



Fabricação de micro e nanoestruturas empregando litografia

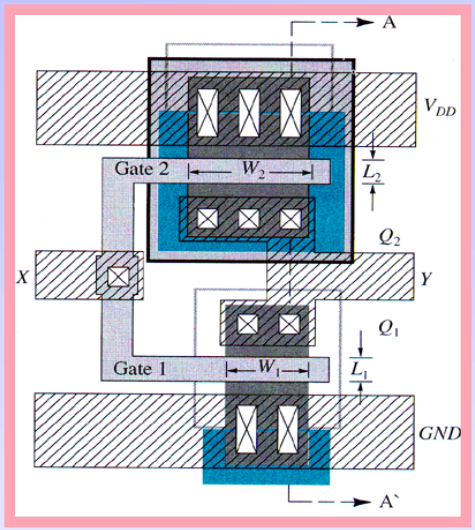
Parte II

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

Litografia Top-Down (Segunda-feira)

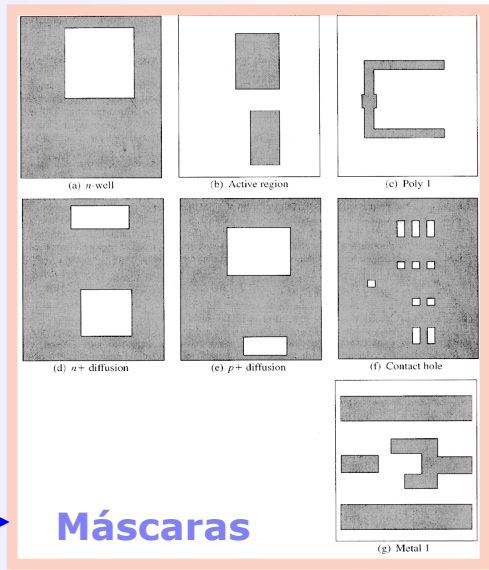
- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Aplicações

Possibilidades Litográficas



CAD

Máscara(s)



CIs

MEMS

Litografia Óptica

Litografia por Raios-X

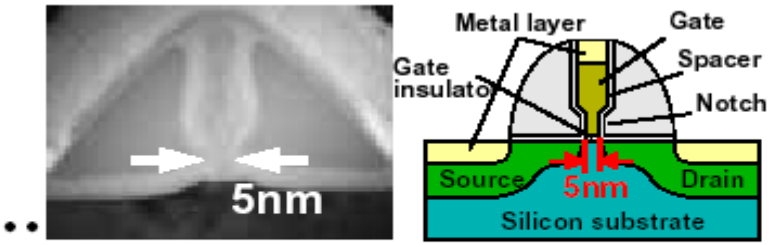
Litografia na Indústria de CIs

- A indústria de CIs avança muito rápido e põe mitos por terra

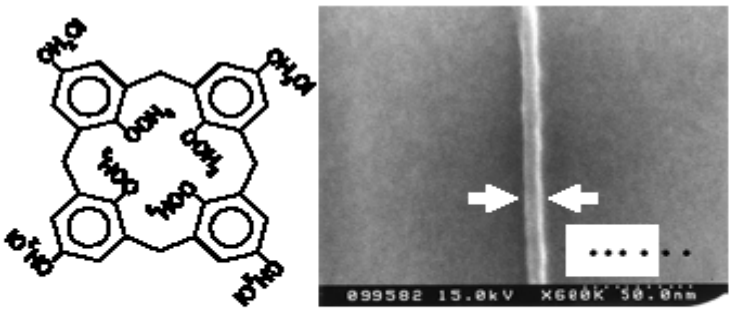
4. NEC Nanoscale Transistor•• (2005)

Today, silicon transistors are used almost everywhere, as the key processing device, embedded in various kinds of equipments. By nature, higher speed, lower power, and increased functionality can be achieved by decreasing the size of the transistors.NEC fabricated a 5-nm-gate world-smallest transistor and successfully confirmed the transistor operation at room temperature. This small transistor is expected to be realized around 2020. NEC also succeeded to develop the high-resolution electron beam resist (Calixarene) for the precise fabrication of such minute devices. NEC investigates the possibility of future LSI through the investigation of nanoscale transistor.

http://www.labs.nec.co.jp/Eng/Overview/soshiki/kiso/nanotech2004.pdf



Photograph and figure of 5-nm-gate transistor.



Calixarene resist and its 8-nm pattern.•• (This work is in collaboration with TOKUYAMA Co.)

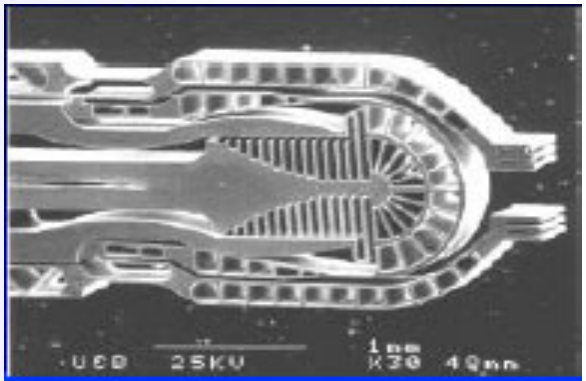
Litografia para MEMS



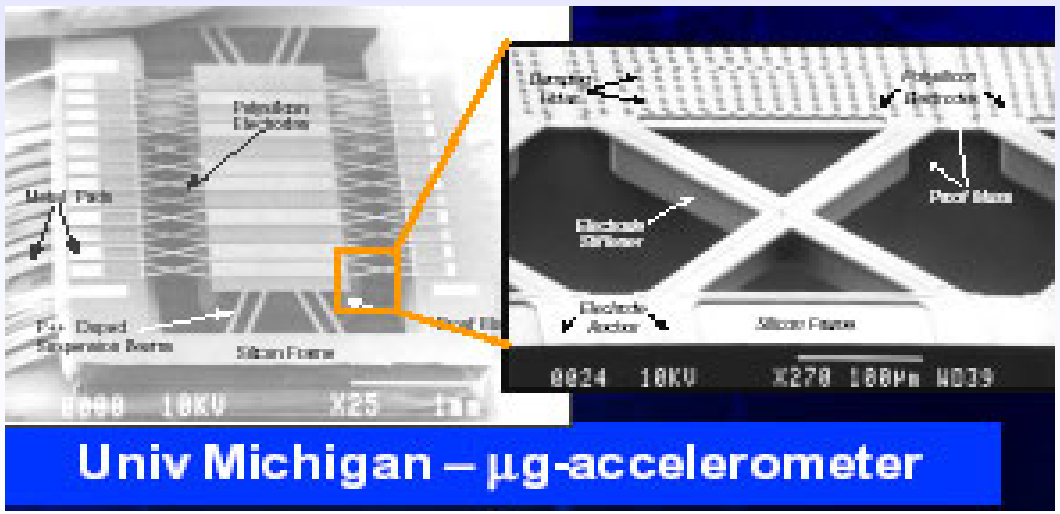
Univ Michigan - Vibratory Gyroscope



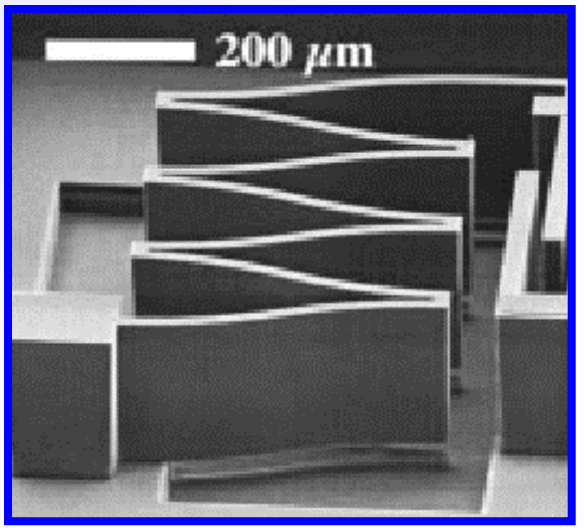
MIT: Turbo Machinery



UC Berkeley: BSAC–C Keller Silicon Tweezers

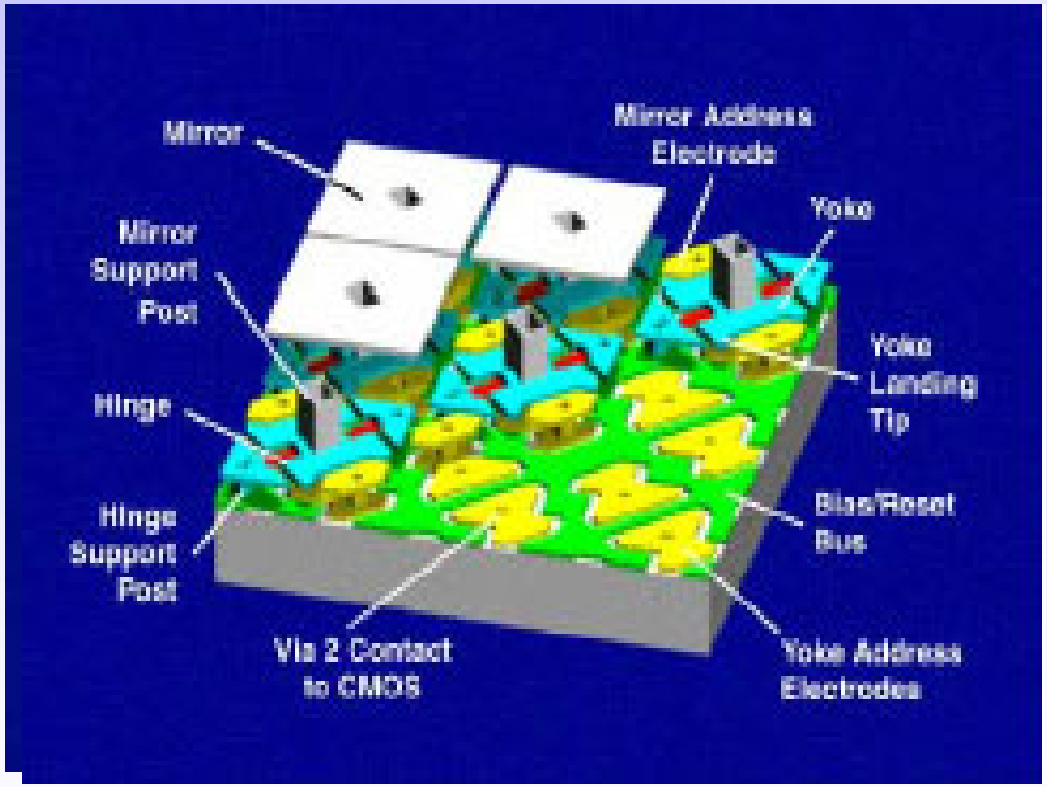


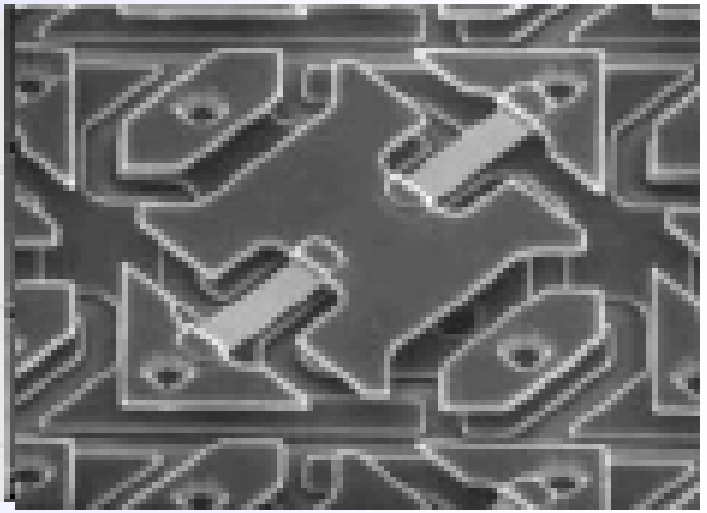
Univ Michigan – µg-accelerometer



Litografia para MEMS

Dispositivos Ópticos



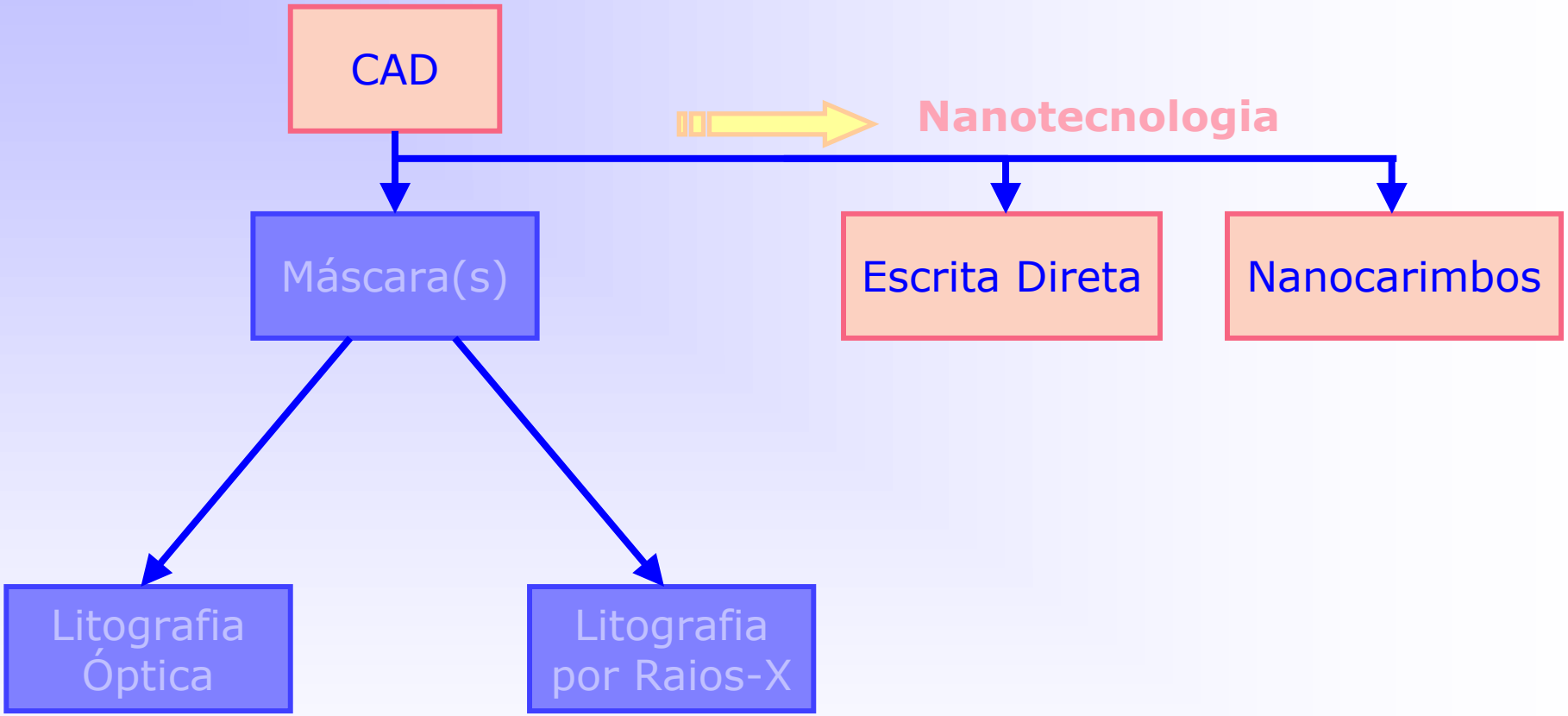


Digital Light Processor! (DLP)

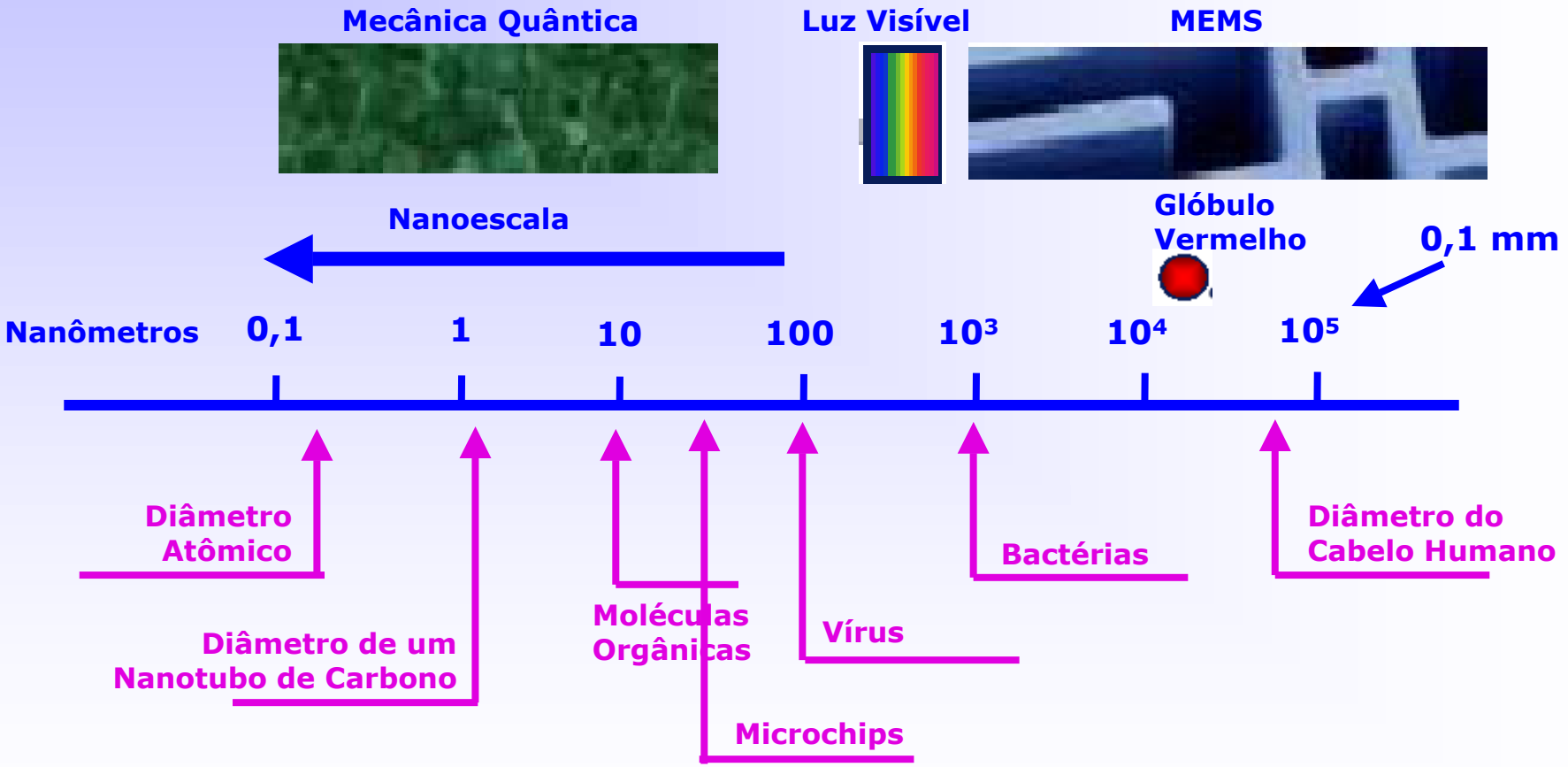
Litografia Top-Down

- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Aplicações

Hoje


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

Onde se situa a Nanotecnologia?



