



Fabricação de micro e nanoestruturas empregando litografia

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

Objetivos

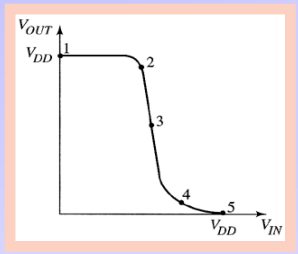
- Familiarizar potenciais usuários com as características mais relevantes das técnicas litográficas (top-down) voltadas para fabricação de micro- e nanoestruturas
- Introdução às técnicas existentes, enfatizando a utilização de litografia por feixe de elétrons
- Apresentar os processos mais comuns associados a essas tecnologias
- Apresentar novos processos voltados para pesquisa em N&N
- Recomendações gerais a serem seguidas para se obter os resultados esperados
- Discussão de potenciais aplicações dos participantes deste mini-curso

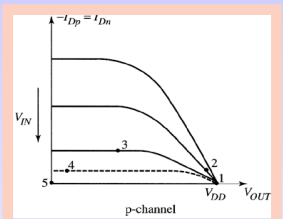
Litografia Top-Down

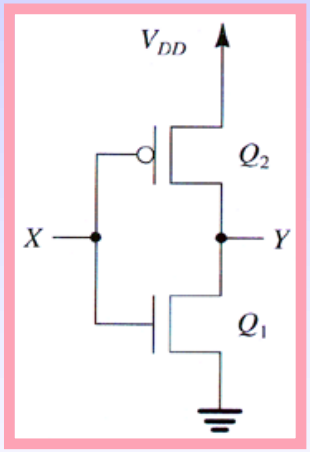
- Litografia na Indústria de CIs
  - Litografia Óptica
  - Litografia por Raios-X
  - Litografia por Feixe de Elétrons
- Litografia Top-Down para Nanotecnologia
- Aplicações

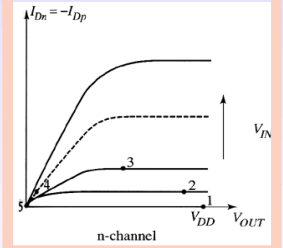
Projeto e Fabricação de CIs

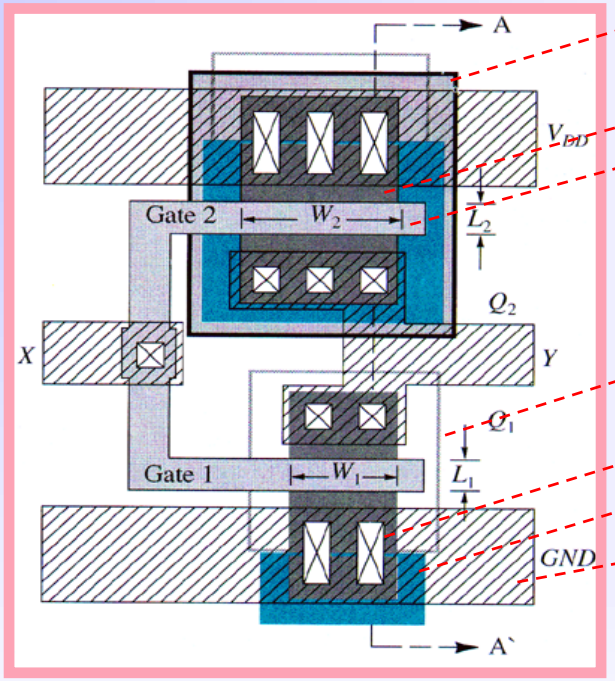
Projeto (CAD)

