



PSI-3552 Fabricação e Caracterização de Dispositivos Nanoeletrônicos

Fotolitografia


**Laboratório de Microeletrônica
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo**

Prof. Roberto K. Onmori sala C2-70 (tel. 3091-5251)
email: RKONMORI@LME.USP.BR

Prof. Fernando J. Fonseca sala C2-65 (tel. 3091-0730)
email: FERNANDO.EPUSP@GMAIL.COM




1



Como e onde são fabricados os Circuitos Integrados?

Suponha que este é o espaço onde ocorre a Fabricação de Circuitos Integrados. Quais as etapas que ocorrem dentro deste espaço?



2

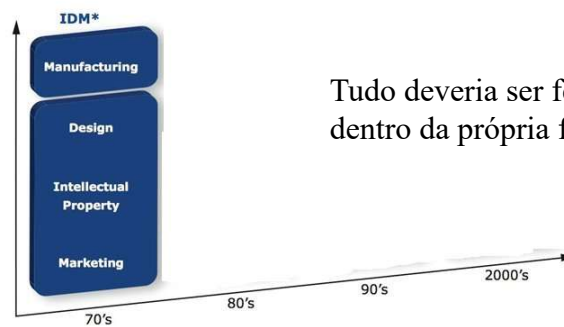
A fabricação de Circuitos Integrados é realizada em Salas Limpas. Mas nem todas as etapas precisam acontecer nas mesmas Salas Limpas.



3

Semiconductor value chain deintegration: Business model's historical evolution

(source: Successful Semiconductor Fabless conference, Yole Développement, Mar. 2013)



• **IDM*s are vertically integrated;** In the **70's**, most companies were **IDM**.

*IDM = Integrated Devices Manufacturer

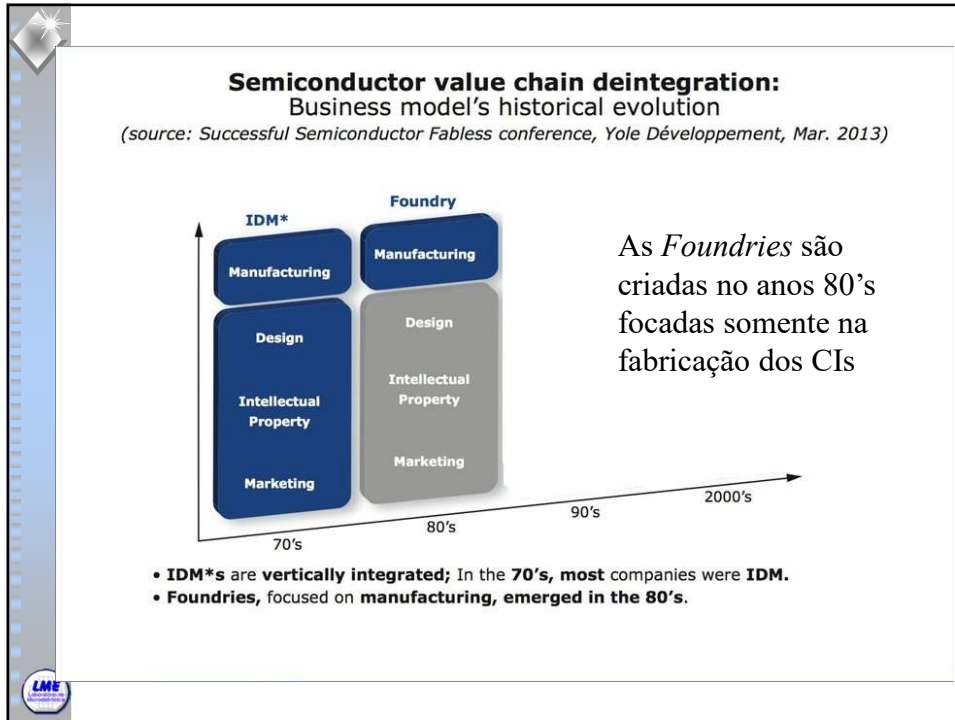
<https://seekingalpha.com/article/4250209-top-3-semiconductor-foundry-stocks-to-buy>