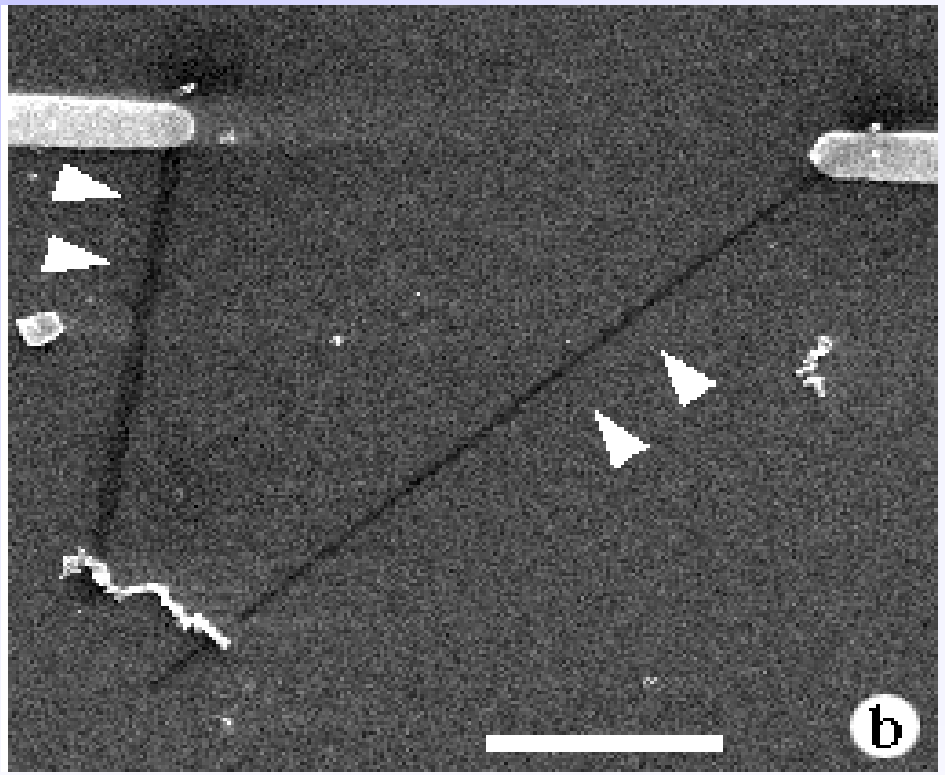
Litografia Top-Down para Nanotecnologia

- Não precisa de 35 níveis
- Não precisa ter a mesma produtividade
- Precisa ter resolução na faixa 10-100nm
- Precisa ter capacidade de alinhamento para apenas 2-3 níveis

Litografia Top-Down para Nanotecnologia

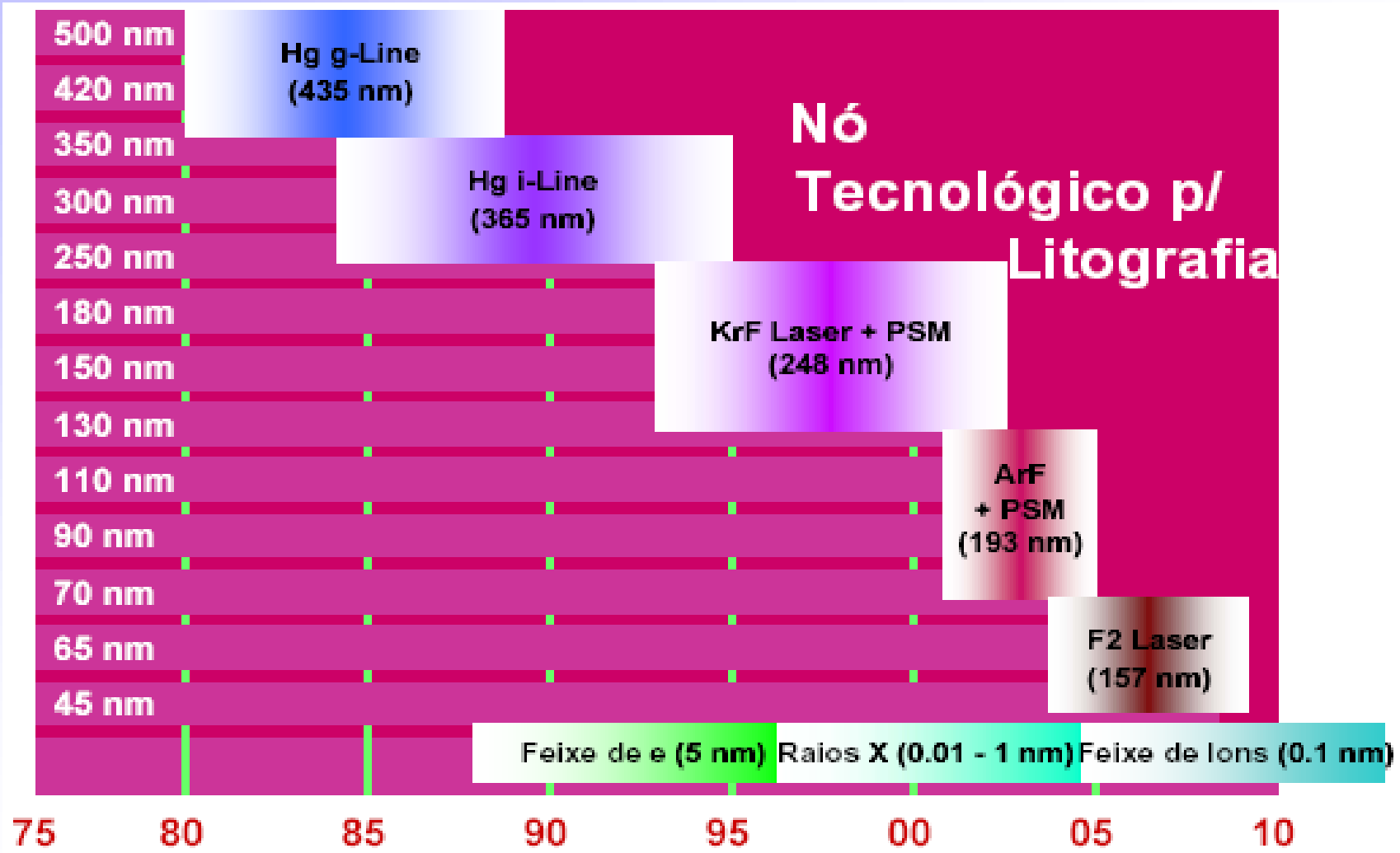
- Em quê ela pode contribuir com estruturas auto-formadas (bottom-up)?
  - Posicionamento em locais pré-definidos
  - Fabricação de estruturas com qualquer geometria (2D-3D)
  - Fabricação de estruturas em qualquer material
  - Possibilita o acesso ao mundo exterior (realizando conexões e nanoconexões)
- Combinada com estruturas auto-formadas cria um enorme potencial inovativo em pesquisa e novos produtos

Nanoconexões



Estruturas protéicas (Microtúbulos) conectadas por nanofios.[10]

Litografia Top-Down para Nanotecnologia

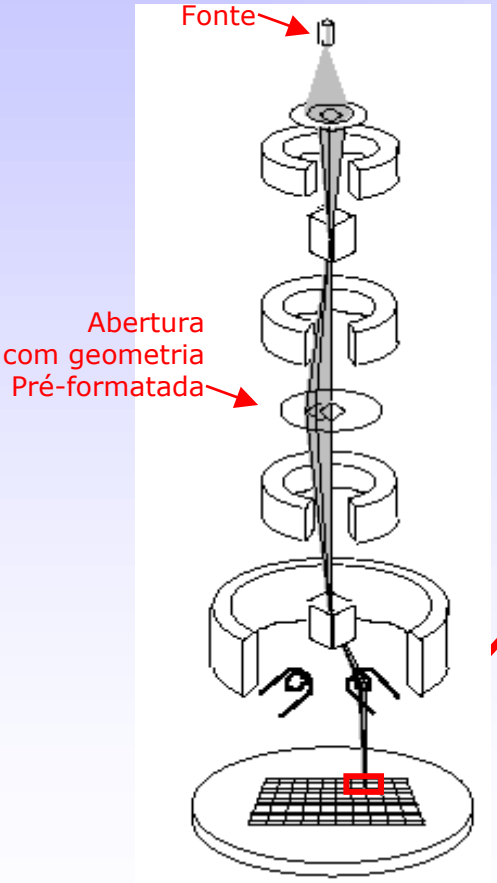


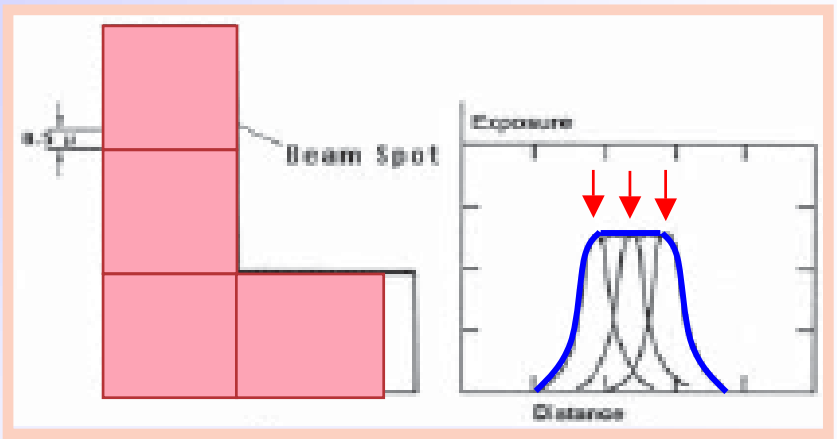
Litografia Top-Down para Nanotecnologia

- Principais técnicas litográficas (top-down) para aplicação em nanotecnologia
  - Feixe de elétrons
  - Raios-X (EUV)
  - Feixe de Íons
  - Holografia
  - Nanoimpressão
  - Varredura de Sonda (SPL ou PPL)
  - Litografia óptica!

Litografia Top-Down para Nanotecnologia

- Litografia por Feixe de Elétrons

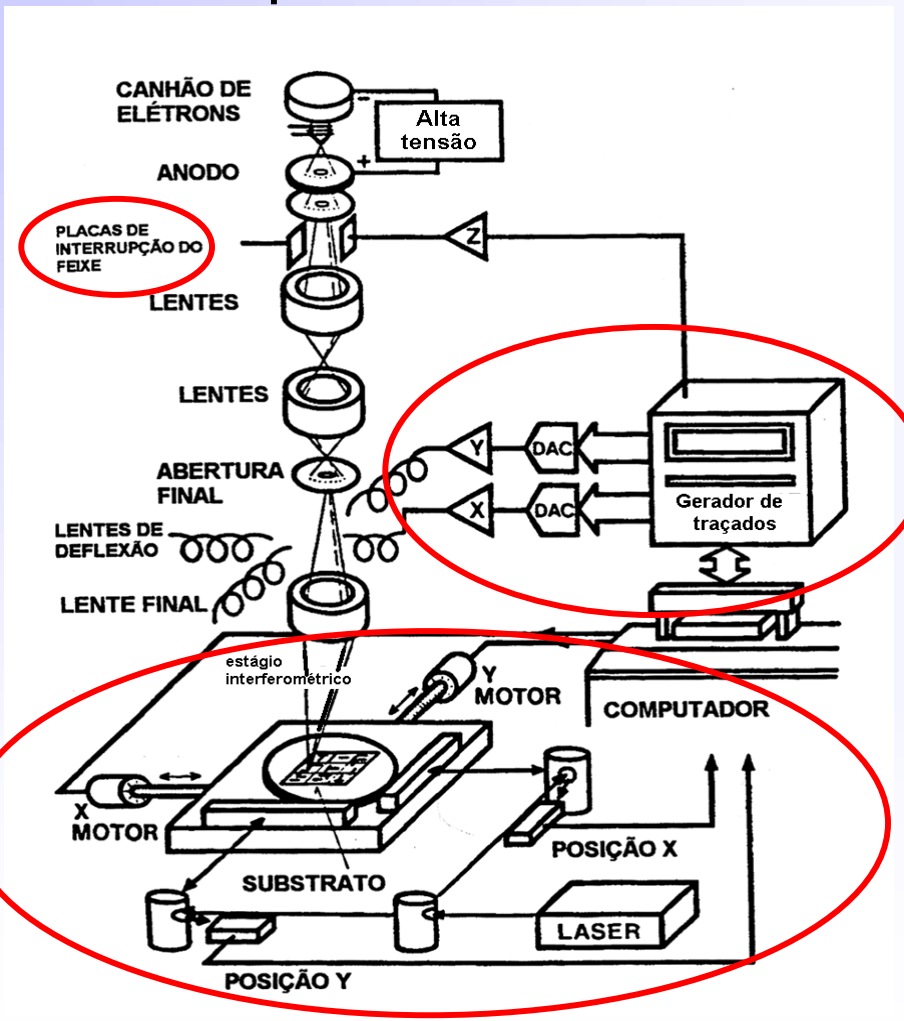




Litografia por feixe de elétrons

- Afinal, é um microscópio eletrônico de varredura?

Eletrostáticas (10-100ns)



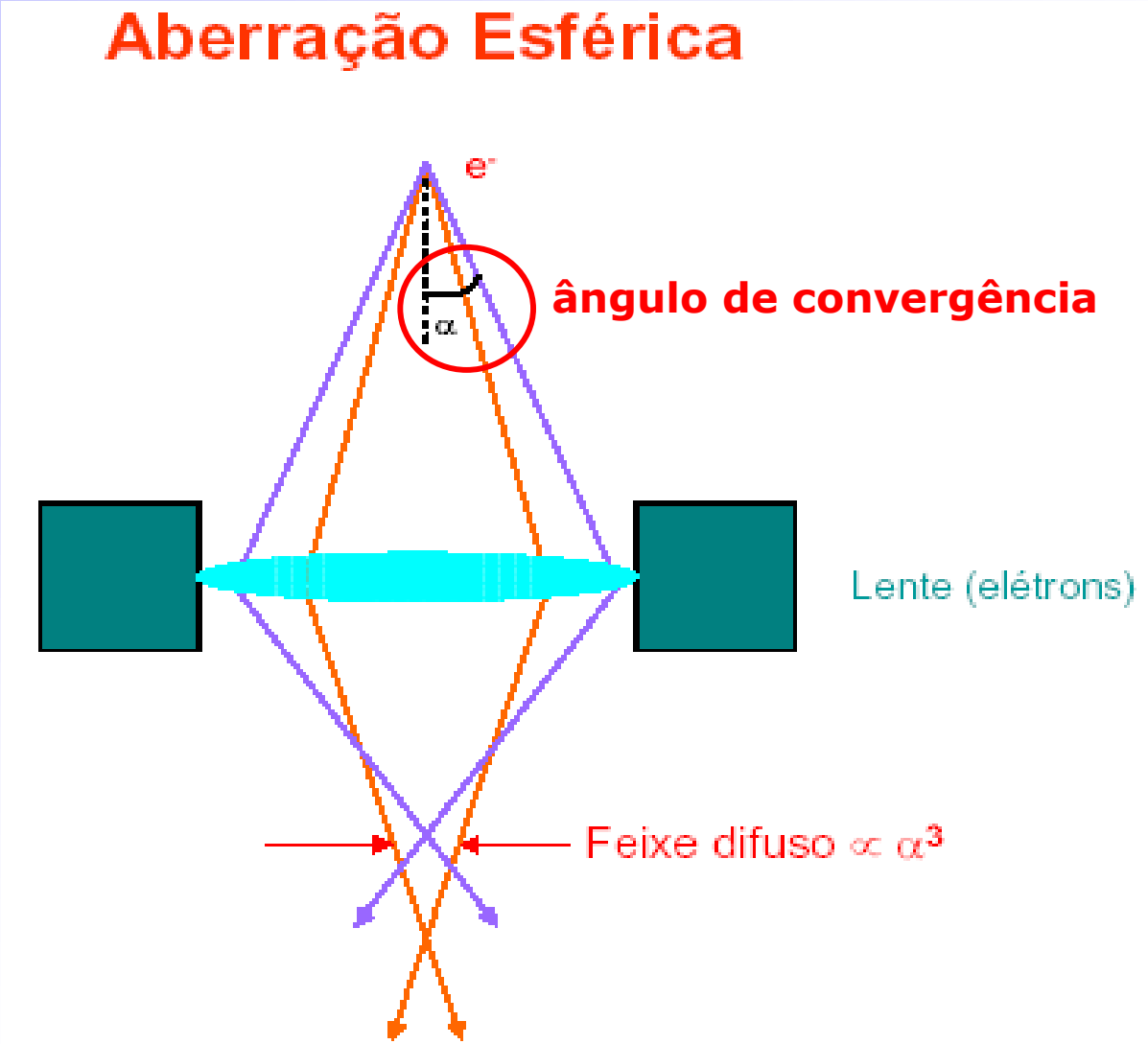
16bits
0,1nm capacidade de endereçamento

4",6",8"
2nm~0,5nm capacidade de posicionamento

Litografia por Feixe de Elétrons

- Difração não limita a resolução
- Resolução depende basicamente do diâmetro do feixe, ~5nm
- Aplicações
  - Escrita direta (inclusive para fabricação de máscaras)
    - Pesquisa
    - Prototipagem
  - Projeção (stepper)
- Limitações
  - Serial, produtividade adequada para pequenas séries e pesquisa
  - Efeito de proximidade
  - Opera em alto vácuo (10^{-6} ~10^{-10} torr)

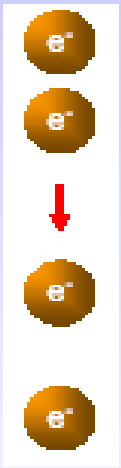
Limitação da Resolução



Limitação da Resolução

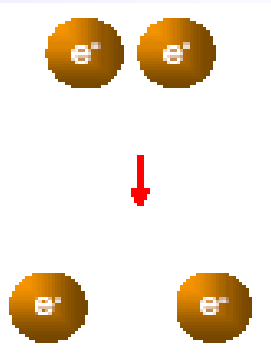
Interação Coulombiana

Efeito Boersch



- **Elétrons repelem-se na direção do feixe**
- **Causa espalhamento de energia dos elétrons**
- **Resulta em aberração cromática**

Efeito Loeffler



- **Elétrons repelem-se ou colidem na direção radial**
- **Causa mudança de trajetória e espalhamento de energia dos elétrons**
- **Resulta em aberração cromática e esférica**

