empregado para reduzir fenômenos de ondas estacionárias no resiste:



- Empregado para ativar reações químicas em resistes p/ DUV (248nm e abaixo) – Muito utilizados em LFE
- Resistes mais convencionais (PMMA, AZ, não necessitam desta etapa)

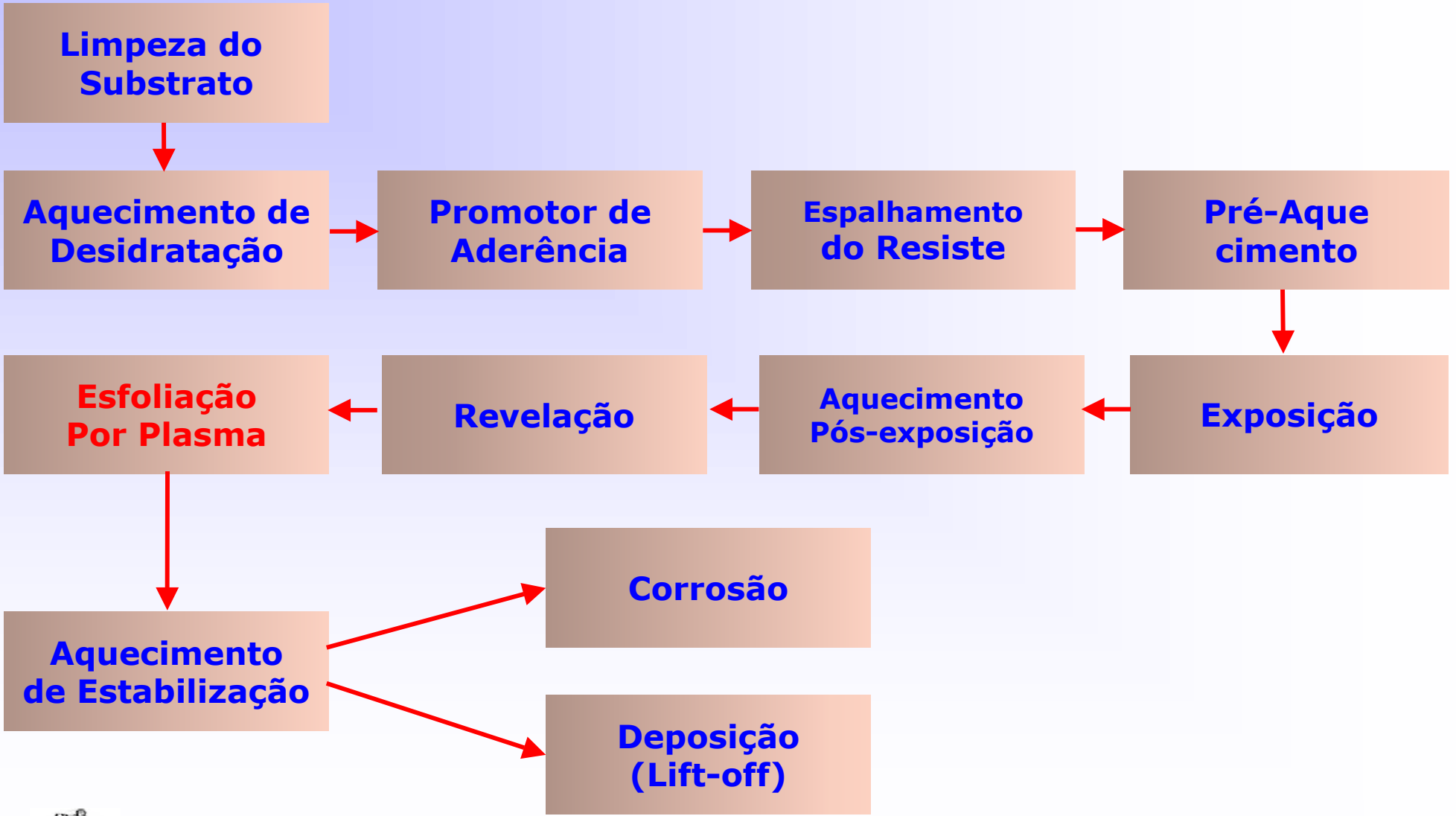
Processamento Litográfico



Revelação

- Quando adquirir o resiste, adquira também o revelador apropriado
- Solução alcalina. Soluções simples como NaOH (Shipley 351) ou KOH (AZ400K) podem ser utilizadas, mas devido à contaminação de dispositivos CMOS por íons móveis, reveladores MIF (isentos de íons metálicos) são utilizados. São em geral baseados em TMAH (MF312, 300-MIF) e podem conter surfactantes
- Cada revelador utiliza uma diluição própria para o resiste de escolha. Podem ser trocados até certo ponto mas convém acompanhar cuidadosamente alterações introduzidas no processo
- Muitos reveladores corroem alumínio

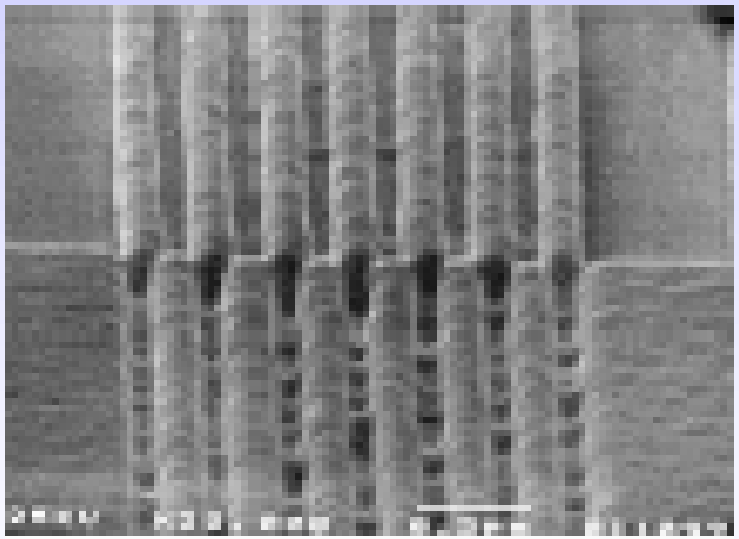
Processamento Litográfico



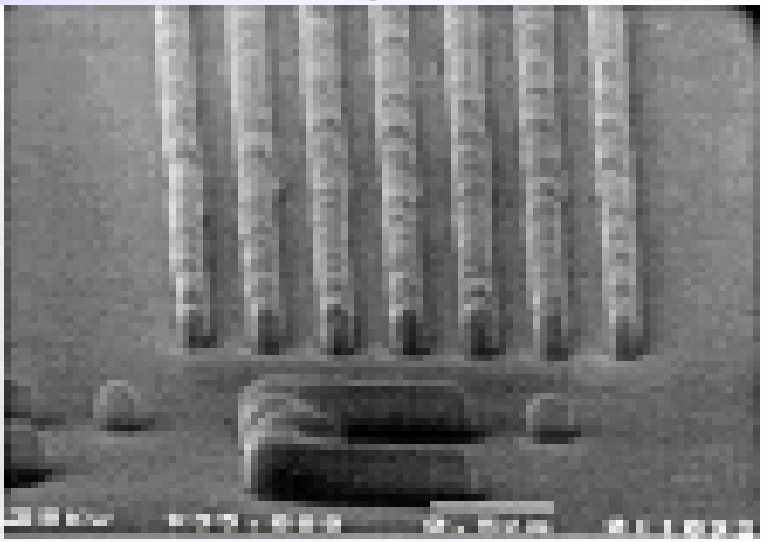
Esfoliação por Plasma (Plasma Flash)

