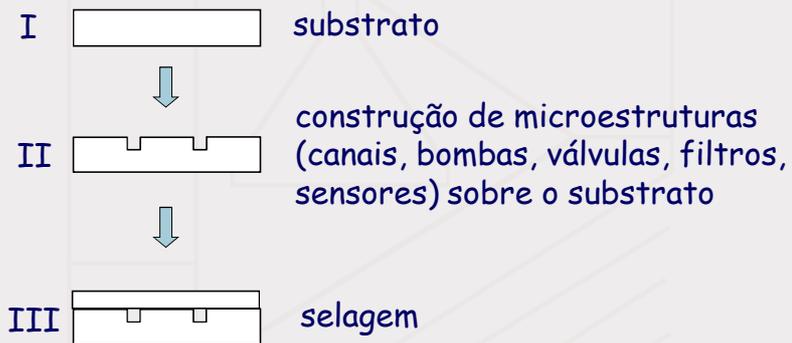


## Microfabricação

- principais etapas de microfabricação



1

## Substratos

- silício
- quartzo
- vidro
- metais
- cerâmicas
- polímeros\*

- \* polimetilmetacrilato, polietileno, polidimetilsiloxano,
- polietilenotereftalato, policarbonato, poliuretano,
- polimida, poliamida e outros

2

## Propriedades para escolha do substrato

Ópticas :   transparência à radiação UV < 300 nm  
              ausência de fluorescência

Elétricas:   isolante elétrico

Térmicas:   isolante térmico  
              selagem a baixa temperatura

Mecânicas:  adequação ao processo de microfabricação

Químicas:   inércia química

Financeira:  baixo custo

3

## Processos de Microfabricação

### Técnicas convencionais

- fotolitografia
- LIGA

### Técnicas não-convencionais (alternativas)

- micromoldagem (litografia macia, estampagem e injeção)
- ablação a laser
- impressão direta

4

## Processos Fotolitográficos

FOTO + LITO + GRAFIA

↓  
luz

↓  
pedra

↓  
escrita

- tecnologia desenvolvida nas décadas de 1970 e 1980 para a indústria de semicondutores e circuitos integrados (chips)
- silício, quartzo e vidro são os substratos mais empregados

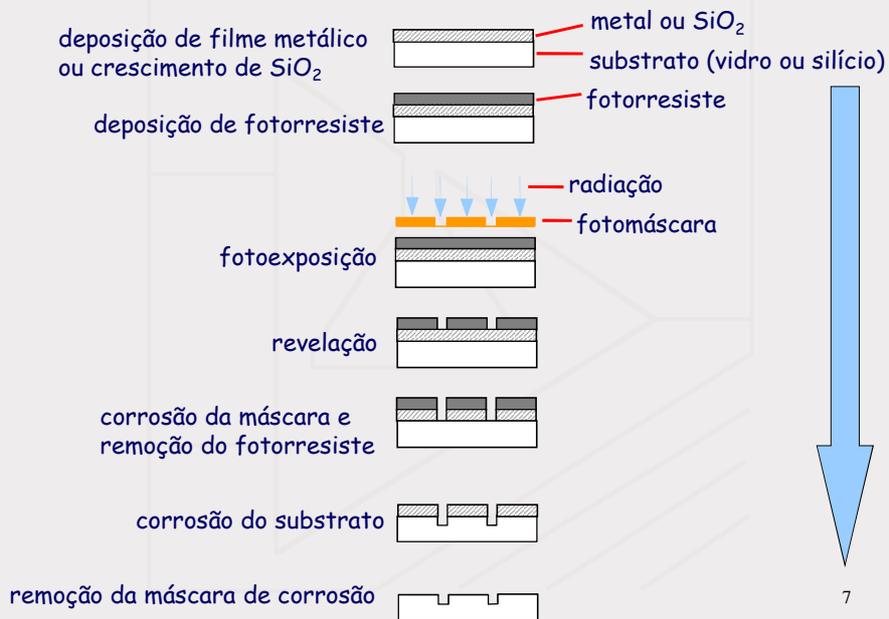
5

## Processos Fotolitográficos

- *Fotolitografia* é usada para produzir imagens de 2 1/2-D, usando um fotoresiste sensível à luz, por meio de exposição controlada
- *Microfotolitografia* é a técnica empregada para imprimir padrões em ultra-miniatura - usada primeiramente na indústria de semicondutores

6

## Principais etapas do processo fotolitográfico



## Deposição de filme metálico

Substrato de vidro ou quartzo:

Filmes metálicos de Cr e Au, com espessuras da ordem de dezenas de nanômetros, são depositados sobre o substrato, por evaporação térmica ou "sputtering".