Limitação da Resolução

$$d = \sqrt{d_g^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2}$$

Para aumentar a resolução:

↑M ,↑ V_b ,↓ ΔE , ↓f ...**e** ... α?

$$d_g^2(\textit{fonte virtual}) = \frac{d_v}{M}$$

(d_v = tamanho da fonte, M = desmagnificação)

$$d_s^2(\textit{aberração esférica}) = \frac{1}{2} C_s \alpha^3$$

(C_s = aber. esférica, α = ângulo de conv.)
(C_s α distância focal ↔ distância de trabalho)

$$d_c^2(\textit{aberração cromática}) = C_c \alpha \frac{\Delta E}{V_b}$$

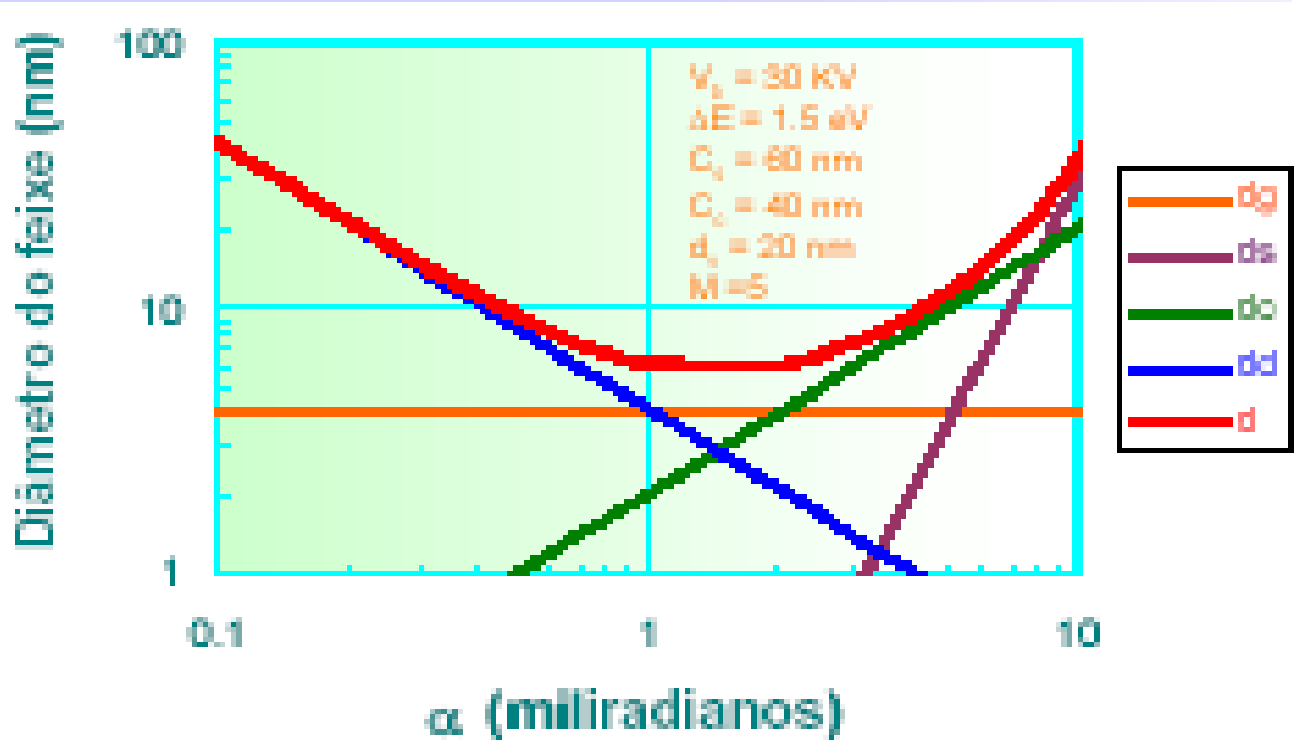
(C_c = aber. cromática, ΔE = esp. de Energia do feixe, V_b = tensão de acel.)

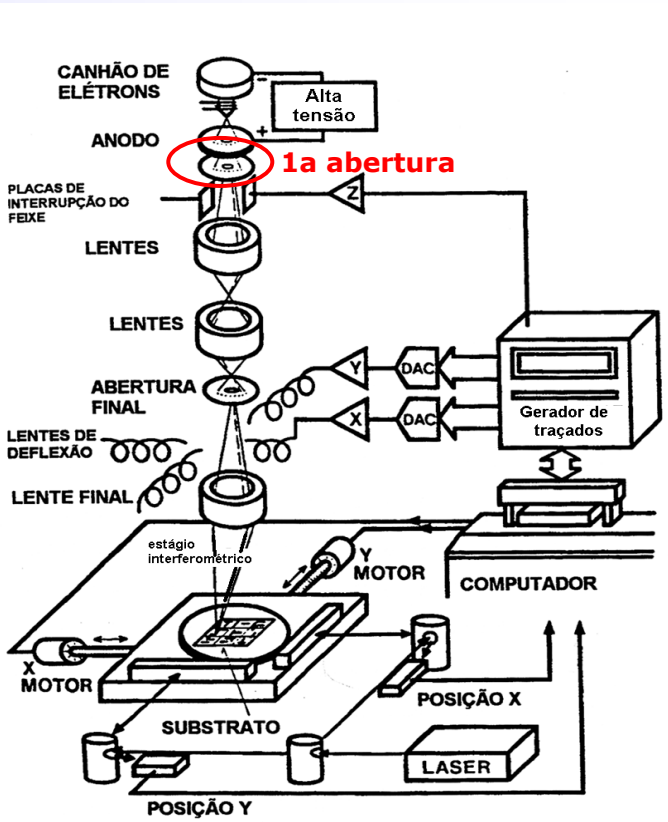
$$d_d^2(\textit{limite de difração}) = 0{,}6\frac{\lambda}{\alpha} \quad \textit{onde } \lambda = \frac{1{,}2}{\sqrt{V_b}}(nm)$$

V_b = 30kV,
λ = 0,08nm

Limitação da Resolução

Resolução vs Ângulo de Convergência (Abertura)





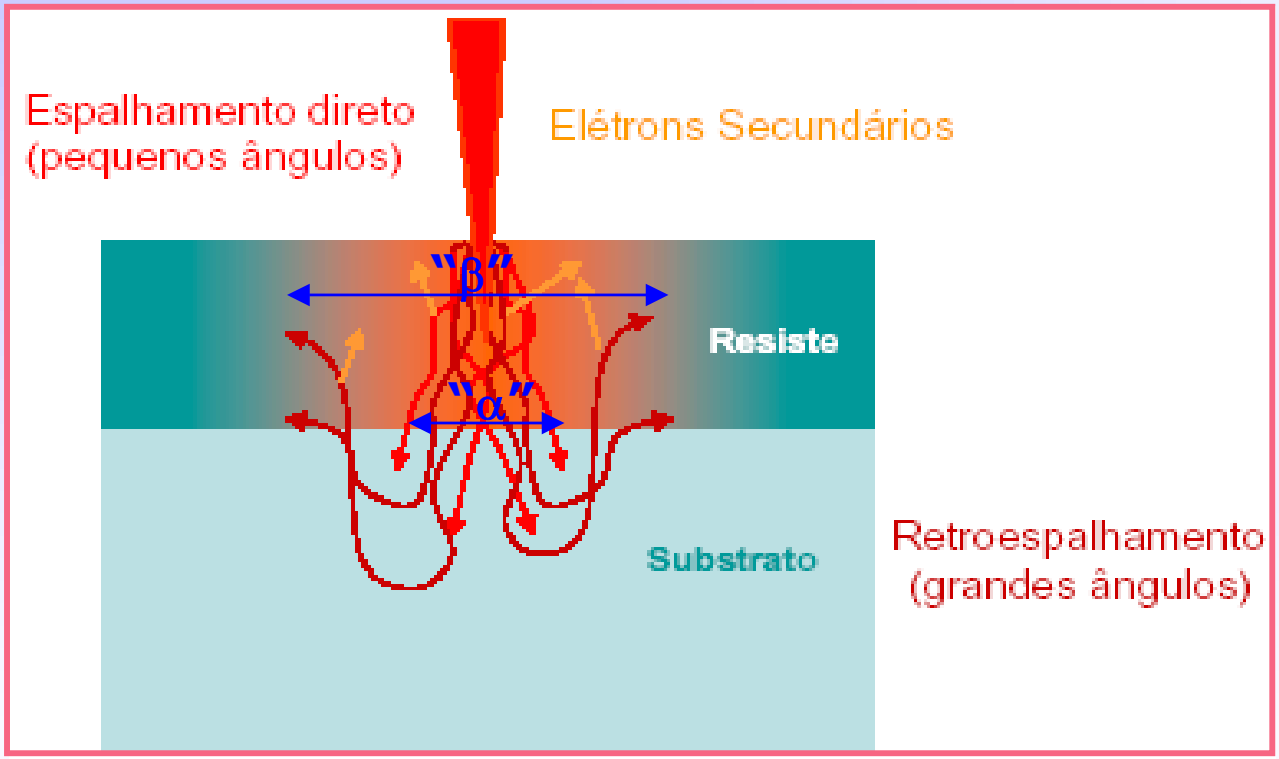
Fonte de Elétrons

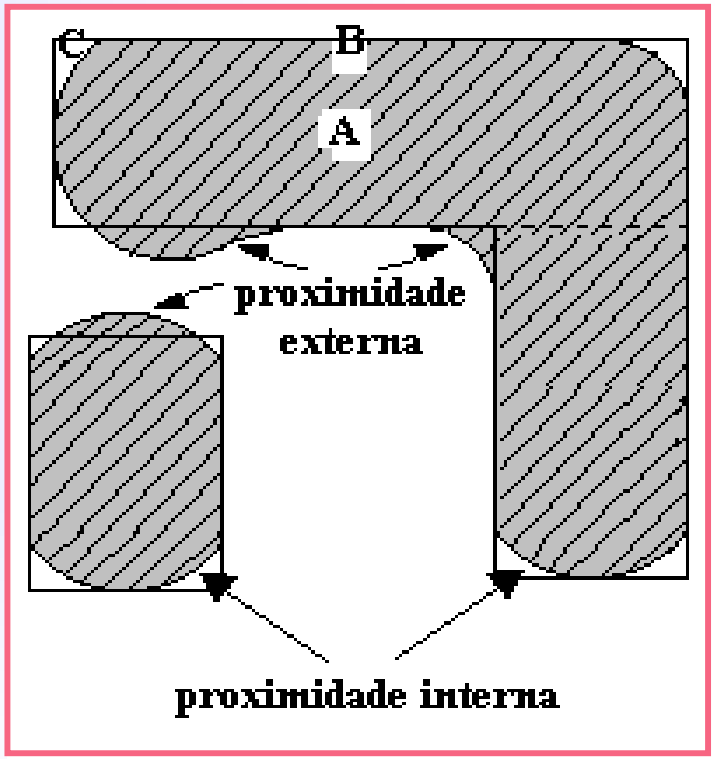
Emissão Termoiônica					
Princípio de operação	Material	Brilho (B) ($A/cm^2/Sr$)	Espalhamento de energia (eV)	Temperatura do Filamento	Vácuo na Fonte (torr)
Emissão de Elétrons a Alta Temp.	W	~ 10^5	2 - 3	~ 3000K	10^{-5} - 10^{-6}
	LaB_6	~ 10^6	2 - 3	2000 – 3000K	10^{-7} - 10^{-8}

Emissão por Campo					
Princípio de Operação	Material	Brilho (B) (A/cm2Sr)	Espalhamento de Energia (eV)	Temperatura do Filamento	Vácuo na Fonte (torr)
Electron Tunneling in High field	W	$10^9 – 10^{10}$	0.2 – 0.5	Ambiente	< 10^{-9}

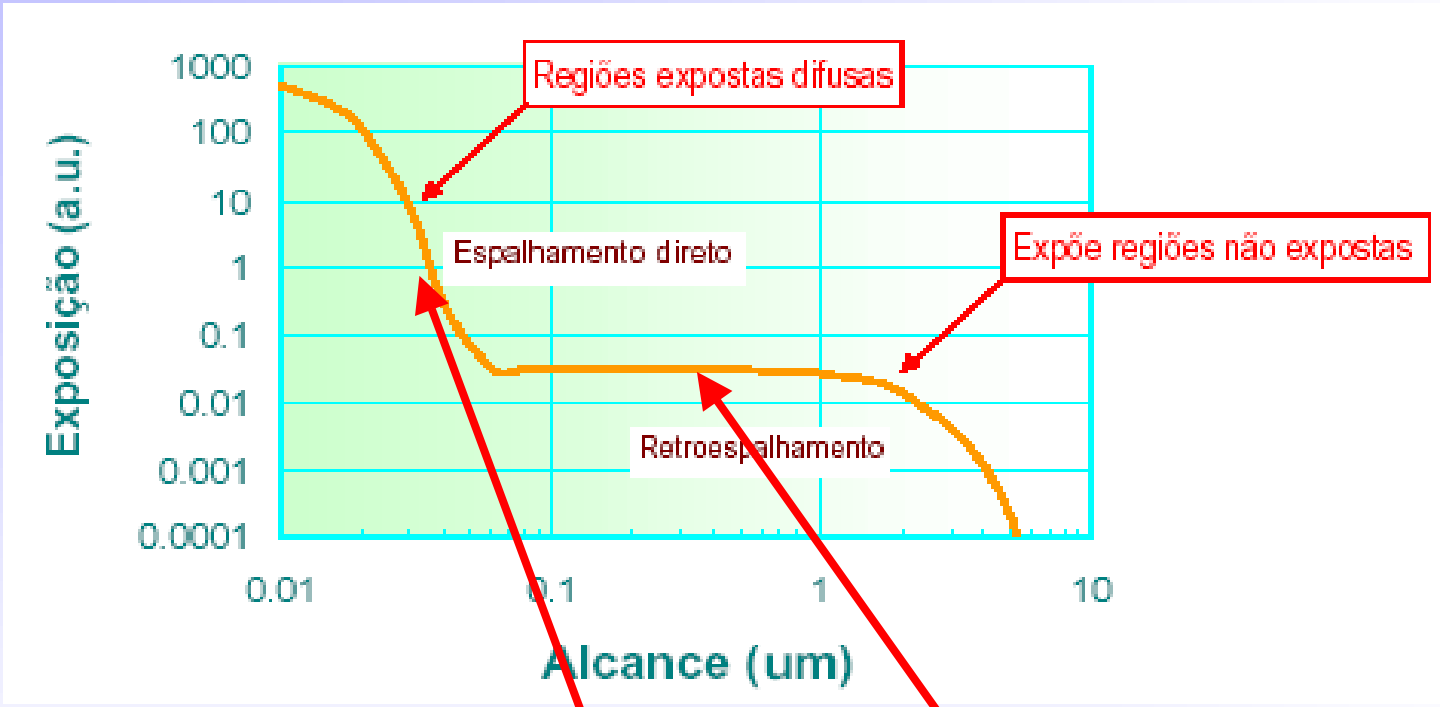
Efeito de Proximidade

Espalhamento de Elétrons no Resiste e no Substrato





Efeito de Proximidade



Pode ser modelado por uma dupla gaussiana:

$$I(r) = \frac{1}{(1+\eta)}\left(\frac{1}{\pi\alpha^2}e^{-r^2/\alpha^2} + \frac{\eta}{\pi\beta^2}e^{-r^2/\beta^2}\right)$$

Em geral uma matriz de 50.000 x 50.000 pontos

Efeito de Proximidade

- **Substrato de Silício e resiste PMMA de 0,5 μm de espessura**

  η = 0.75 (independente da energia do feixe)

  keV = 11 / 15 / 20 / 25 / 30 / 35
  β= 0.9 / 1.4 / 2.2 / 2.8 / 4.0 / 5.8

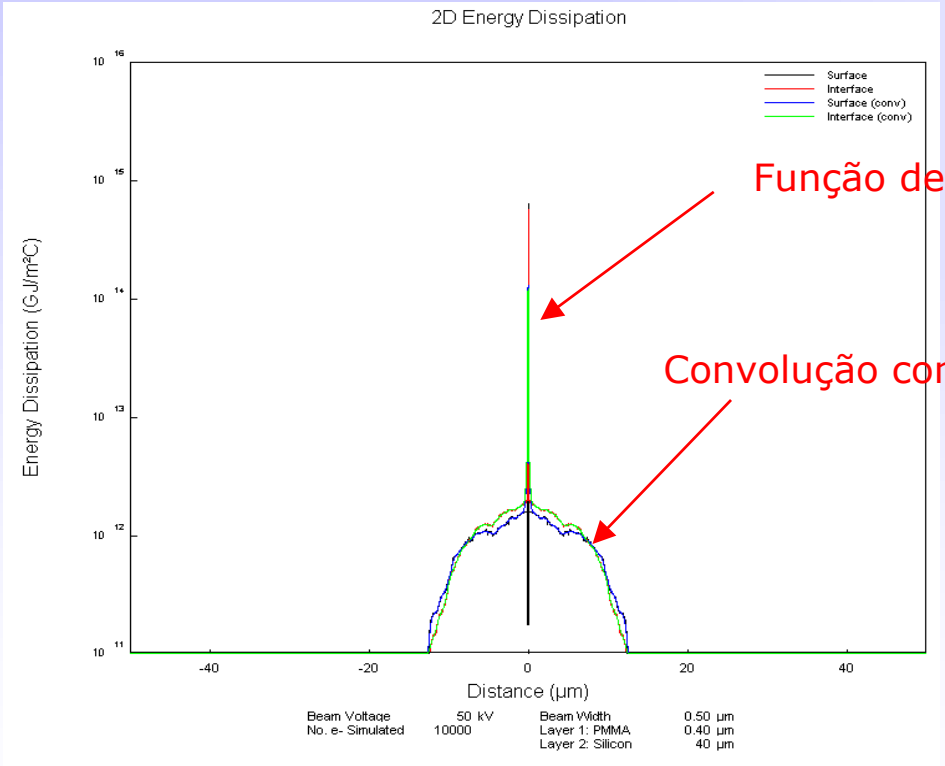
- **Substrato de GaAs e resiste PMMA de 0,5 μm de espessura**

  η = 1.4 (independente da energia do feixe)