- Plasma de O_2, 5s

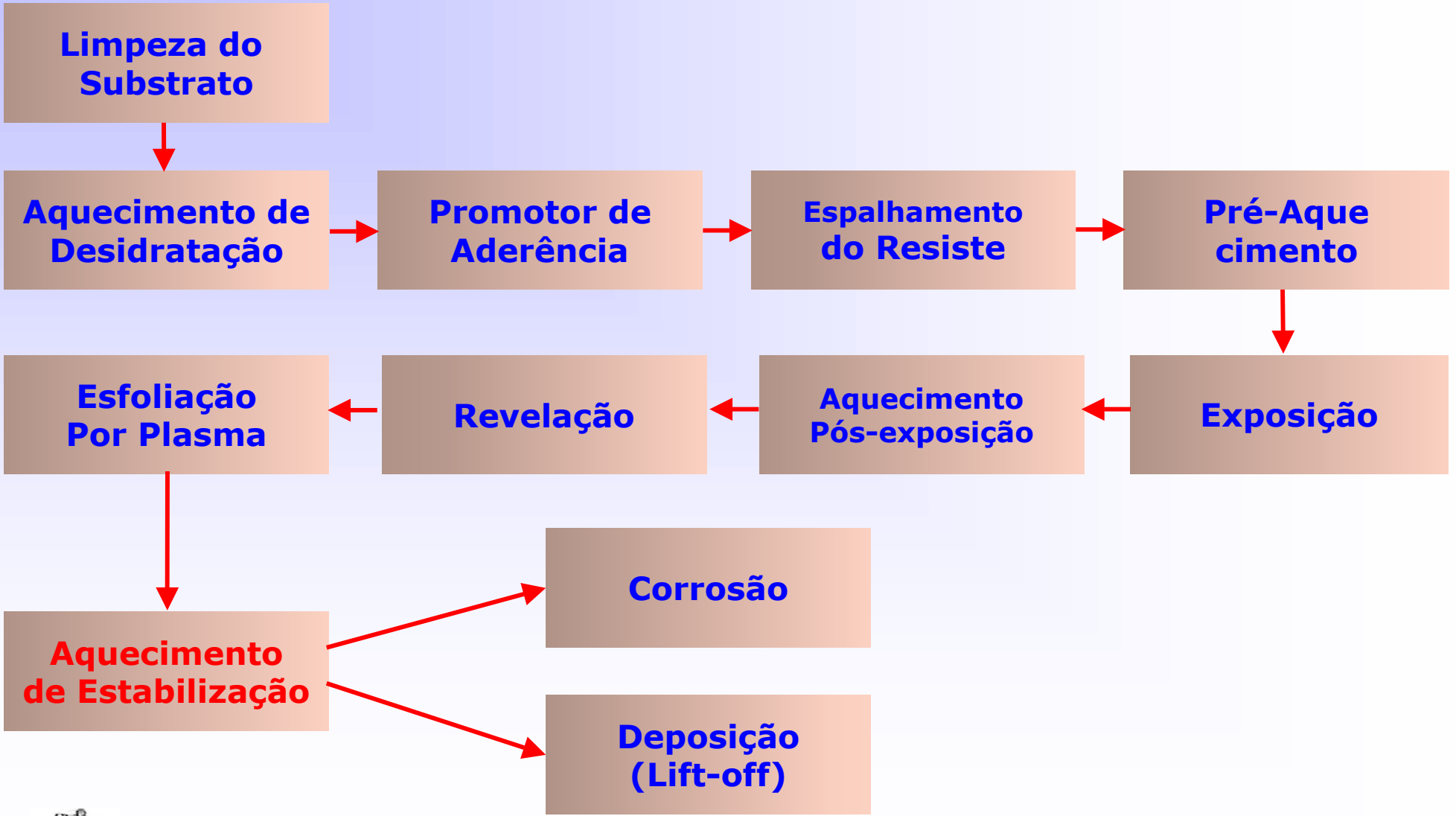
Antes



Depois

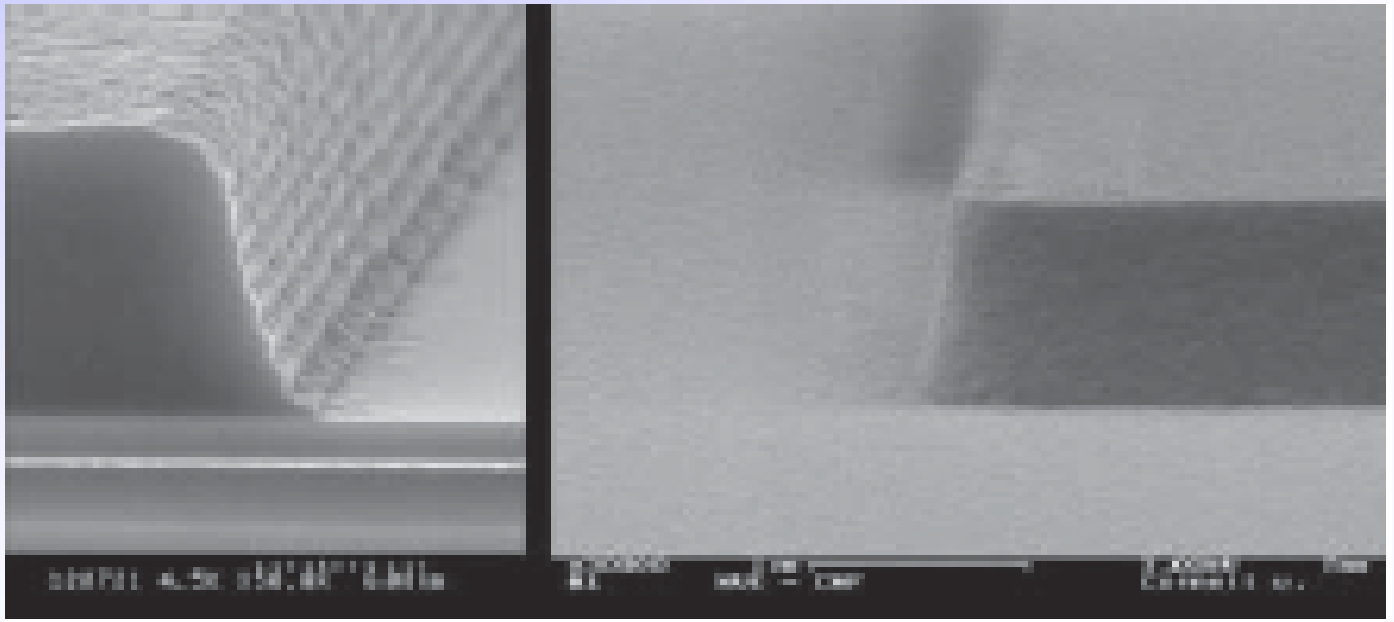


Processamento Litográfico



Aquecimento de Estabilização (hard-bake)

- Em geral utilizado para melhorar a resistência ao processo de corrosão (por plasma) posterior. Siga as recomendações do fabricante



Shipley 1813 no postbake Shipley 1813 115°C 60 sec. Postbake

Litografia Top-Down

- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Preparação das amostras
- Recomendações
- Aplicações

Recomendações

- Falarei especificamente de litografia por feixe de elétrons, mas vale da mesma forma para as outras técnicas
- Você deve saber o que você deseja fazer **antes** de iniciar o processo:
  - Quais as características principais de suas geometrias?
  - Qual o processo litográfico mais adequado?
  - O que a técnica que você vai utilizar precisa (p.ex. Máscaras, material de consumo especial, etc.)
  - Não são todos os níveis que serão feitos por LFE, a maioria será feita opticamente!

Recomendações

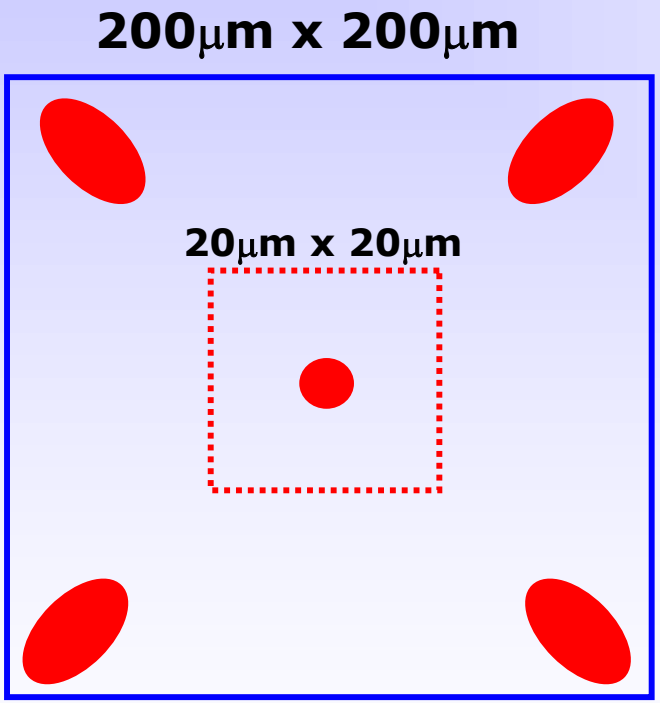
- Sugestões para começar:
  - Pense sobre o layout que você quer implementar (nível a nível) e detalhe como irá implementá-lo. Qual a seqüência?
  - Informe-se sobre as técnicas litográficas disponíveis
  - Projete o layout de acordo com as regras da técnica litográfica escolhida
  - Processos de fabricação **não** são processos de caracterização. Não espere "encomendar" um resultado. O melhor é escolher um pesquisador ou estudante do seu grupo para realizar as etapas necessárias sob supervisão do responsável pelo equipamento
  - Documente TODA a seqüência de fabricação detalhadamente, não para você, mas para TODAS as pessoas envolvidas no trabalho

Recomendações

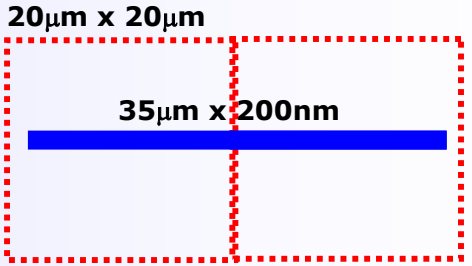
- Especificamente no caso de litografia por feixe de elétrons:
  - Os campos de escrita são quadrados de 50μm, 100μm, 200μm, 400μm, 800μm, 1600μm de lado
  - A menor dimensão possível é cerca de 1/2000 do tamanho do campo
  - Pode-se repetir o mesmo campo ao longo da amostra até uma área de 15x15mm mas o "projeto" deve estar circunscrito a um único campo. Não há possibilidade de fazer costuras (stiching) entre campos
  - Coloque a parte mais importante no centro do campo
  - Reserve espaço (20%) para marcas de alinhamento nos cantos dos quadrados

Recomendações

- Coloque a parte mais importante no centro do campo



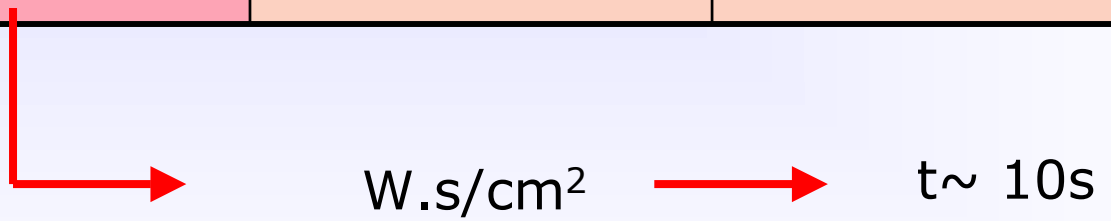
Se for necessário escrever uma linha de 200nm x 35 mm?



Recomendações

- Algumas palavras sobre resistes
  - Podem ser negativos ou positivos, assim como as máscaras
  - Atualmente existem tanto resistes negativos como positivos de altíssima resolução (~50nm)

	UV	DUV
Sensibilidade	100mJ/cm^2	10mJ/cm^2



Recomendações

- Algumas palavras sobre resistes
  - Resistes para LFE

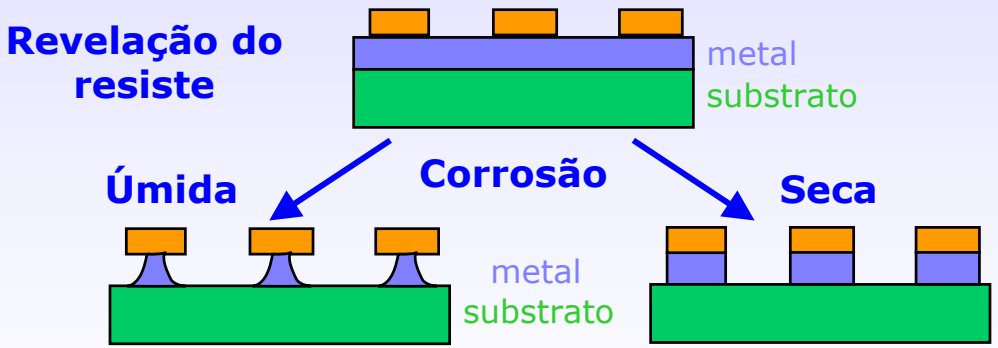
Resiste	Sensibilidade	Tempo de Exposição (rede dif. 100x100μm, I = 10pA, J=3A/cm²)
PMMA (+)	100μC/cm²	10min
APEX-E (+)	30μC/cm²	3min
SU8 (-)	5μC/cm²	30s

Recomendações

- Algumas palavras sobre resistes
  - Identifique claramente o processo a ser realizado após a exposição
    - Evaporação
    - Corrosão (por plasma)
  - PMMA é um resiste de elevada resolução (~10nm)
    - Não suporta plasmas
    - Portanto é adequado apenas para corrosão úmida ou lift-off

Recomendações

- Algumas palavras sobre resistes
  - Outros resistes além do PMMA
    - Em geral, pior resolução (em geral 50~80nm)
    - Mais sensíveis (10x!!)
    - Suportam plasma
    - Seletividade em plasma (4:1), úmida (100:1)



Plasma (4:1):

Resiste no mínimo 4x mais espesso do que o filme que se deseja corroer

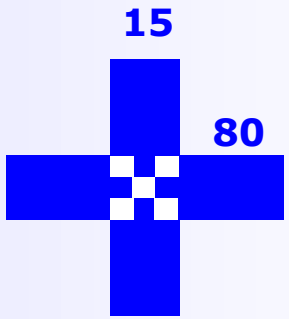
Recomendações

- Marcas de Alinhamento
  - Visíveis no microscópio óptico E no microscópio eletrônico
    - Cruzes com dimensões em torno de 80x80μm e braços de 15μm
    - Materiais com diferentes pesos moleculares em relação ao substrato (contraste de elétrons secundários) ou buracos