4

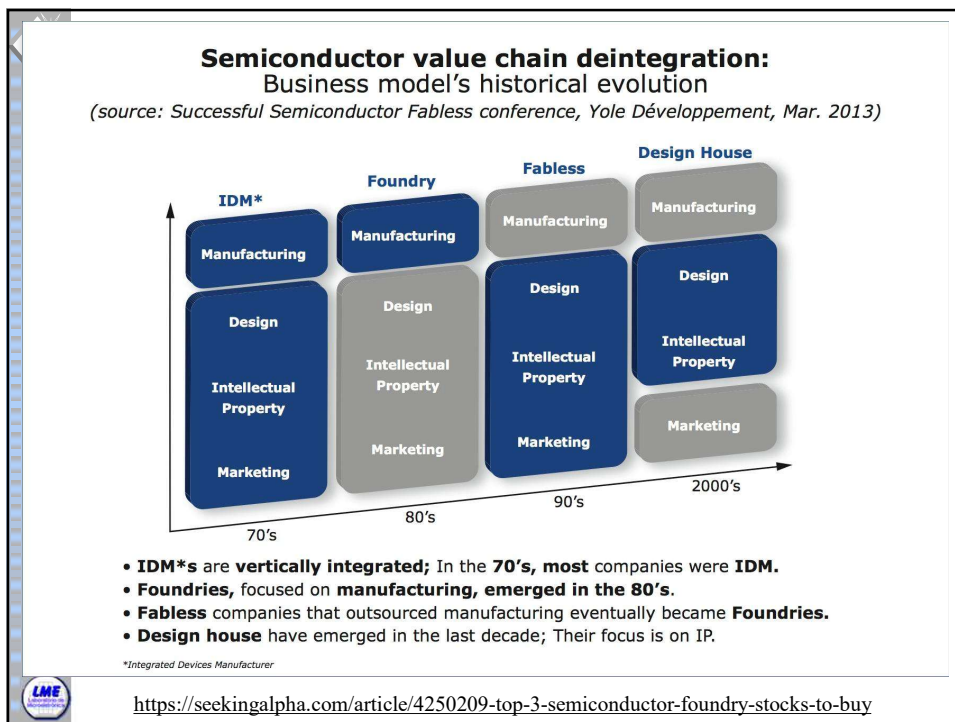
Slide 4

F1

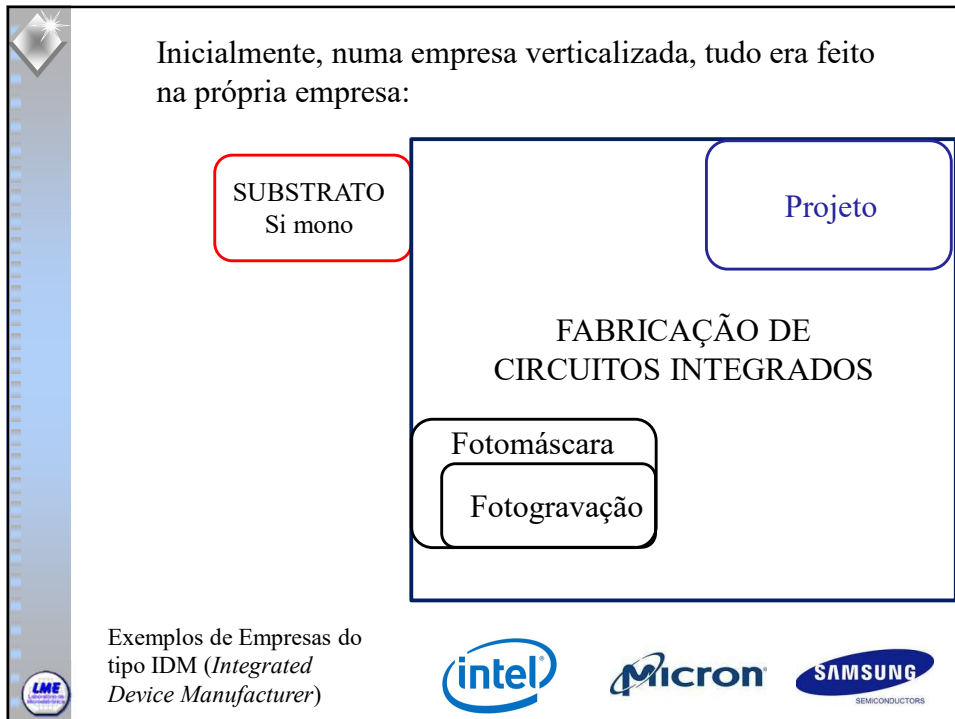
Fernando; 21/09/2020



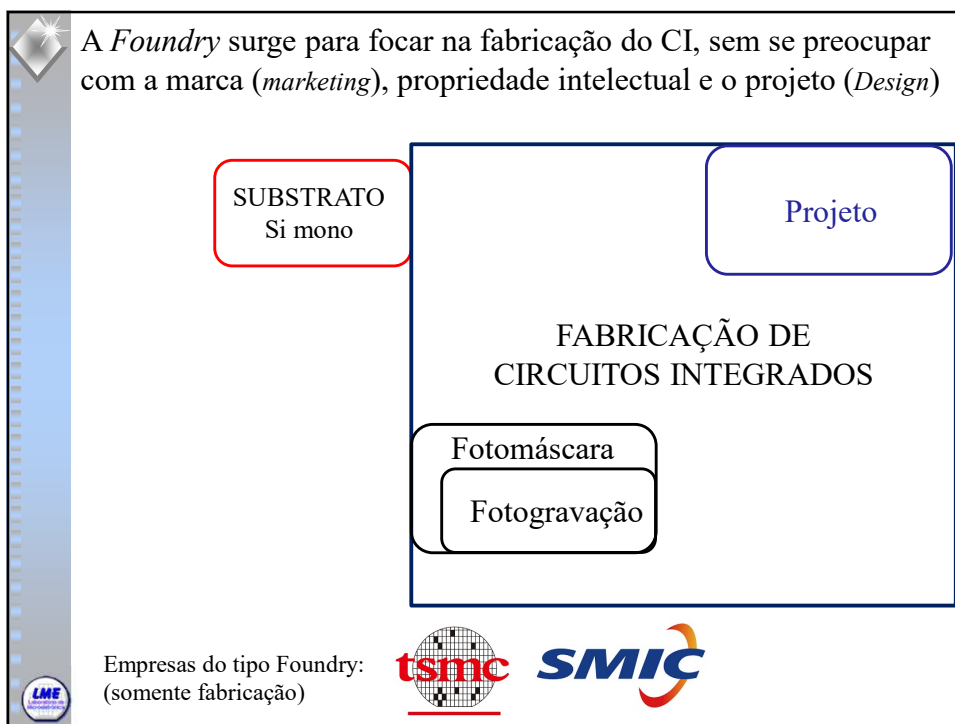
5



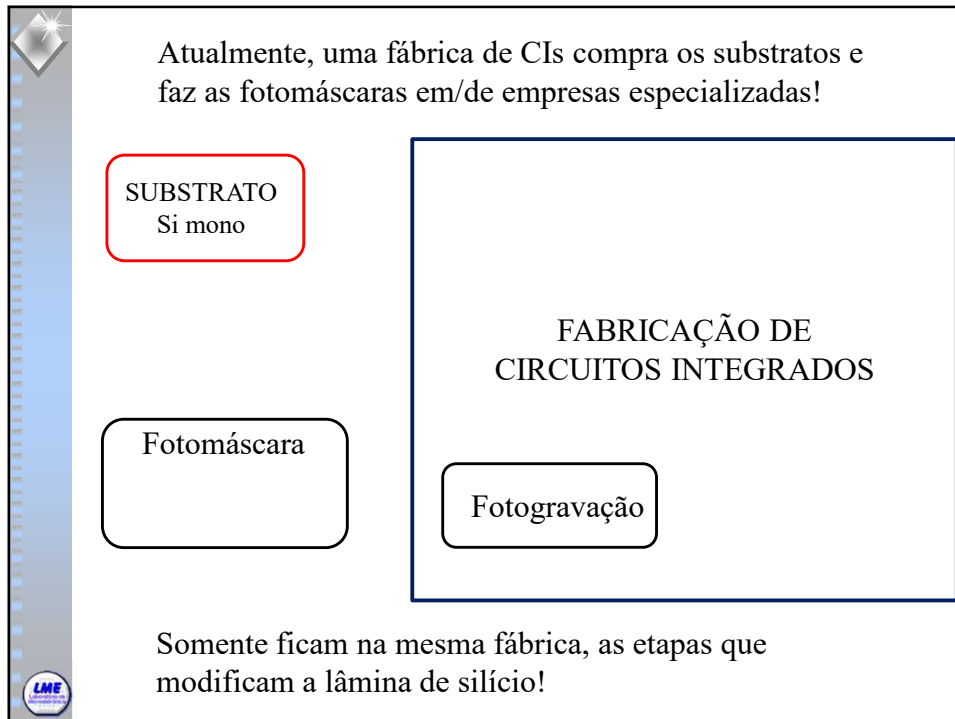
6



7



8



11

Tópicos a serem estudados:

- Introdução
- Máscara – usos
- Idéia da dimensão μm
- Fotoresiste
 - Matrix
 - Inibidor
 - Positivo
 - Negativo
 - Resíduos
 - Propriedades
 - Tipos de fotoresiste
- Máscaras – matrizes
- Processo fotográfico
- Fotorepetidora
- Fotorepetição
- “Pattern Generator”
- “Spinner”
- Transferência de imagem
- Fotoalinhadora
- Alinhamento
- Cuidados
- Revelação
- Etapas básicas no processo
- Litografia convencional
- Processo “Lift – off”
- Problemas de difração
- “Eletron beam”
 - Positivo
 - Negativo
 - Polímeros
- Raios – X
- Outros métodos
- Bibliografia
- Tema de artigo

Advanced
Lithography

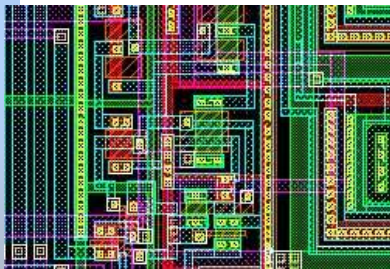
Making eaf, Work page 50
Optical Damage Tests page 57
Deep UV Resists page 63

Measuring
Critical Dimensions
page 73

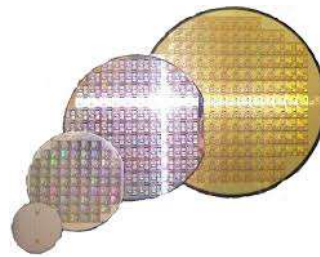
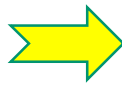
12

Iniciando a fabricação dos CIs:

O projetista de CI gera um desenho (*lay-out*) dos dispositivos a serem fabricados sobre a lâmina de Si



Projeto de CI

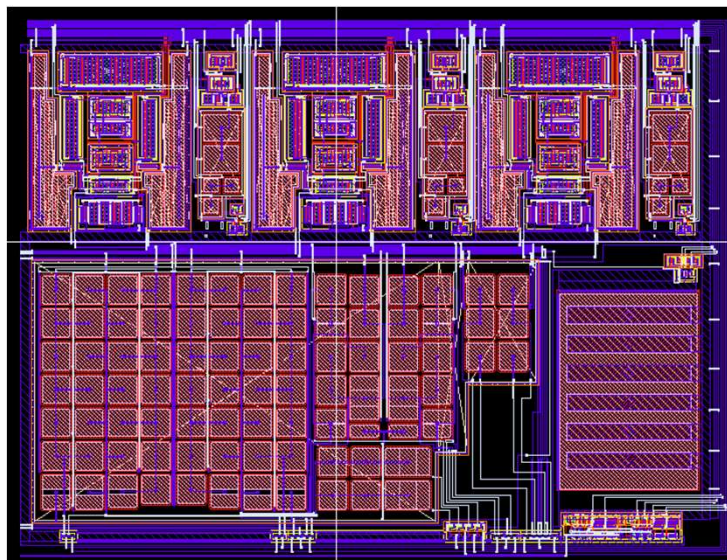


CI sobre o Silício



13

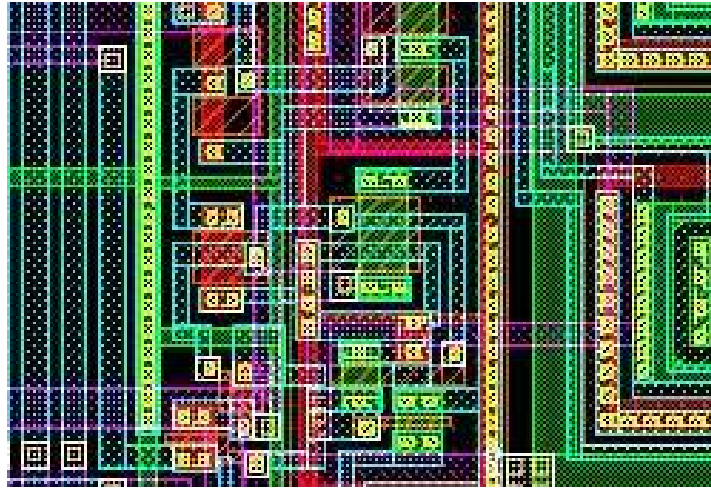
Circuito Integrado



O projeto do CIs é feito segundo as especificações do circuito eletrônico desejado, respeitando as regras e limitações do fabricante do CI.