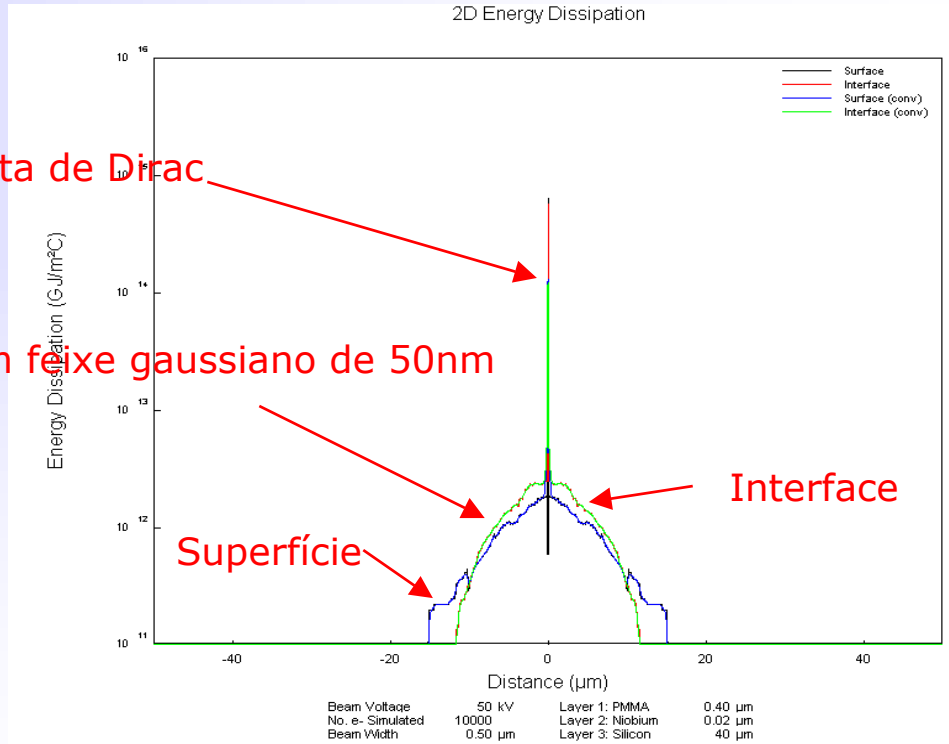
  keV = 15 / 20 / 25 / 30 / 35 / 39
  β= 0.7 / 1.0 / 1.3 / 1.8 / 2.2 / 2.6

Distribuição de Energia Considerando o Efeito de Proximidade

PMMA = 400nm
Si = 40μm

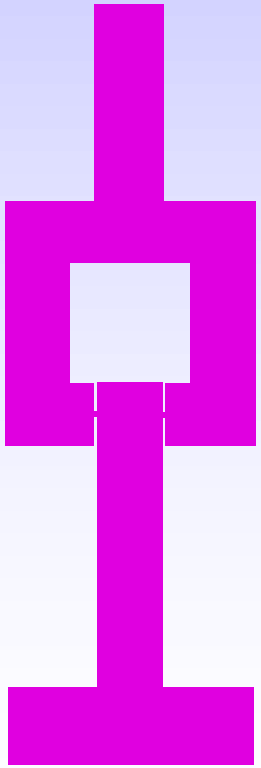


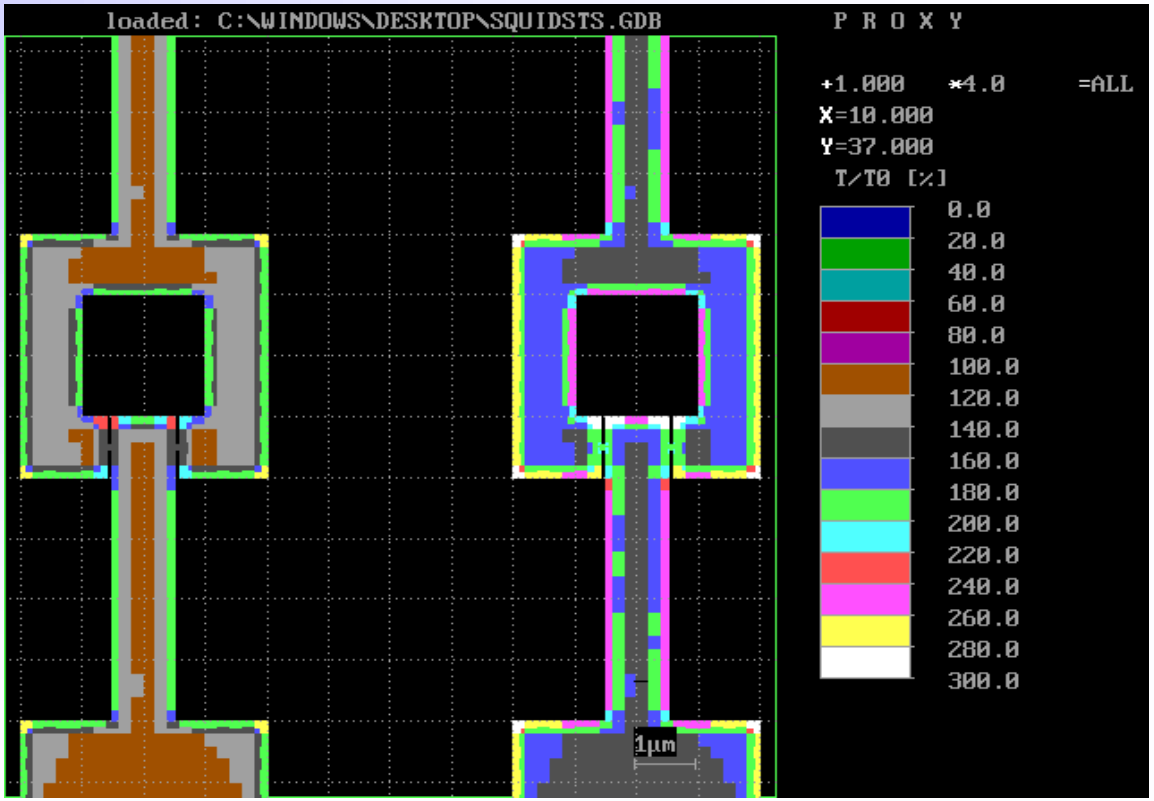
PMMA = 400nm
Nb = 20nm
Si = 40μm



Efeito de Proximidade

- Parâmetros de Efeito de Proximidade:
  - α, β, γ





Estratégias para minimizar o efeito de proximidade

- Utilize resistes finos
- Utilize substratos finos
- Ajuste a tensão de aceleração
- Divida a geometria em sub-estruturas com doses diferentes

Litografia por feixe de elétrons

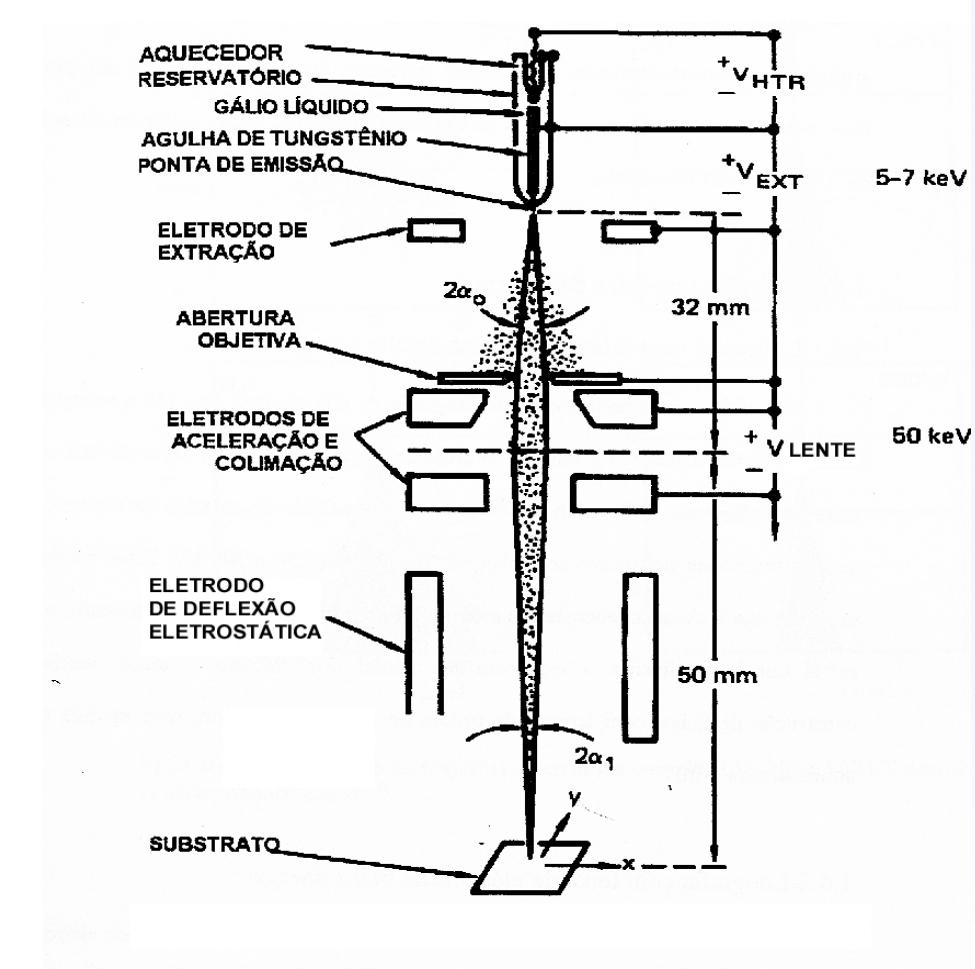
Specification

- Direct Writing and SEM system
- Thermal assisted field emission
- Resolution:
  - 2 nm @ 20 KeV
  - 2 nm @ 1.0 KeV
- Column voltage range:
  - 200 – 30KV
- Resolution of laser interferometer register: 2 nm
- Maximum wafer size: 4"
- Writing speed: 10MHz
- Load locked



Litografia por Feixe de Ions

- Como LFE, LFI pode ser utilizada para escrita direta



Litografia por Feixe de Ions

- Características principais
  - Menos sujeita à retroespalhamento (massas maiores)
  - Resistes para LFI são mais sensíveis
  - Maiores energias que LFE

  ➡ Melhor resolução e produtividade

- Dificuldades
  - Fontes de íons menos confiáveis
  - Mais difícil de focalizar
  - Menor profundidade de penetração (30nm ~ 500nm)
  - Implantador Iônico de baixa energia!

Litografia por Holografia

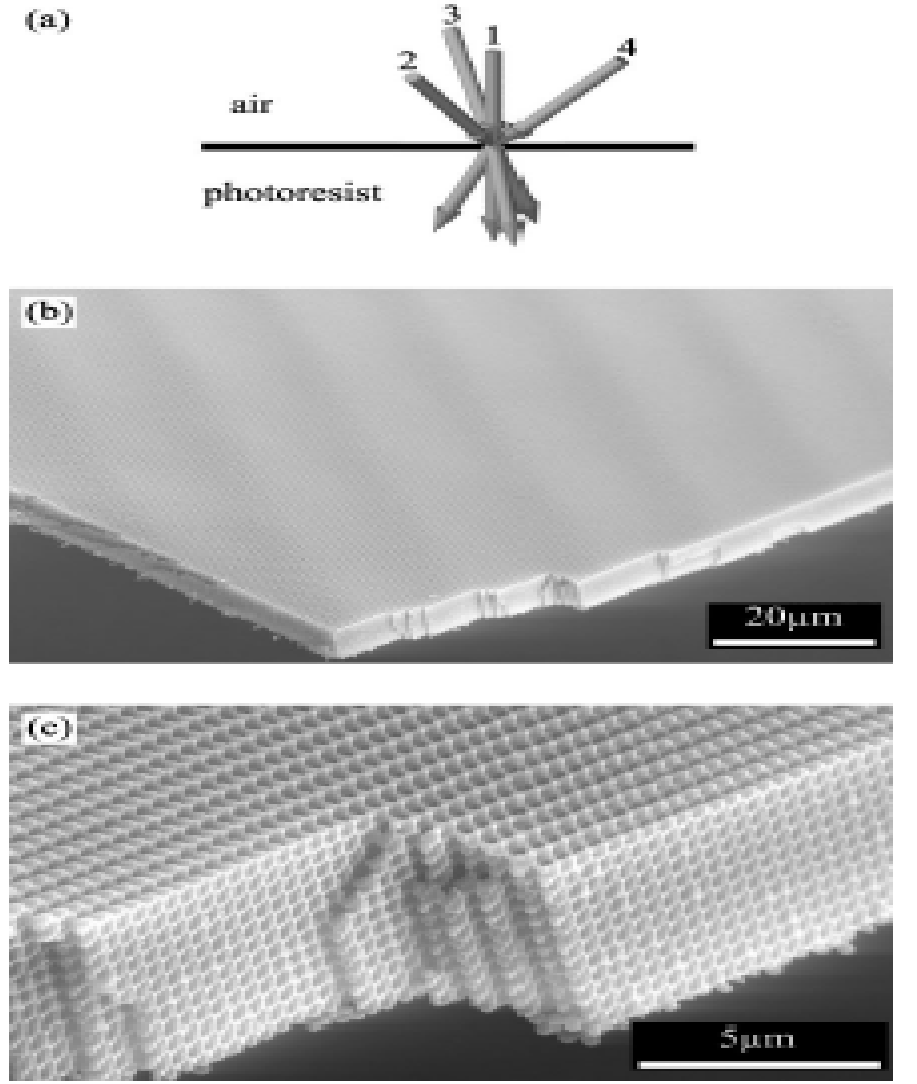
- Aplicação imediata em cristais fotônicos (Scheneider, 2004)

• Redes fabricadas em filmes de Al
• Posição relativa das três redes para gerar o padrão de interferência

• Exposição laser Nd:YAG (355nm)

• Estruturas (4×10^8) resultantes no resiste sobre a superfície
(LFE = 25×10^8)

• Excelente resolução e profundidade de foco

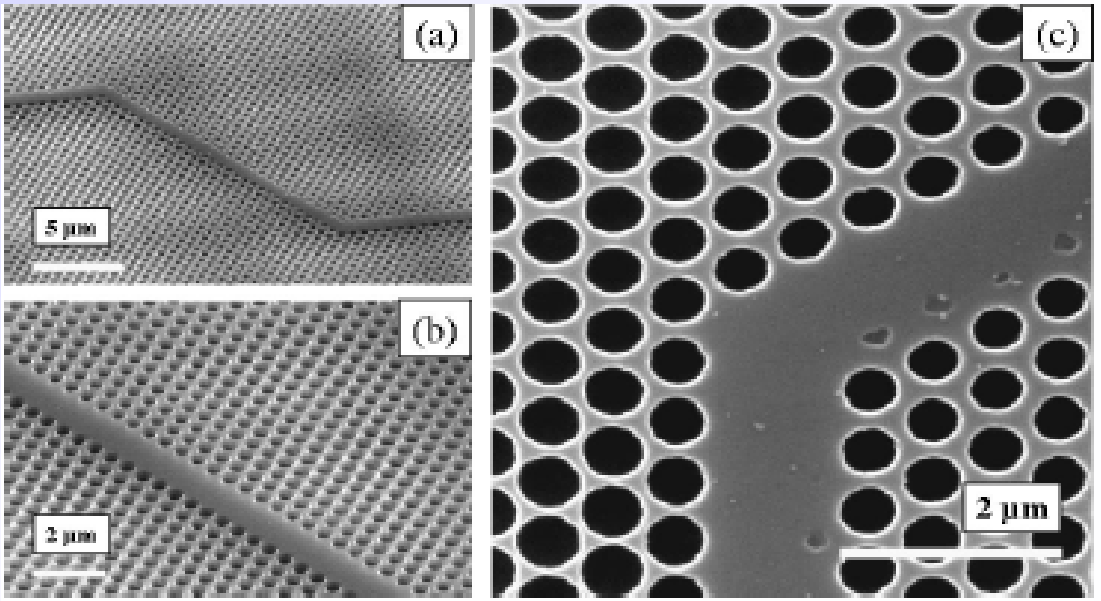


Litografia por Holografia

- Combinação com litografia por feixe de elétrons...

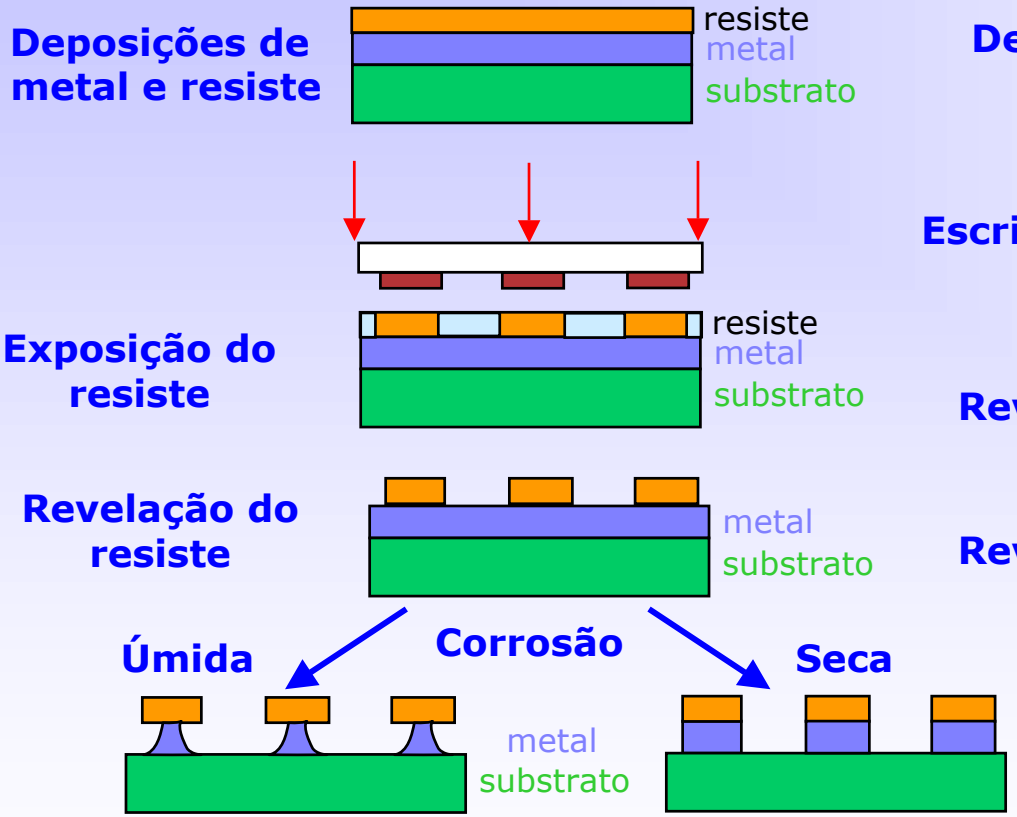
•Adicionar estruturas com geometrias específicas