- a camada de metal é utilizada como máscara durante a etapa de corrosão do substrato

8

## Crescimento de $\text{SiO}_2$

### Substrato de silício

Uma camada de óxido de silício é crescida pela oxidação da superfície do substrato em altas temperaturas e presença de oxigênio

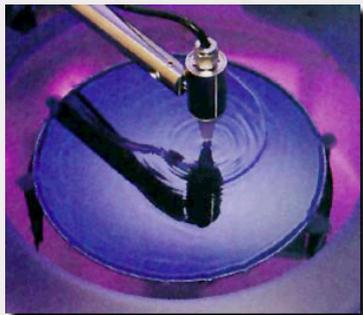
filme  $\text{SiO}_2$



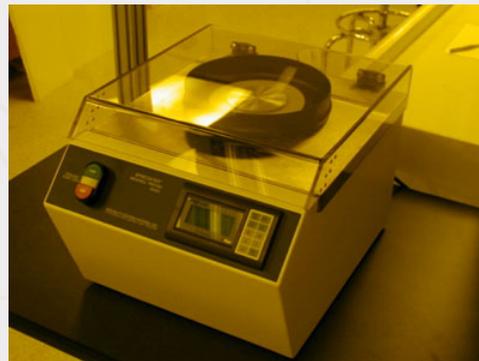
- a camada de  $\text{SiO}_2$  é utilizada como máscara durante a etapa de corrosão do substrato

9

## Aplicação do Fotorresiste



spin coater

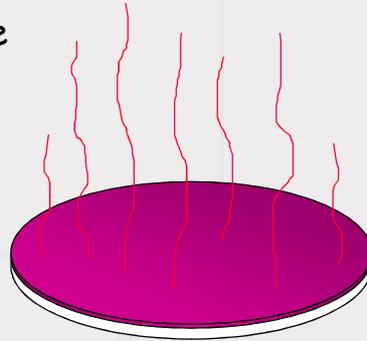


espessura: viscosidade da solução  
velocidade de rotação  
tempo de rotação

10

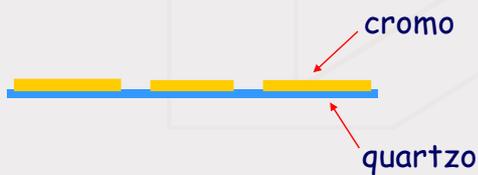
## Soft bake

- aquecimento a 75 - 100 °C
- elimina parcialmente o solvente
- reduz tensão mecânica do filme
- aumenta aderência do fotoresiste
- melhora a uniformidade
- melhora a resistência à corrosão
- excesso de aquecimento diminui a fotossensibilidade



11

## Alinhamento

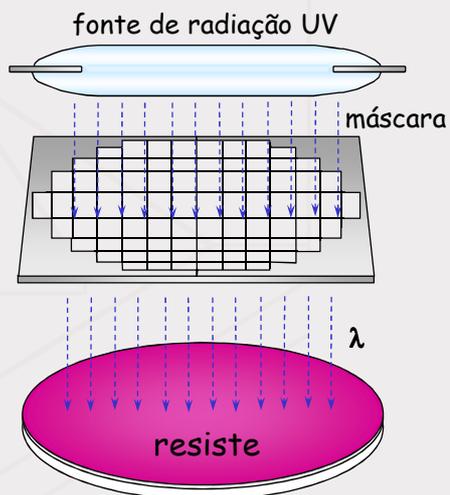


alinhamento

12

## Exposição

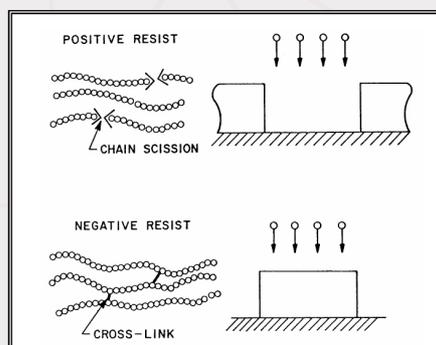
- transfere a imagem da máscara para o wafer recoberto com o fotoresiste
- ativa os componentes fotossensíveis do fotoresiste