14

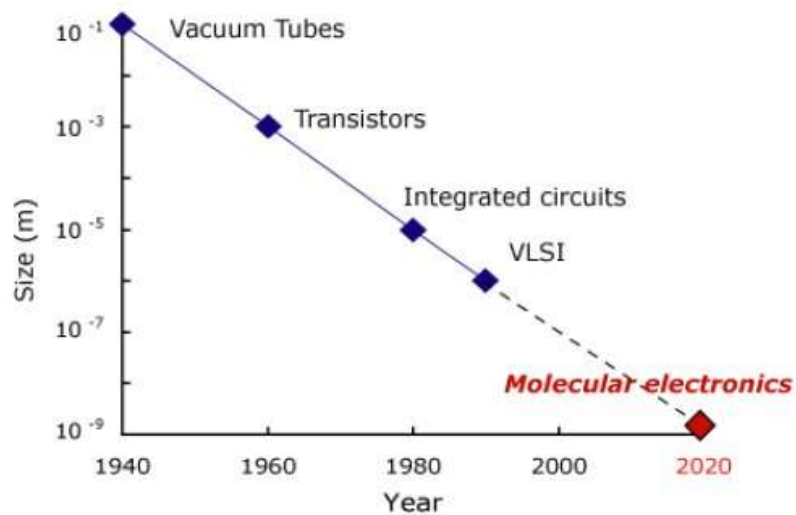
Fotomáscaras



As fotomáscaras são definidas separando cada etapa de fabricação, a fim de realizar uma ação sobre a lâmina de cada vez.

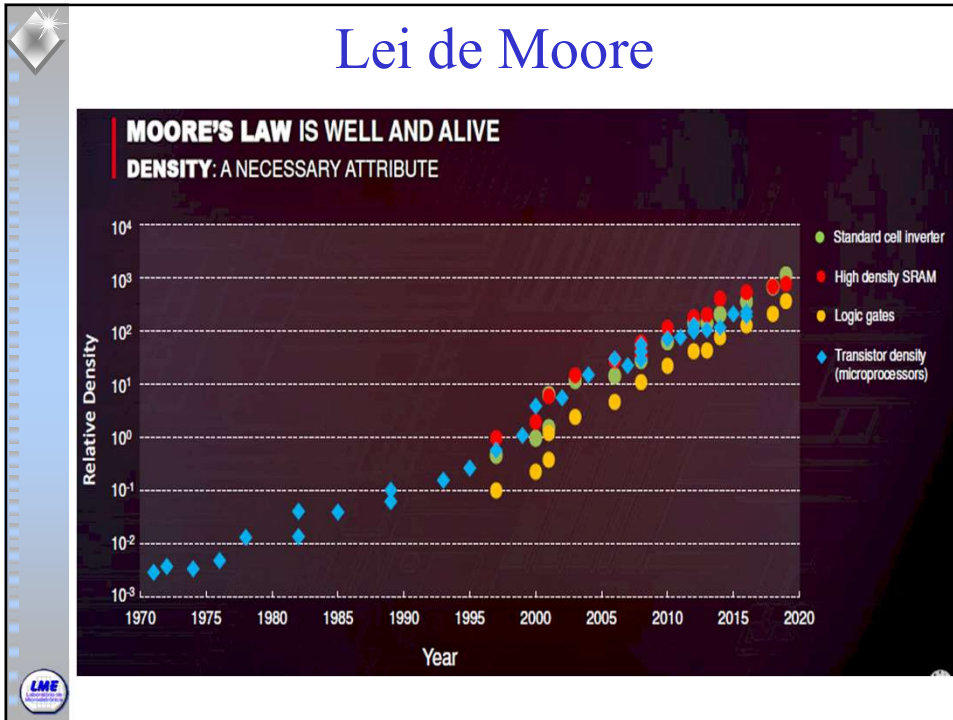
15

Lei de Moore*

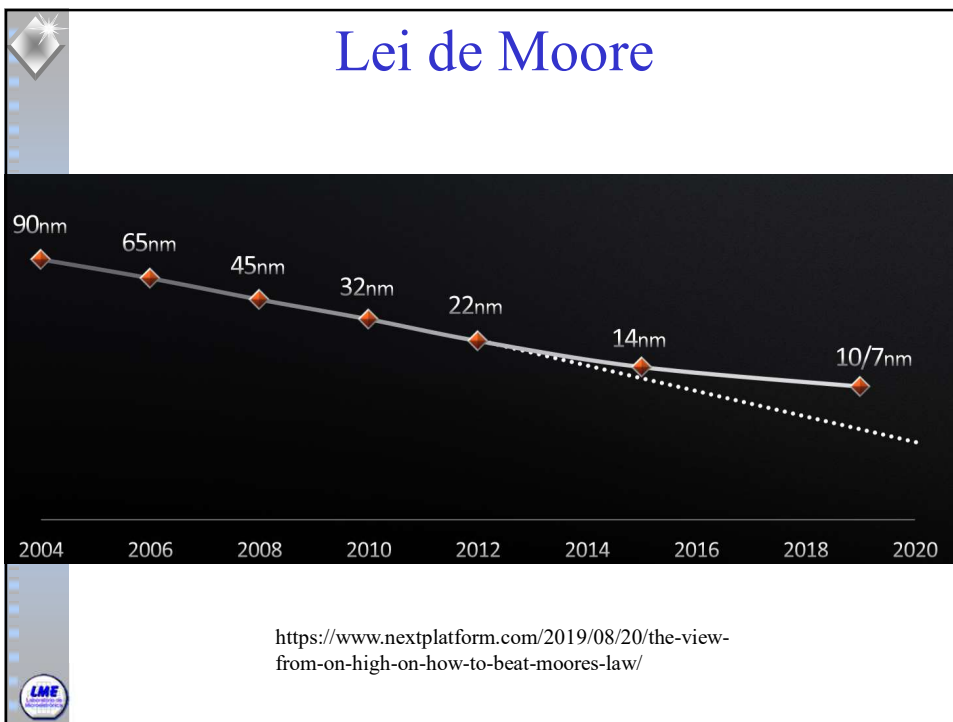


*Previsão feita em 1990

16



17



18

Lei de Moore

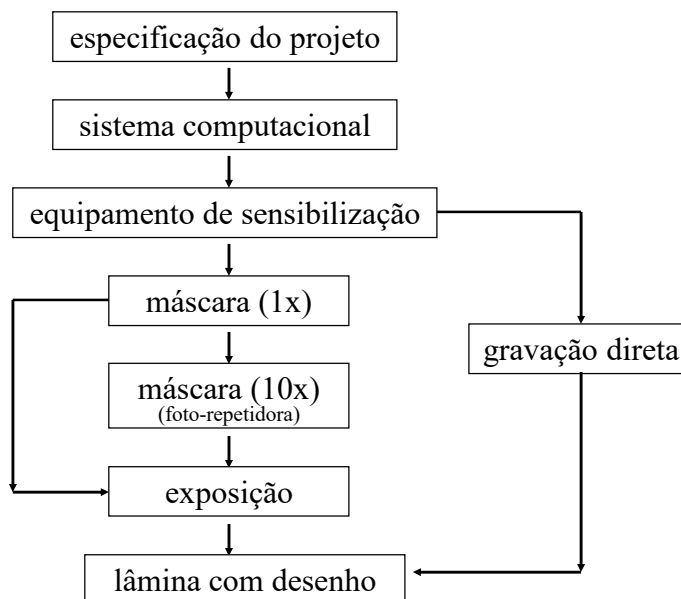
A lei de Moore estabelece que a quantidade de transistores num chip duplica a cada 18 a 24 meses.



Mas nos últimos anos, chegando próximo do limite físico do arranjo cristalino, a diminuição das dimensões tende a mudar a sua tendência e afastando-se da lei de Moore.

19

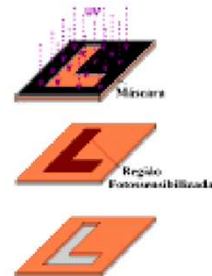
Fluxograma



20

Desenho (máscara) e o Fotoresiste:

- A partir de uma geometria estabelecida, deseja-se transferir o desenho para o material fotosensível através do uso de uma fonte luminosa (luz).
- Após a sensibilização, faz-se a revelação e a posterior remoção do material fotosensível resultando na geometria desejada.