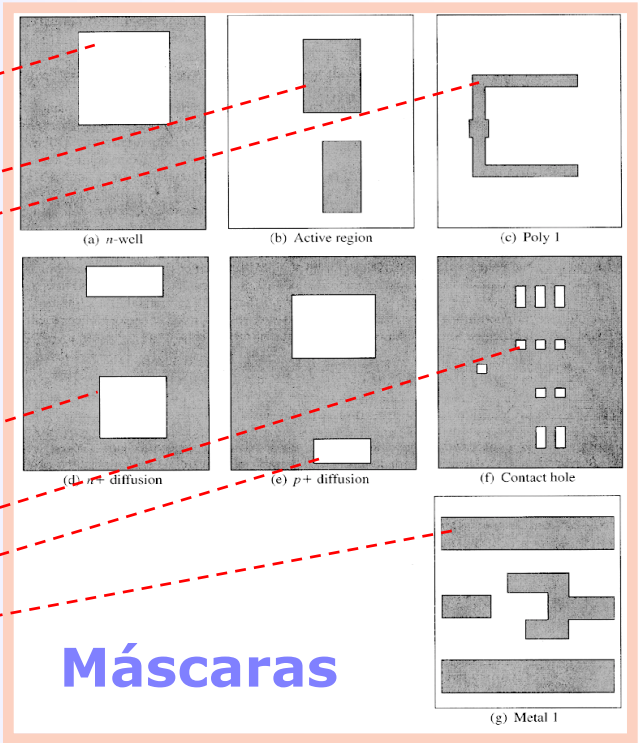




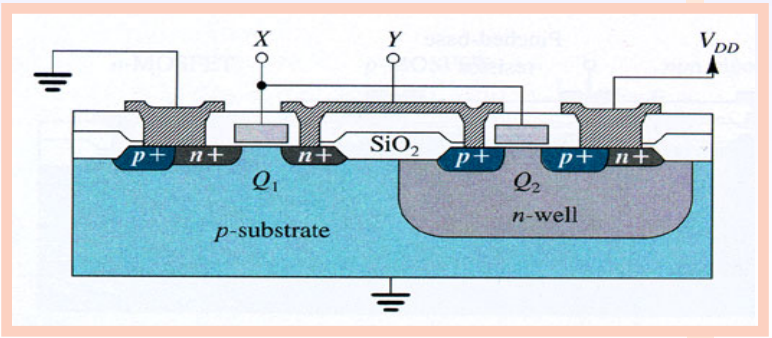






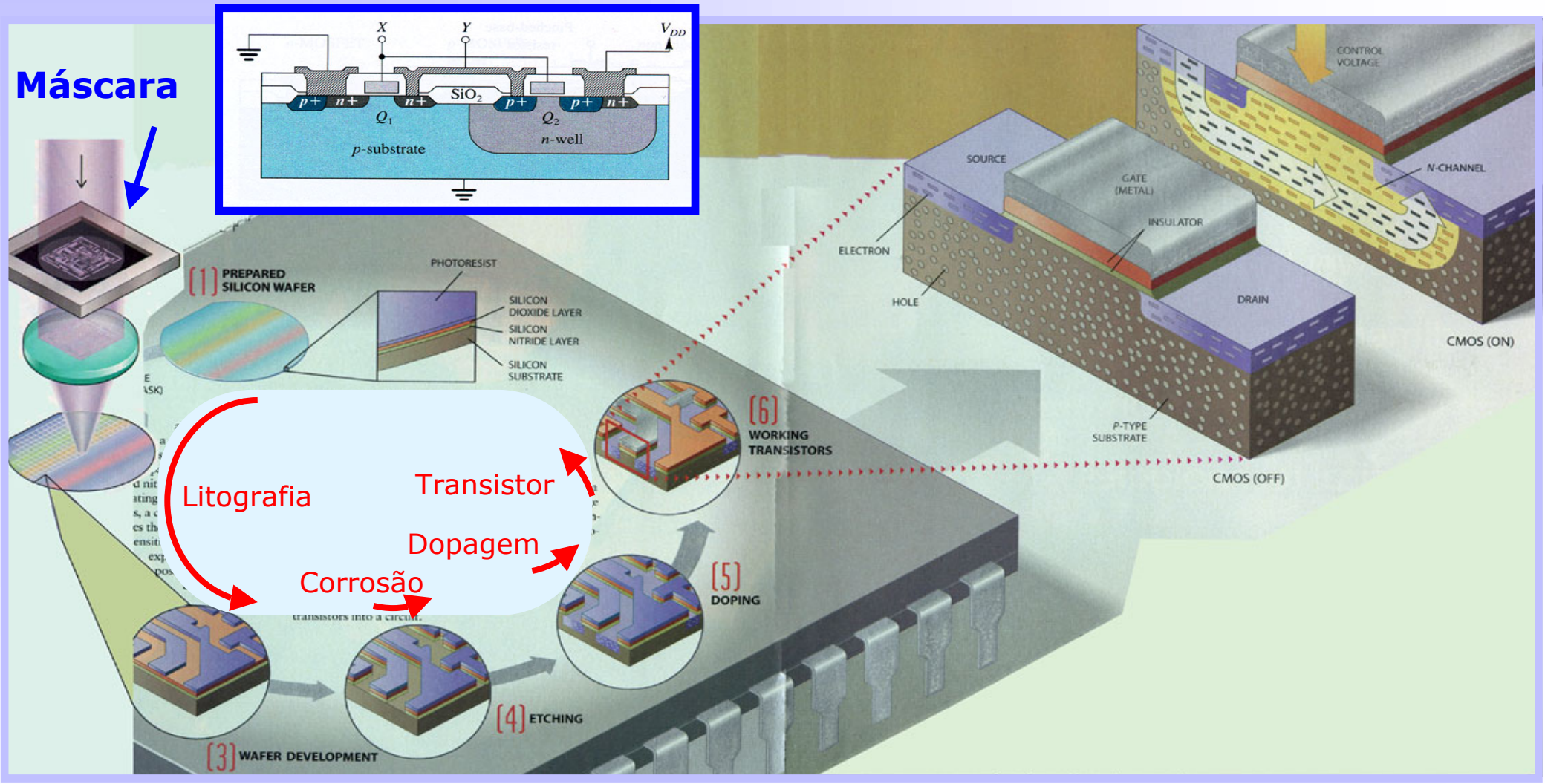


Máscaras



← **Fabricação**

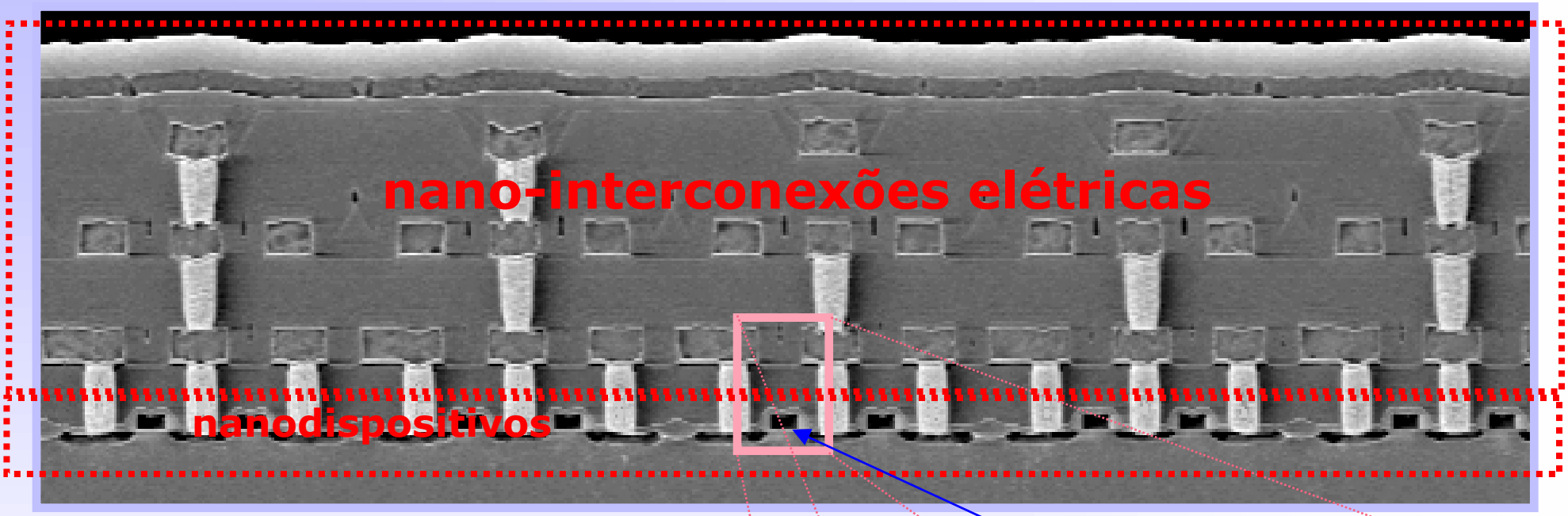
As Etapas de Fabricação de CIs



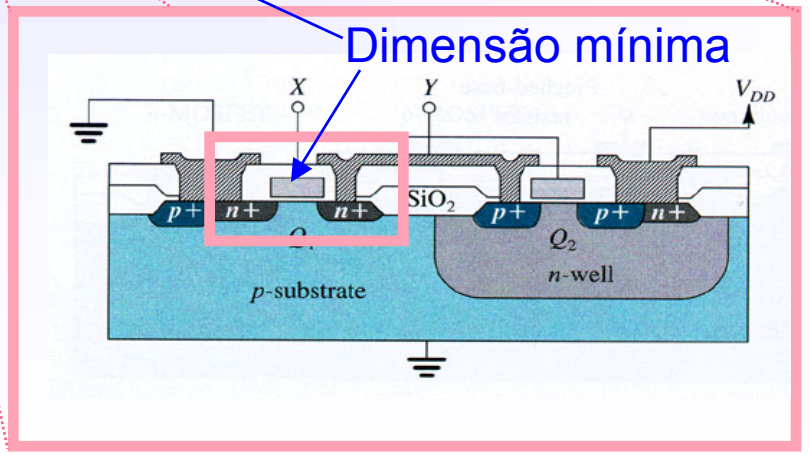
As Etapas de Fabricação de CIs

- Litografia
  - Transferência dos traçados desejados (geometrias) para uma máscara na superfície da amostra
- Corrosão
  - Transferência dos traçados da máscara na superfície da amostra para as camadas de interesse, integrantes do dispositivo final
- Portanto Litografia e Corrosão são nomes de etapas da fabricação e não nome dos processos de fabricação

Projeto e Fabricação de CIs



Faça certo
Faça rápido
Faça sempre

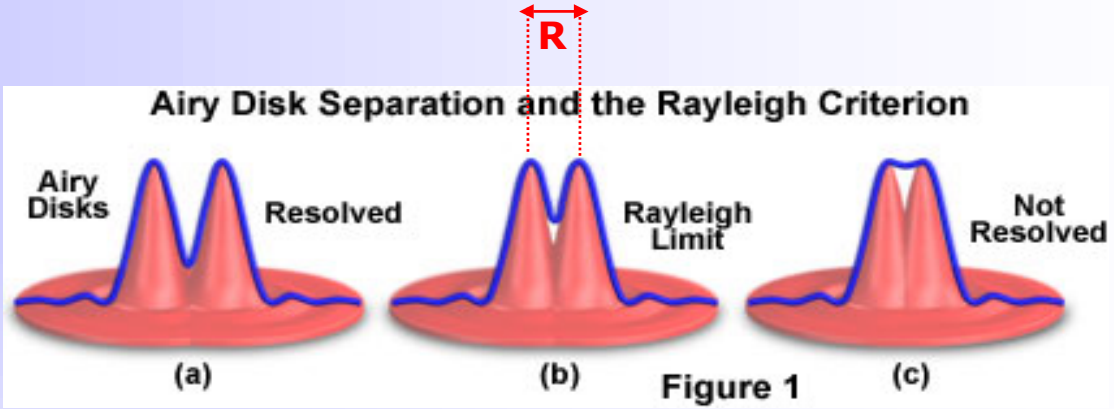


Litografia na Indústria de CIs (faça certo)

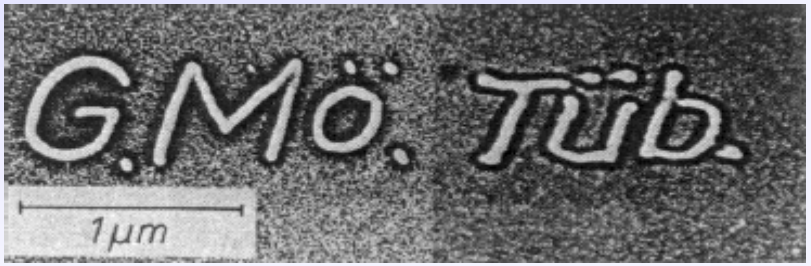
- Resolução

Crit. Rayleigh:

R = 1.22 λ / 2 NA
R = 0.6 λ / NA (obj)



- Resolução e Controle da Dimensão Crítica



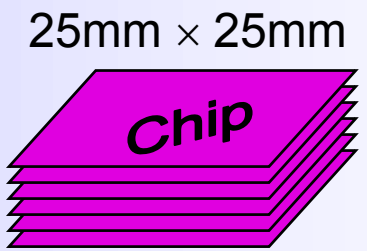
Mollenstaedt e Steigel, 1960

Dimensões mínimas atuais: 65nm → 45nm

Controle da dimensão crítica: 6.6nm → 4.7nm

Litografia na Indústria de CIs (faça certo)

- Precisão de Alinhamento (20% da menor dimensão)



35 camadas!

$\Delta T = 1°C$; α do silício = 2,33 ppm / °C $\rightarrow$ $\Delta \ell$ = 60nm!

- Controle da dimensão crítica: 11nm $\rightarrow$ 8nm

Litografia na Indústria de CIs (faça certo)

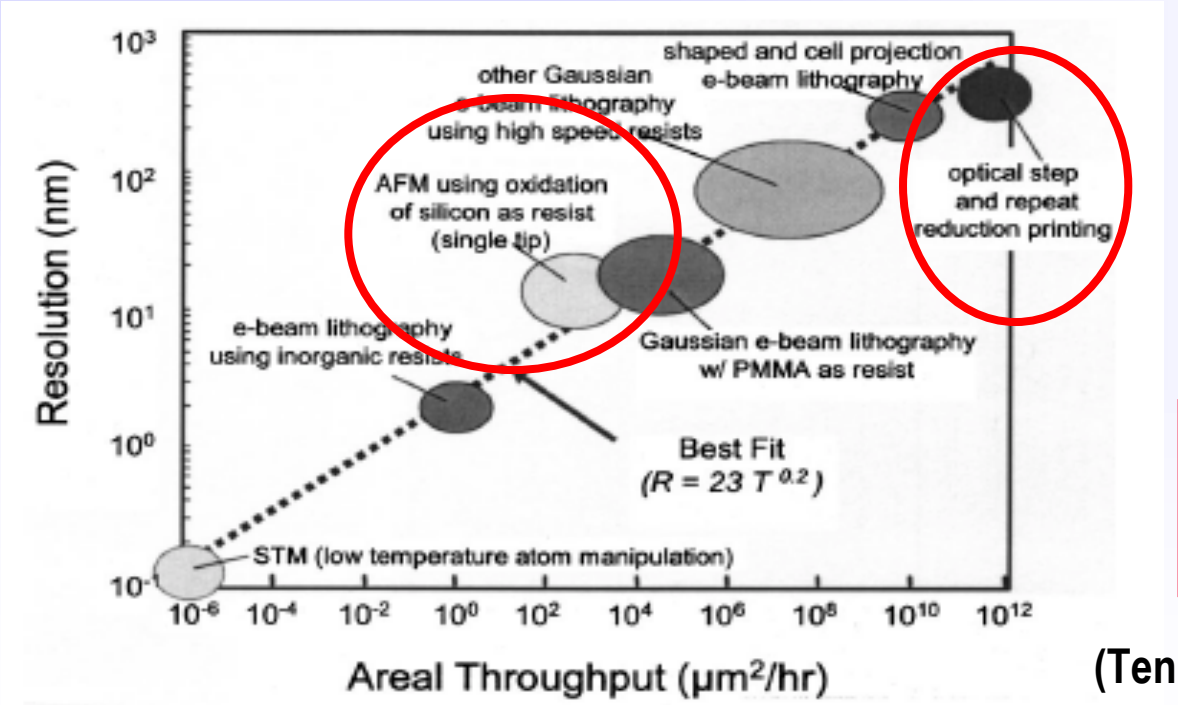
Table 76a Lithography Technology Requirements—Near-term Years

Year of Production	*2005*	*2006*	*2007*	*2008*	*2009*	*2010*	*2011*	*2012*	*2013*
DRAM ½ pitch (nm) (contacted)	*80*	*70*	*65*	*57*	*50*	*45*	*40*	*36*	*32*
DRAM and Flash									
DRAM ½ pitch (nm)	80	70	65	57	50	45	40	35	32
Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly)	76	64	57	51	45	40	36	32	28
Contact in resist (nm)	94	79	70	63	56	50	44	39	35
Contact after etch (nm)	85	72	64	57	51	45	40	36	32
Overlay [A] (3 sigma) (nm)	15	13	11	10	9	8	7.1	6.4	5.7
CD control (3 sigma) (nm) [B]	8.8	7.4	6.6	5.9	5.3	4.7	4.2	3.7	3.3
MPU									
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ pitch (nm)	90	78	68	59	52	45	40	36	32
MPU gate in resist (nm)	54	48	42	38	34	30	27	24	21
*MPU physical gate length (nm) **	32	28	25	23	20	18	16	14	13
Contact in resist (nm)	111	97	84	73	64	56	50	44	39
Contact after etch (nm)	101	88	77	67	58	51	45	40	36
*Gate CD control (3 sigma) (nm) [B] ***	3.3	2.9	2.6	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ pitch (nm)	90	78	68	59	52	45	40	36	32
Chip size (mm^2)									
Maximum exposure field height (mm)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Maximum exposure field length (mm)	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Maximum field area printed by exposure tool (mm^2)	858	858	858	858	858	858	858	858	858
Number of mask levels MPU	33	33	33	35	35	35	35	35	35
Number of mask levels DRAM	24	24	24	24	24	26	26	26	26
Wafer size (diameter, mm)	300	300	300	300	300	300	300	450	450

** MPU physical gate length numbers and colors are determined by several working groups and the ORTC.*
*** Noted exception for RED in next three years: Solution NOT known, but does not prevent production manufacturing.*

Litografia na Indústria de CIs (faça rápido)

- Produtividade
  - Lâminas de 300mm de diâmetro (+- 100 chips/lâmina – 25níveis)
  - 100 níveis por hora (lâminas/hora)
  - 25 horas expõe totalmente 100 lâminas



AFM tem uma resolução 100 vezes melhor

mas é 1 bilhão de vezes mais lento

As mesmas cem lâminas levariam 30 milhões de anos…

(Tennant, *Nanotechnology*, 1999)

Litografia na Indústria de CIs (faça sempre)

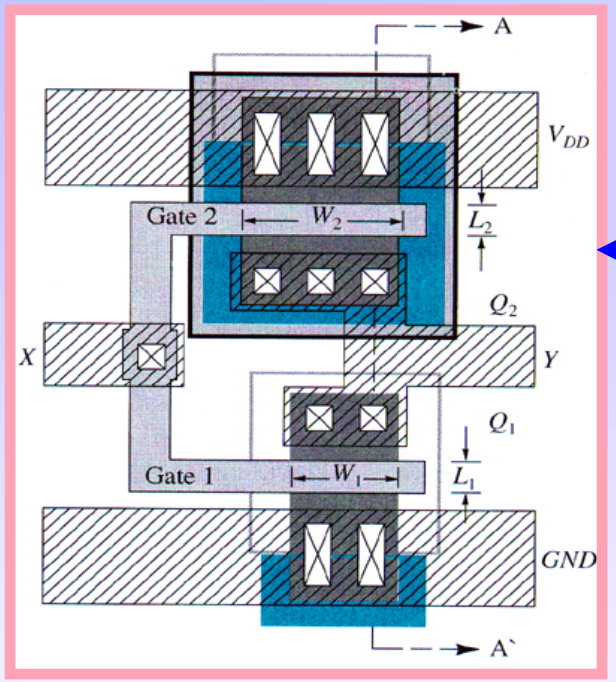
- Reprodutibilidade

Feynman (1959): É minha intenção oferecer um prêmio de US$ 1.000 à primeira pessoa que conseguir colocar o conteúdo escrito de uma página em uma área 25.000 vezes menor, de forma que ela possa ser lida por um microscópio eletrônico de varredura



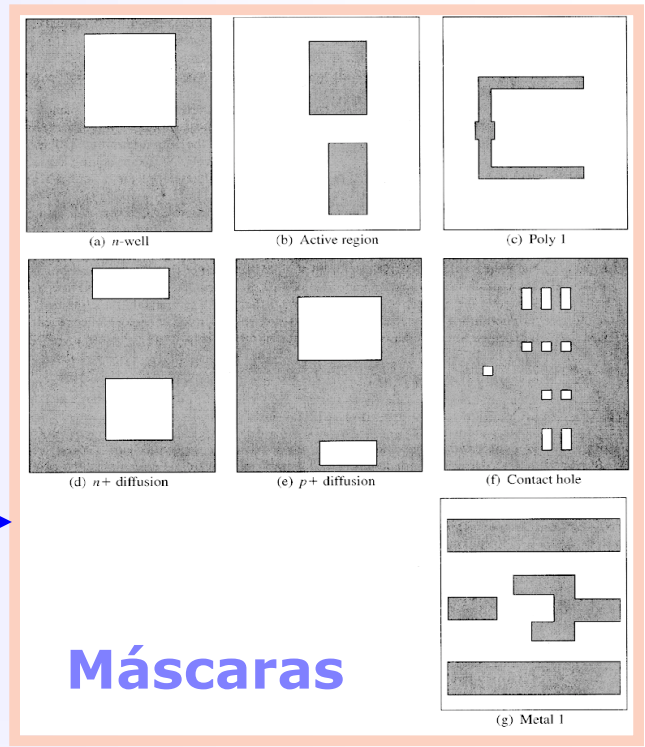
9 μm → letras de 60nm → o prêmio foi concedido em 1987, quase 30 anos depois!