13

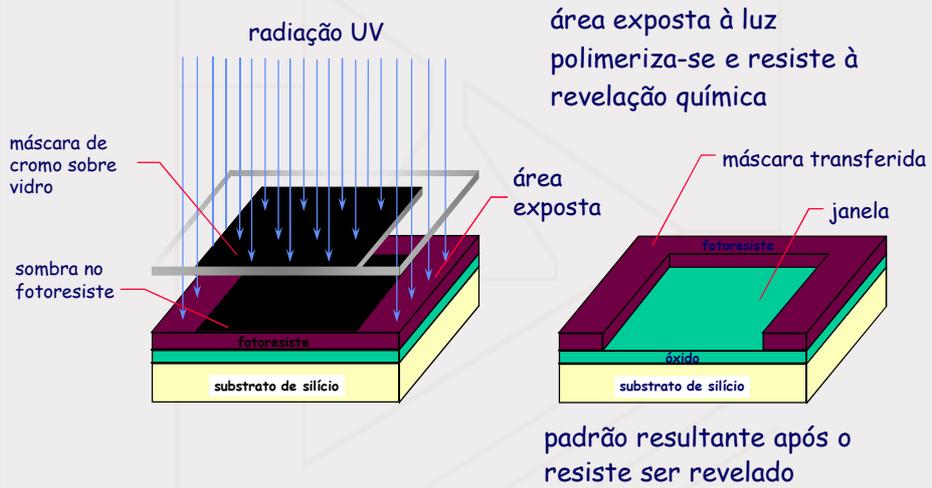
## Tipos de Fotoresiste

- negativo: imprime um padrão que é o oposto do padrão da máscara
- positivo: imprime um padrão idêntico ao da máscara