O material remanescente é utilizado para delinear geometrias:

- decapagens
- metalizações
- dopagens
- deposições
- SiO₂
- metal (Al, Au, Ag...)
- Si-poli



21

O Fotoresiste

- fotoresiste (exemplo: AZ 1350 para o processo óptico)
 - - material que muda a solubilidade após a exposição a luz
- dois tipos: positivo e **negativo**
- fotoresiste (FR):
 - “matrix” (resina):
 - boa adesão sobre a superfície a ser fotogravada
 - propriedades mecânicas
 - inerte à radiação
 - estabilidade térmica
 - viscosidade adequada
 - resistência ao ataque químico
 - flexibilidade
 - elevada pureza química
 - material homogêneo
 - material sensível a luz (inibidor) fotoativo
 - varia quimicamente com a ação da luz
 - propriedade de absorção da luz

22

Características do fotoresiste

- o filme deve ser removido em tempo razoável
 - muito lento: tempo perdido
 - muito rápido: difícil controle e reprodutibilidade
- o resultado deve ser igual ao padrão do resiste
- as paredes do filme deve ter um perfil adequado
- o substrato não deve sofrer dano (ou o mínimo possível)
- após a sensibilização o resiste deve ser passível de remoção

23

Fotoreste positivo

- composição: matrix, inibidor (PAC), solvente
- o solvente é eliminado após o pré-bake
- matrix é uma resina de baixo peso molecular (novolac)
- o novolac dissolve em soluções aquosas alcalinas
- o PAC é insolúvel em solução aquosa e é fotosensível e impede que o novolac se dissolva (inibidor)
- PAC + matrix reage com a luz UV formando um material solúvel em solução alcalina (revelador), com a taxa de remoção de 1000-2000 Å^o seg
- O material não exposto à luz UV tem uma taxa de remoção do fotoresiste de 10-20 Å^o seg

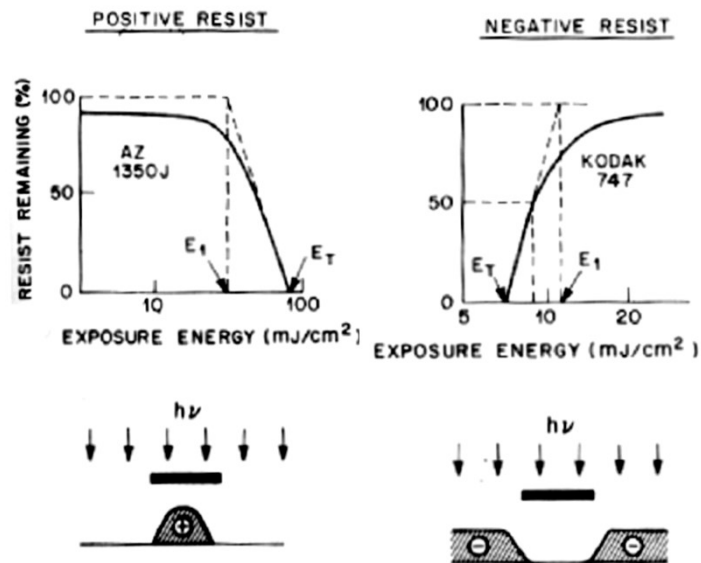
24

Fotoresiste negativo

- muito usado em sistemas até o VLSI mas o inchamento requer resolução de até 3 μm .
- vantagens:
 - melhor adesão em determinados substratos
 - maior rapidez na exposição possibilitando maior área exposta
 - maiores áreas
 - baixo custo ($\sim 1/3$ do positivo)
 - menor alteração em relação à temperatura
 - menor alteração com a diluição do revelador

25

Resíduos de fotoresiste em função do tempo de exposição



26

Propriedades

- sensibilidade: é definida como a energia necessária para causar uma resposta do fotoresiste. Esta grandeza possui limites práticos pois, se o FR apresenta alta sensibilidade pode ser que a sua vida útil seja reduzida.

$$S = \text{num. fotoindução} / \text{num. fótons absorvidos}$$

- Resistência a decapagem e estabilidade térmica: habilidade do resiste em suportar procedimentos de ataques químicos. Os resistes possuem boa resistência a ataques úmidos mas não para processos secos.
- Adesão: aplicado para diversas superfícies como Al, Au, Si. Apresenta problemas sobre Si-poli, metais e SiO₂
- Viscosidade: conteúdo sólido que fica após a eliminação do solvente e depende desse conteúdo e da temperatura como parâmetro da espessura do resiste

27

Tipos de fotoresiste positivo

resiste	% sólido	viscosidade
Kodak microresite 809	32	23
Hunt way HPR 204	28	17
Shipley AZ 1370	27	17
Shipley AZ 1350J	31	30
Shipley AZ 1450J	31	28

28

Máscaras matrizes

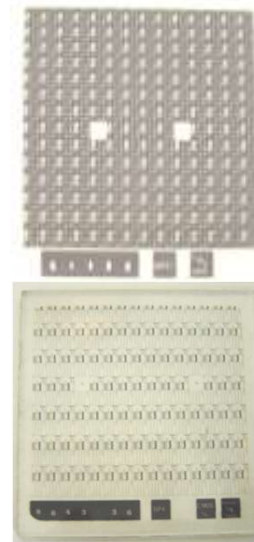
- placa de vidro (quartzo) planar com pouquíssima impureza
- coberto por :

material fotográfico

- exposição e revelação.
- material resultante serve como filtro de luz

metal (níquel cromo, alumínio...)

- necessita de fotoresiste
- exposição, revelação e remoção do metal
- o metal resultante serve como filtro de luz



29

Fabricação: processo fotográfico

confeção do “rubylith”

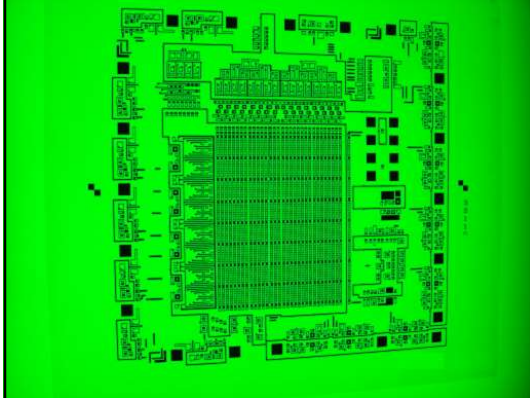
detalhe do
cortador

coordenatógrafo

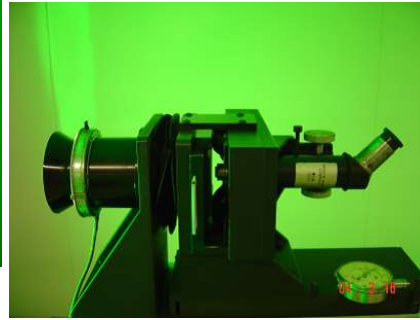


30

Fotografia e redução de 15 a 25 x



desenho com 60 x 60 cm²

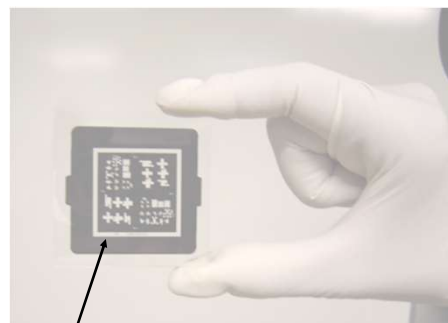
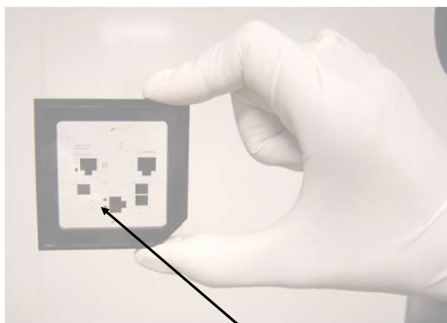


máscara com 4 x 4 cm²
(desenho com 3x3 cm²
para redução de 20x)