•Guias de Onda
•Ressonadores

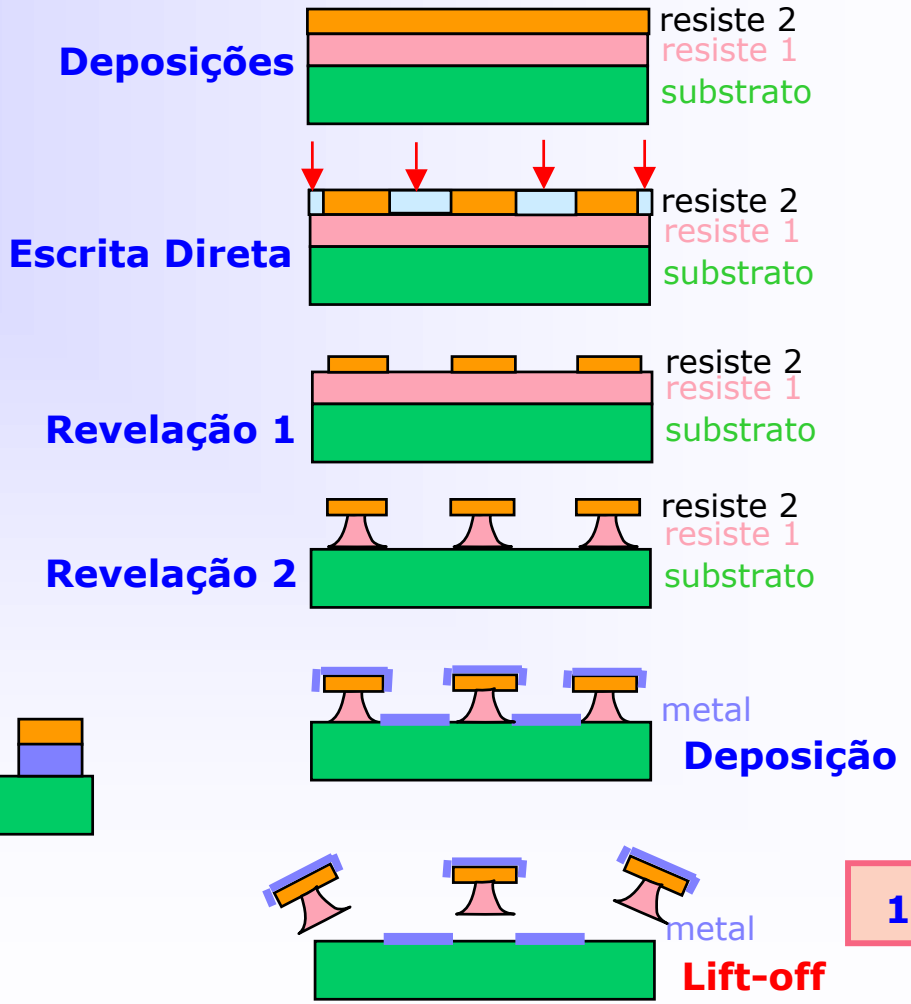


Lift-off

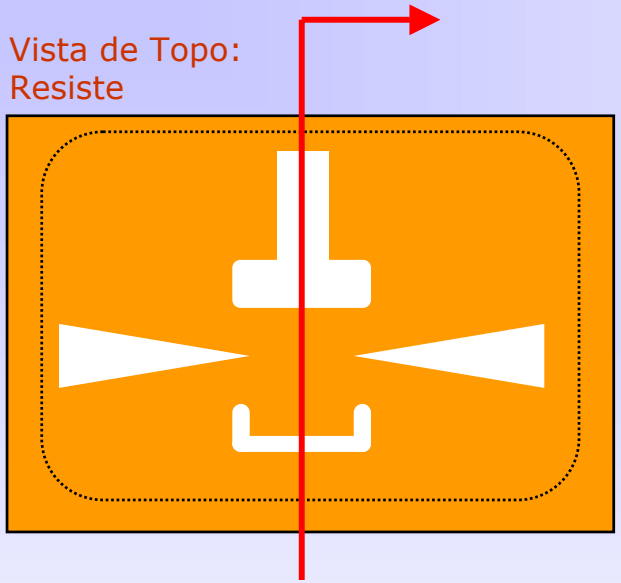
- Processo Tradicional

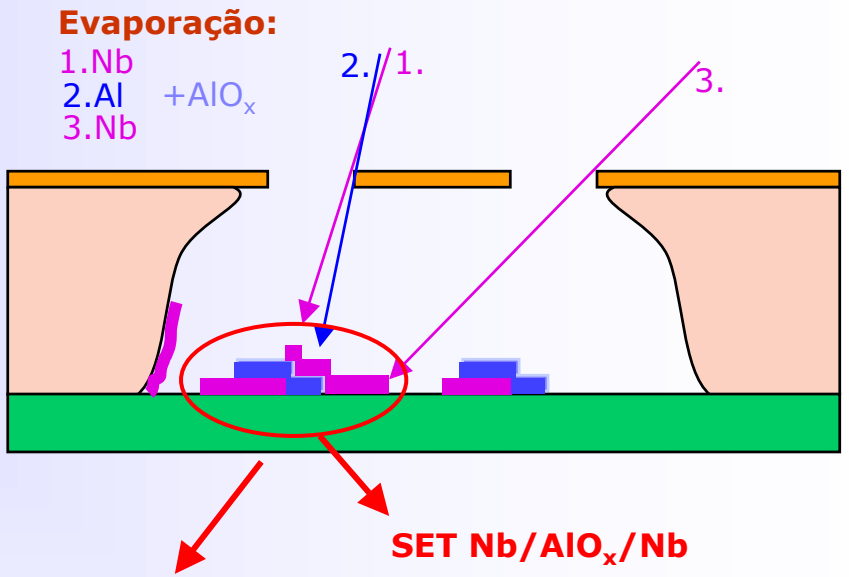


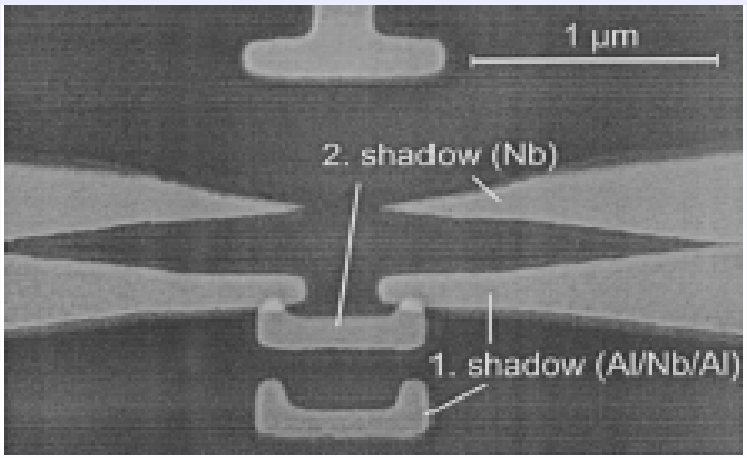
- Lift-off



Lift-off e evaporação inclinada (com sombras)





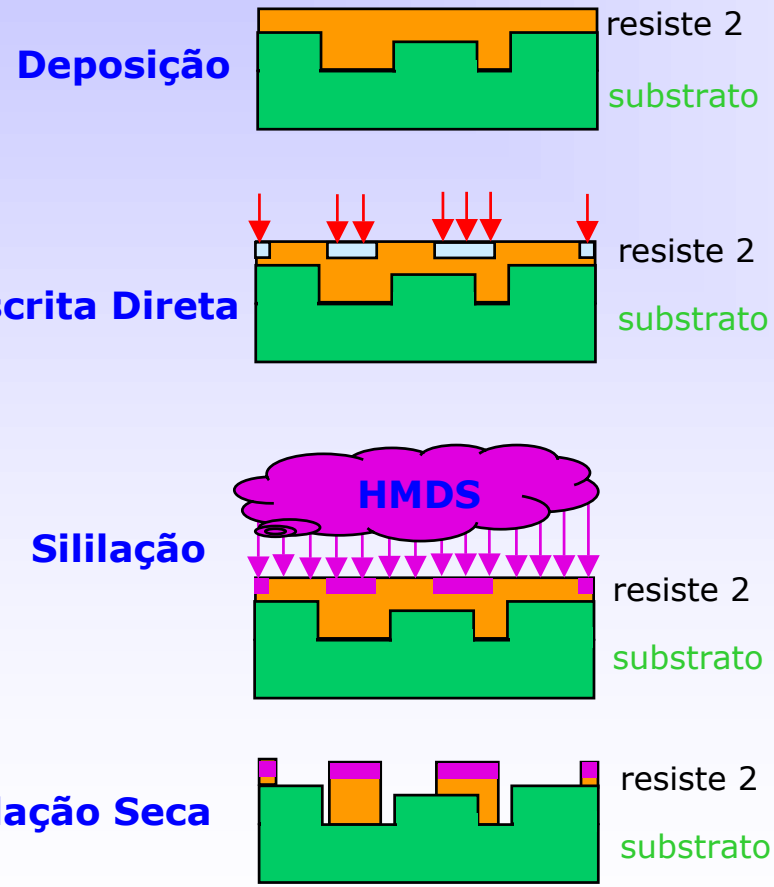


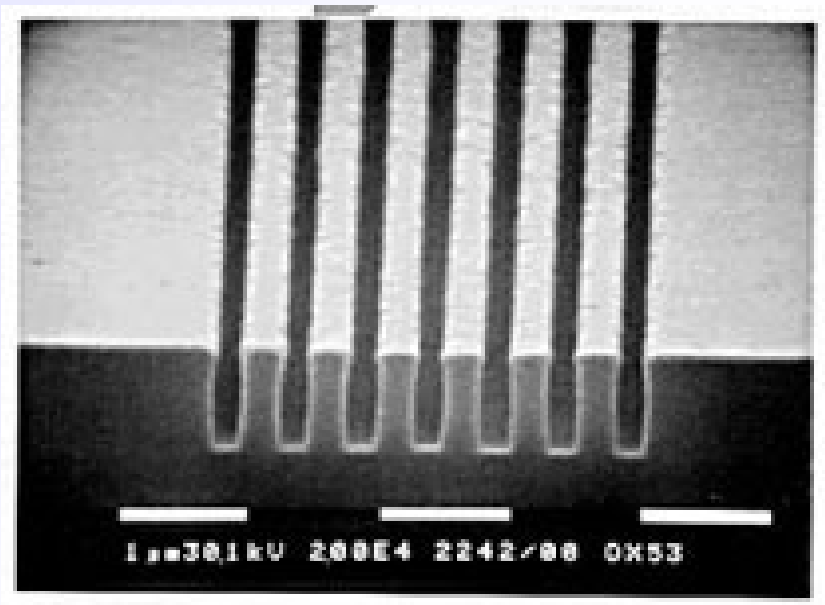
$$Resolução = 0,61\, l / q$$

$$DOF = l\, M^2 / 2q^2$$

Processos de Máscara Embutida (BIM)

- **Sililação**



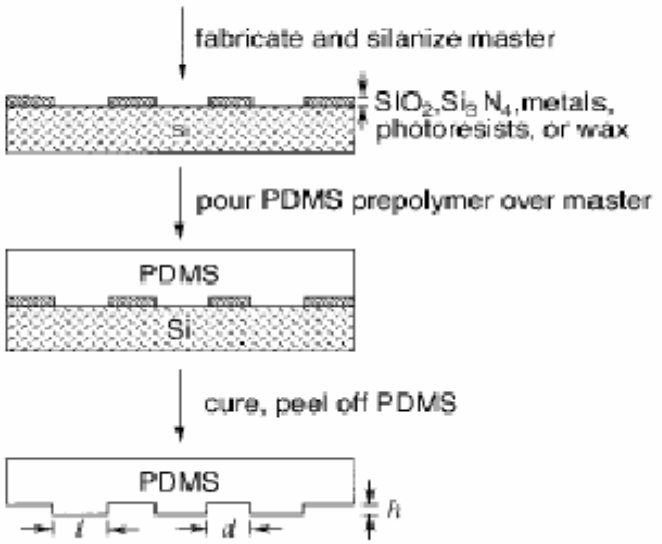


Nanoimpressão (nanocarimbos)

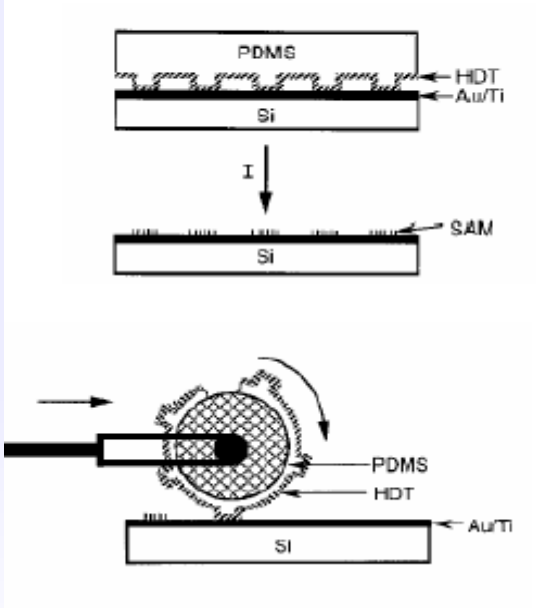
- Nanoimpressão é um tipo de impressão por contato onde as geometrias são geradas por deformação/transformação física ao invés de reações fotoquímicas
- Potencial
  - Produtividade
  - Resolução
- Dificuldades
  - Defeitos
  - Pouca capacidade de alinhamento

Nanoimpressão por Microcontato

Produção do Molde/Estampo



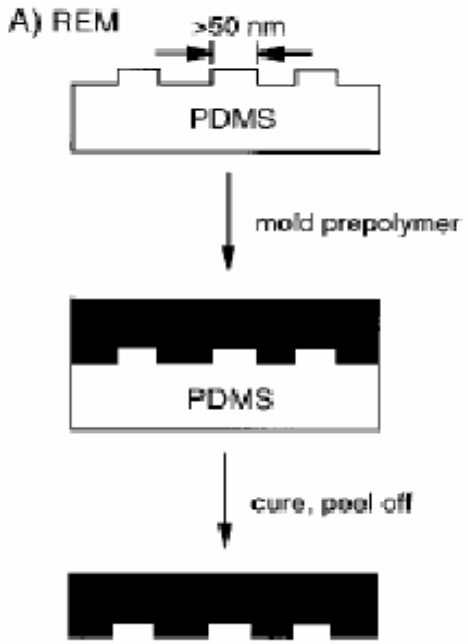
Impressão por Microcontato (μCP)



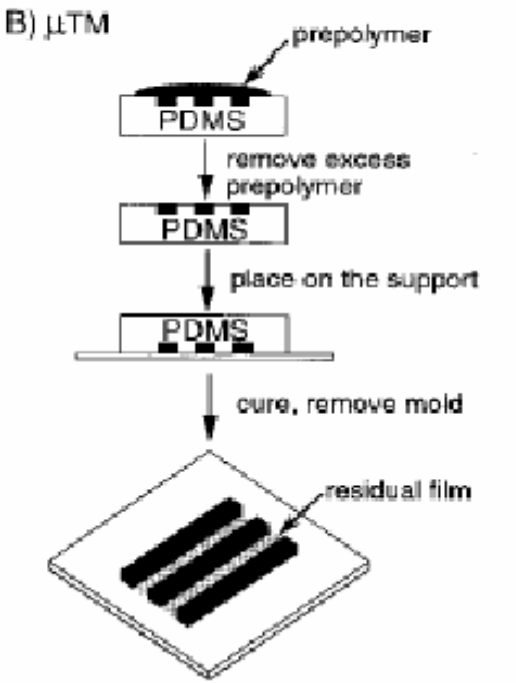
PDMS – Poly(DiMethylSiloxana) SAM – Monocamada Autoorganizada HDT – HexaDecanoThiol

Nanoimpressão por Microcontato

Moldagem de Réplicas

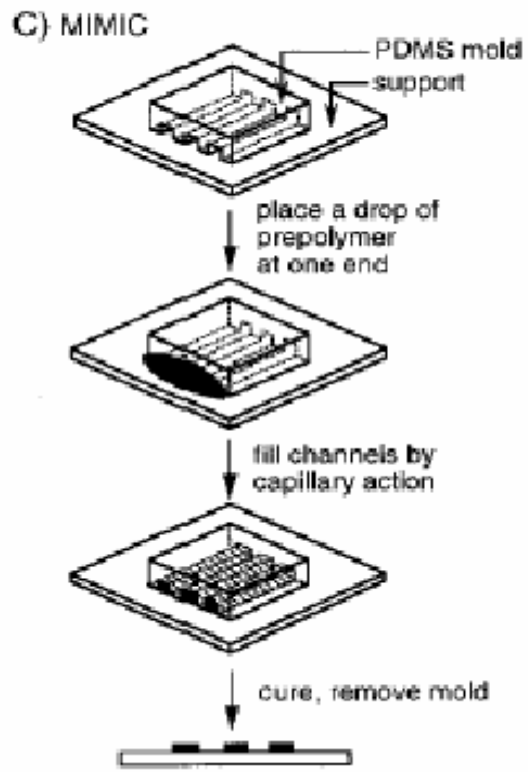


Moldagem por Microtransferência

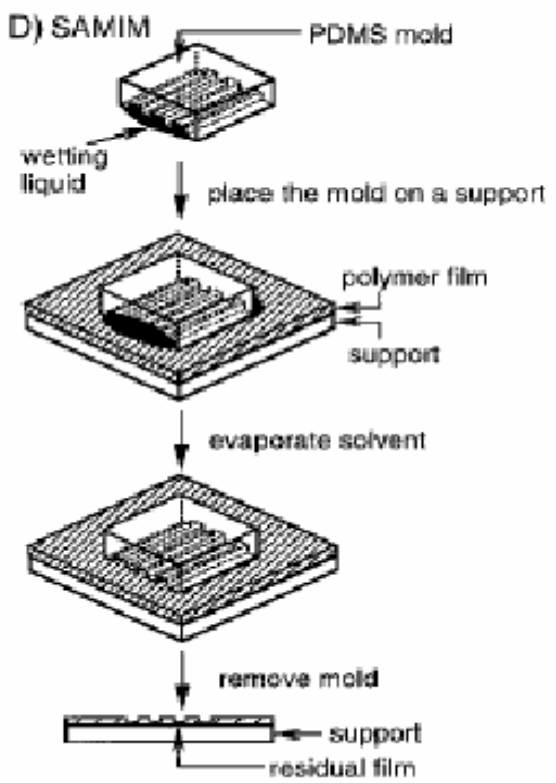


Nanoimpressão por Microcontato

Micromoldagem Capilar

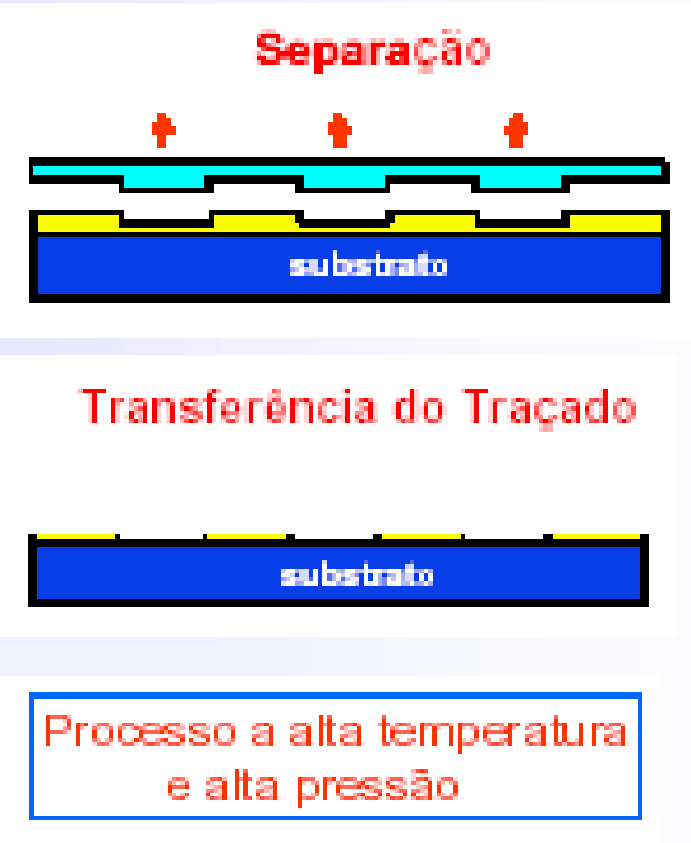


Micromoldagem assistida por Solvente



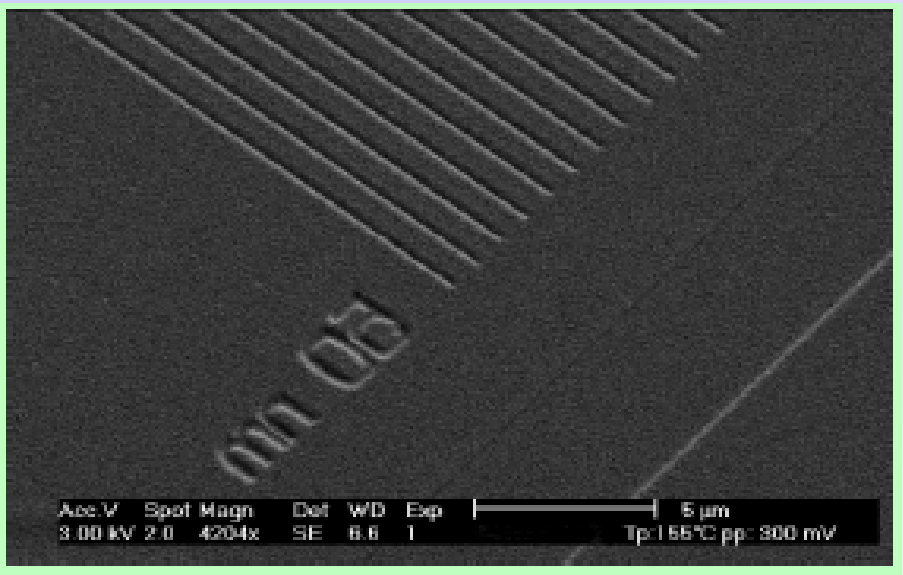
Litografia por Nanoimpressão (NIL)