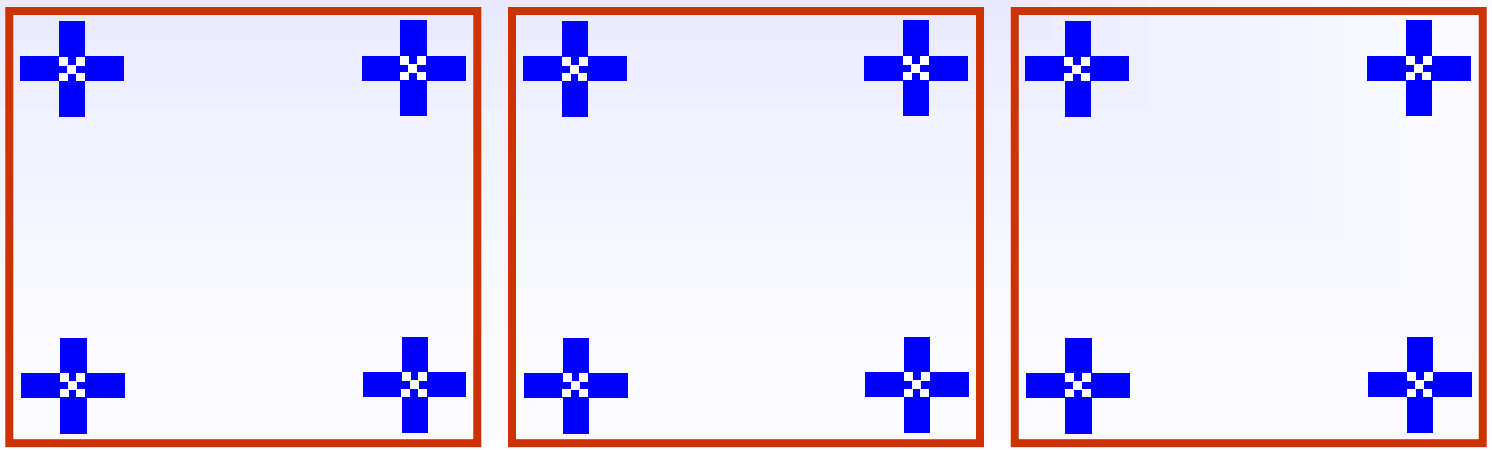


Recomendações

- Marcas de Alinhamento para LFE

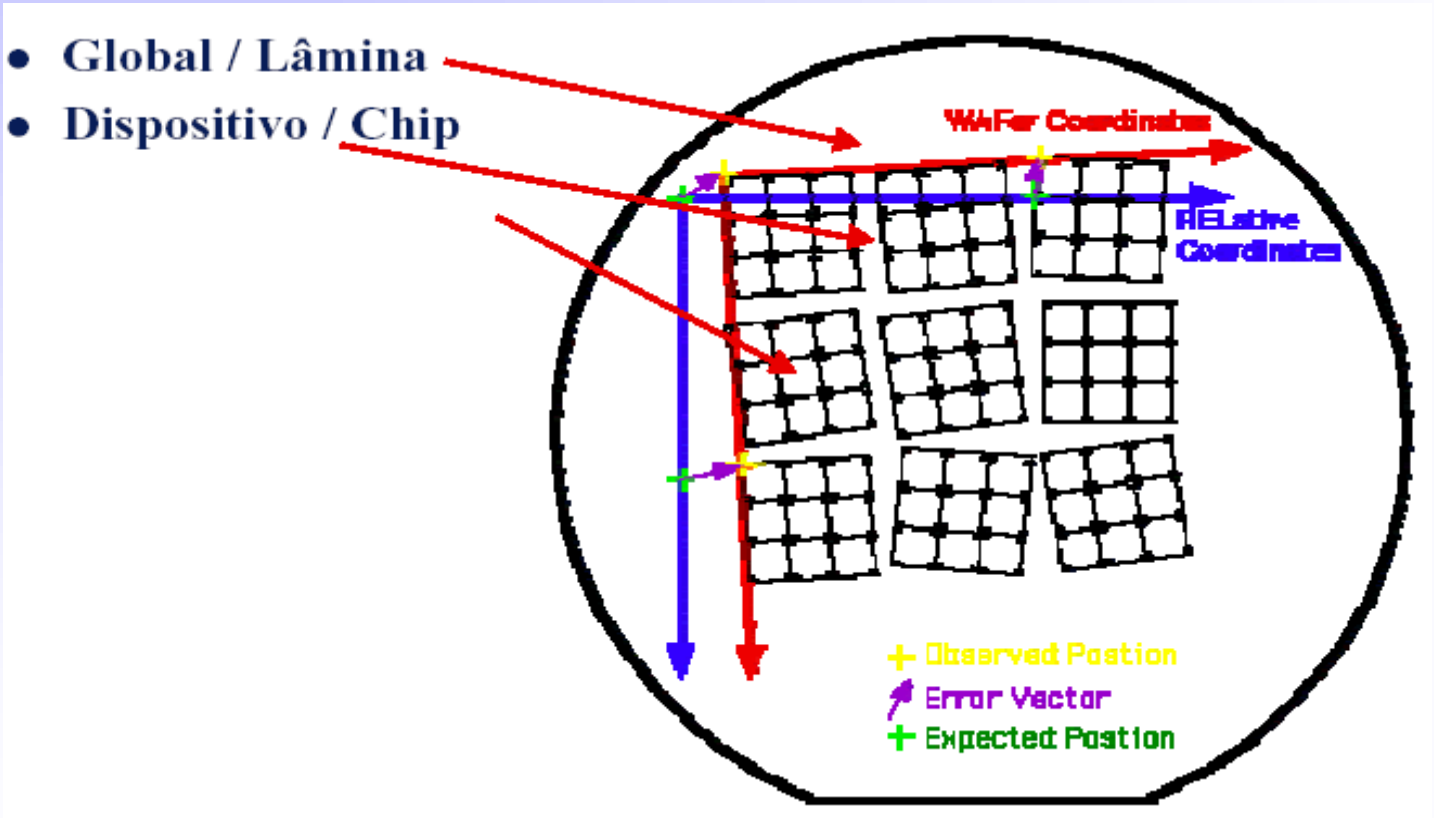


- Posicionamento das Marcas



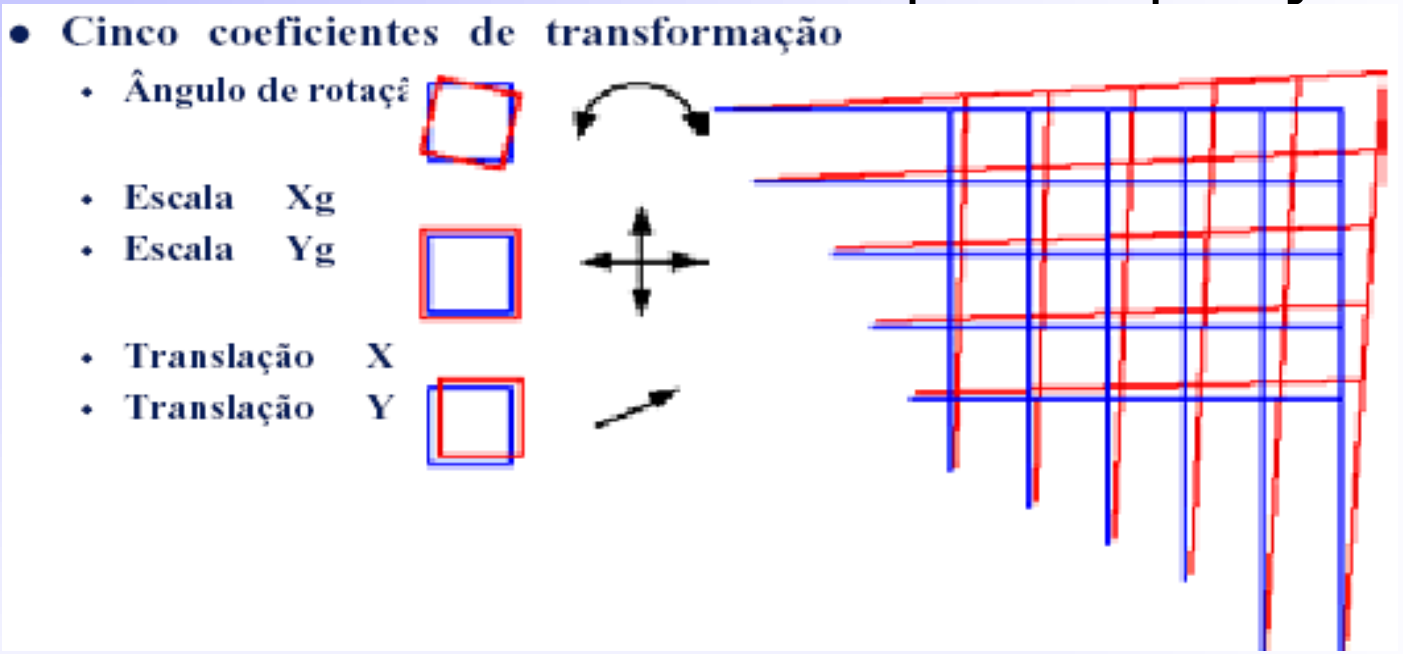
Recomendações

- Posicionamento sobre a amostra para exposição



Recomendações

- Posicionamento sobre a amostra para exposição



- Em LFE os coeficientes de transformação devem ser obtidos para cada nível a ser exposto! (a magnificação nunca é exatamente a mesma)
  - Altura da amostra
  - Mudança de magnificação do SEM, levando a rotação da imagem

Recomendações

- Nivelamento da amostra é muito importante:
  - GaAs costuma ter In nas costas. É necessário remover antes mesmo de espalhar o resiste!
  - Em LFE, a profundidade de foco pode ser dada por:

$$DOF = 0.2\ WD / A\ M$$

se WD(distância de trabalho)= 8mm, A (abertura) = 100μm e para um campo de aproximadamente 200μm (M = 1000x)

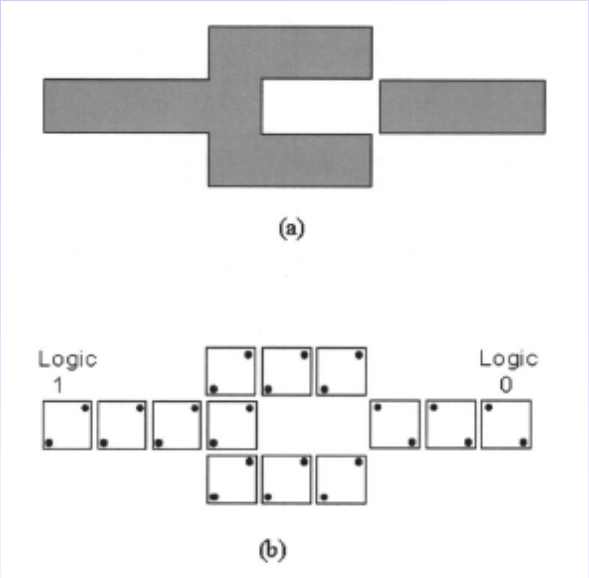
$$DOF \sim 15\mu m$$

  - Se a amostra tiver 10x10mm, isto significa que ela deve estar nivelada dentro de **1,6 miligrau** para não desfocalizar o feixe em nenhum ponto