31

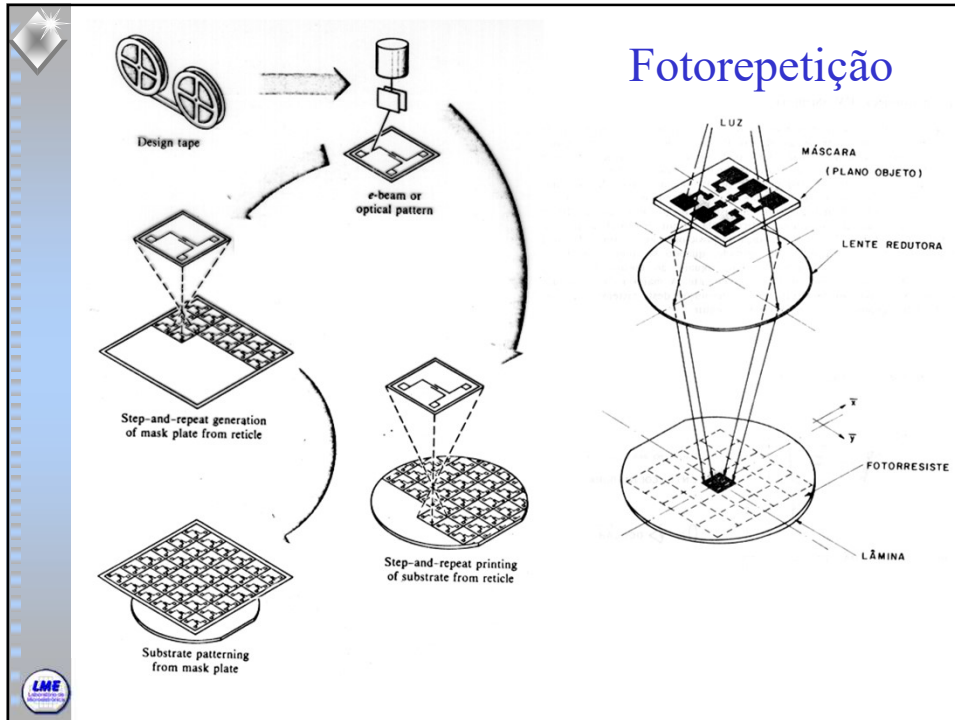
Máscara fotografada e revelada



emulsão fotográfica



32



33

Fotorepetição

3x3 cm²

redução de 10x

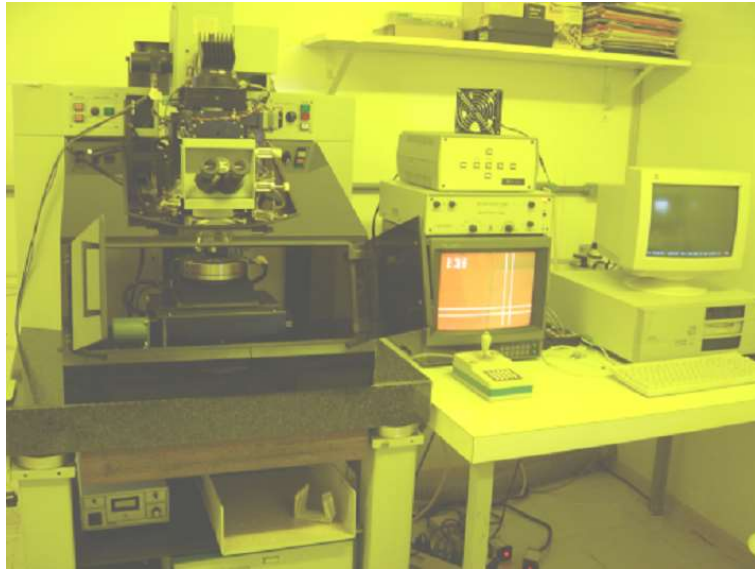
0,3x0,3 cm²
e matriz de
10 x 10

fotorepetidora

34

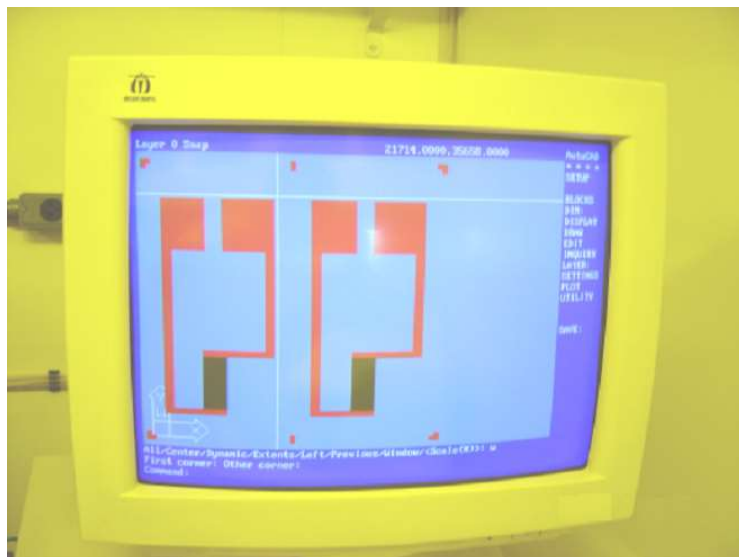
Gerador de padrões (“Pattern Generator”) :

pode gerar máscaras e também pode fazer escrita direta.

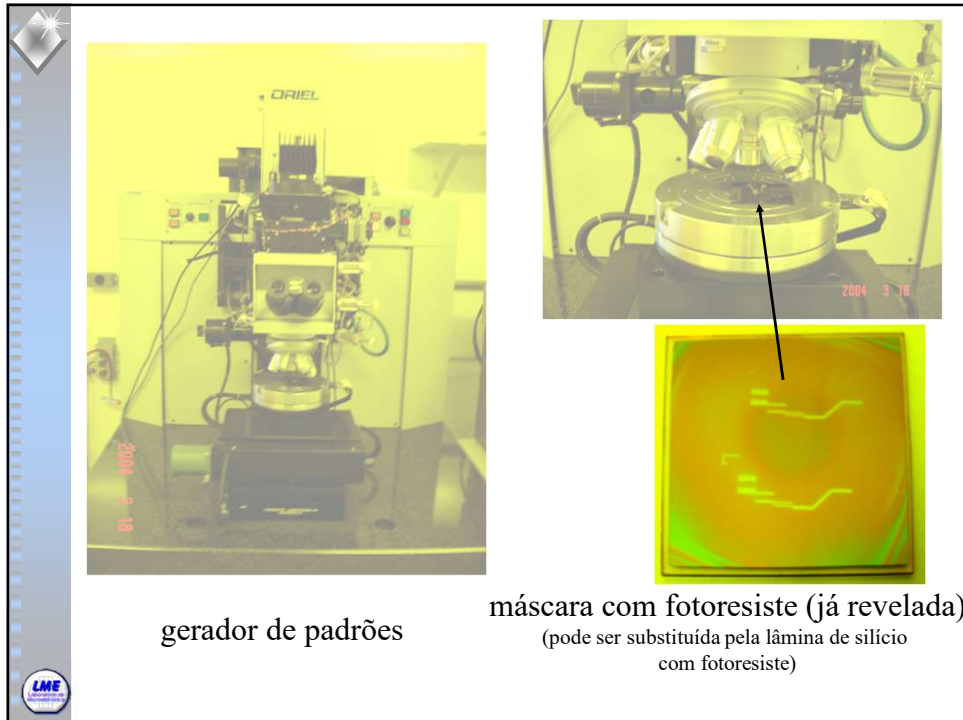


35

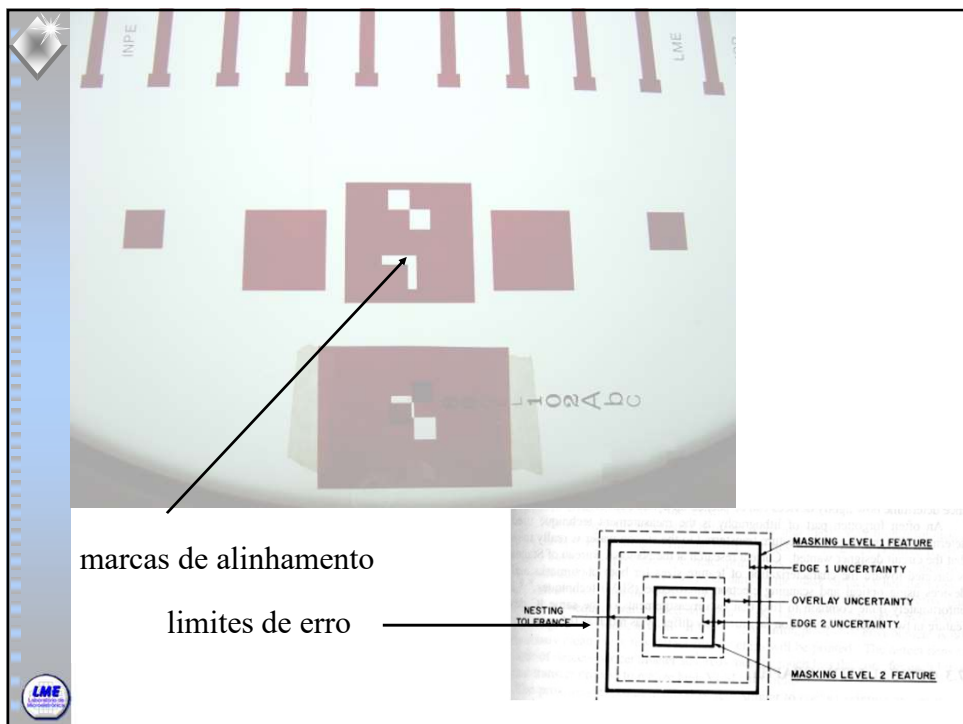
Computador para desenhar o formato da figura