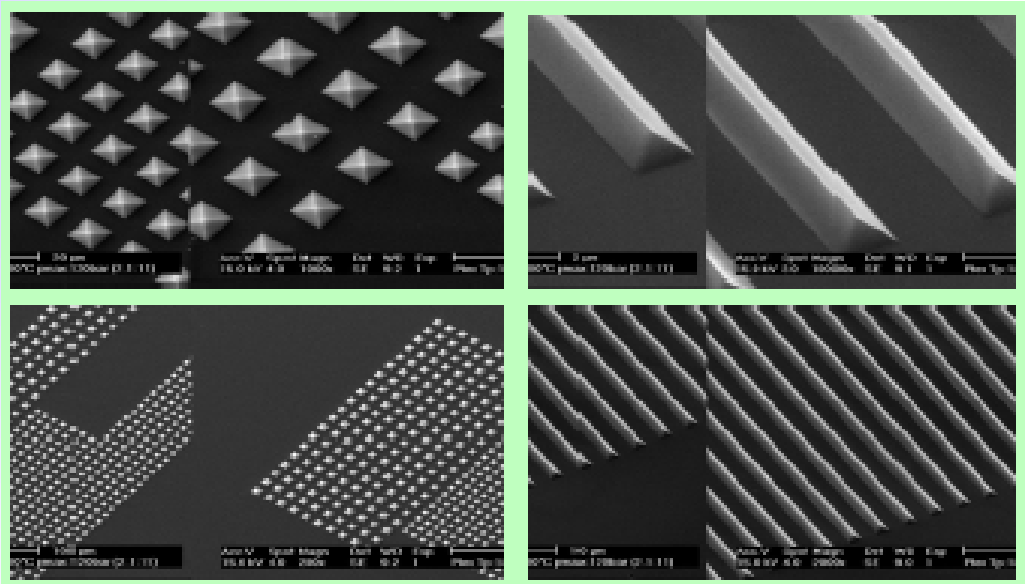


Resultados por Nanoimpressão

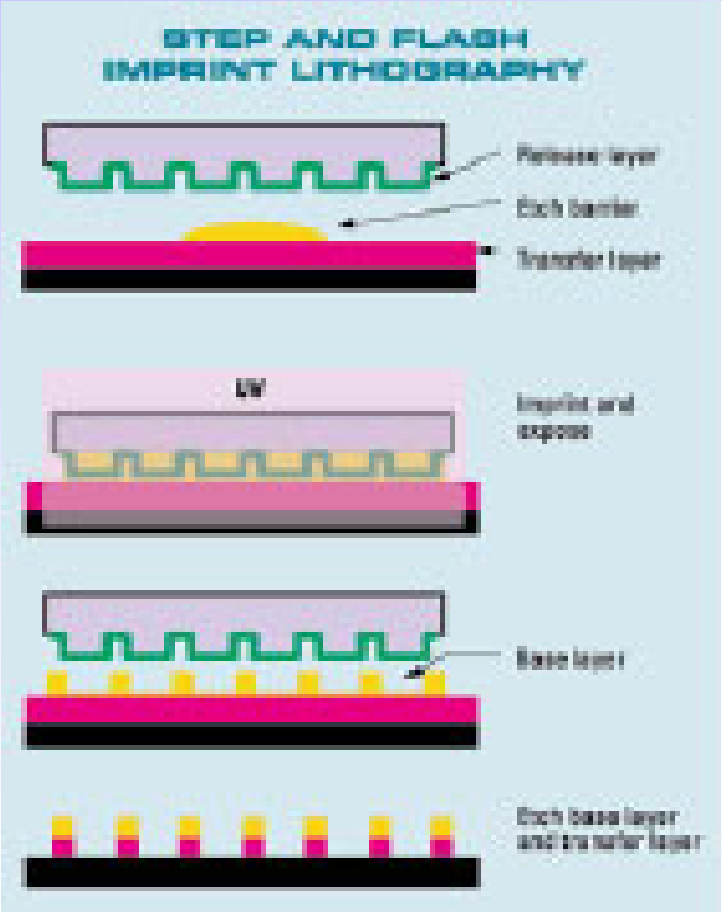
Linhas de 50nm



Estruturas 3D



Litografia de Impressão por Passo e Flash (SFIL)

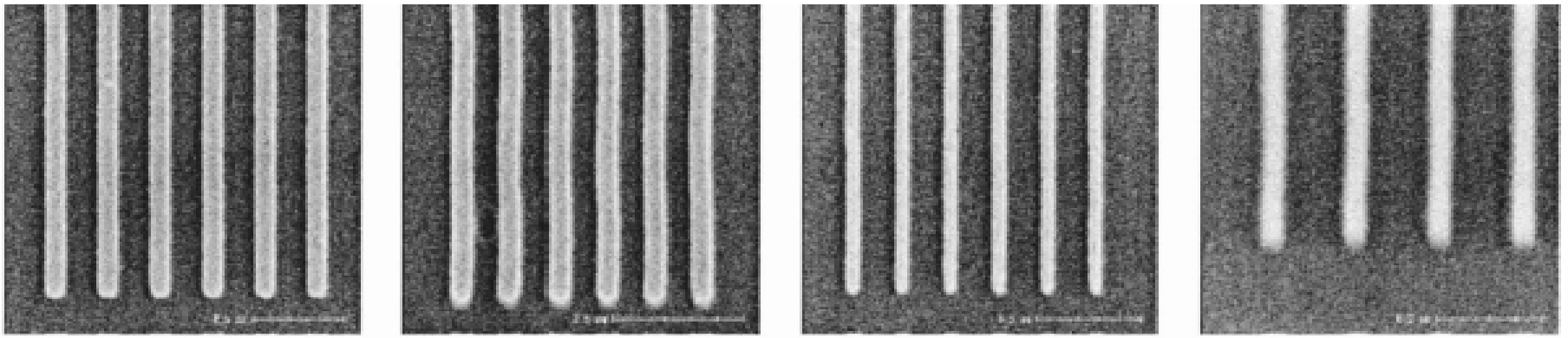


Processo a baixa pressão e baixa temperatura

Nanoimpressão

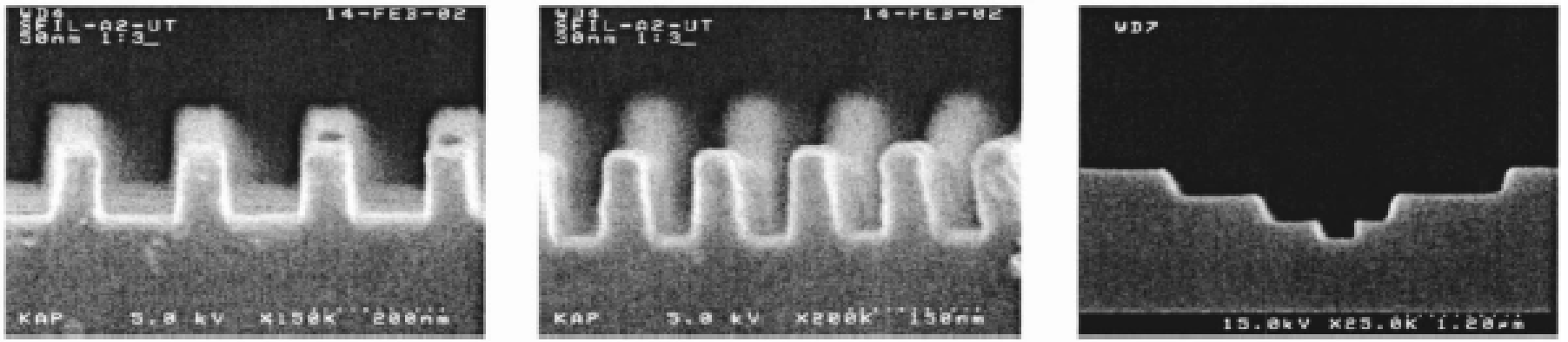
SFIL (Resnick, 2003)

a



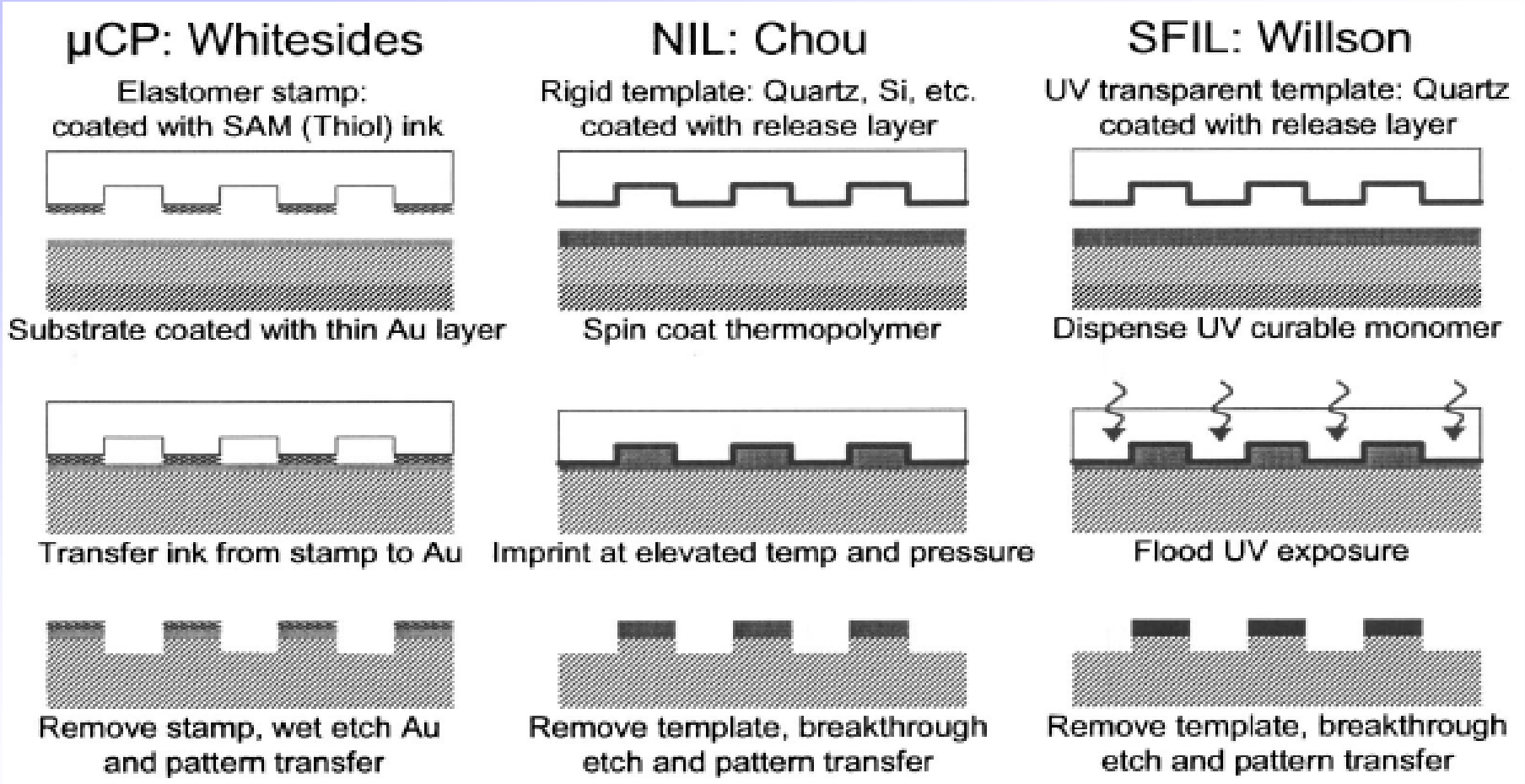
80 nm 60 nm 30 nm 20 nm

b



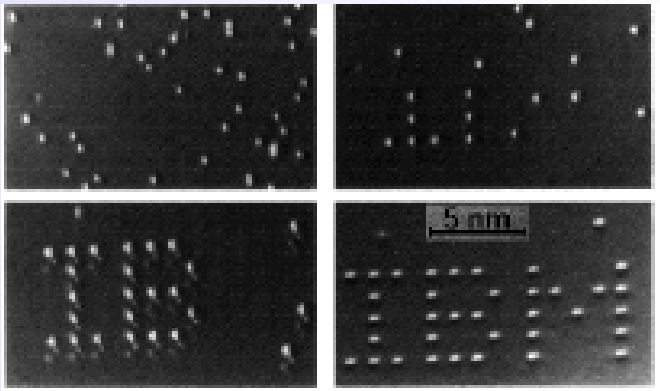
50 nm 30 nm three-tiered structure

As três Técnicas Principais de Nanoimpressão

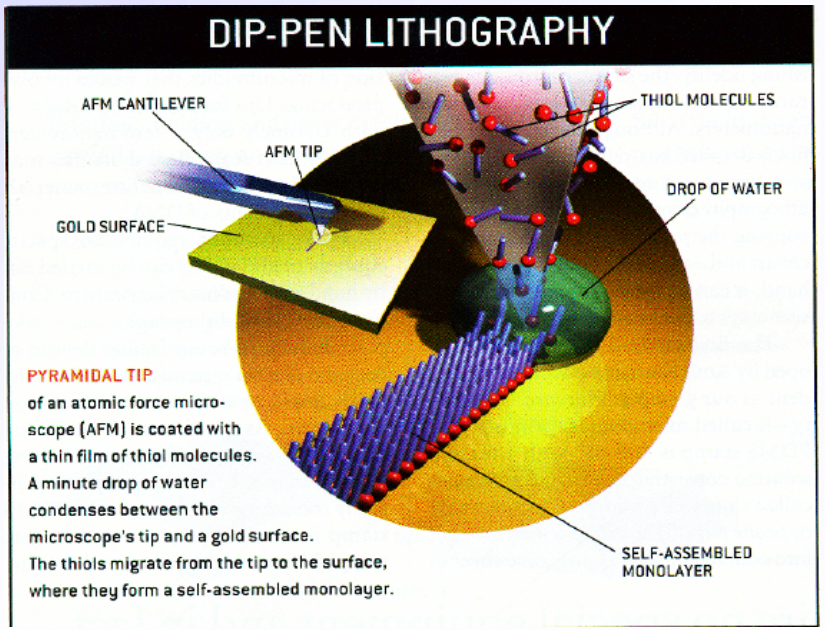


Litografia por Varredura de Sonda

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



(Mirkin, 1999)



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
  - IME-Rio
  - USP
  - DEMA-UFSC
  - UFMG
  - UFPE

No Brasil

- Nanocarimbos e Nanoimpressão
  - Gerar o carimbo!
  - Litografia por peixe de elétrons
  - Estamos (LSI-USP) em estágio inicial
    - Aquisição de materiais, elaboração de projetos
  - Desconheço outros grupos

Litografia Top-Down

- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
  - Litografia por Feixe de Elétrons
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Aplicações

No Temático Fapesp

- Explorar novas aplicações para:
  - Estudo de fenômenos básicos (mecanismos de transporte em nanoestruturas, etc)
  - Reduzir as dimensões até agora alcançadas
    - Acredito que isso possa ser feito em conjunto
  - Nanodeposição?

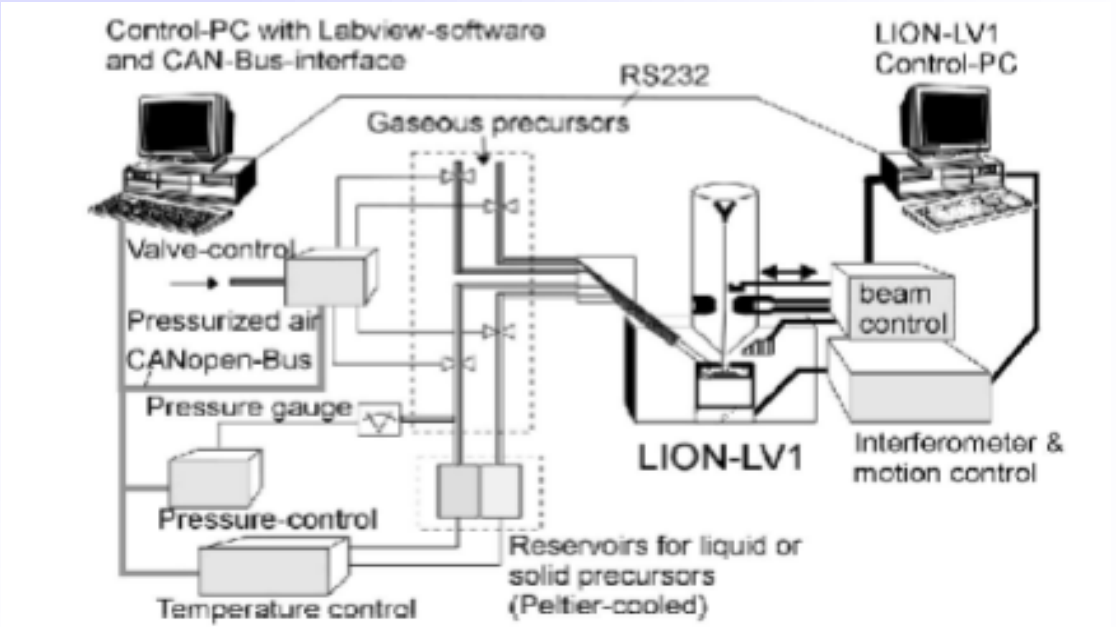


Fig. 2. Schematic of the vapour manifold integrated into the lithography system.