Possibilidades Litográficas



CAD

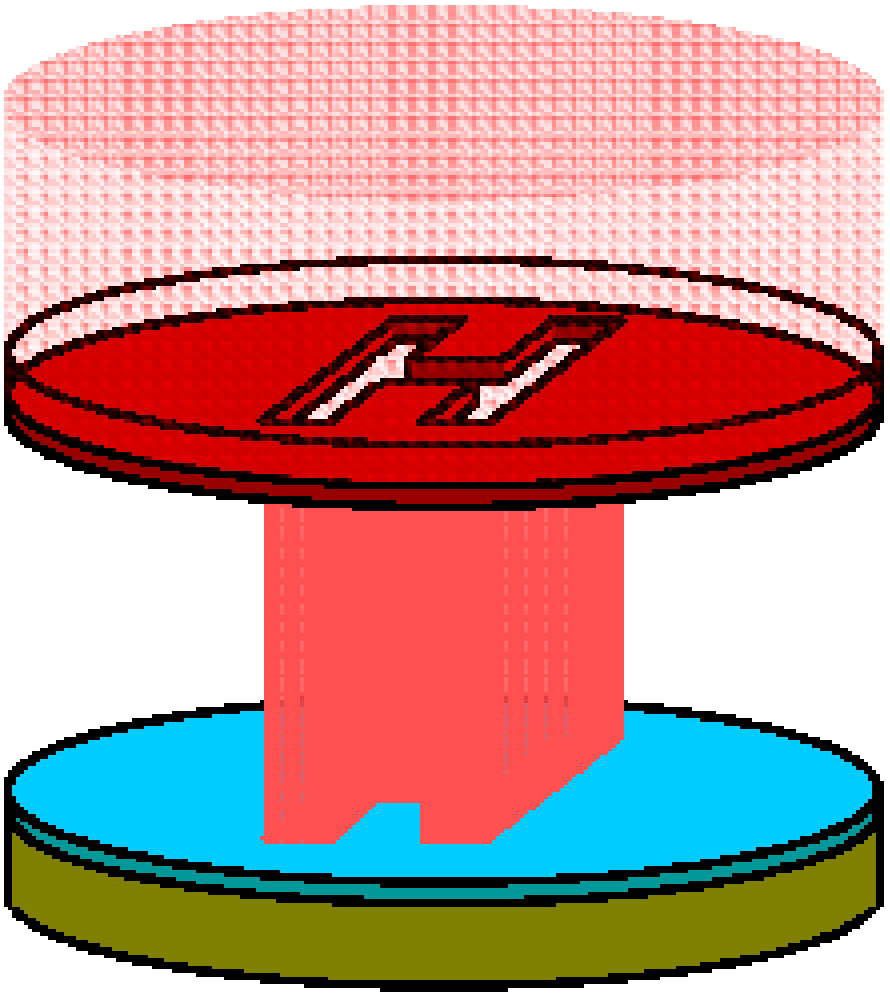
Máscara(s)



Litografia Óptica

Litografia por Raios-X

Litografia Óptica



Radiação (Exposição)

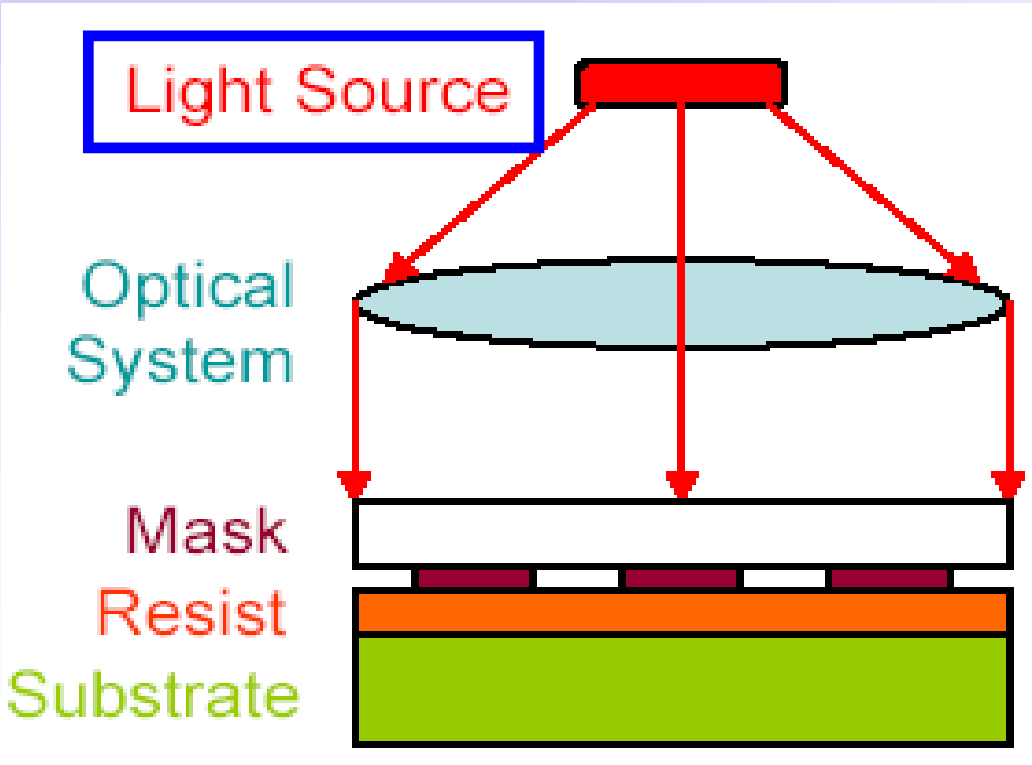
Máscara (Alinhamento)

Fotorresiste (cobertura)

Substrato

Litografia Óptica

Impressão por Contato

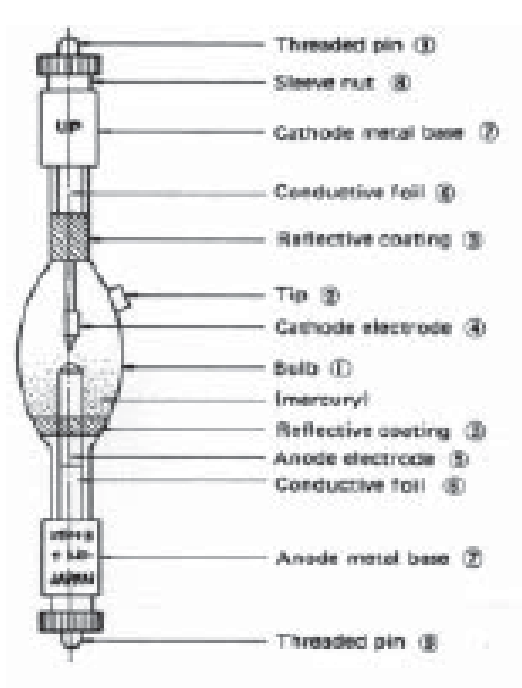


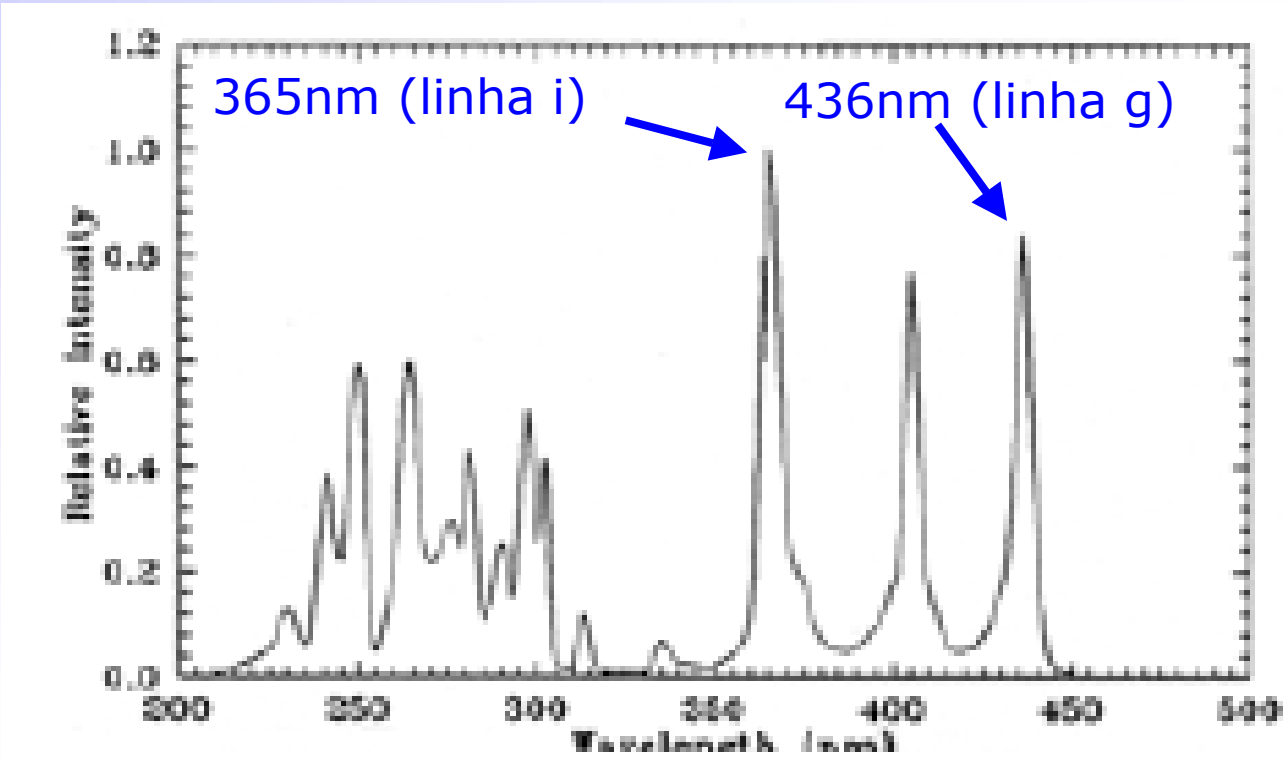


Fonte de Luz

- Lâmpada de Arco - Mercúrio (fazer rápido)