36



37

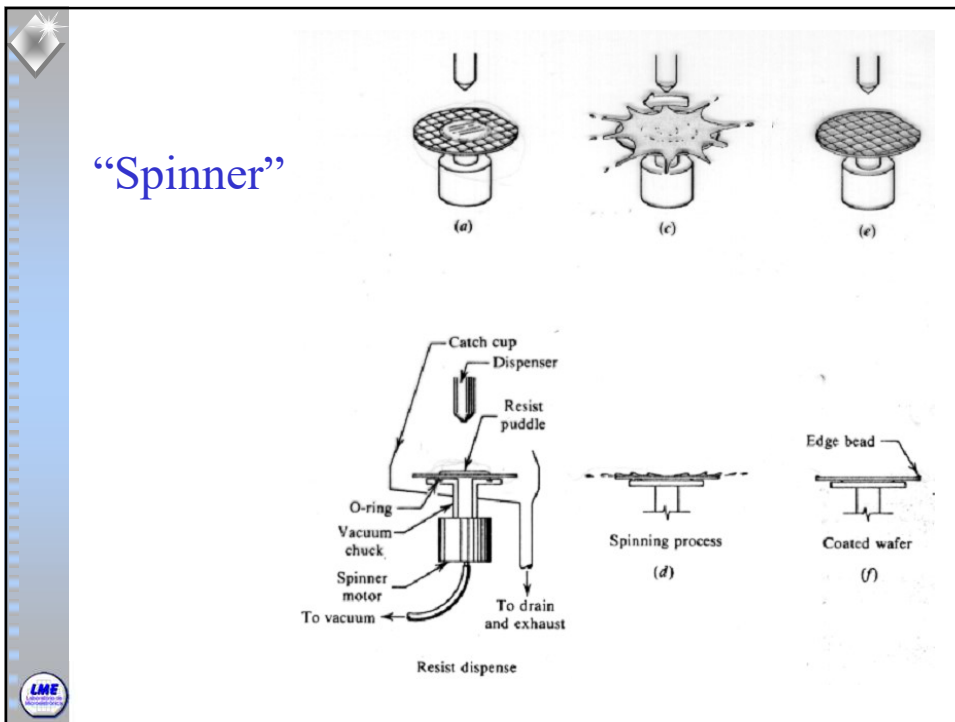


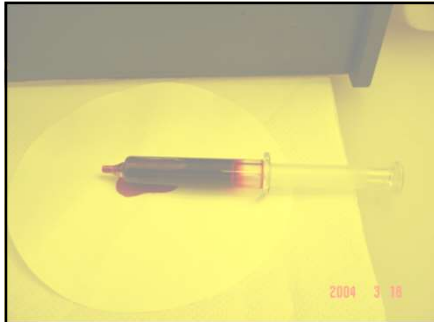
38



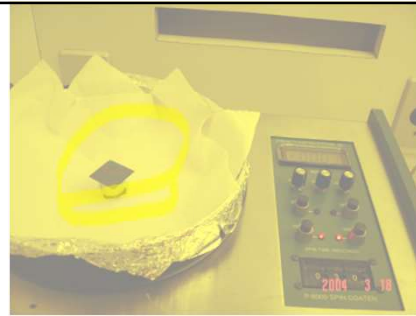
capela (iluminação amarela)
para deposição e revelação
do fotoresiste

produtos químicos





1 - fotoresiste



2 - amostra no spinner

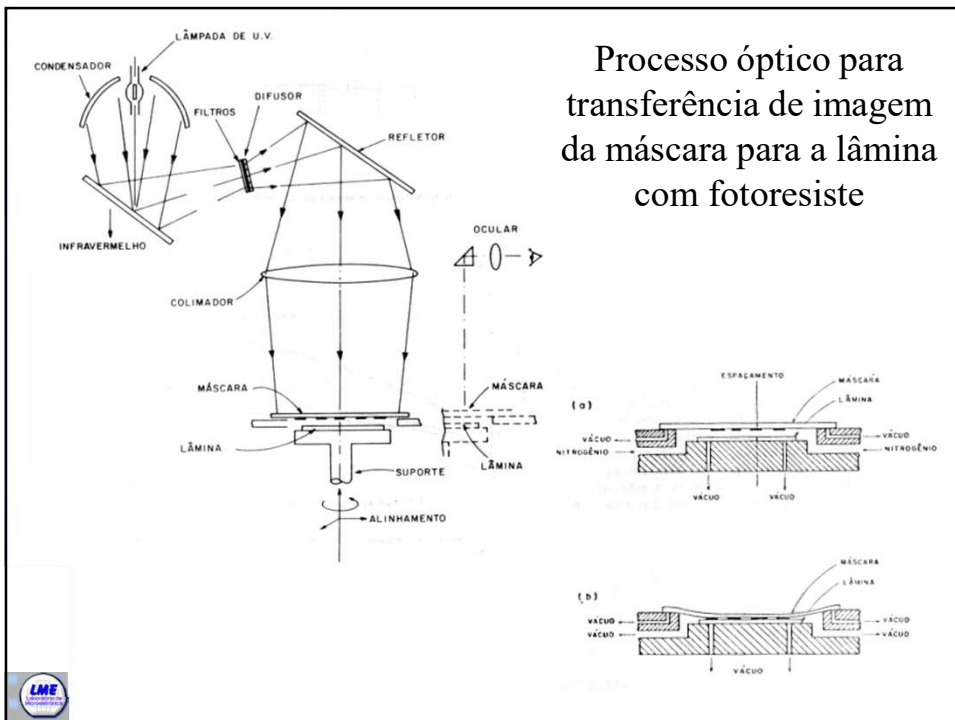


3 - aplicação do fotoresiste e posterior rotação



4 - estufa para secagem "pré-backing"

41



42

Fotoalinhadora

- alinhamento da máscara e
- exposição ao UV

suporte para a máscara

luz UV exposição

amostra com fotoresiste a ser exposto (ex.lâmina)

43

Máquinas industriais de fotolitografia

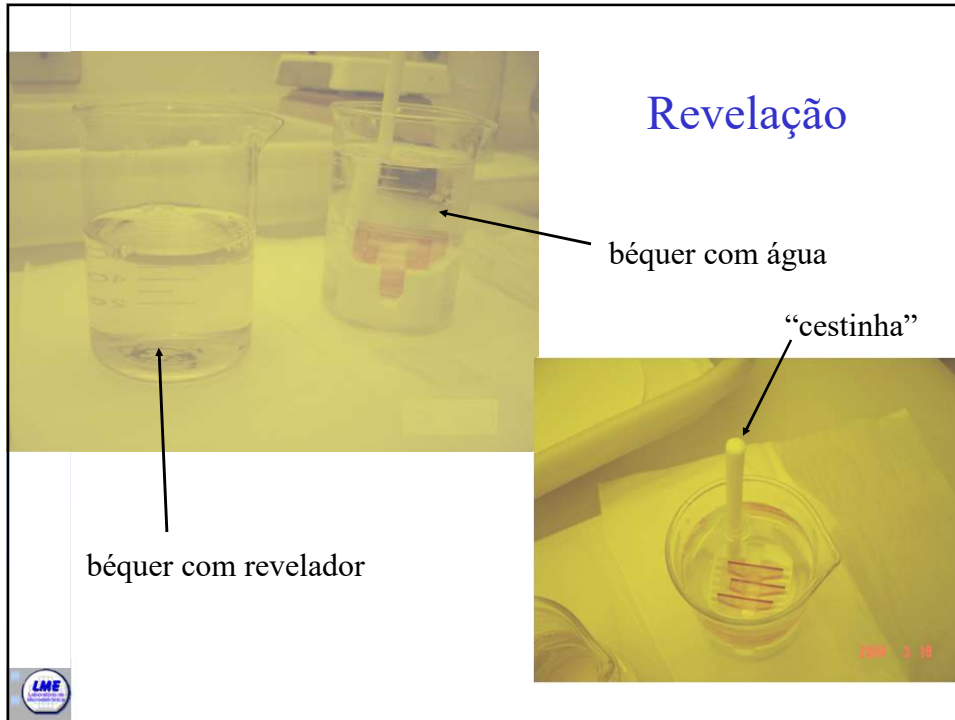
Laser pattern generator performs like wafer stepper

The Sigma7300 laser pattern generator's resolution and pattern accuracy are targeted to volume production at the 90nm and 65nm technology nodes. The system works like a micro-stepper with a programmable mask. It is based on this company's spatial light modulator (SLM) technology. The SLM is an IC with a flat, mirror-like surface. DUV light is reflected off the surface of the SLM to expose photoresist on a photomask blank, forming the pattern of the mask. The tool uses a 248nm laser with 2kHz flash rate and a 0.82 NA. It employs many of the same resolution enhancement techniques that wafer steppers use to achieve maximum resolution and CD control. **Micronic Laser Systems AB, Taby, Sweden; ph 46/8-638-5200, ulf.sundstrom@micronic.se, www.micronic.se.**