Litografia Top-Down

- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Preparação das amostras
- Recomendações
- Aplicações

- Computação molecular (Hang, 2003)



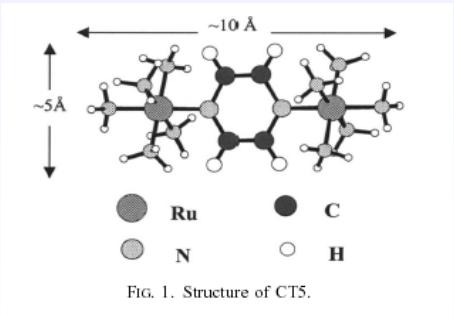
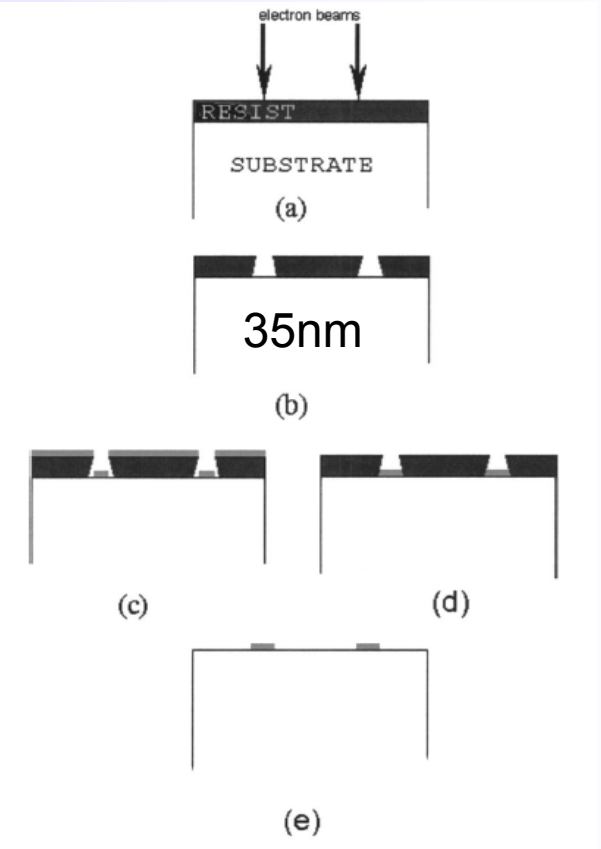


FIG. 1. Structure of CT5.



- Computação molecular (Buehler, 2002)

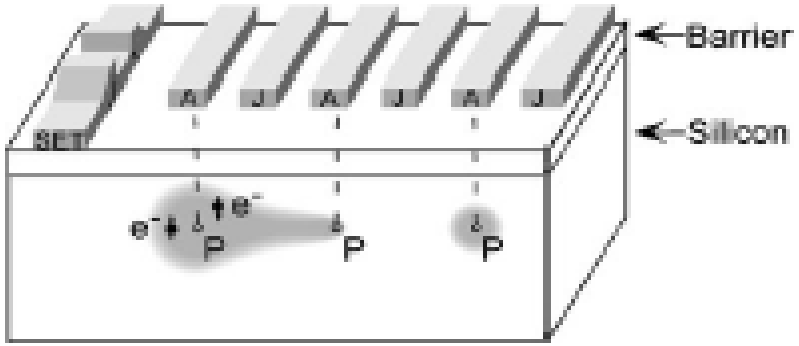


Figure 1. SSQC architecture in which ^{31}P atoms form an array of quantum bits in ^{28}Si. The SET is used to read out the spin configuration of the two leftmost donors.

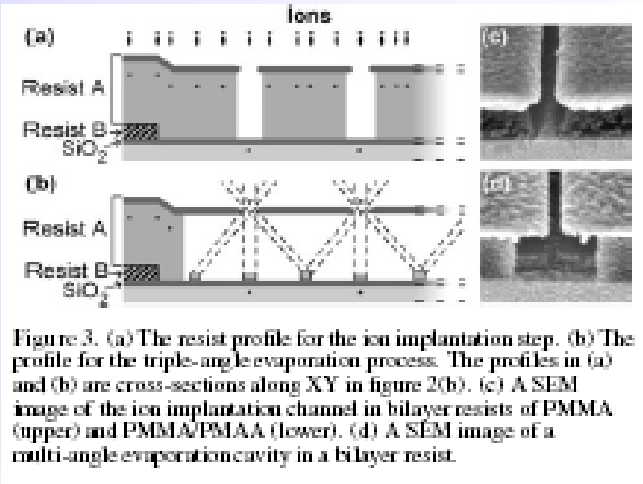


Figure 3. (a) The resist profile for the ion implantation step. (b) The profile for the triple-angle evaporation process. The profiles in (a) and (b) are cross-sections along XY in figure 2(b). (c) A SEM image of the ion implantation channel in bilayer resists of PMMA (upper) and PMMA/PMAA (lower). (d) A SEM image of a multi-angle evaporation cavity in a bilayer resist.

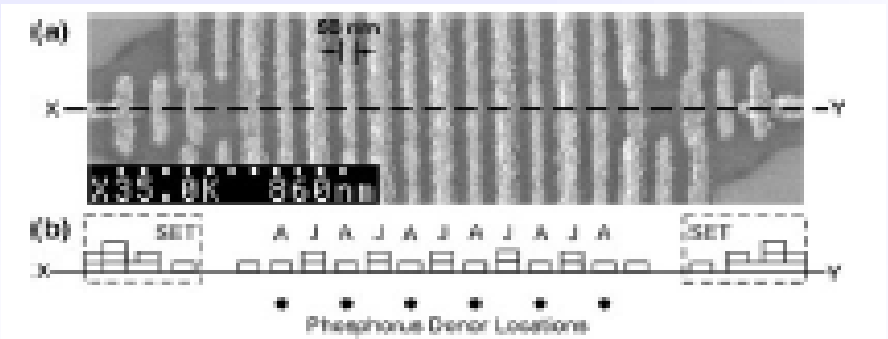
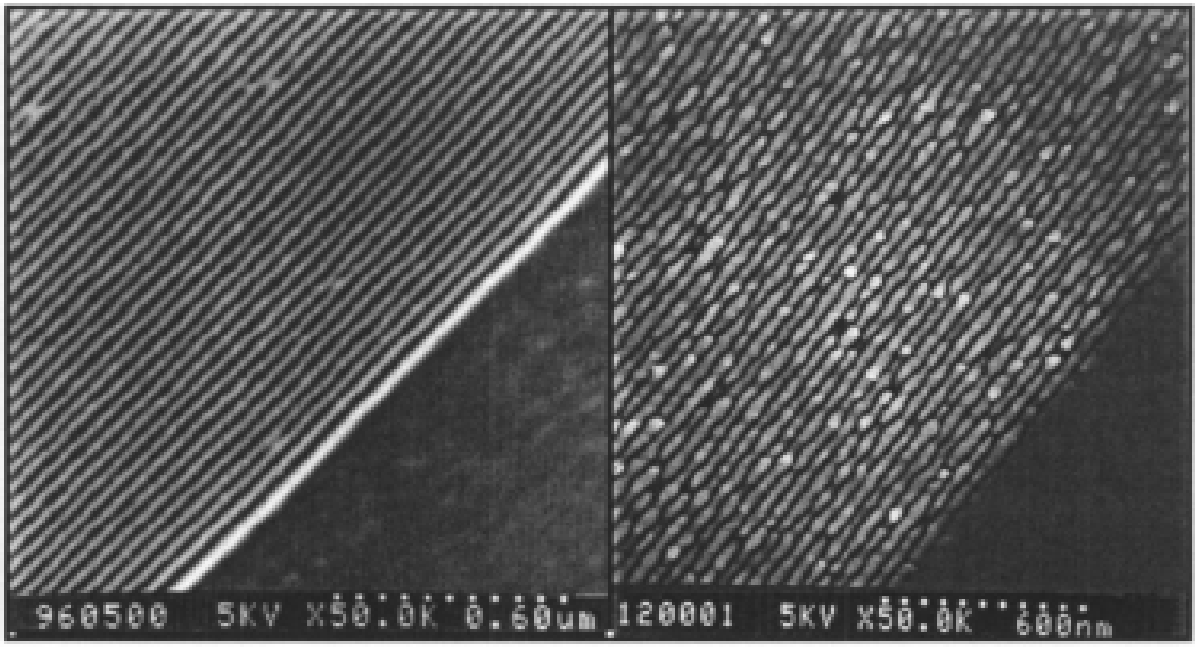


Figure 5. (a) A SEM image of the gate and SET array for a six-donor SSQC device produced by triple-angle evaporation. (b) A cross-section of the device in (a) through the line marked XY.

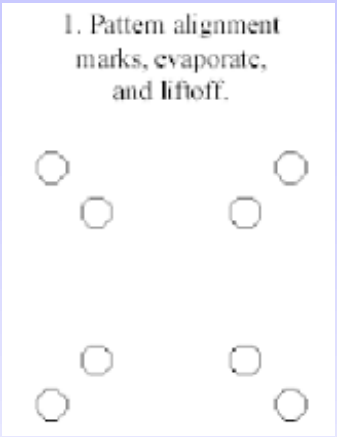
- Redes de Difração (Spector, 1997)

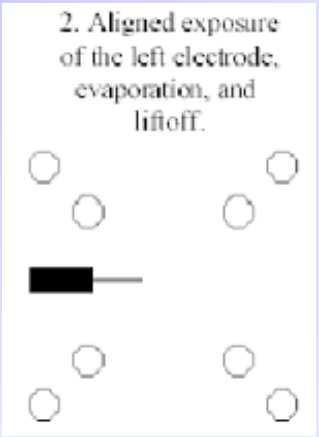


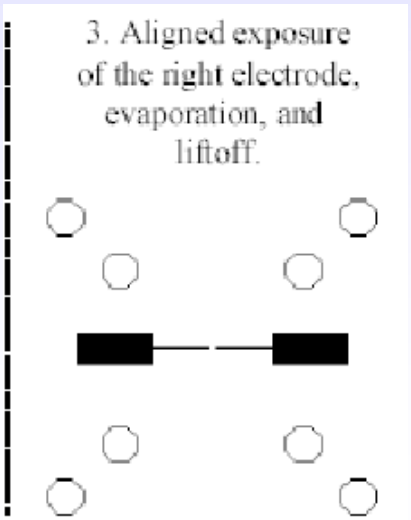
20nm entre linhas

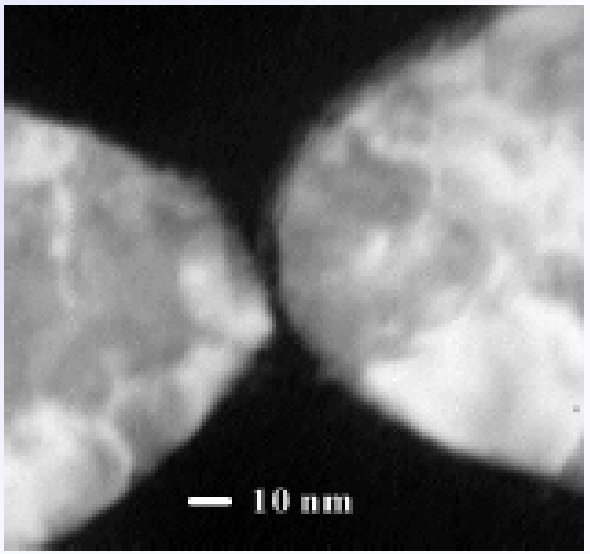
- Fabricação de Eletrodos com Nanoseparação