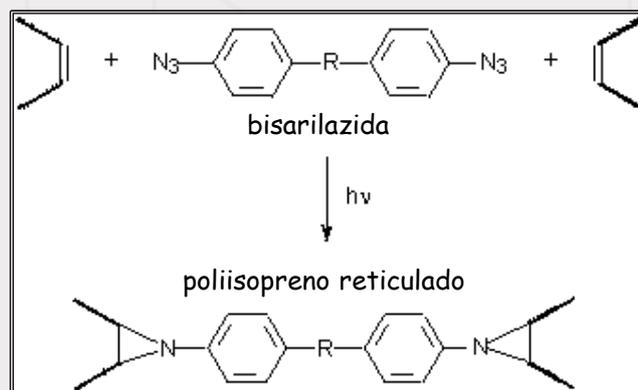
14

## Litografia Negativa



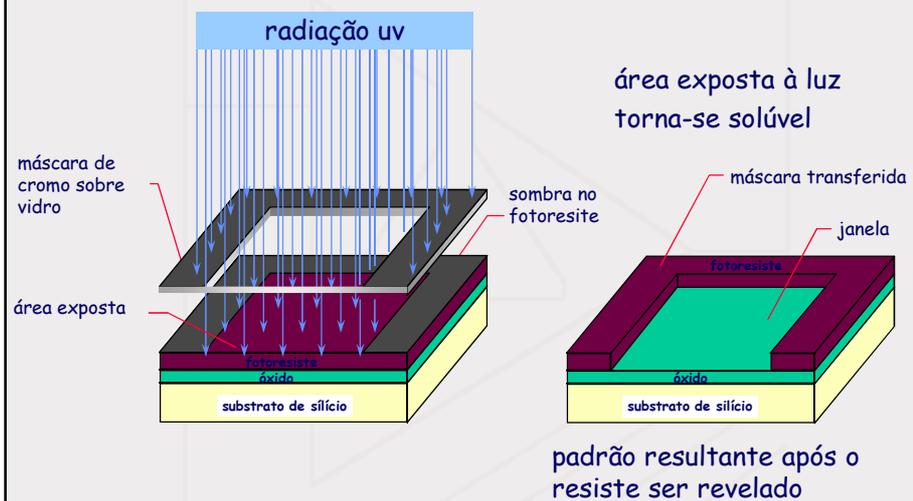
15

## Fotoreziste Negativo



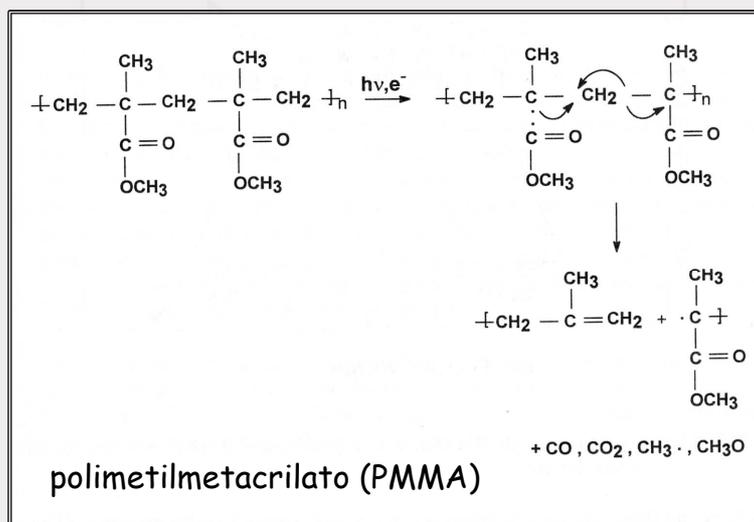
16

## Litografia Positiva



17

## Fotoresiste Positivo



18

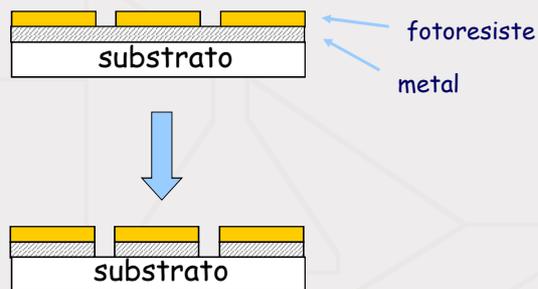
## Revelação do Fotorresiste

- áreas solúveis do fotorresiste são dissolvidas pelo solvente revelador, transferindo o padrão da fotomáscara para a camada de fotorresiste

Fotorresiste	Revelador
Positivo	KOH (sol.aquosa), hidróxido de tetrametilamônio, acetona
Negativo	Xileno

19

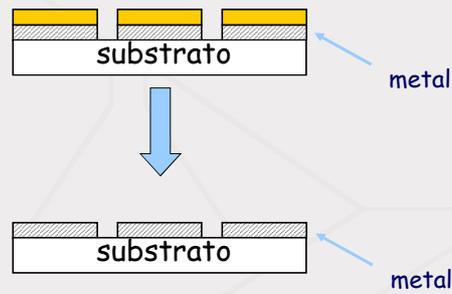
## Corrosão da máscara



- Au: soluções de  $KI/I_2$  ou  $HCl/HNO_3$  (água régia)
- Cr: soluções de  $K_3Fe(CN)_6$  ou de  $Ce(NH_4)_2(NO_3)_6$
- $SiO_2$ : solução de HF

20

## Remoção do Fotorresiste

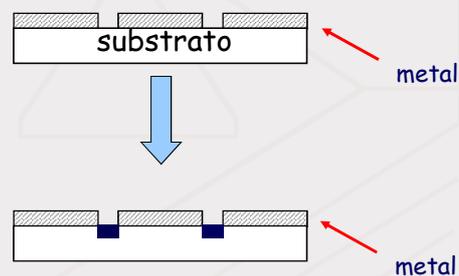


- solução de  $\text{HNO}_3$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  (piranha)

21

## Corrosão do Substrato

- padrão microfluídico é transferido para o substrato pela remoção (química ou física) de material não protegido pela máscara