No Temático Fapesp

- Aplicações

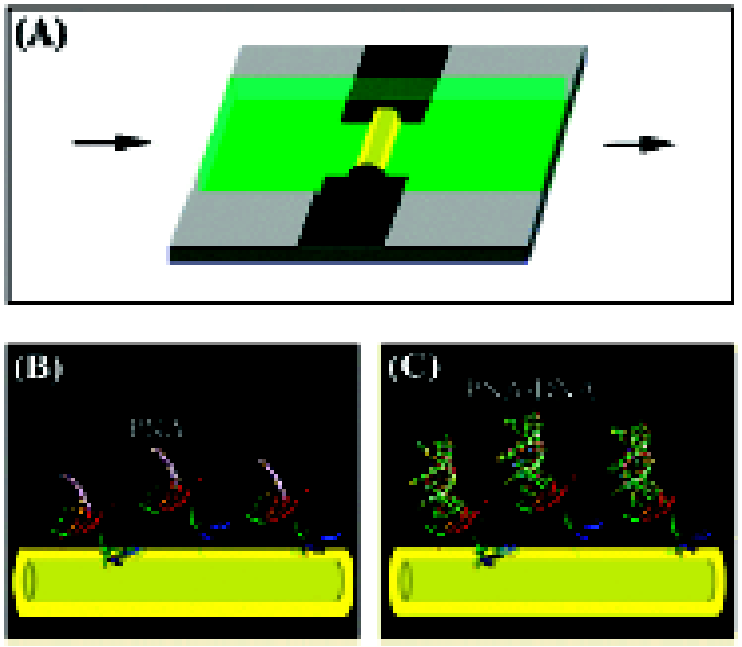


Figure 1. (A) Schematic of a sensor device consisting of a SiNW (yellow) and a microfluidic channel (green), where the arrows indicate the direction of sample flow. (B) The SiNW surface with PNA receptor. (C) PNA–DNA duplex formation.

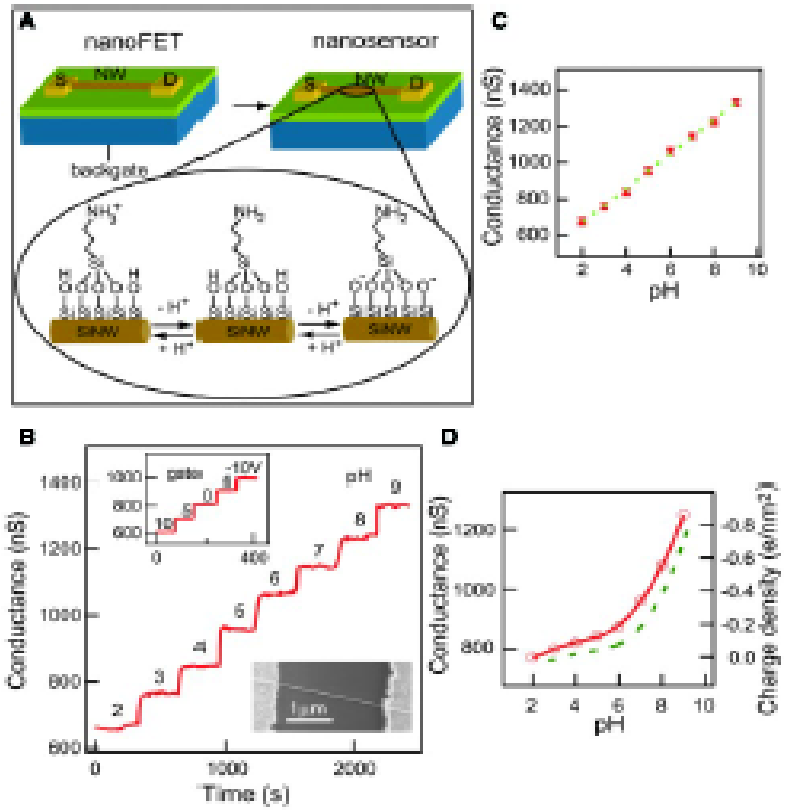


Fig. 1. NW nanosensor for pH detection. (**A**) Schematic illustrating the conversion of a NW FET into NW nanosensors for pH sensing. The NW is contacted with two electrodes, a source (S) and drain (D), for measuring conductance. Zoom of the APTES-modified SiNW surface illustrating changes in the surface charge state with pH. (**B**) Real-time detection of the conductance for an APTES-modified SiNW for pHs from 2 to 9; the pH values are indicated on the conductance plot. (Inset, top) Plot of the time-dependent conductance of a SiNW FET as a function of the back-gate voltage. (Inset, bottom) Field-emission scanning electron microscopy image of a typical SiNW device. (**C**) Plot of the conductance versus pH; the red points (error bars equal ± 1 SD) are experimental data, and the dashed green line is linear fit through this data. (**D**) The conductance of unmodified SiNW (red) versus pH. The dashed green curve is a plot of the surface charge density for silica as a function of pH. [Adapted from (*19*)]

No Temático Fapesp

- Aplicações

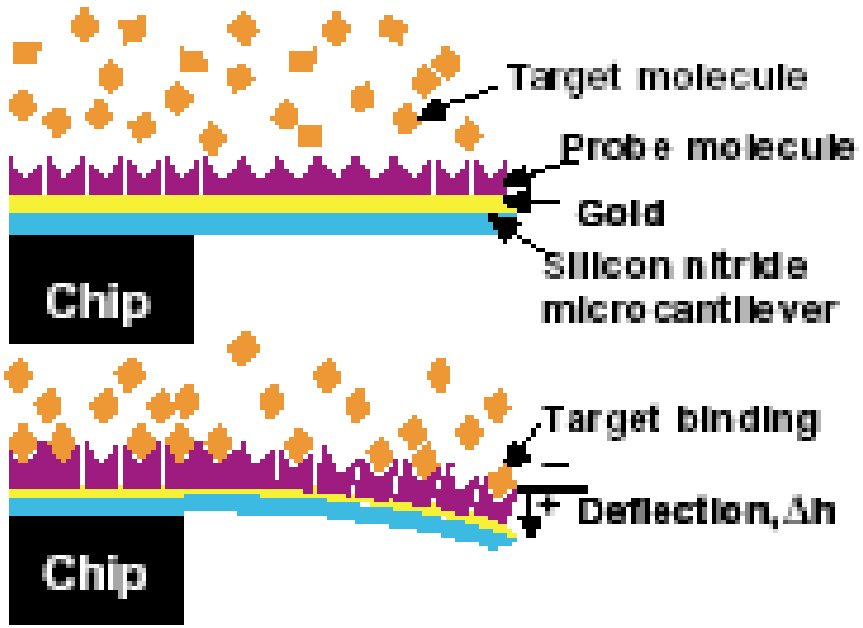


Figure 1. Diagram of interactions between target and probe molecules on cantilever beam. Specific biomolecular interactions between target and probe molecules alter the intermolecular nanomechanical interactions within a self-assembled monolayer on one side of a cantilever beam. This can produce a sufficiently large force to bend the cantilever beam and generate motion.

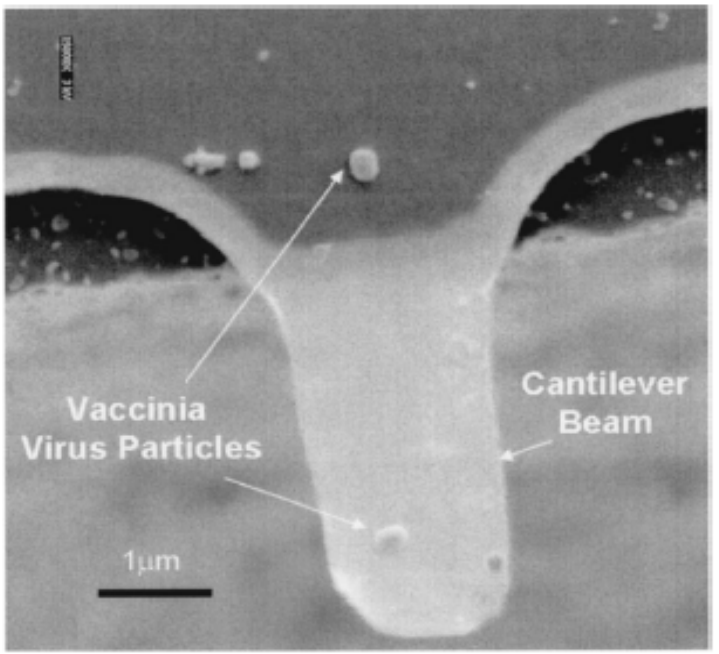
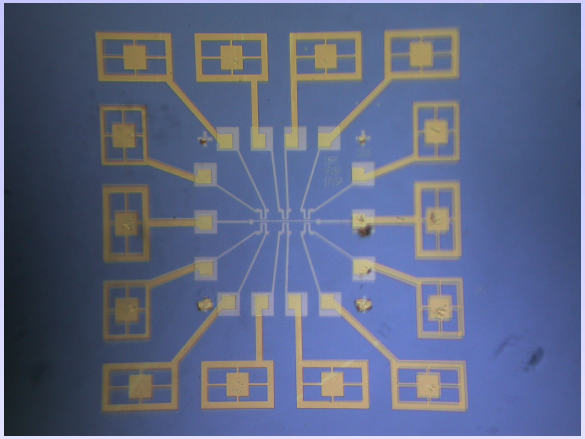
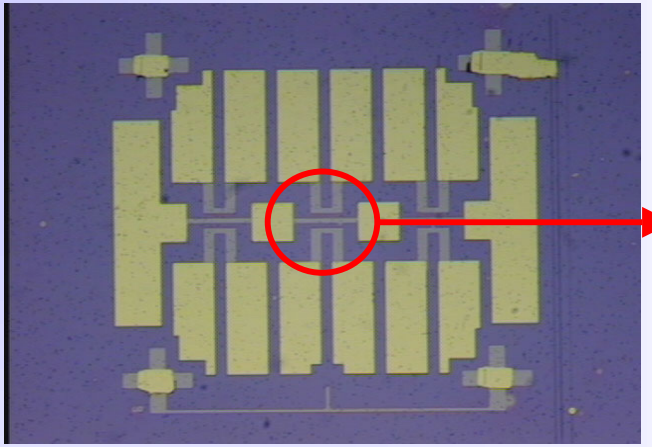
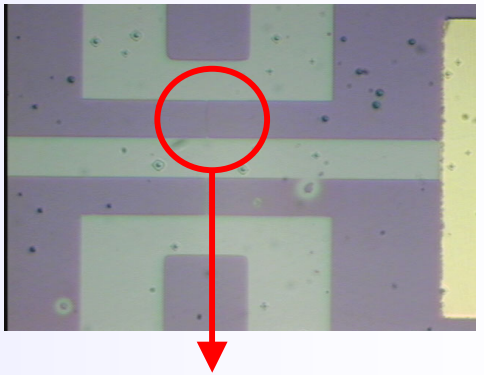


FIG. 2. Scanning electron micrograph (SEM) showing a cantilever beam with a single vaccinia virus particle. The cantilever beam has plan dimensions of length, $L = 4\ \mu$m, and width, $W = 1.8\ \mu$m.

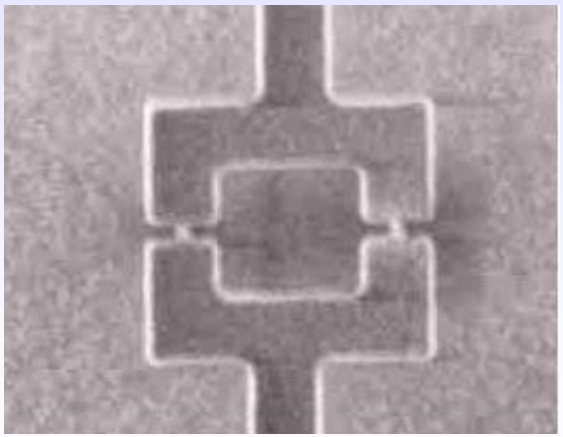
Microsquids em Filmes Magnéticos

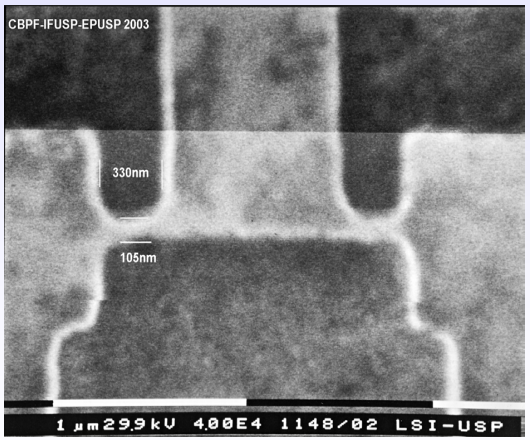


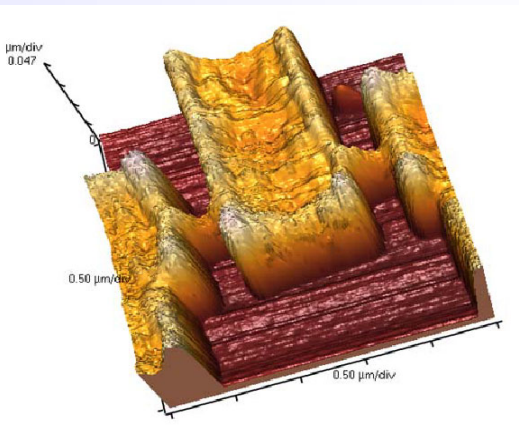




Linhas de 50nm x 10um





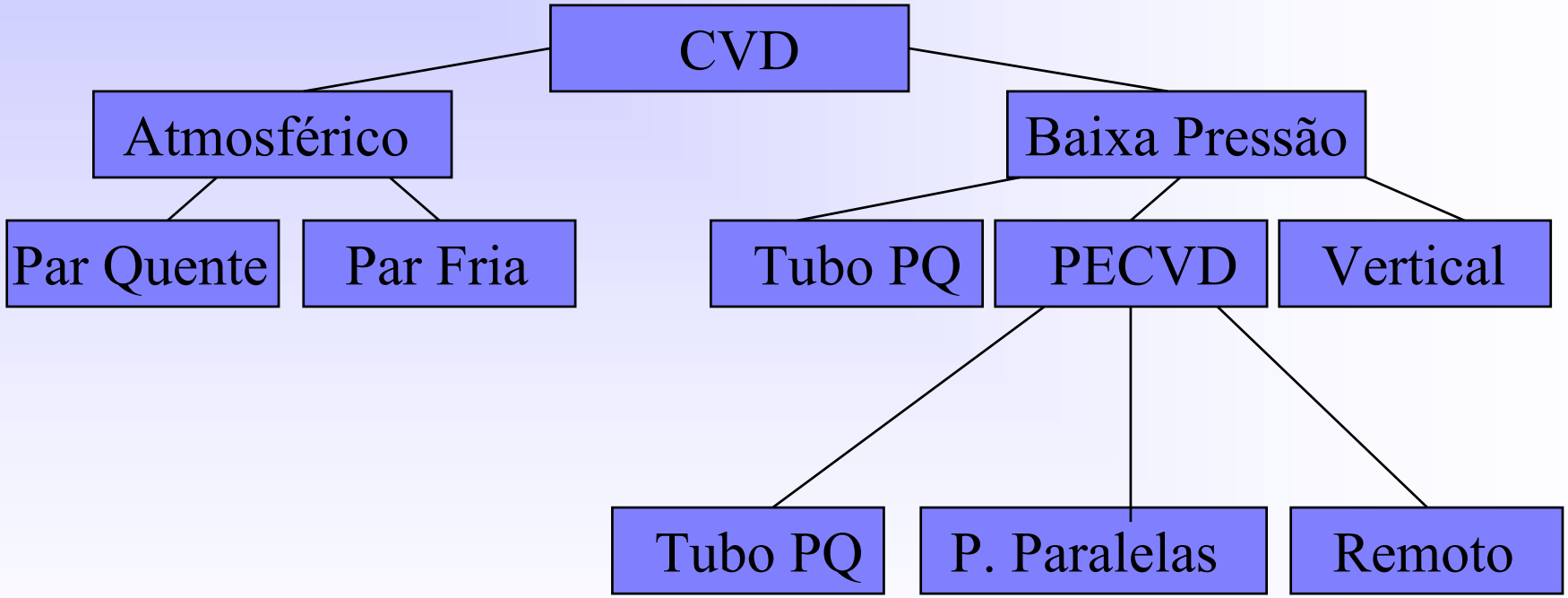


*** Trabalho conjunto IFUSP-EPUSP-CBPF**

A deposição na indústria de CIs

Técnicas de Deposição

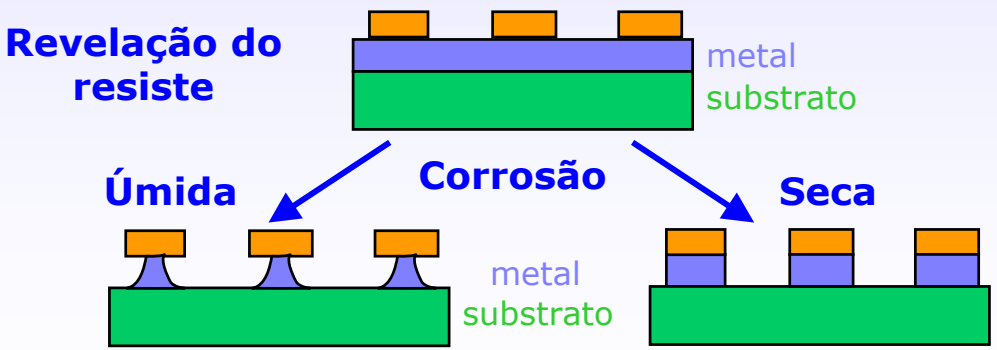
Deposição química em fase de vapor



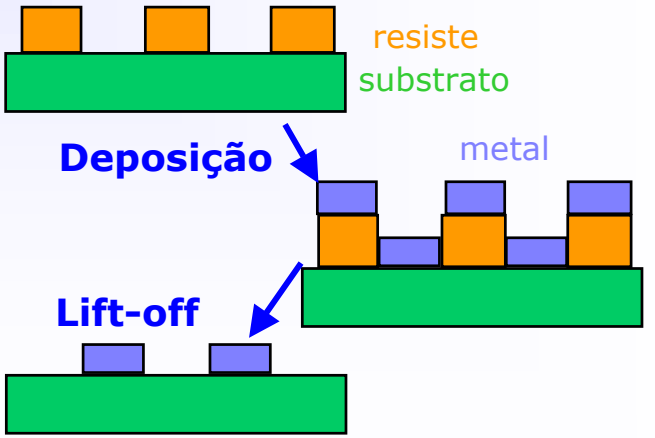
Técnicas de Deposição

- Evaporação
- Sputtering
- Deposição química em fase de vapor (CVD)
  - Em todas as regiões (camada homogênea)
  - Seletiva (em plugues)