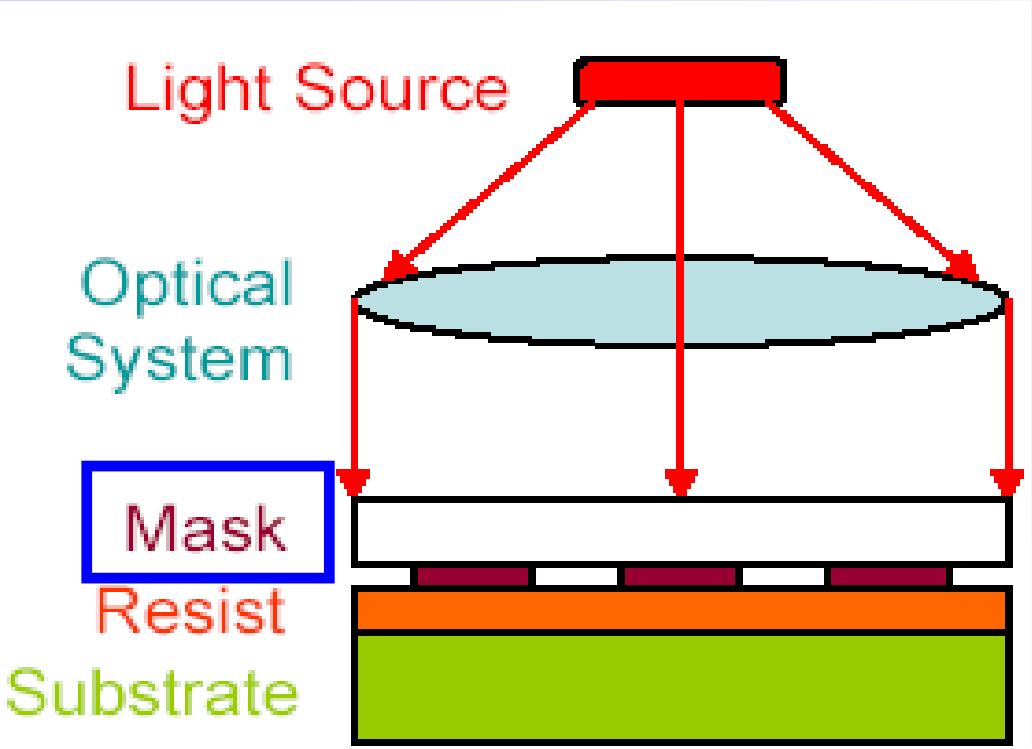
USH-350DP (350W)



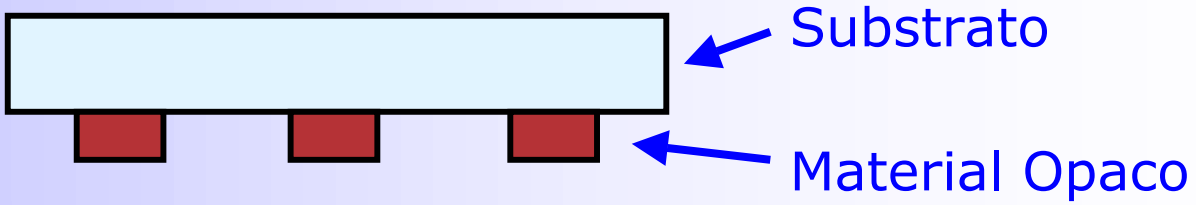


Litografia Óptica

Impressão por Contato



Máscara



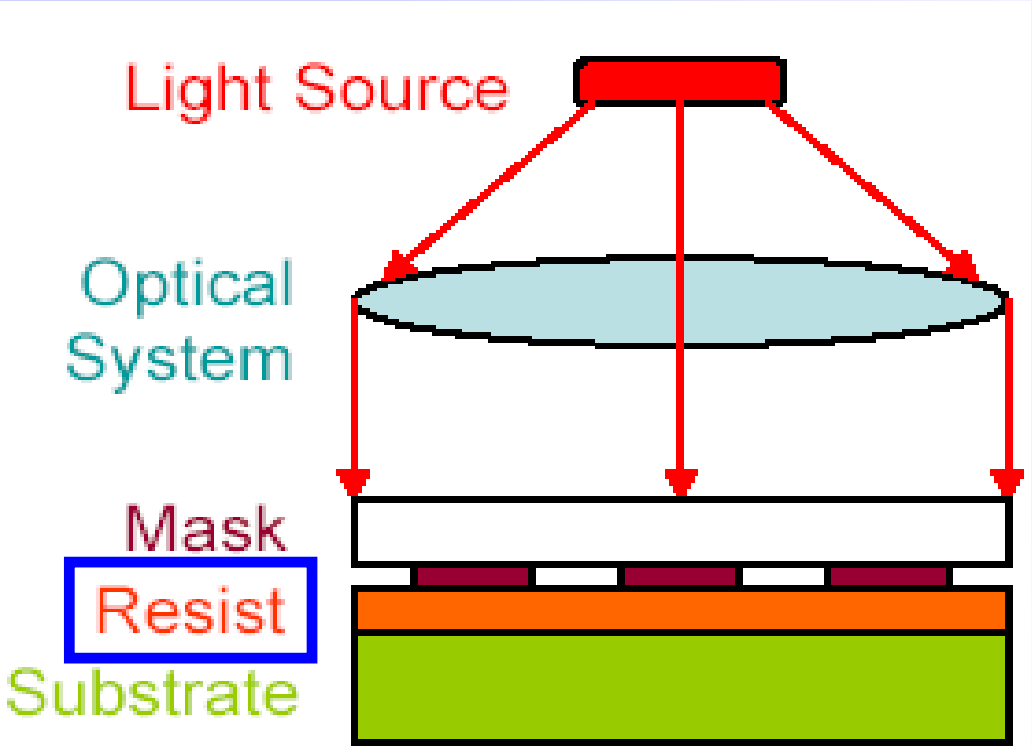
- Características do Substrato
  - Altamente transparente no comprimento de onda de interesse
  - Pequeno coeficiente de expansão térmica
  - Opticamente plano

  (Vidro de borosilicato, sílica fundida, quartzo)
- Características do Material Opaco
  - Perfeitamente opaco no comprimento de onda de interesse
  - Boa aderência ao substrato
  - Alta durabilidade

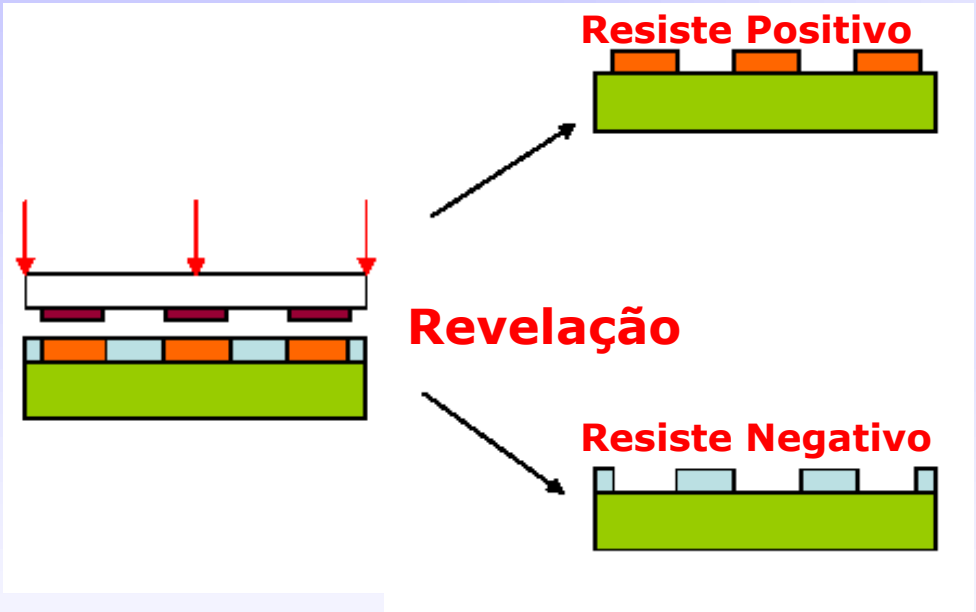
  (cromo ou emulsão)

Litografia Óptica

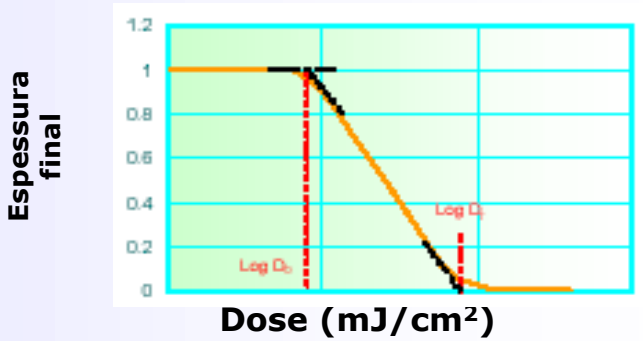
Impressão por Contato



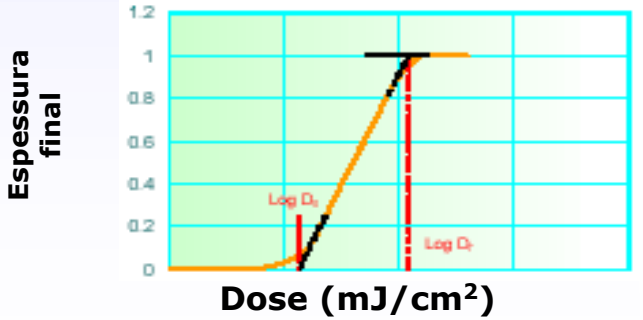
Resiste



- Resiste Positivo
  - Solubilidade (no revelador) das regiões expostas é muito **maior** que das regiões não expostas

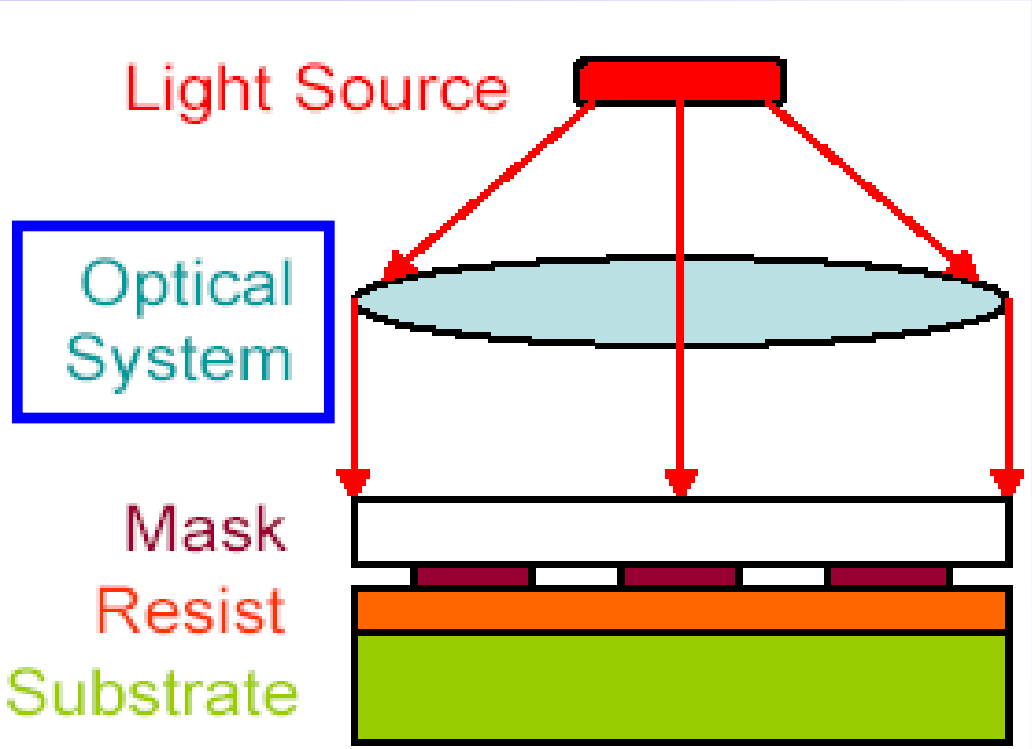


- Resiste Negativo
  - Solubilidade (no revelador) das regiões expostas é muito **menor** que das regiões não expostas