• corrosão úmida (solução) ou seca (plasma)

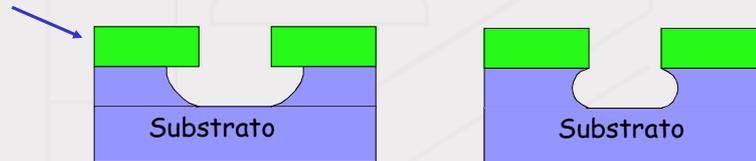
22

## Corrosão do Substrato

Isotrópica:

taxa de corrosão é igual em todas as direções

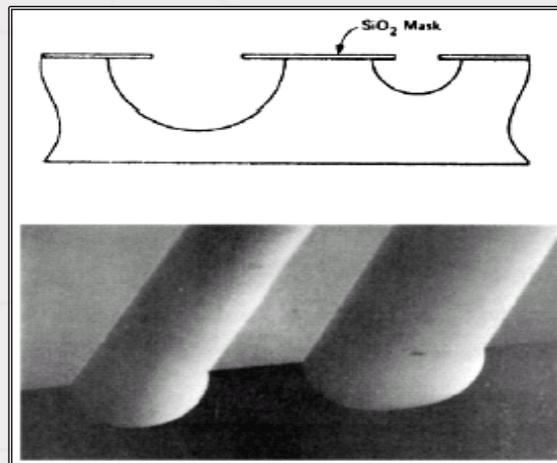
máscara



23

## Corrosão do Substrato

Isotrópica:



24

## Corrosão do Substrato

Anisotrópica:  
taxa de corrosão é maior em uma direção

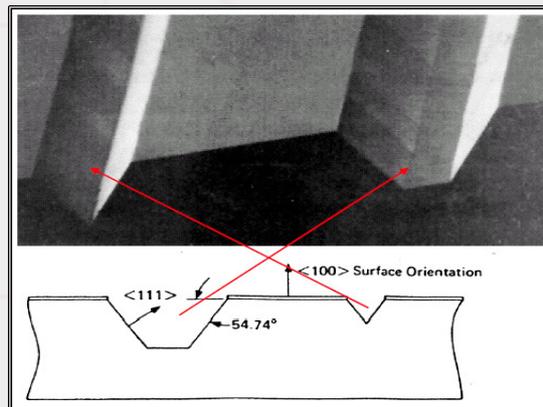
máscara



25

## Corrosão do Substrato

Anisotrópica:



26

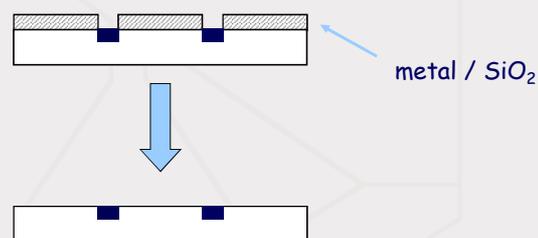
## Corrosão do Substrato

Substrato	Corrosão Úmida Isotrópica	Corrosão Úmida Anisotrópica	Corrosão Seca Isotrópica	Corrosão Seca Anisotrópica
Vidro	Soluções de HF/NH <sub>4</sub> F ou HF/HNO <sub>3</sub>	—	Plasma	Plasma
Silício	Soluções de HF/HNO <sub>3</sub>	Soluções de KOH, NaOH, LiOH, NH <sub>4</sub> OH, hidróxido de tetrametilamônio	Plasma	Plasma

plasma: CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>, Ar, CHF<sub>3</sub>

27

## Remoção da máscara

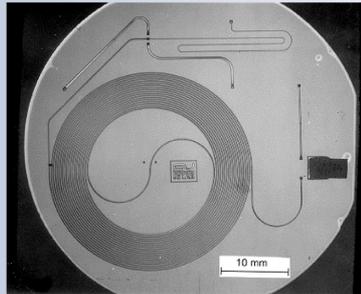


- Au: soluções de KI/I<sub>2</sub> ou HCl/HNO<sub>3</sub> (água régia)
- Cr: soluções de K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> ou de Ce(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>
- SiO<sub>2</sub>: solução de HF