(Guilhorn, 2000)

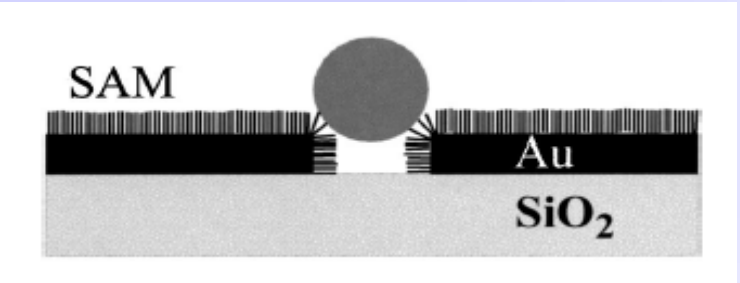


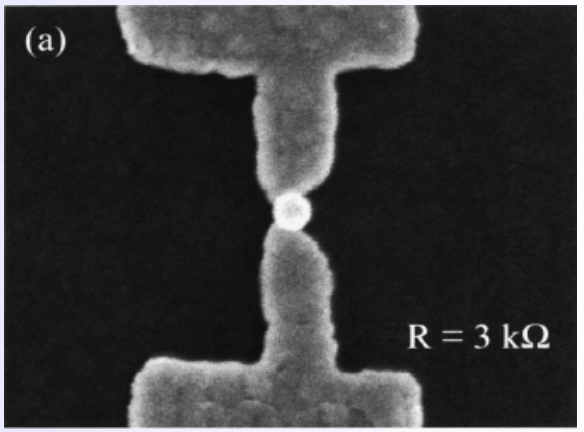




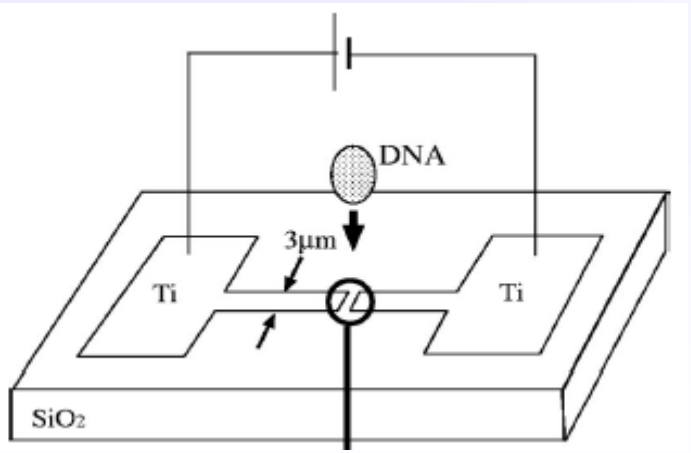


- Medidas de Transporte Elétrico em Moléculas com Nanoseparação por Técnicas Híbridas (TD+BU) (Amlani, 2002)





- Análise de DNA (Hashioka, 2003)



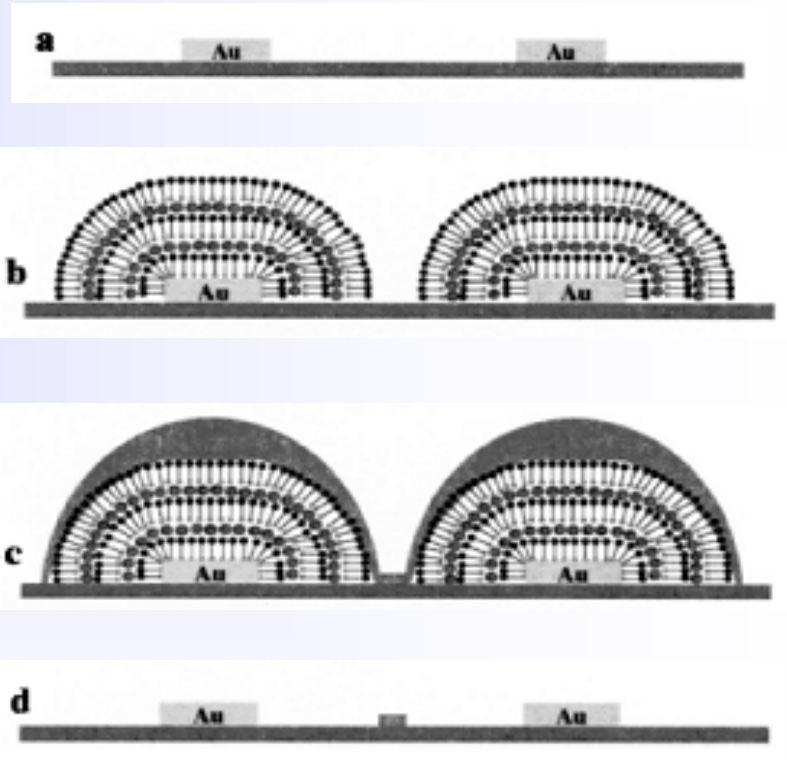
- Réguas Moleculares (Anderson, 2002)

  • Exposição + revelação
  • Deposição de Au
  • Lift-off

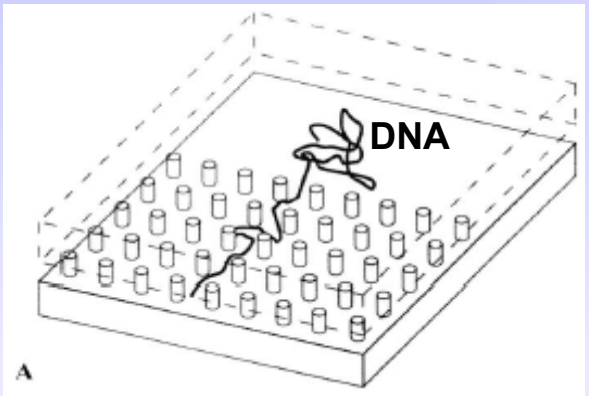
  • Deposição do SAM em multicamadas

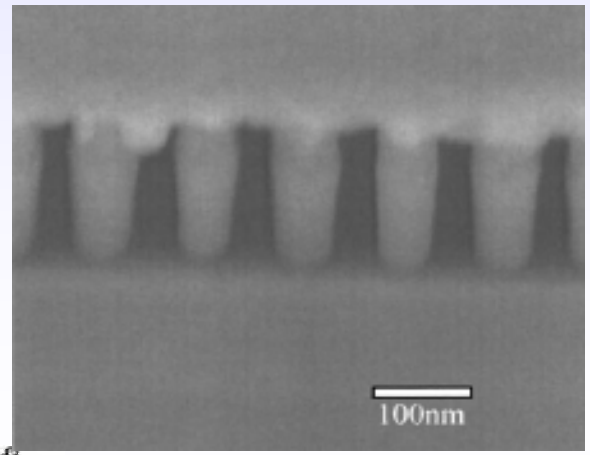
  • Deposição do segundo metal

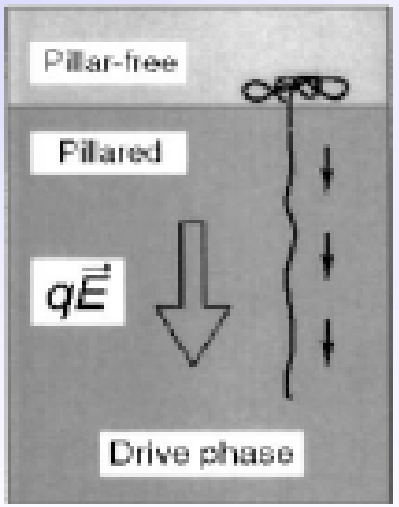
  • Lift-off

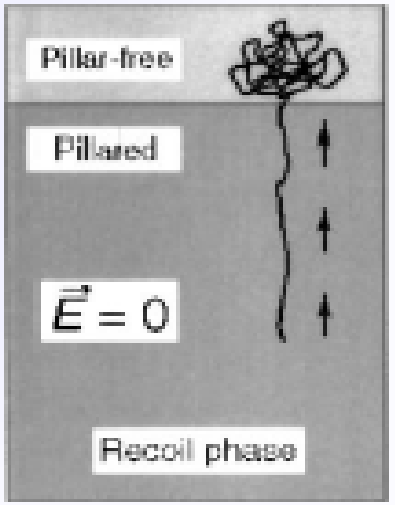


- Nanoestruturas Fluídicas (Hang, 2003)
  - Escolher, separar e analisar moléculas específicas









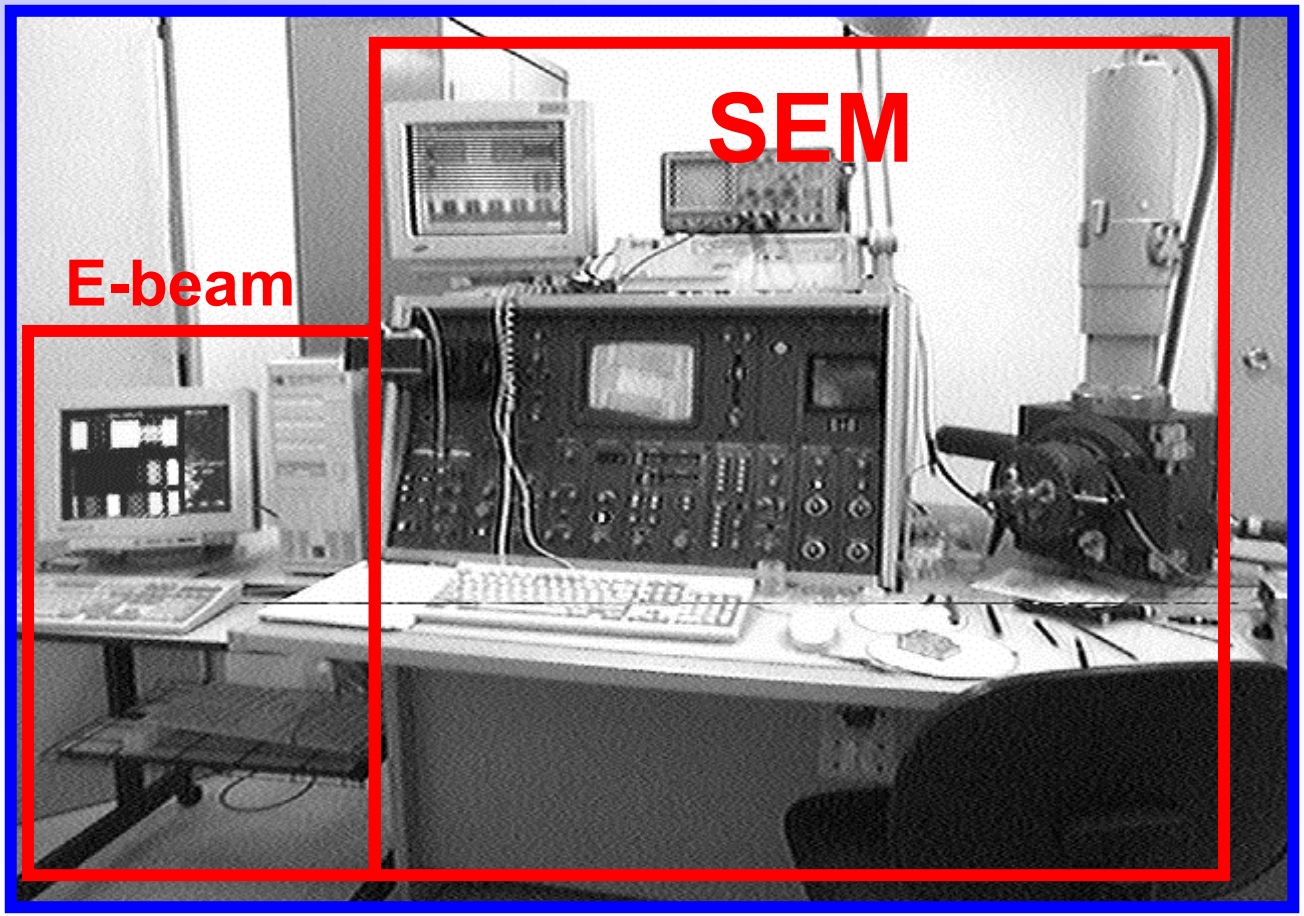
Nanofabricação de estruturas no LSI-PSI-EPUSP