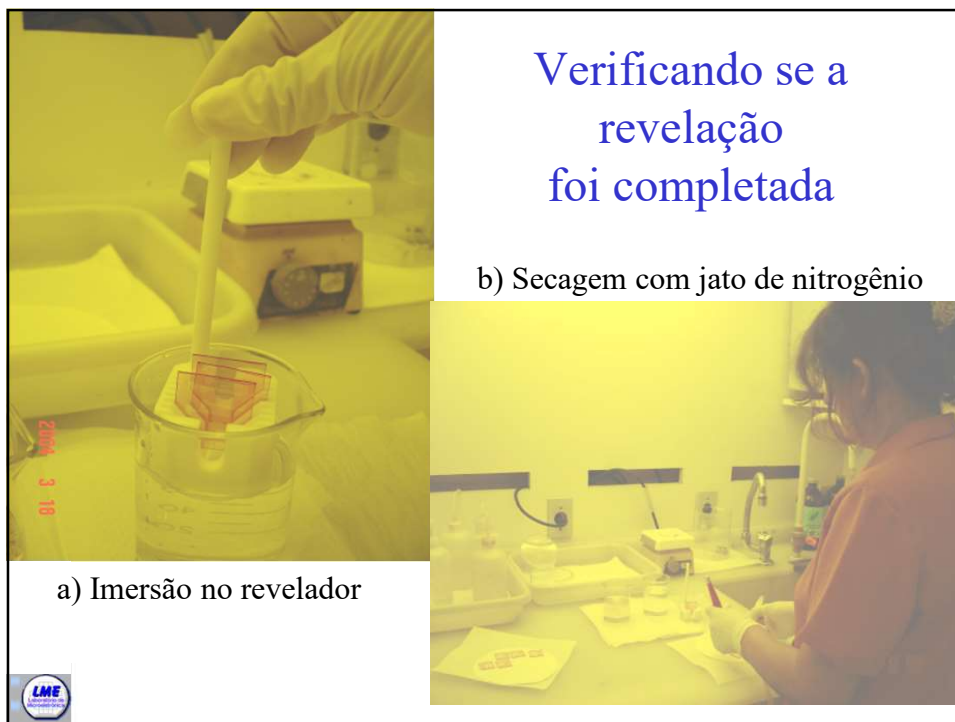
Metrology tools inspect up to 120wph

These stand-alone and integrated 200mm and 300mm metrology tools for 65nm and 45nm nodes have the repeatability and matching needed to enable reliable process control. The capabilities of the ultra-II tools on CVD etch/polish stops and hard masks enable low-*k* integration. *MetaPULSE-II* provides fab-proven second-generation pulse technology for all stages of copper integration from ultrathin barrier deposition to post-CMP residual barrier, dishing, and erosion process control. *Wafer-View* automates macro-defect inspection for lithography or CMP at speeds of up to 120wph. **Rudolph Technologies Inc., Flanders, NJ; ph 973/448-4316, jclerico@rudolphtech.com, www.rudolphtech.com.**

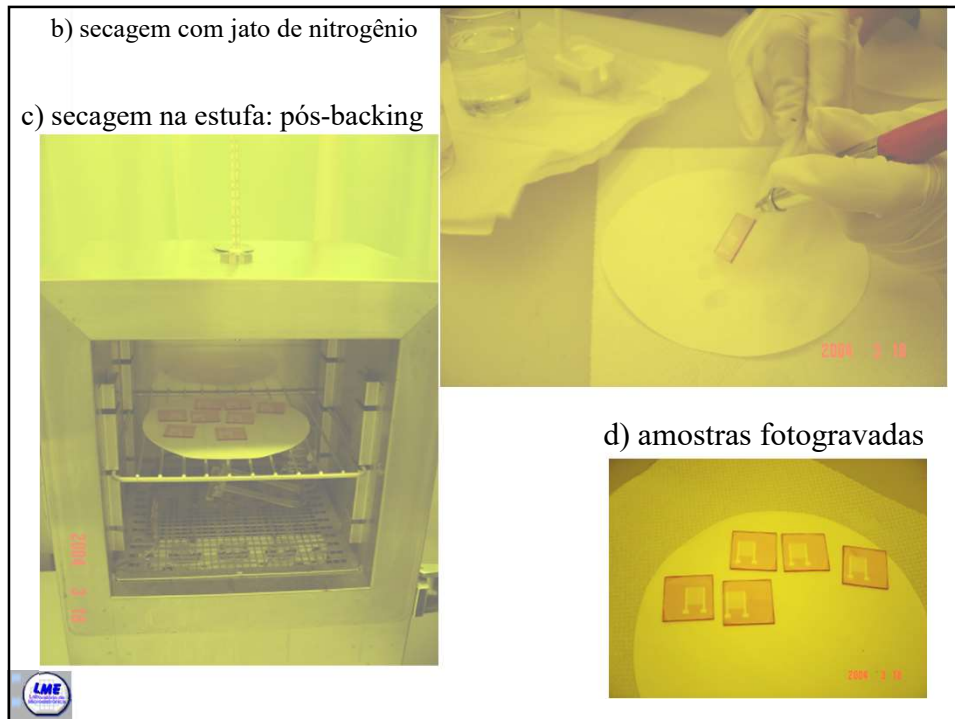
44



45



46



47

Cuidados:

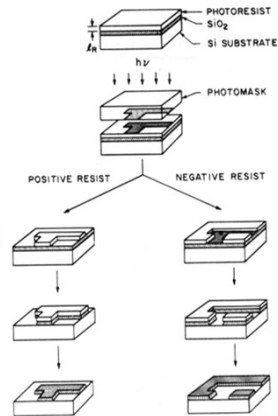
- luz ambiente
- positivo x negativo!
 - onde remover (ou não remover)
- área de visão abaixo da fotomascara
 - visão do que está em baixo
 - contraste transparente x escuro
- produtos químicos
- resiste ao processo seguinte? (plasma, vácuo....)
- armazenamento (seco, limpo...)

The diagram shows a large green circle with two small white squares inside it, representing a view through a photomask. A red timestamp '2004 3 10' is visible in the bottom right corner of the diagram.

48

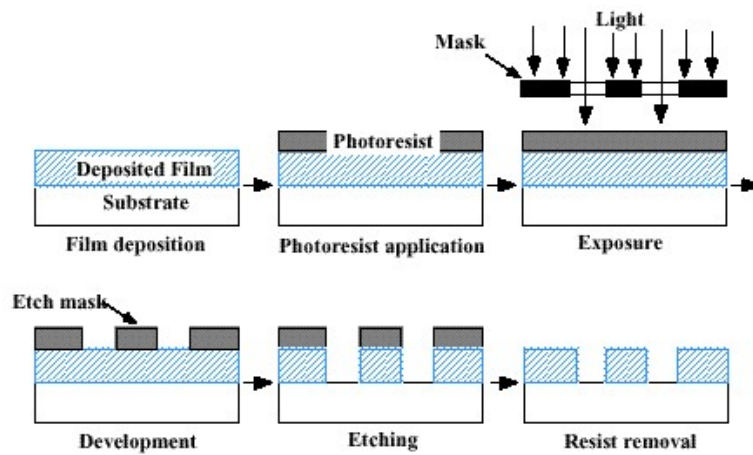
Etapas básicas no processo

- preparação do substrato (limpeza, uso de HMDS...)
- aplicação do fotoresiste (temperatura, tempo, rotação..)
- pré-baking (temperatura, tempo,..)
- alinhamento
- exposição
- revelação
- pós-baking (temperatura, tempo,..)
- etching (decapagem)
- remoção do fotoresiste