Tradicional

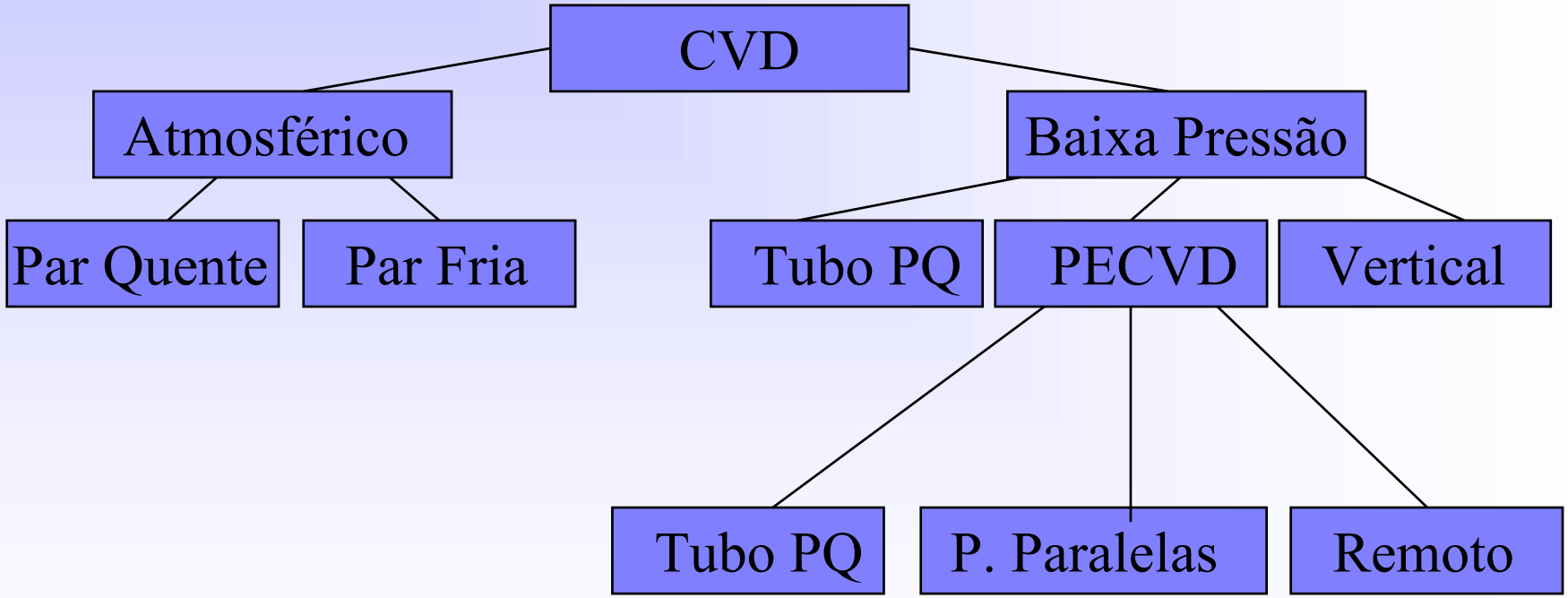


Lift-off



Técnicas de Deposição

Deposição química em fase de vapor



O passo natural

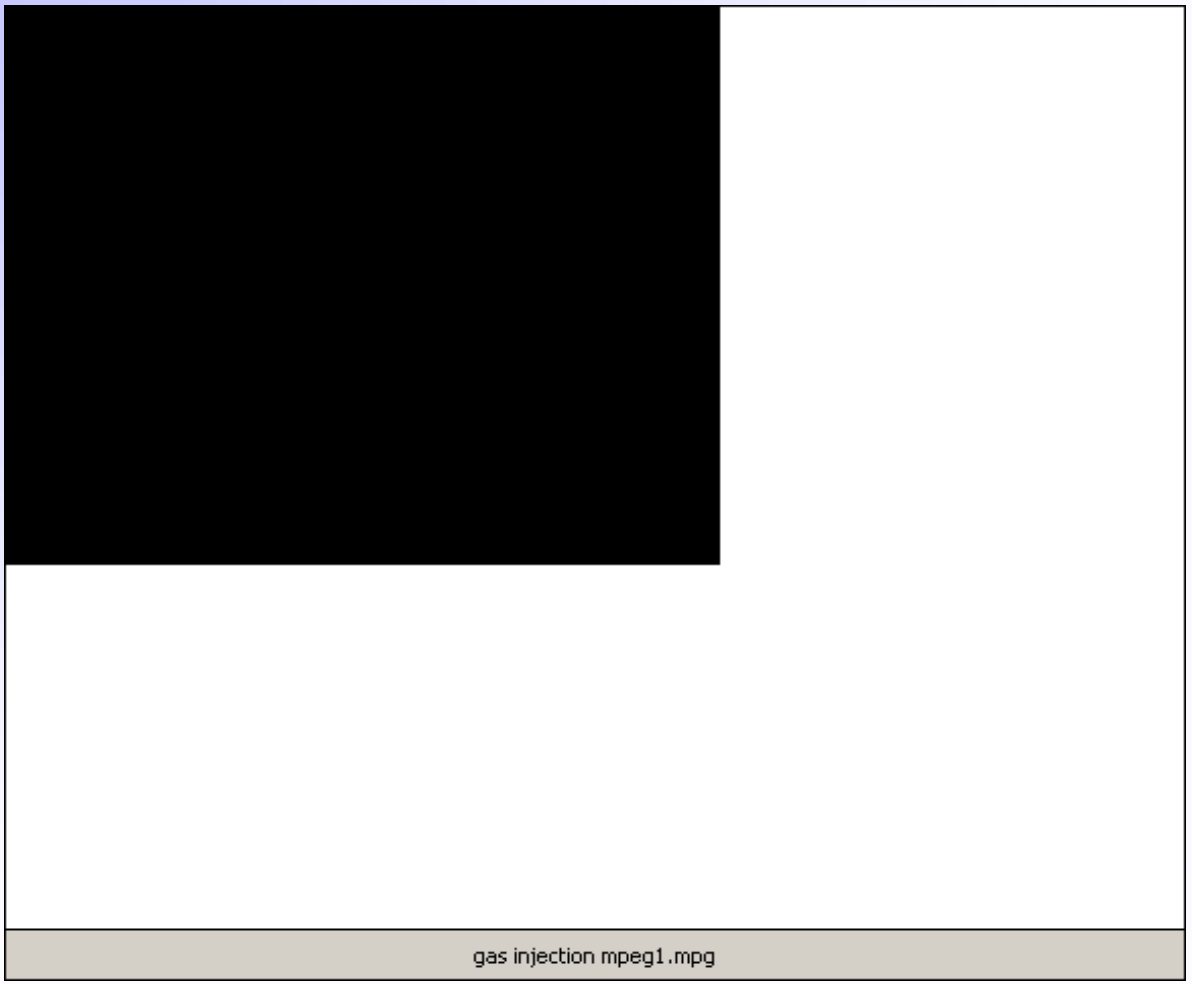
- Litografia por raios-X
  - Benefícios
    - Baixíssimos comprimentos de onda (10-0,01nm) $\rightarrow$ $\rightarrow$ altíssima resolução (~20nm)
    - Defeitos, particulados são transparentes aos Raios-X
  - Problemas
    - Fontes de luz caras (sincroton)
    - Sem óptica de redução (muito difícil, espelhos com $\lambda/20$)
    - Fonte pontual erro geométrico
    - Máscara de difícil fabricação (1:1), empregando materiais transparentes / opacos aos raios-X:
      - Material opaco: Metal pesado como Au
      - Material transparente: Material leve na forma de membrana (1~2μm de Si3N4)

Nanodeposição Localizada

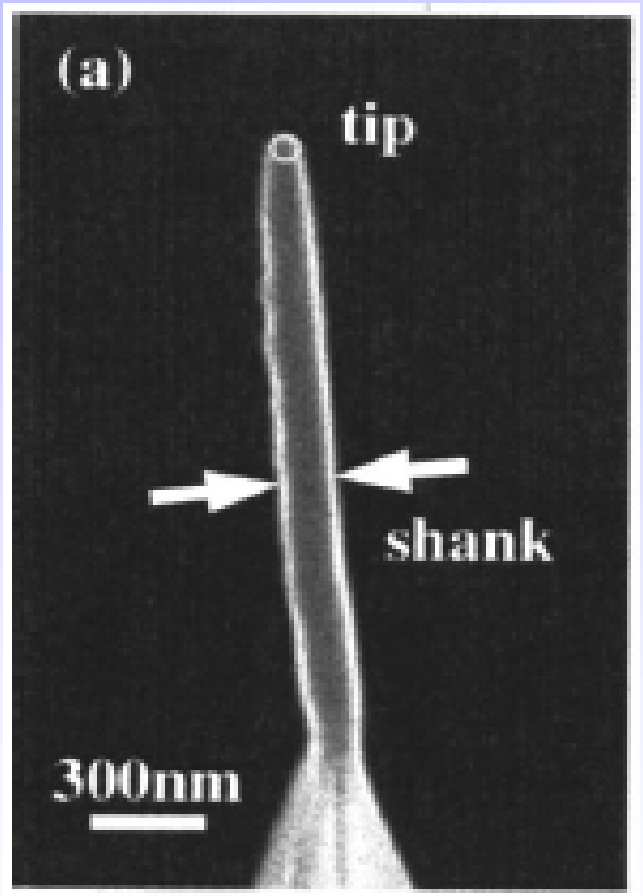
Nanodeposição localizada

- Em uma câmara em vácuo injeta-se um gás precursor em um microregião
- Com um feixe (de elétrons ou de íons) promove-se a reação de deposição, sobre a superfície, no local desejado

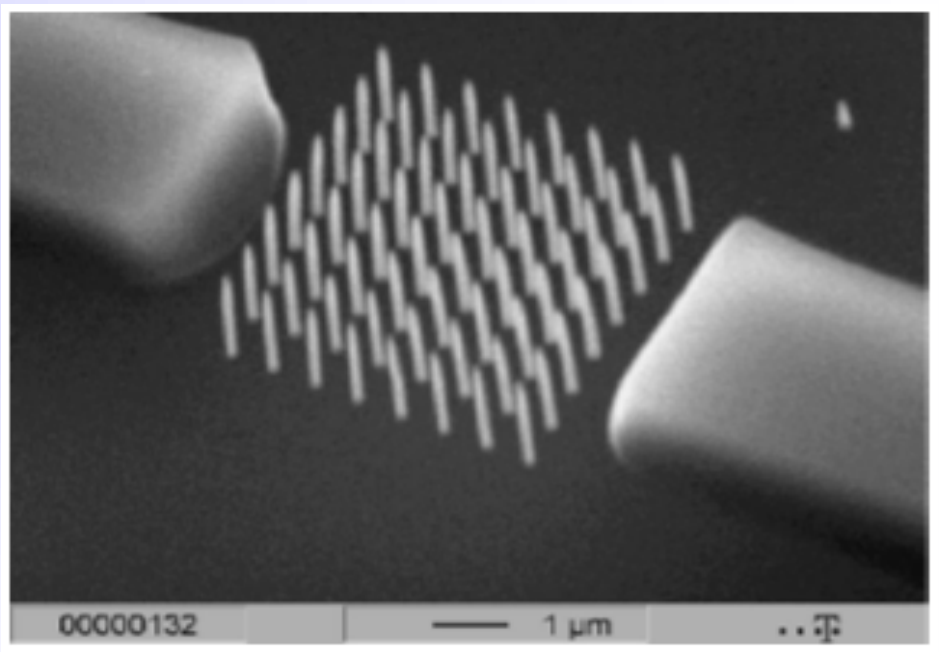
Nanodeposição localizada



Exemplos de aplicações

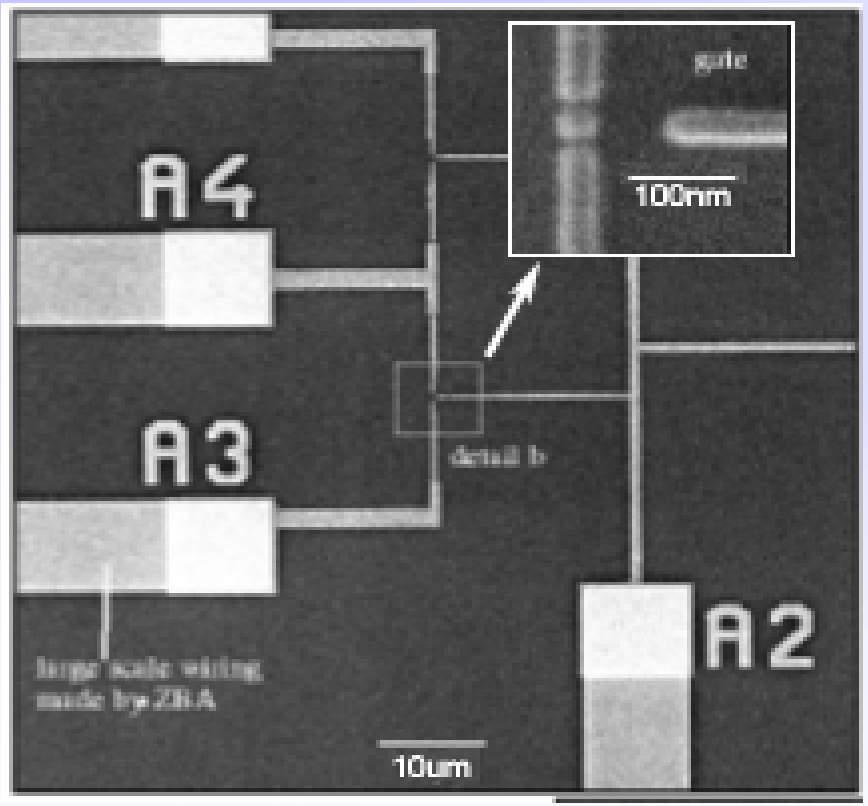


Superpontas magnéticas de AFM

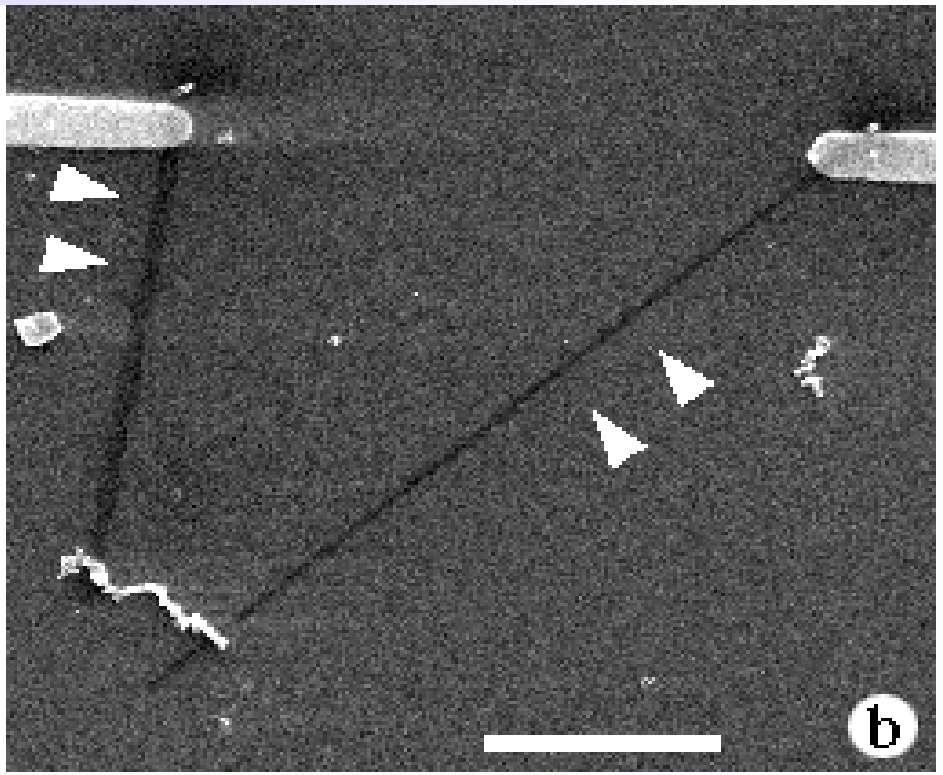


Arranjos de cristais fotônicos fabricados por EBID[6]

Exemplos de aplicações

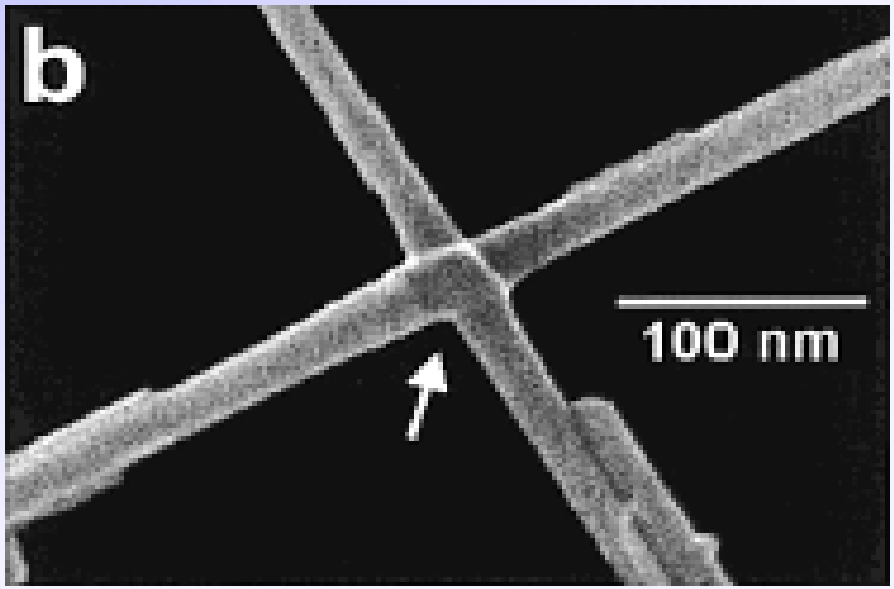


Arranjos de transistores SET[9]



Estruturas protéicas (Microtúbulos) conectadas por nanofios.[10]

Exemplos de aplicações



Soldagem de dois nanotubos de carbono realizada por EBID de C.[12]

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