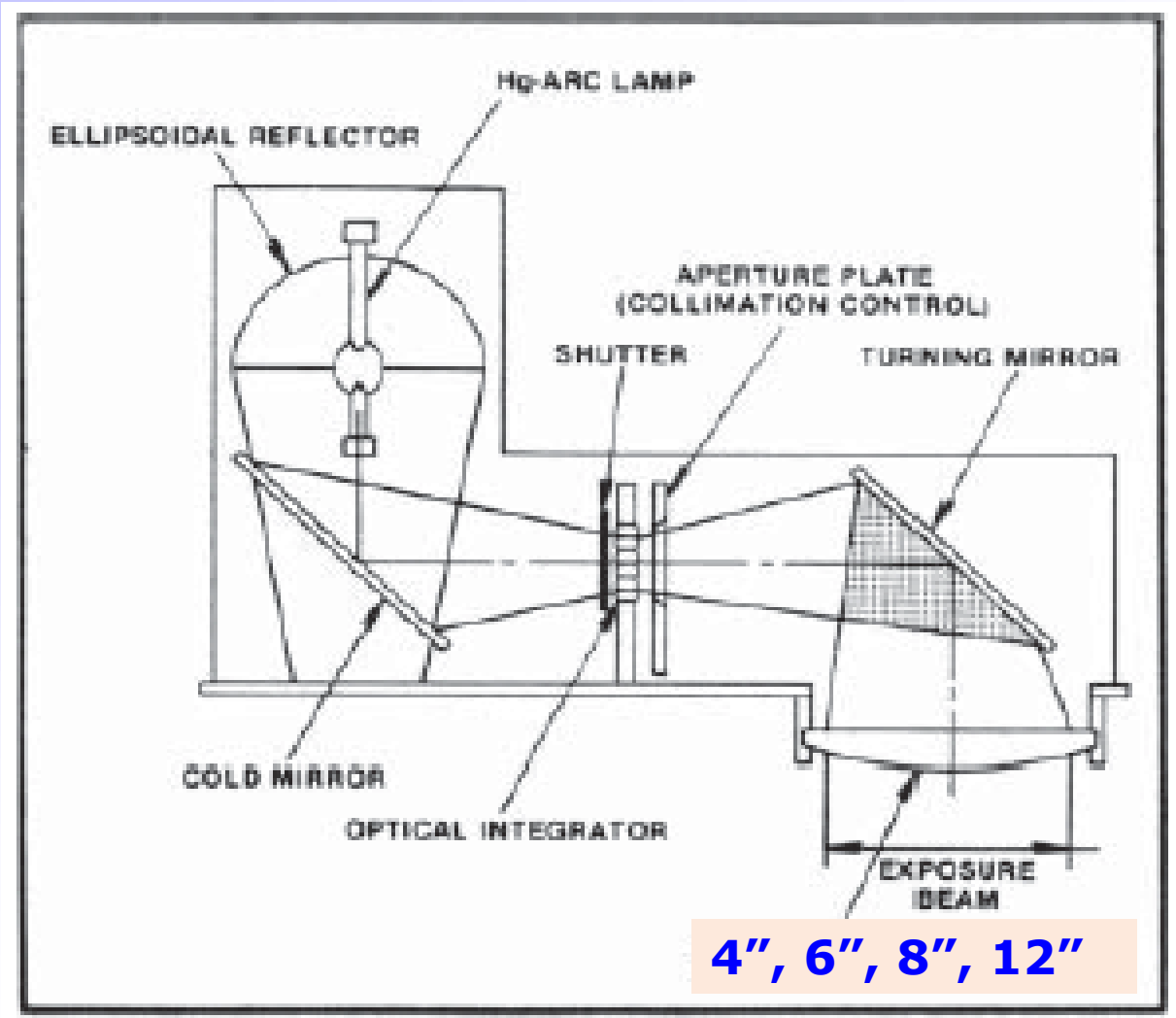


Litografia Óptica

Impressão por Contato

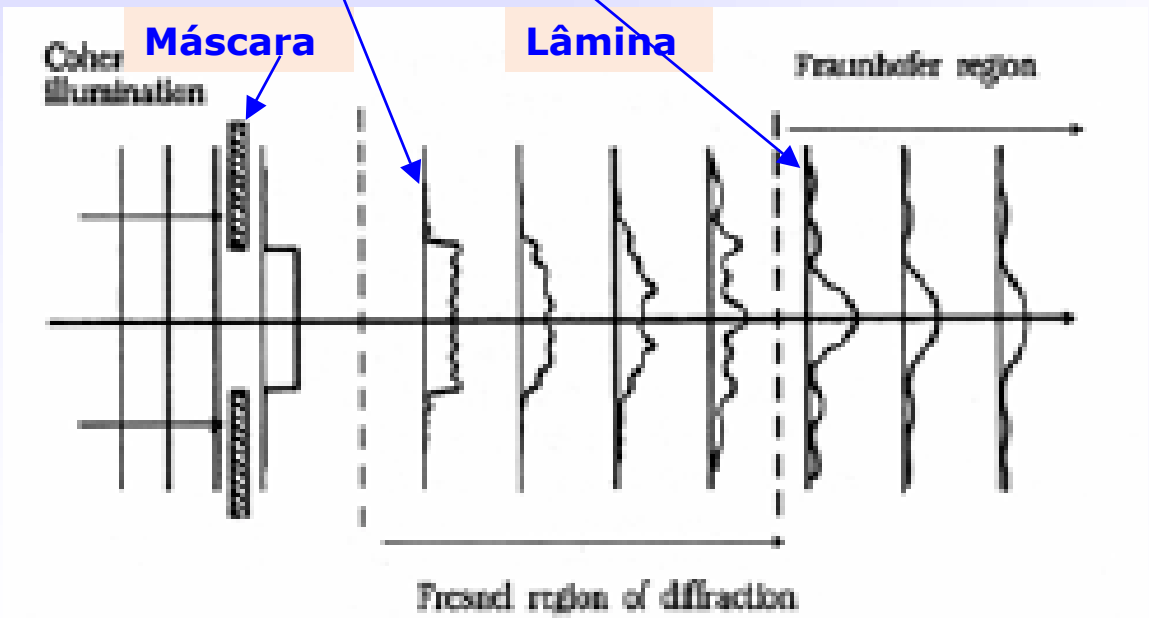


Sistema óptico: impressão por contato

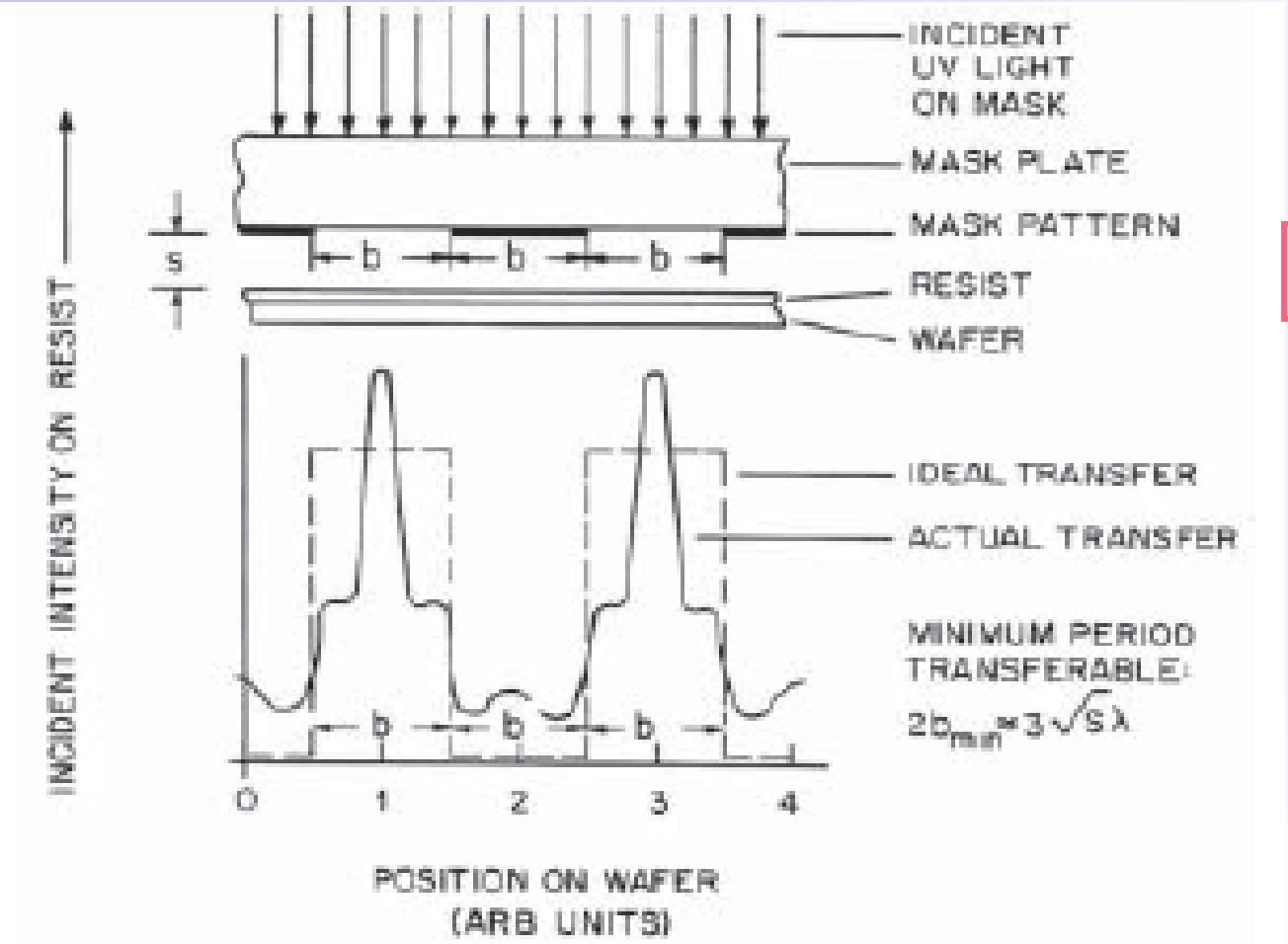


Difração em Litografia por Contato

- Trasnsferência par ao resiste não é perfeita devido aos fenômenos de difração óptica:
  - Difração Fraunhofer (grandes distâncias entre objeto e imagem), não é o caso
  - Difração de Fresnel (pequenas separações entre objeto e imagem)



Difração em Litografia por Contato



- Limite Teórico para linhas e espaços iguais (rede de difração)

$$2b_{\min} = 3\sqrt{\lambda(s + 0{,}5d)}$$

$2b_{\min}$ = Período da r.d.