- Abordagem "top-down"
  - Esculpir as estruturas em substratos ou filmes previamente depositados, sendo complementar a abordagem "bottom-up". As duas abordagens provavelmente vão se encontrar na faixa de 20nm~50nm
  - Embora menos elegante que a abordagem "bottom-up" possui as seguintes vantagens:
    - Utiliza todo o conhecimento acumulado das técnicas de fabricação de microeletrônica
    - Permite a fabricação de nanoestruturas em formatos e regiões previamente escolhidas, o que viabiliza a interconexão de diversas nanoestruturas de forma coerente e organizada
    - Viabiliza a fabricação de estruturas com dimensões micrométricas que no entanto precisam ser definidas por fatias ou trechos nanométricos, como por exemplo microlentes refrativas e difrativas de relevo contínuo

Nanofabricação de estruturas no LSI-PSI-EPUSP

- Para definição de estruturas nanofabricadas empregamos um MEV adaptado para litografia por feixe de elétrons (e-beam)
  - Não usa máscara (escrita direta) e possui resolução atual de cerca de 60nm (já fabricadas). Permite prototipagem rápida diretamente a partir de desenhos gerados até mesmo em AUTOCAD. O ciclo litográfico completo leva menos de um dia a partir do layout AUTOCAD
  - Utilizamos um microscópio eletrônico de varredura com um equipamento acessório da empresa Raith GmBH
  - Baixíssimo throughtput, exposição estrutura a estrutura, porém de elevada resolução (potencialmente pode-se fabricar estruturas de até 3-5 vezes o diâmetro do feixe do MEV/SEM, cerca de 40nm).
    Na prática isto também significa aproximamente um campo com diversas estruturas exposto a cada 30min, ou 10 amostras por período