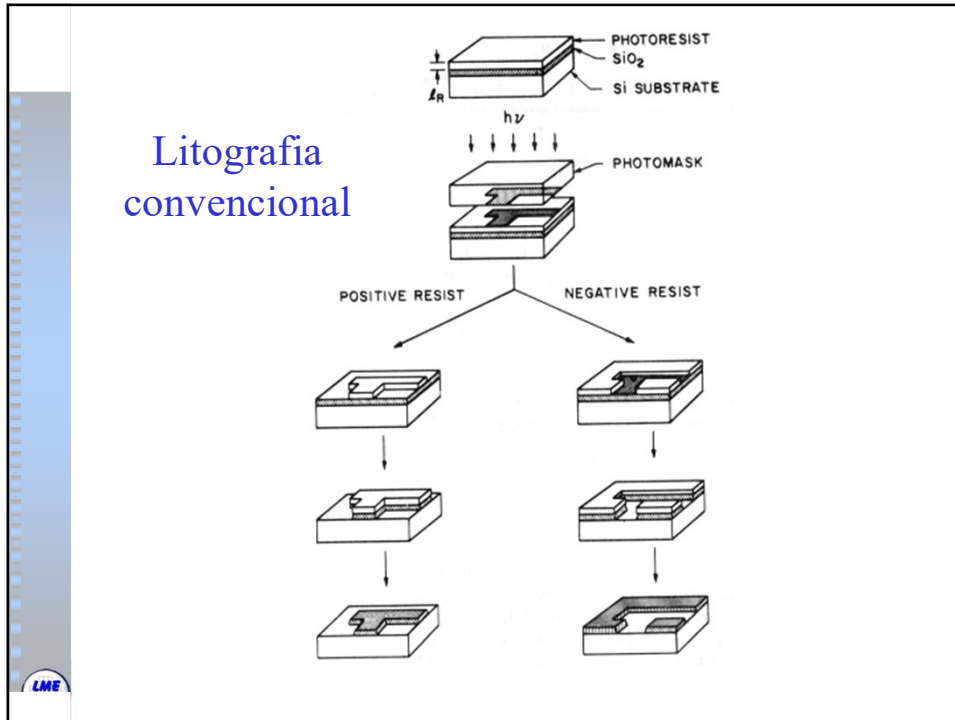
49

Litografia convencional



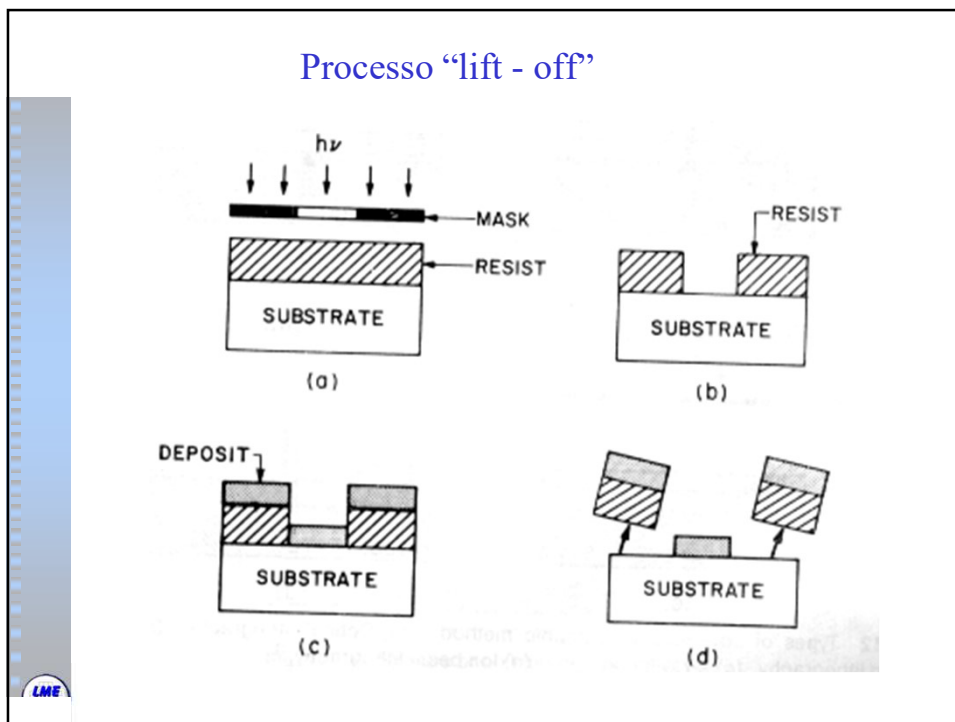
50

Litografia convencional



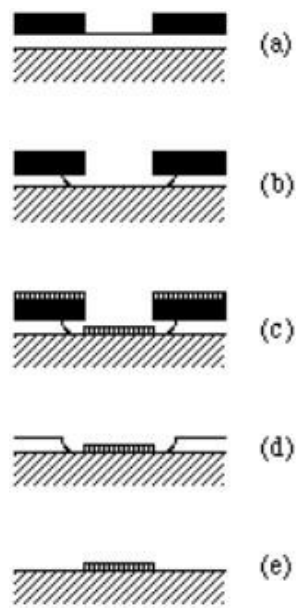
51

Processo "lift - off"



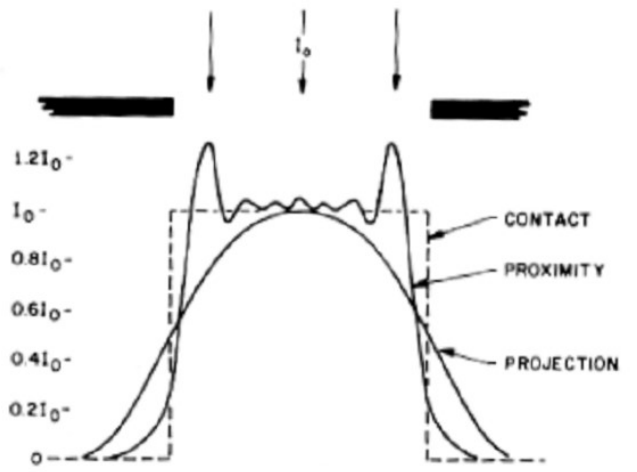
52

Processo "lift-off" (detalhe)



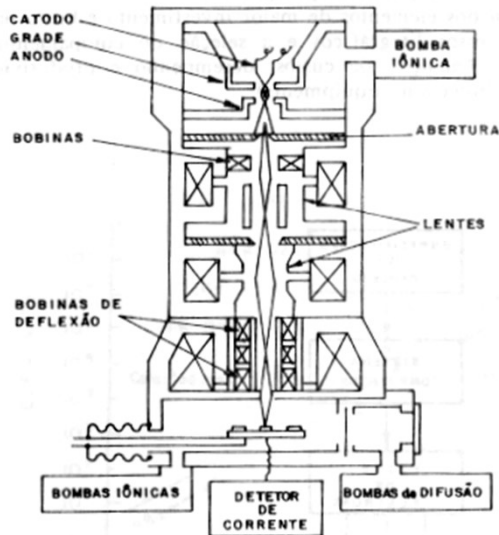
53

Problemas: difração



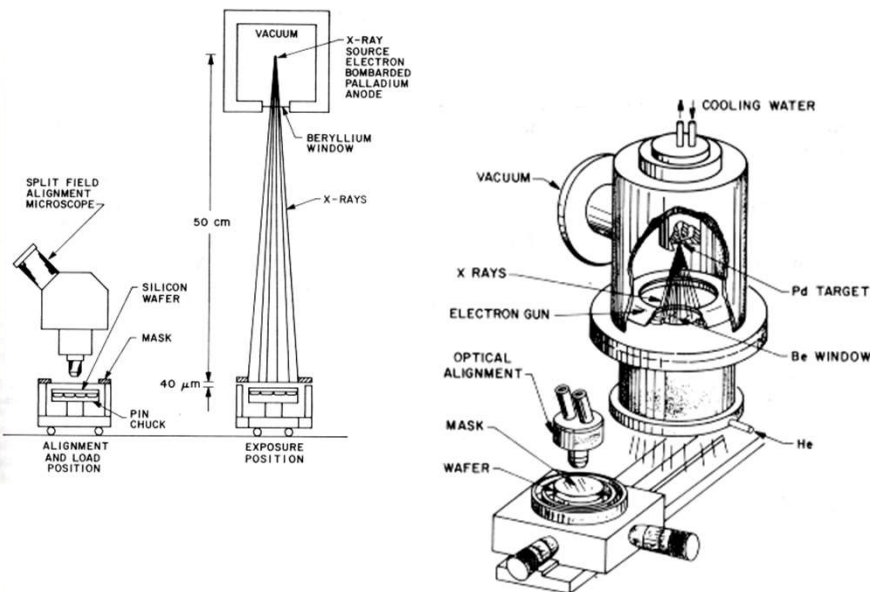
54

Electron beam



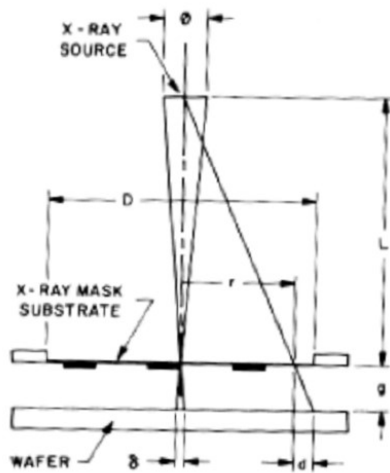
55

Litografia por raios - X

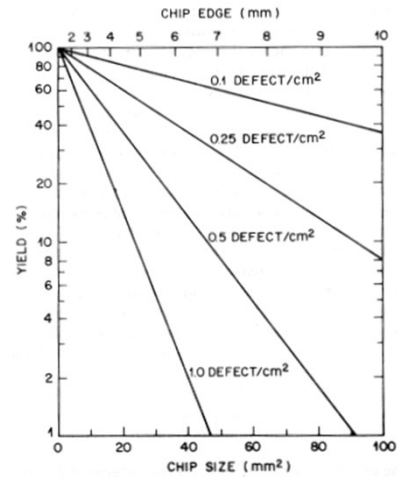


56

Posicionamento da máscara



Quantidade de defeitos por área e campo




57

Outros métodos

- Ion beam lithography
- Deep UV lithography
- multi level resists
- Inorganic resists

58



Referências bibliográficas:

- Processos em Microeletrônica, V. Baranauskas, Ed. V. Baranauskas, Campinas, 1990.
- VLSI Technology, 2nd Edition, S.M. Sze, McGraw-Hill, 1988.
- VLSI Eletronics Microstruture Science, vol 6, Material and Process Characterization, Edited by Norman G. Einsprch, Academic Press, 1983
- Semiconductor Devices, Physics and Technology, S.M. Sze, Murray Hill, New Jersey, 1985