λ = Comprimento de onda

s = Distância másc/subst

d = Espessura do resiste

Litografia por Contato

- Para $s = 0$:

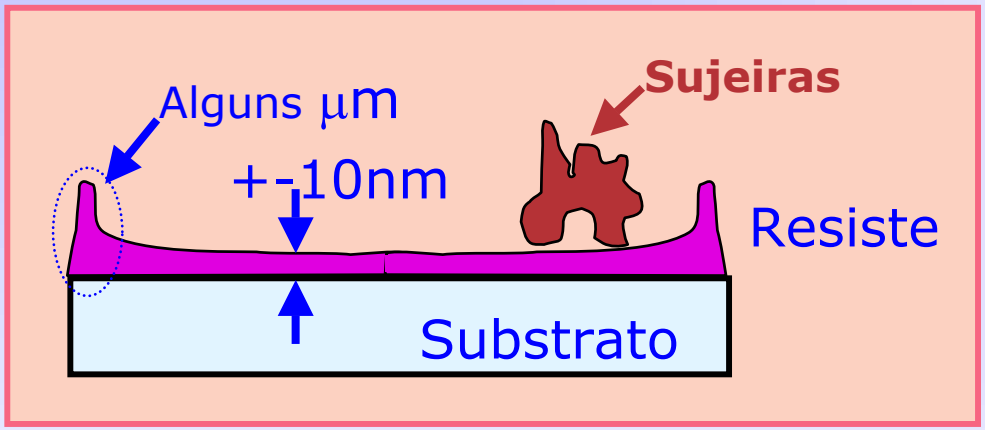
$$2b_{\min} = 3\sqrt{0{,}5\,\lambda\, d}$$

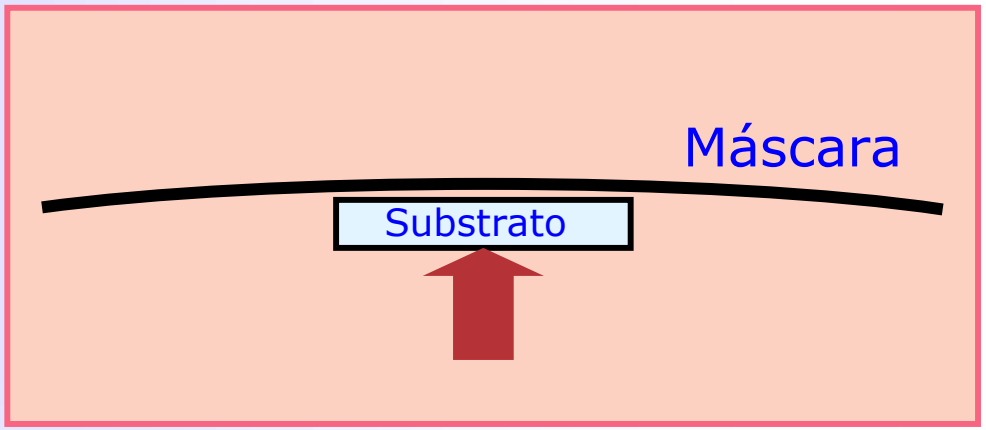
$b_{\min}$

	λ = 436nm	λ = 365nm
d = 1μm	0,70μm	0,64μm
d = 0,5μm	0,50μm	0,46μm

Problemas da Litografia por Contato

- Contato!



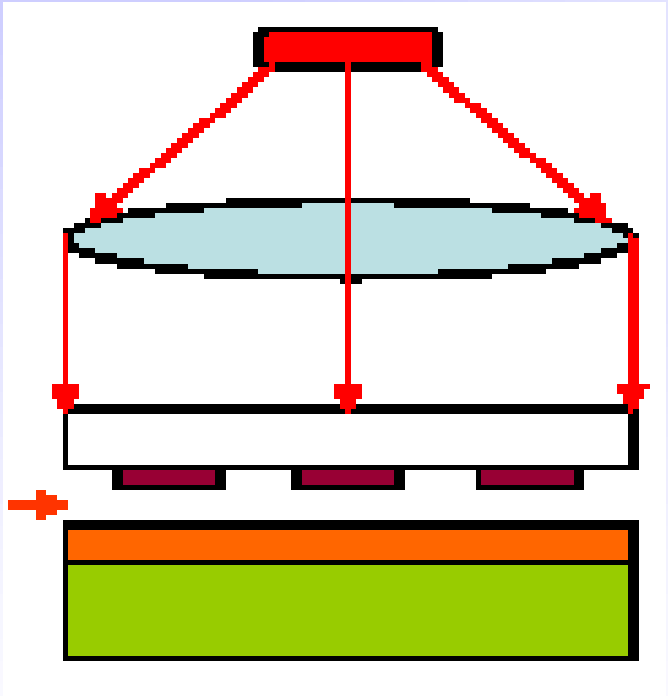


- Máscara
  - Substrato 3”, 4”, 5”, 6” → Máscara 3”, 4”, 5”, 6” (1:1)
  - Dimensões mínimas na máscara = dimensões mínimas no substrato

    (máscara isenta de defeitos e igual aos traçados finais)

Litografia Óptica

Impressão por Proximidade



Separação (*s*)

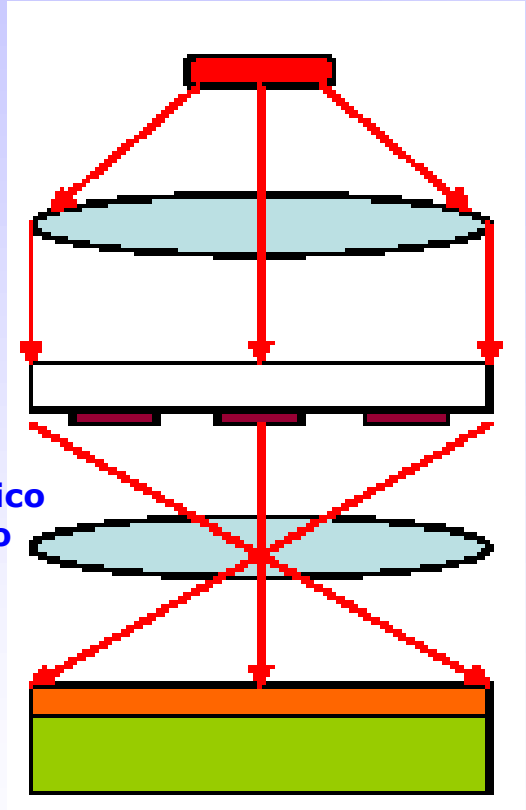
- Reduz significativamente defeitos por contato
- Degrada significativamente a resolução (***s*** ≠ **0**):

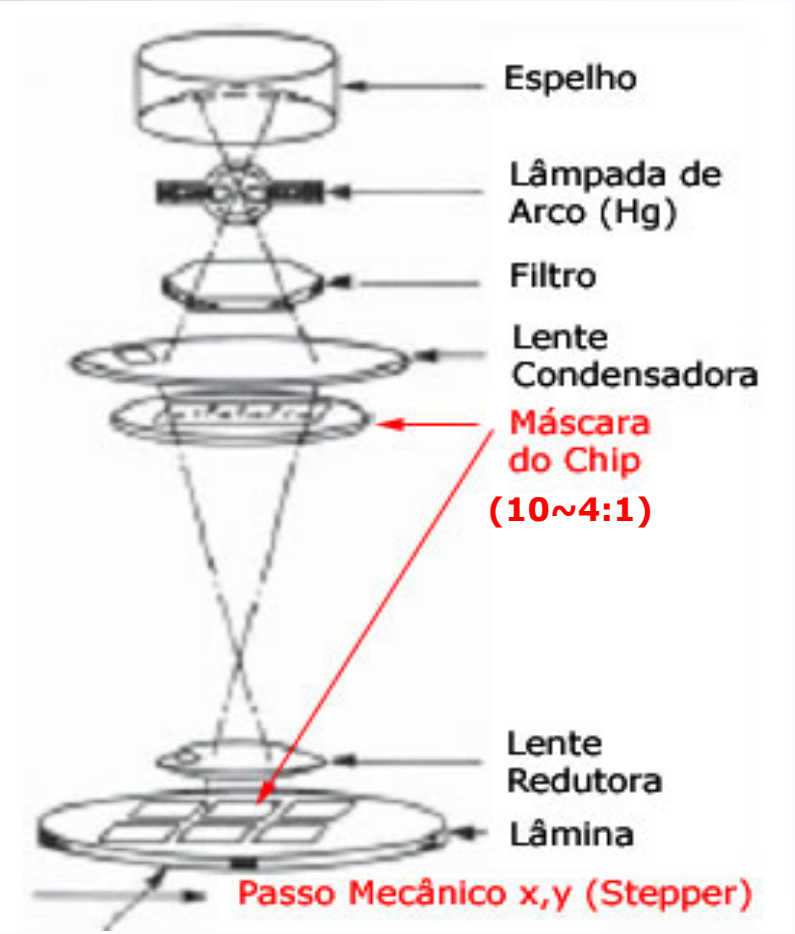
$$2b_{\min} = 3\sqrt{\lambda(s + 0{,}5d)}$$

$b_{\min}$	λ = 436nm	λ = 365nm
d = 0,5μm s = 10μm	6,3μm	5,8μm
d = 0,5μm s = 10μm	14μm	13μm
	(0,50μm)	(0,46μm)

Possível solução: Impressão por projeção

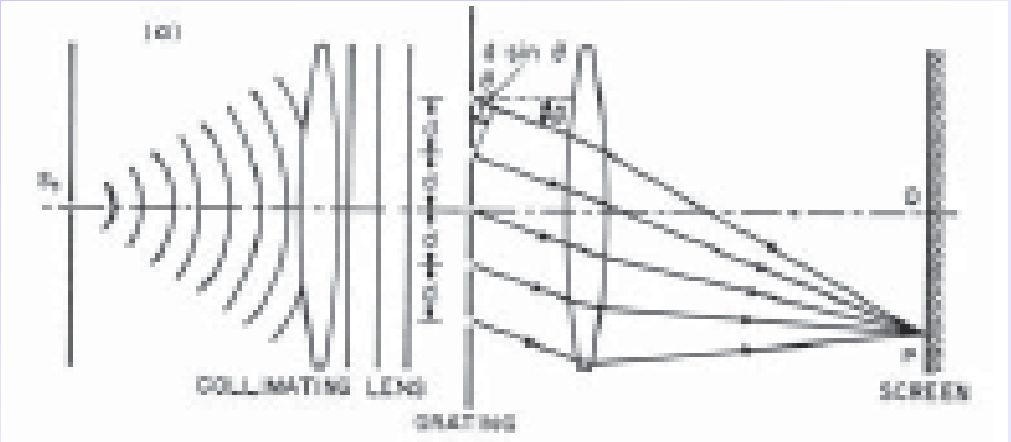
Sistema óptico de redução (10~4:1)





Impressão por Projeção

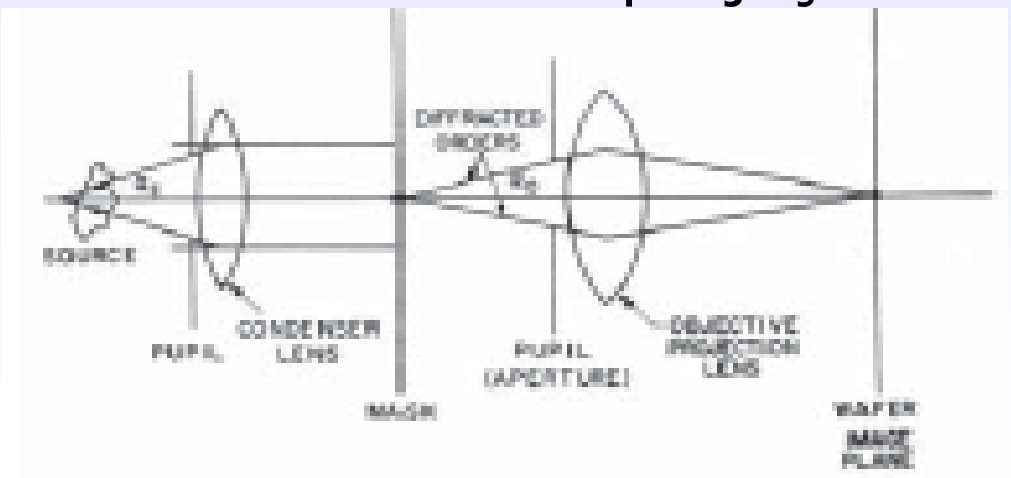
- Difração de Fraunhofer (objeto e imagem distantes)

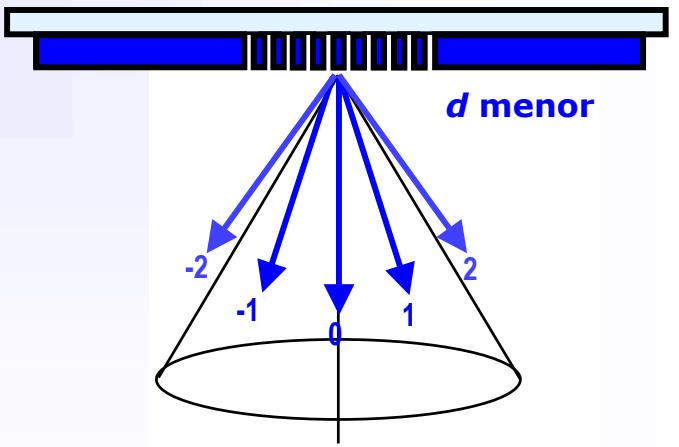


- Ângulo onde ocorrem os máximos de intensidade quando uma onda plana incidente em um rede de período d (no ar):