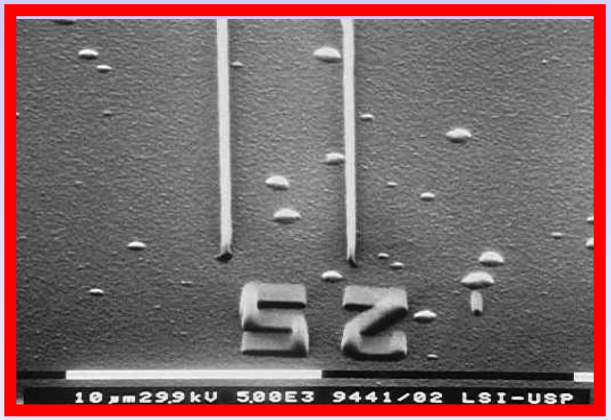
Detalhe do SEM-PSI-EPUSP



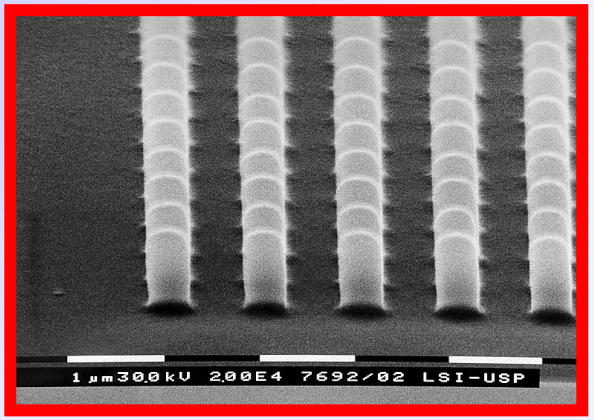
Exemplos de Trabalhos Realizados

- Fabricação de estruturas quase nanométricas

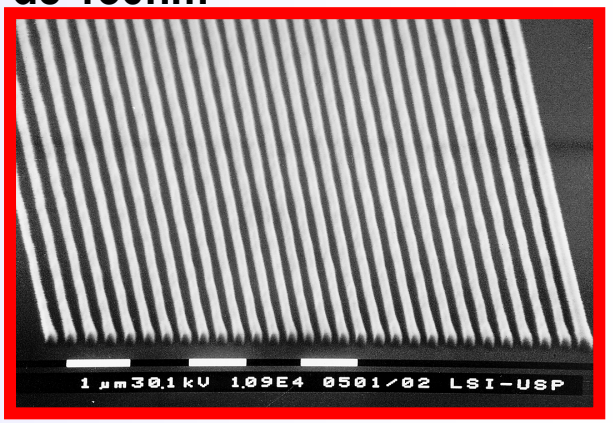
Linhas de 0,25µm



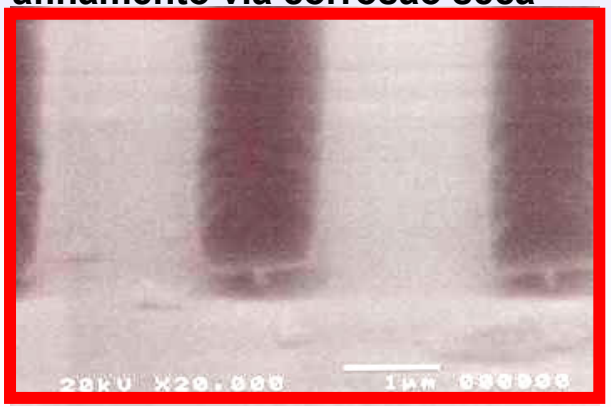
Pilares de 0,5µm



Redes de difração com linhas de 130nm



Linhas de 90nm obtidas por afinamento via corrosão seca

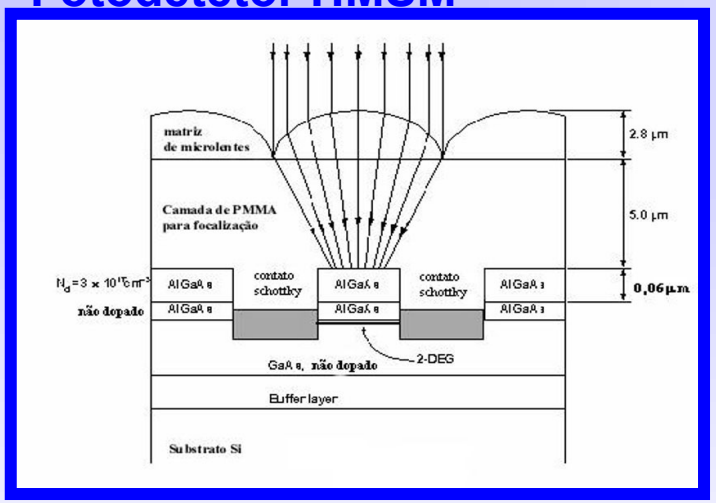


*** Trabalho em colaboração com CCS-Unicamp**

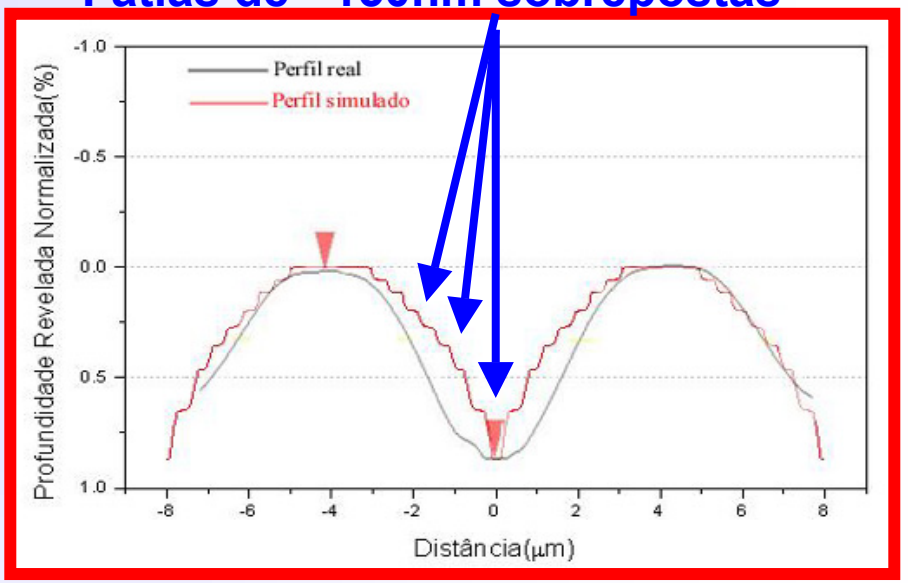
Exemplos de Trabalhos Realizados

- Microlentes nanoestruturadas

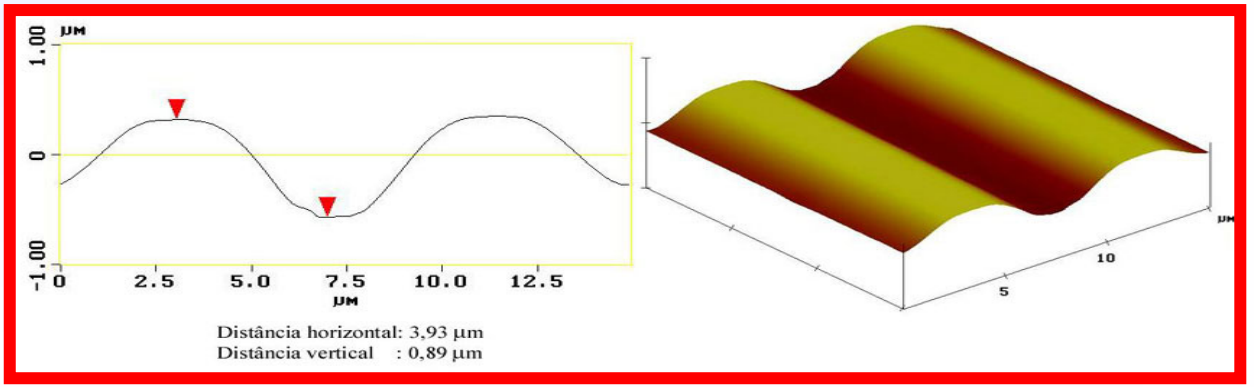
Fotodetetor HMSM



Fatias de ~150nm sobrepostas



AFM

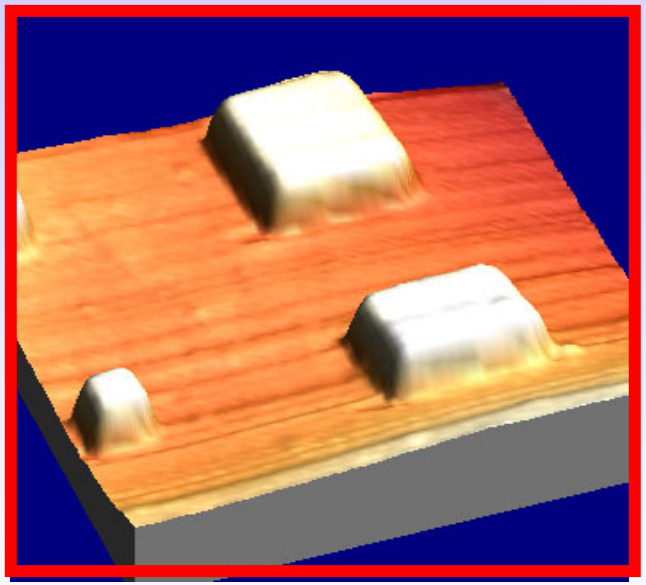


*** Trabalho em colaboração com USP-São Carlos e Drexel University - USA**

Exemplos de Trabalhos Realizados

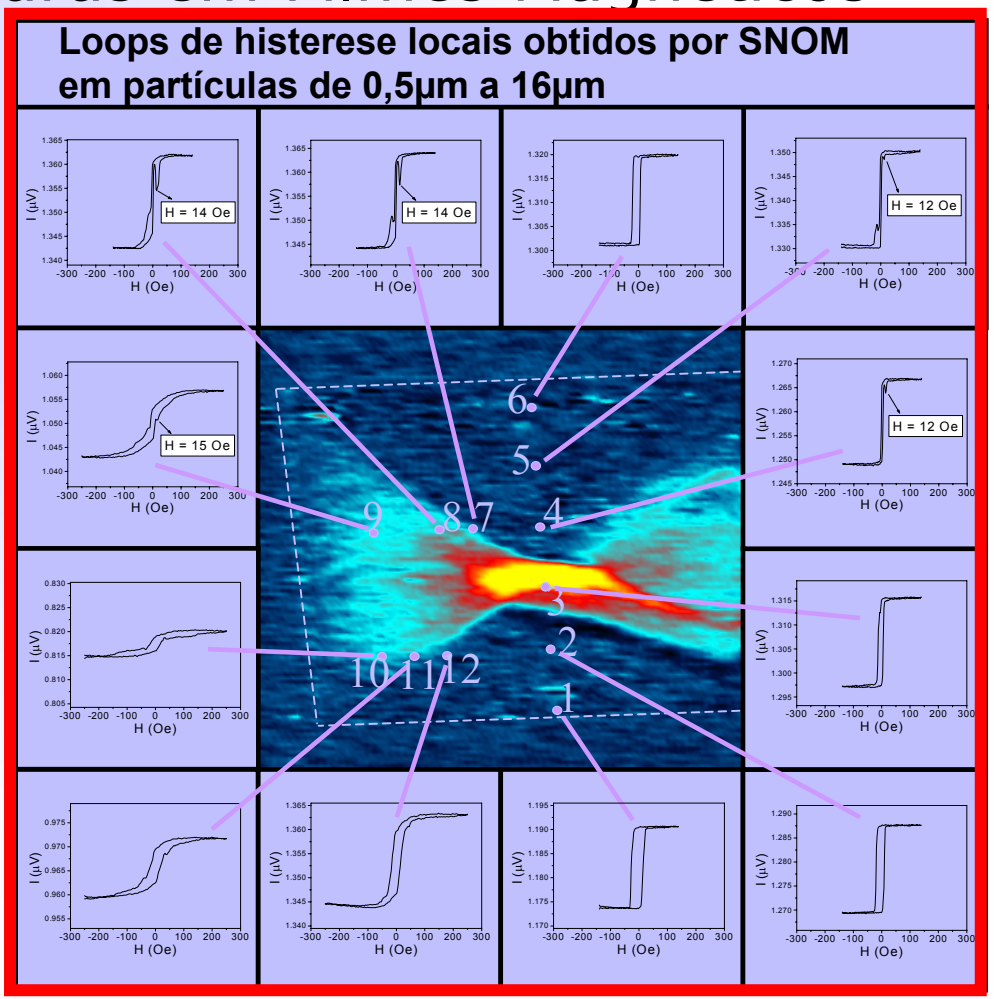
- Fabricação de Microestruturas em Filmes Magnéticos

Partículas de $Co_{70.4}Fe_{4.6}Si_{15}B_{10}$ obtidas por e-beam/lift-off

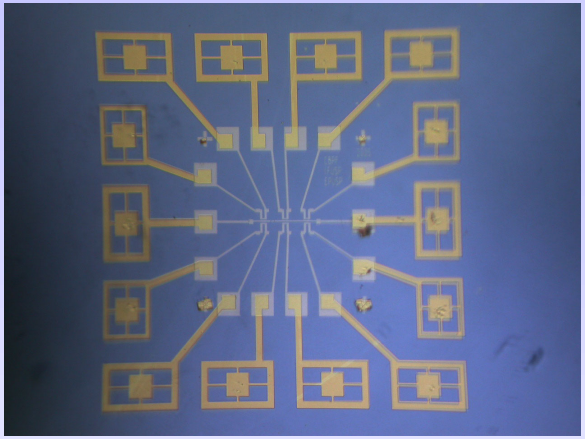


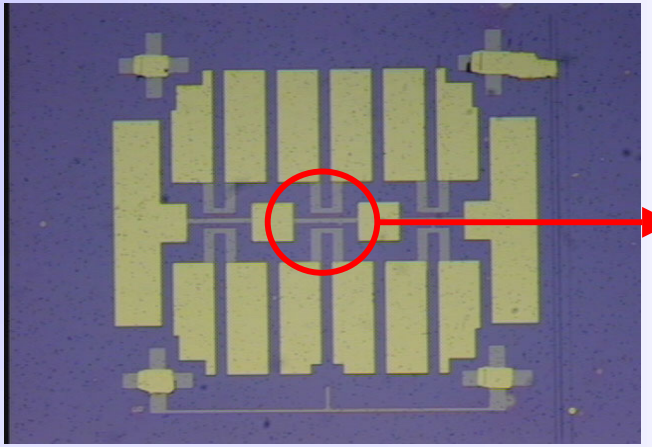
*** Trabalho em colaboração com IF-USP, CBPF e CNRS-França**

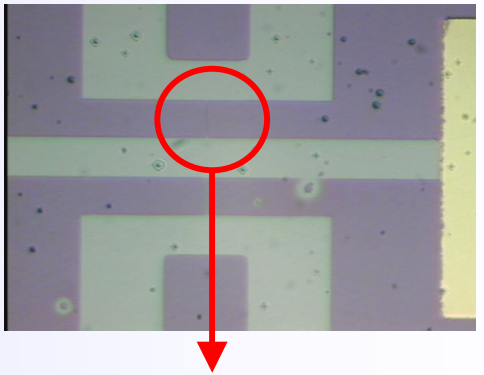
Loops de histerese locais obtidos por SNOM em partículas de 0,5μm a 16μm