28

## Dispositivos feitos por fotolitografia

### GC on a chip



capillary:  
1.5 m, 200 x 30  $\mu\text{m}$

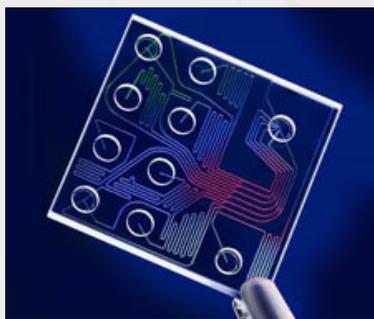
stationary phase:  
OV-101

detector:  
thermal conductivity

Terry, Jerman, Angel, IEEE Trans. Electron. Devices 1979, ED-26, 1880

29

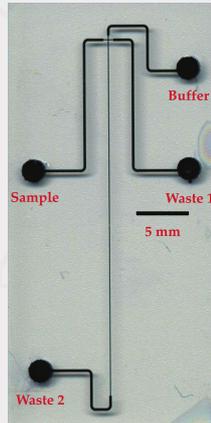
## Dispositivos feitos por fotolitografia



dispositivo em substrato de vidro para  
separação de DNA, RNA, proteínas

30

## Dispositivos feitos por fotolitografia

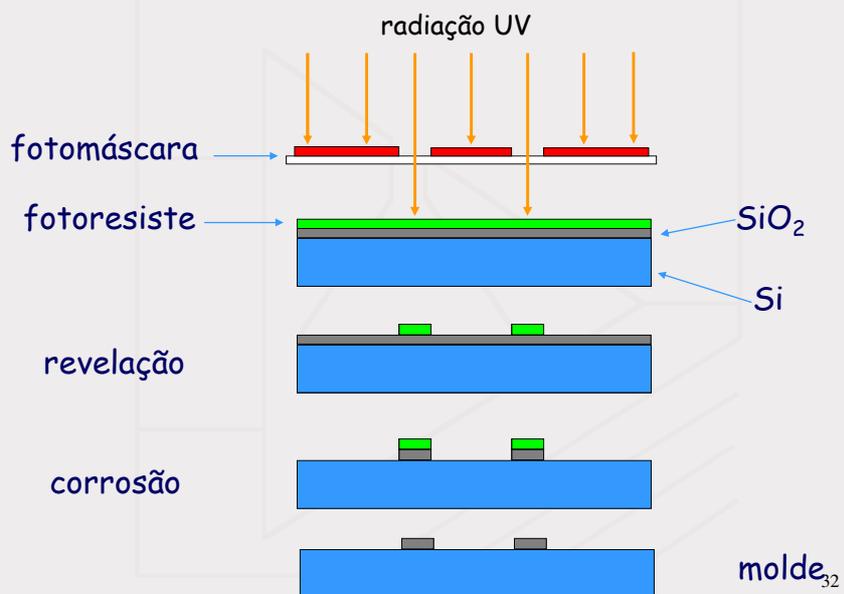


microcanal de separação

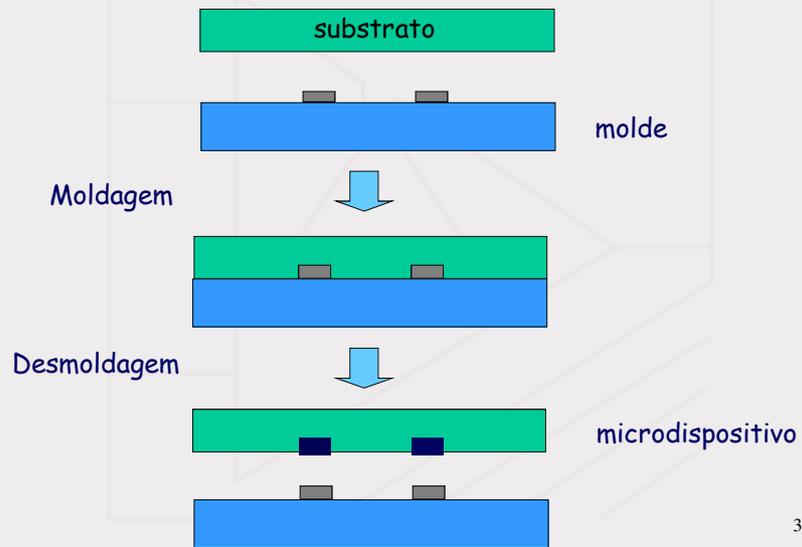
microdispositivo para eletroforese em substrato de vidro