$\text{sen}\,\theta = N\,\lambda/d$ $\quad N = 0, 1, 2, \ldots$

- Em um sistema de projeção:





n sen θ = NA

Impressão por projeção

- Estendendo o argumento para aberturas quaisquer na máscara podemos escrever:

$$d_{\min} = 2b_{\min} = R = k\,\lambda / NA$$

Onde *k* é um fator do processo litográfico (da ordem de 0,8)

- Maneiras de melhorar a resolução:
  - Diminuir λ
  - Aumentar NA
  - Melhorar o processo (reduzir *k*)

Impressão por projeção

- Como temos uma redução óptica, outro aspecto importante é a profundidade de foco:

$$DOF = k' \lambda / NA^2$$ onde k´ é um fator do sistema óptico

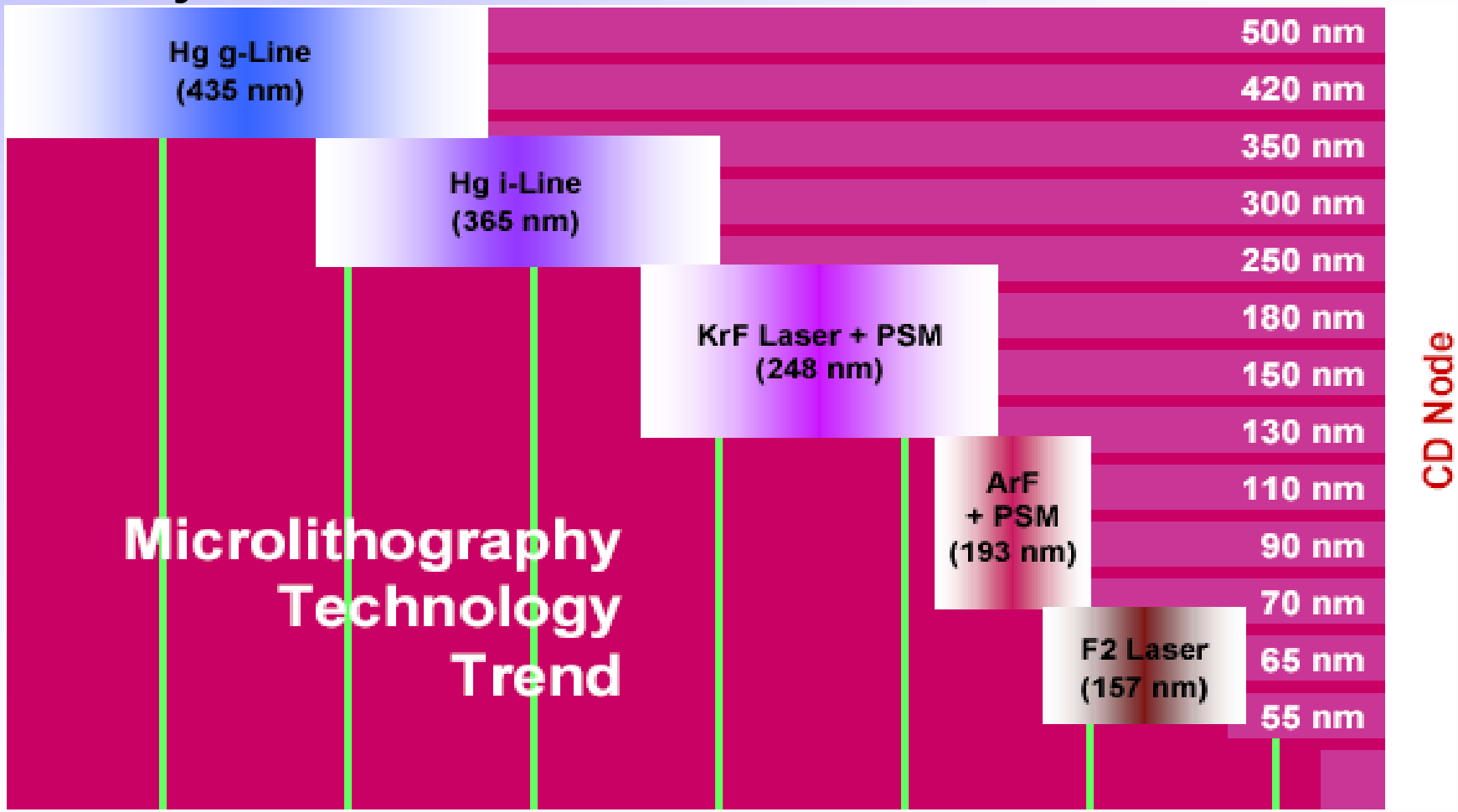
Substrato não é plano (~10μm)

Há topografia no substrato (~1μm)

- DOF reduz muito mais rápido com NA do que R melhora

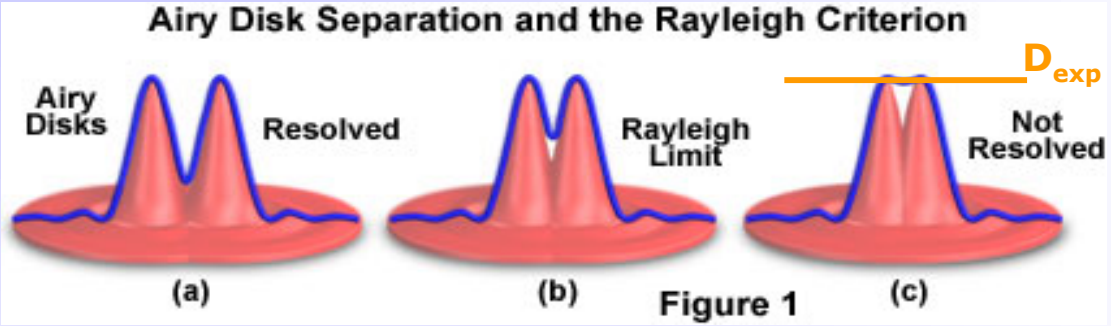
Impressão por Projeção

- A solução é reduzir λ



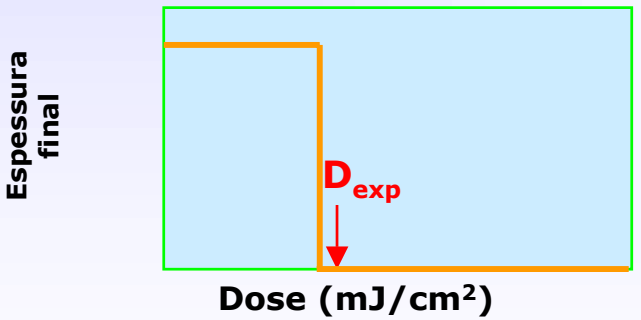
Impressão por Projeção

- Outra solução é reduzir *k*



Densidade de Energia (mJ/cm^2)

+

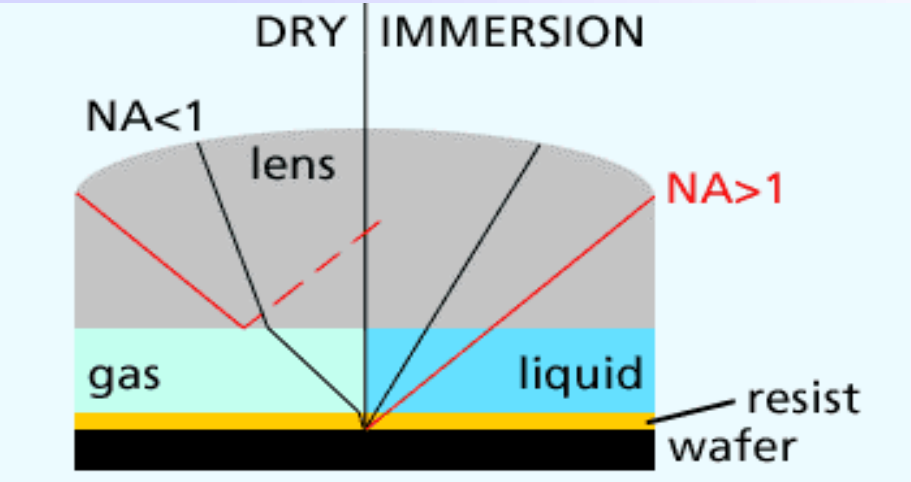


Curva de Contraste Do Resiste

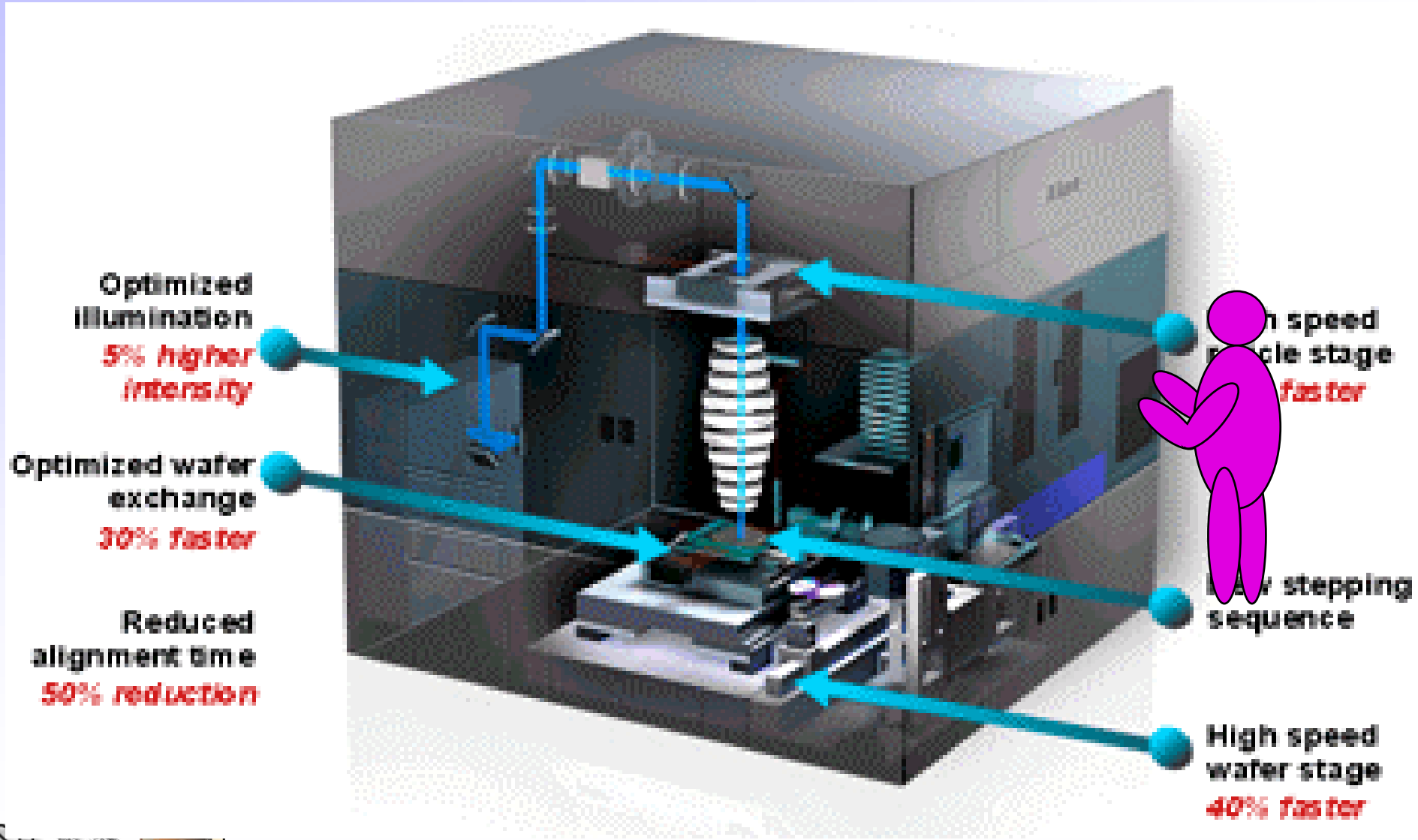
Impressão por Projeção

- Outra solução é aumentar *NA*
  - NA = n.sen(θ)