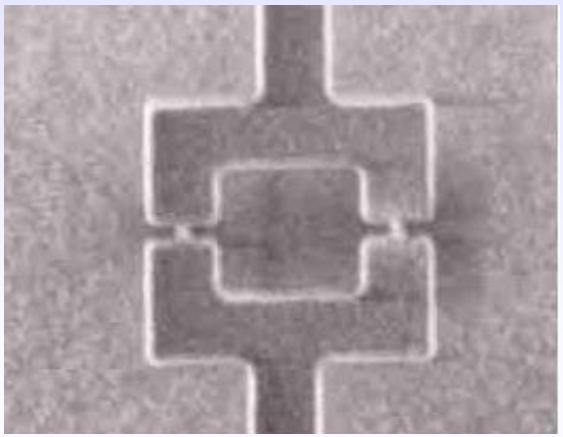
Microsquids em Filmes Magnéticos

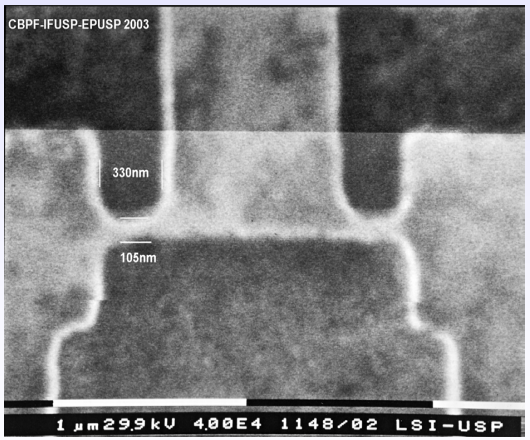


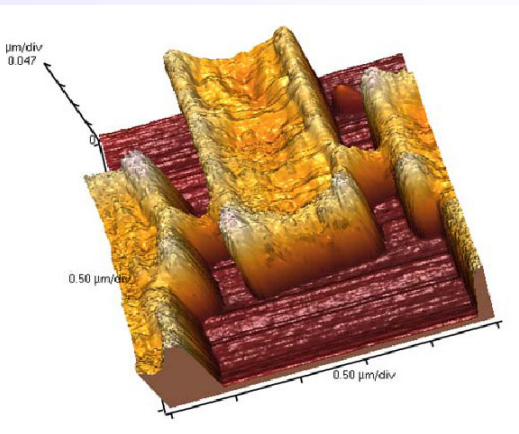




Linhas de 50nm x 10um



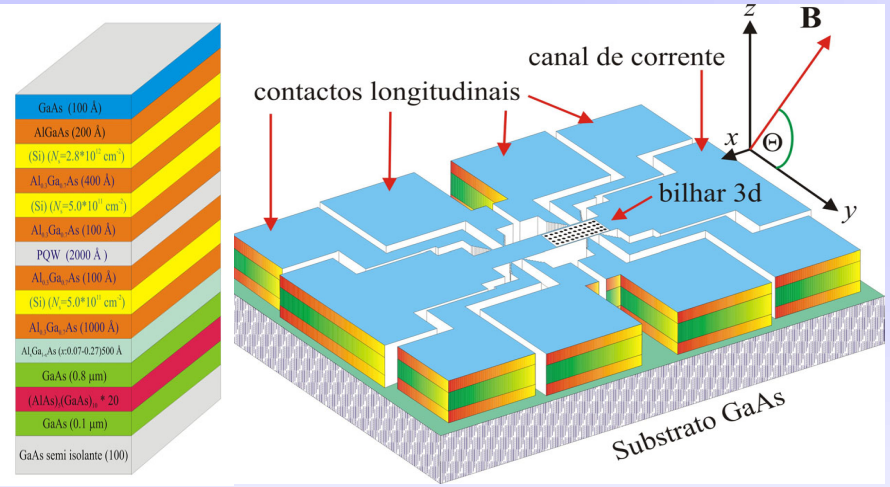


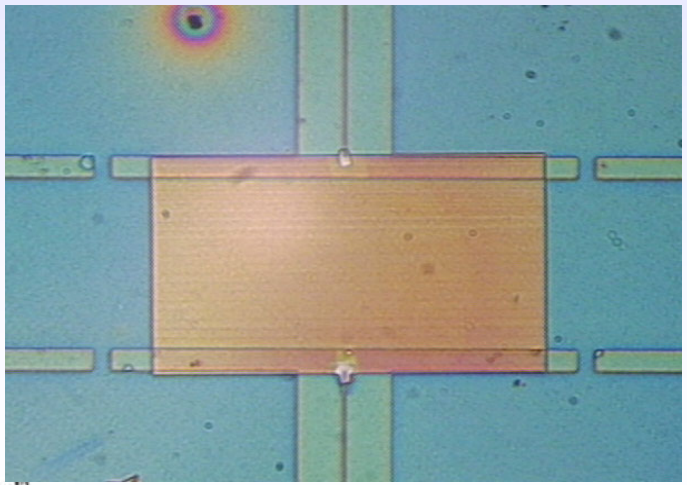


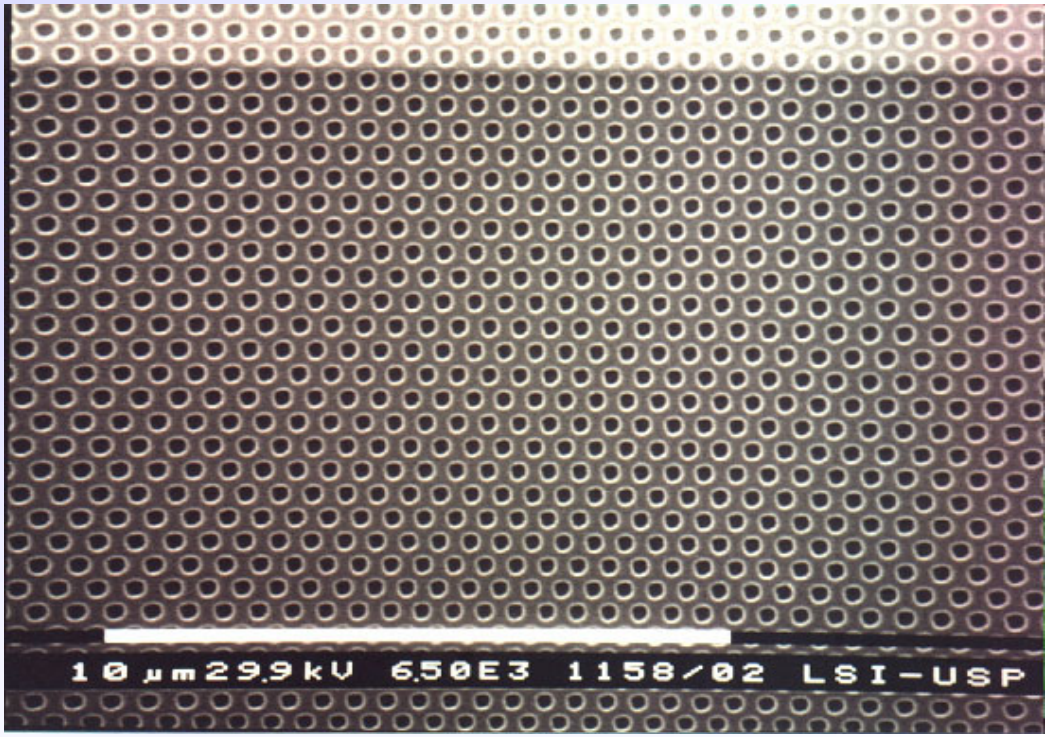
*** Trabalho conjunto IFUSP-EPUSP-CBPF**

Exemplos de Trabalhos Realizados

- Medidas de Transporte em Redes de Pontos/Anti-pontos



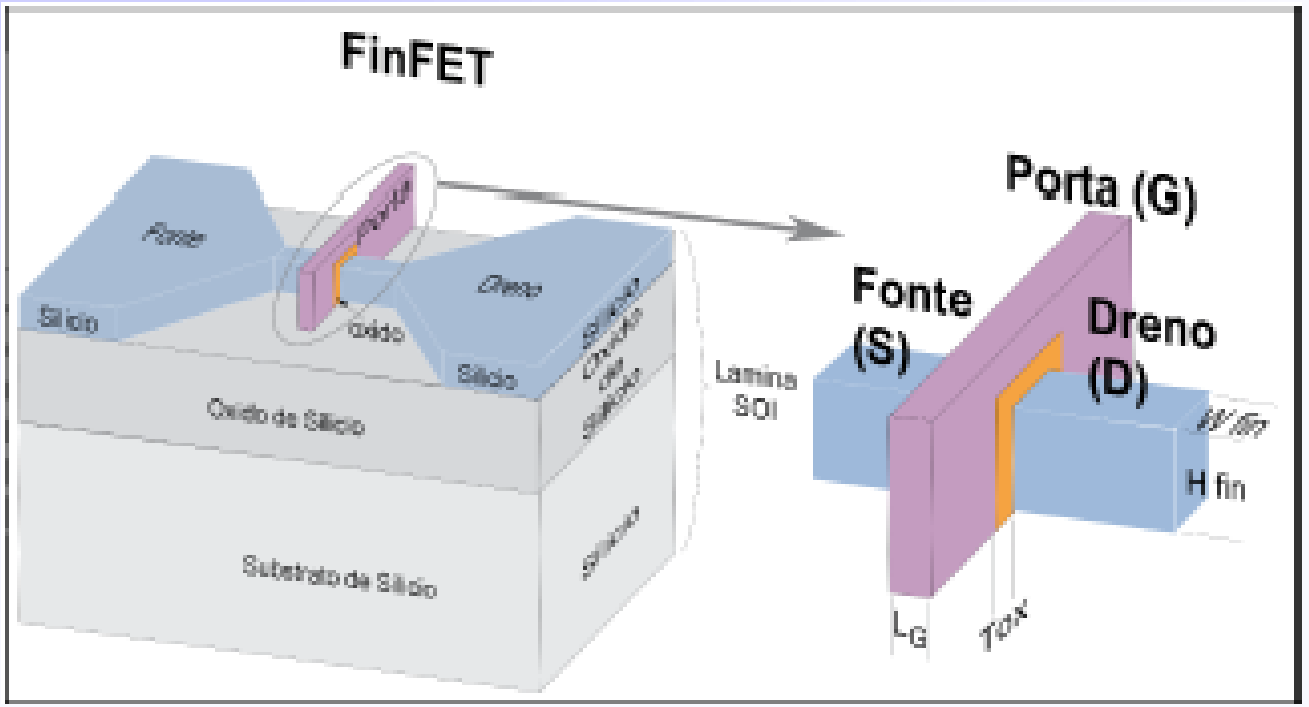




*** Trabalho em colaboração com IF-USP**

Exemplos de Trabalhos Realizados

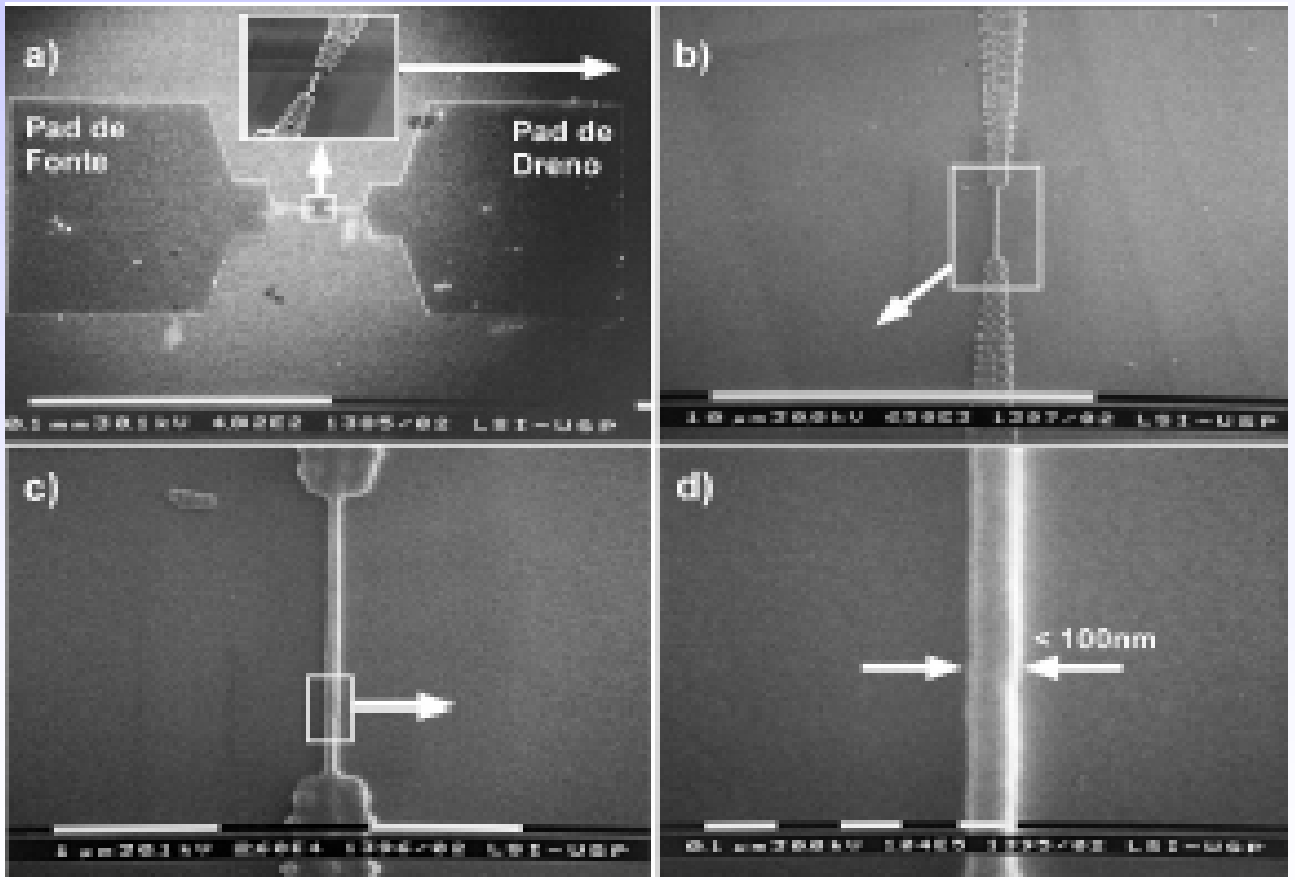
- Estudo de Dispositivos Eletrônicos CMOS Convencionais na Escala Nanométrica (FinFETs)



*** Trabalho em colaboração com IFUSP/FEI**

Exemplos de Trabalhos Realizados

- Estudo de Dispositivos Eletrônicos CMOS Convencionais na Escala Nanométrica (FinFETs)



*** Trabalho em colaboração com IFUSP/FEI**

Conclusões

- Existem diferenças fundamentais na litografia de ponta para CIs e aquela para nanotecnologia
- As técnicas litográficas Top-Down podem ser combinadas entre si e com estratégias Bottom-Up para aumentar significativamente o número de aplicações científicas e tecnológicas de nanotecnologia
- A colaboração é peça fundamental nesse processo!