31

## Construção de moldes para micromoldagem

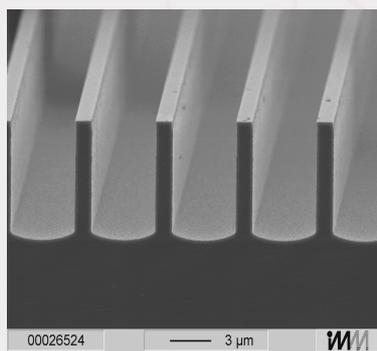


## Moldes para micromoldagem

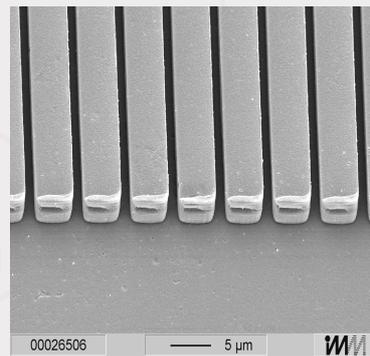
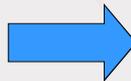


33

## Moldes para micromoldagem



Molde de Silício



réplica em PMMA  
altura: 5  $\mu\text{m}$ ; largura 0,8  $\mu\text{m}$

34

## Processo LIGA

- processo desenvolvido na Alemanha em 1982
- envolve litografia, eletroformação e moldagem

Lithographie → Litografia

Galvanoformung → Eletroformação

Abformtechnik → Moldagem

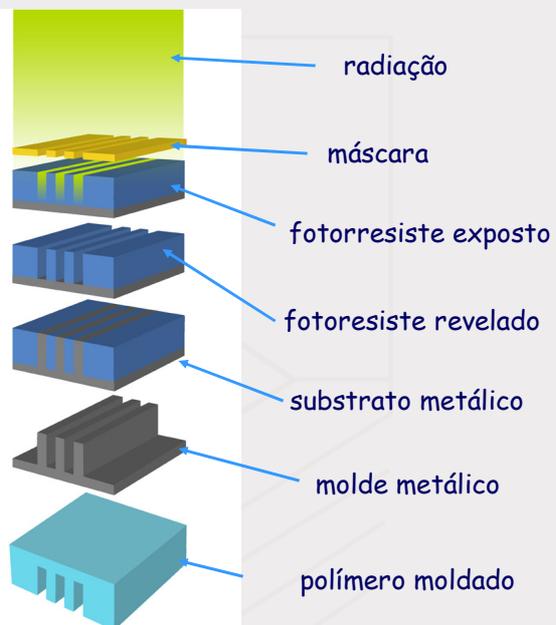
35

## LIGA

Litografia →

Eletroformação →

Moldagem →



36

## Fotoresiste para litografia profunda

Características requeridas:

- alta adesão no substrato
- alto coeficiente de absorção da radiação (raios-X ou UV)
- alta solubilidade no revelador

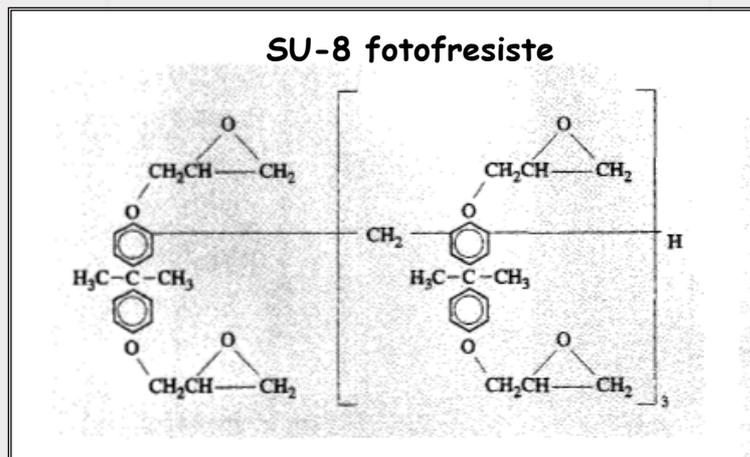
Exemplos:

- Polimetilmetacrilato (PMMA) (positivo)
- SU-8 (negativo), resina epóxi desenvolvida pela IBM®

37

## Fotoresiste para litografia profunda

### SU-8 fotofresiste

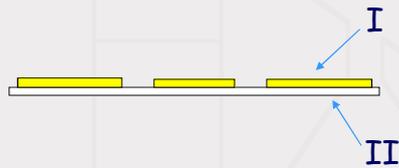


SU-8 apresenta maior estabilidade térmica e resistência química que o PMMA

38

## Processo LIGA

Fotomáscara



Radiação	I	II
UV	chromo	quartzo
Raios-X	ouro	berílio, poliimida, Si, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>

39

## Processo LIGA

### Radiação

#### Ultravioleta:

- fonte: lâmpada de vapor de mercúrio
- comprimento de onda: 350 a 500 nm
- energia do fóton: 10 a 15 eV

#### Raios-X

- fonte: radiação síncrotron
- comprimento de onda: 0,2 a 1 nm
- energia do fóton: 5 a 15 keV

40

## L N L S LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON



- espectro contínuo desde infra-vermelho a raios- X
- feixe colimado e de alta intensidade

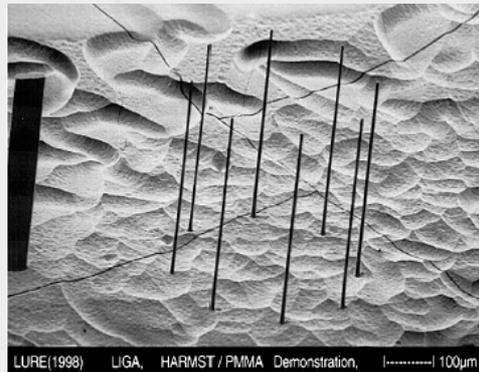
41

### Litografia profunda por raios-X (síncrotron)

- elevada razão de aspecto (100-150 : 1)
- alta resolução (pequeno efeito de difração)
- paredes com alta verticalidade (alta colimação do feixe). Erro de verticalidade típica de 0,1  $\mu\text{m}$  para cada 200  $\mu\text{m}$  de espessura do filme
- paredes com com baixa rugosidade (10 nm)
- custo elevado

42

## Litografia profunda por raios-X (síncrotron)



postes obtidos após revelação de  
fotoresiste de PMMA exposto a raios-X

43

## Litografia profunda por UV

- não necessita de fontes de radiação complexas
- menor custo
- resolução inferior
- menor razão de aspecto (< 20:1)
- maior rugosidade de superfície (1 mm)

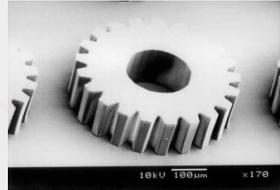
44

## Litografia profunda por UV

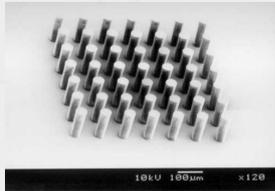
fotoresiste SU-8 125 $\mu\text{m}$  com UV



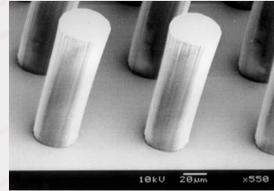
engrenagens



(detalhe)



postes



(detalhe)

Produzidas no LNLS

45

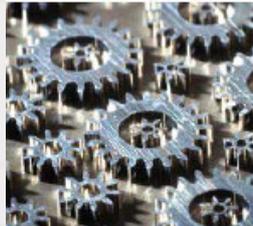
## Processo LIGA - eletroformação



Cu



Ni



Ni

46

## Processo LIGA - aplicações

### Seqüenciador e Separador de DNA



Molde de Ni



Polímero moldado

47

## Processo LIGA - vantagens

- alta razão de aspecto
- paredes verticais e baixa rugosidade de superfície
- grande variedade de materiais:
  - polímeros
  - cerâmicas
  - metais

48