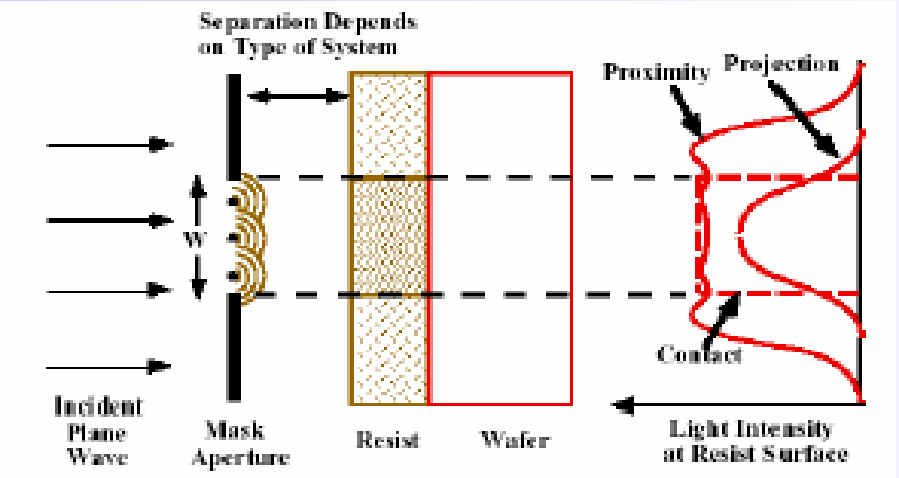
(Immersion Lithography)



Stepper de última geração



Comparação



Sistema	Vantagens	Desvantagens
Contato	▪ Alta resolução ▪ Baixo custo ▪ Alta produtividade	▪ Contaminação da máscara ▪ Defeitos
Proximidade	▪ Baixa contaminação da máscara	▪ Baixa resolução
Projeção	▪ Alta resolução ▪ Baixa cont. da masc. ▪ Alta produtividade	▪ Custo

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 (síncroton)
    - 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)

Erro geométrico

- Erro de magnificação lateral

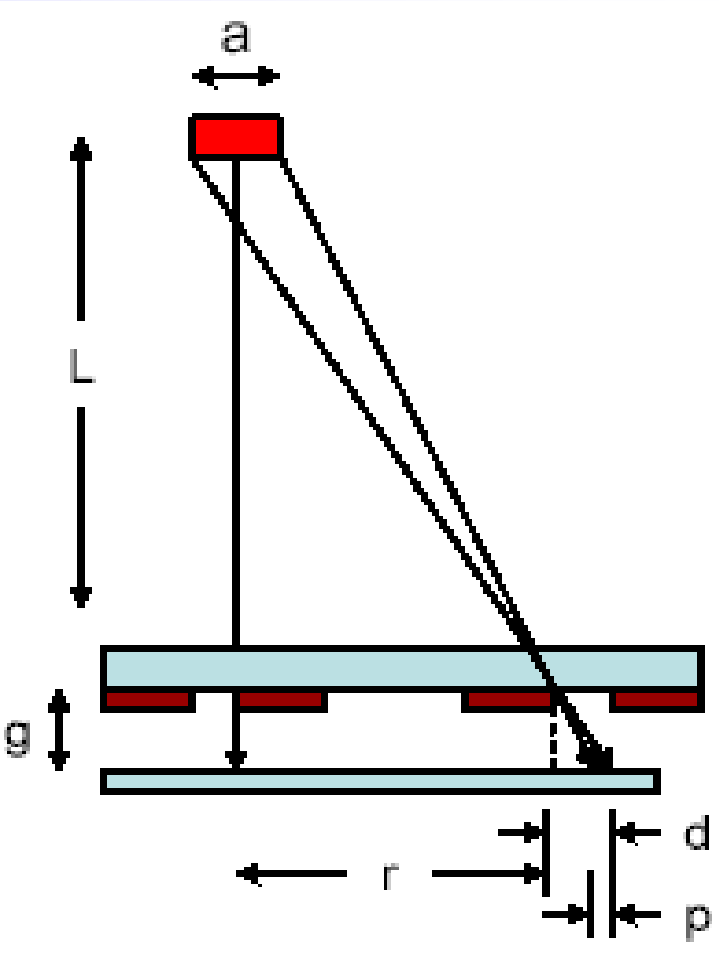
  d = (g/L) r

- Zona de penumbra

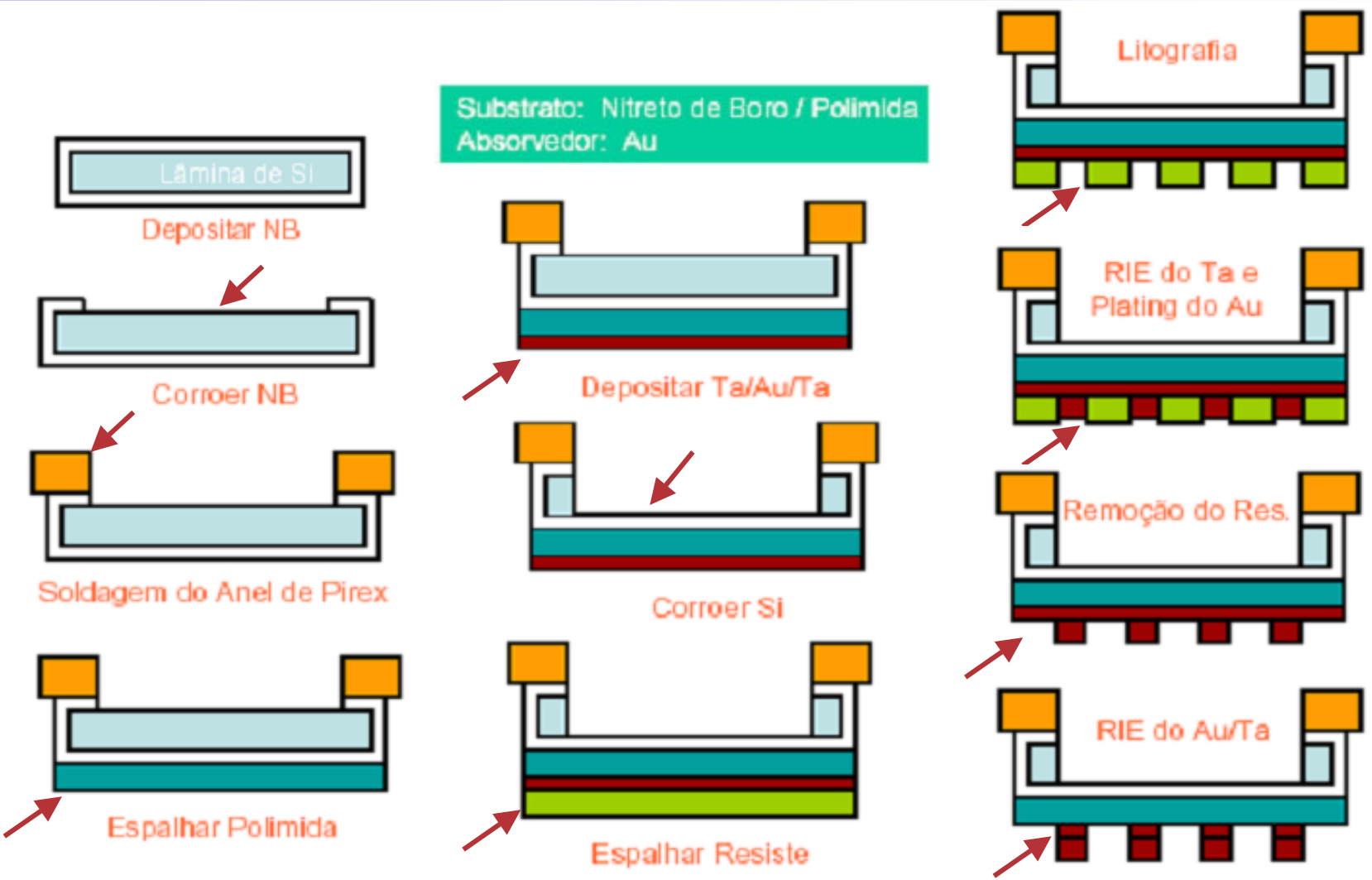
  p = (g/L) a

Soluções

- Pode-se corrigir a máscara para d
- Reduzir o espaçamento g (muito difícil, planicidade do substrato e da máscara)
- Aumentar L (fontes mais intensas)



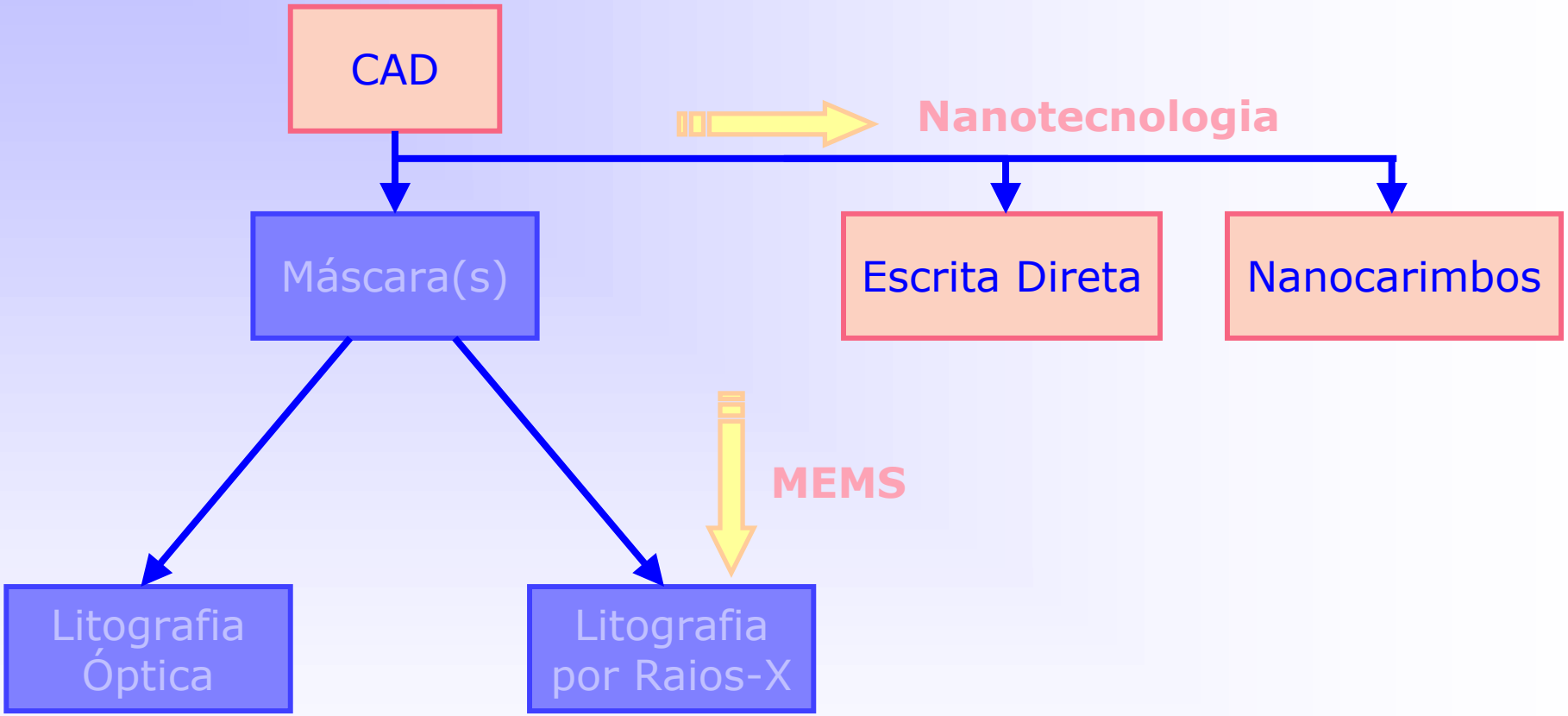
Fabricação de uma máscara para Raios-X



No Brasil

- Diversos equipamentos de contato/proximidade:
  - UFRGS
  - UFPE
  - Cenpra
  - LNLS
  - Unicamp
  - USP
  - CETUC
  - UFMG
- Raios-X: Linha de Luz Síncroton LNLS
- Equipamento de Projeção: CEITEC/RS
- Máscaras: Cenpra

Amanhã


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