

# Tecnologia de Circuitos Integrados

## □ Introdução.

- Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores.

- Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados.

## □ Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS).

- Componentes Disponíveis.

- Etapas de Fabrico.

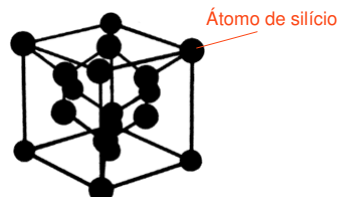
- “Layout”.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

Quando os átomos se unem para formarem as moléculas de uma substância, a distribuição e disposição desses átomos pode ser ordenada e organizada constituindo o que se designa por **estrutura cristalina**.

O Germânio, o Silício e o AsGa possuem uma estrutura cristalina cúbica como é mostrado na seguinte figura.



## Tecnologia de Circuitos Integrados

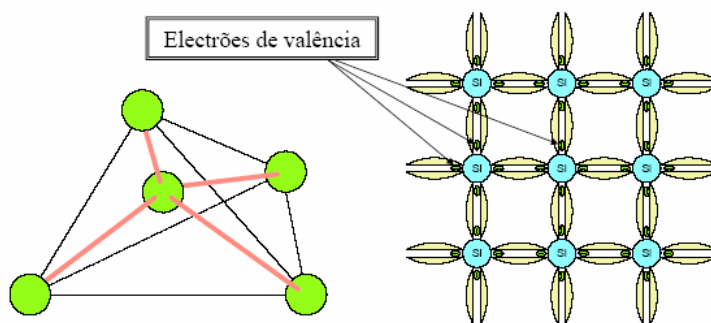
### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

Nessa estrutura cristalina, cada átomo (representado por Si na figura do próximo 'slide') une-se a outros quatro átomos vizinhos, por meio de **ligações covalentes**, e cada um dos quatro electrões de valência de um átomo é compartilhado com um electrão do átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois electrões.

Um **semicondutor intrínseco** é um semicondutor no estado puro. À temperatura de zero graus absolutos ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) comporta-se como um isolante, mas à temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) já se torna um condutor porque o calor fornece a energia térmica necessária para que alguns dos electrões de valência deixem a ligação covalente (deixando no seu lugar uma lacuna) passando a existir alguns electrões livres no semicondutor.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores



Estrutura cristalina do Silício ou Germânio puros. Os electrões de valência são partilhados entre átomos adjacentes através das ligações covalentes.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

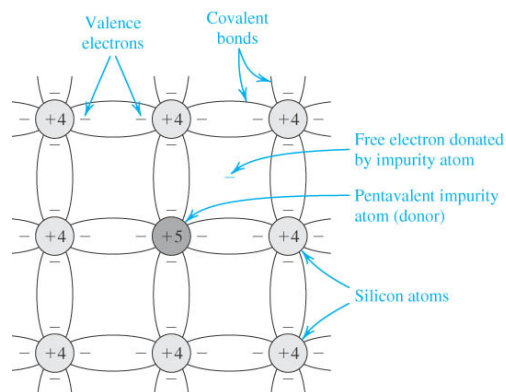
O número de portadores livres existente num semicondutor intrínseco não é suficiente para a sua utilização no fabrico de dispositivos electrónicos. Assim, no fabrico destes dispositivos as propriedades de condução do semicondutor intrínseco são modificadas por processos de dopagem, obtendo-se o respectivo **semicondutor extrínseco**.

Um semicondutor extrínseco pode ser do tipo *p* ou do tipo *n* consoante o tipo de dopante (ou impureza) utilizado.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

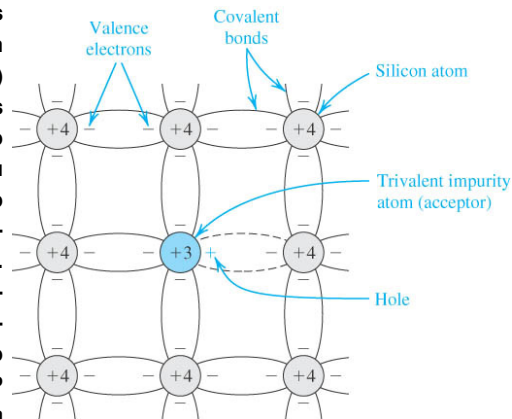
### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

A introdução de átomos pentavalentes (como o Arsénio) num semicondutor puro (intrínseco) faz com que apareçam electrões livres no seu interior. Como esses átomos fornecem (doam) electrões ao cristal semicondutor eles recebem o nome de impurezas dadoras ou átomos dadores. Todo o cristal semicondutor, dopado com impurezas dadoras é designado por **semicondutor do tipo N** (N de negativo, referindo-se à carga do electrão).



### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

A introdução de átomos trivalentes (como o Índio) num semiconductor puro (intrínseco) faz com que apareçam lacunas livres no seu interior. Como esses átomos recebem (ou aceitam) electrões eles são denominados impurezas aceitadoras ou átomos aceitadores. Todo o cristal puro semiconductor, dopado com impurezas aceitadoras é designado por **semiconductor do tipo P** (P de positivo, referindo-se à falta da carga negativa do electrão).



### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

● Num semiconductor extrínseco do tipo P as lacunas estão em maioria designando-se por portadores maioritários da corrente eléctrica. Os electrões, por sua vez, estão em minoria e designam-se por portadores minoritários da corrente eléctrica.

● Para este semiconductor a concentração de lacunas  $p_p$  é aproximadamente igual à concentração de dopantes num semiconductor deste tipo,  $N_A$ , ou seja:

$$p_p = N_A$$

● Para este semiconductor a concentração de portadores do tipo  $n$  é muito menor verificando-se a relação:

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

sendo  $n_i^2$  a concentração total de portadores no semiconductor.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

● Num semicondutor extrínseco do tipo N os electrões estão em maioria designando-se por portadores maioritários da corrente eléctrica. As lacunas (que são a ausência de um electrão), por sua vez, estão em minoria e designam-se por portadores minoritários da corrente eléctrica.

● Para este tipo de semicondutor tem-se:

$$n_n = N_D \qquad p_n = \frac{n_i^2}{N_D}$$

sendo  $n_n$  a concentração de electrões,  $p_n$  a concentração de lacunas e  $N_D$  a densidade de dopantes num semicondutor extrínseco do tipo  $n$ .

O produto  $p_p \cdot n_p = \text{constante} = n_i^2$ , sendo  $n_i = n = p$ , no semicondutor intrínseco.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

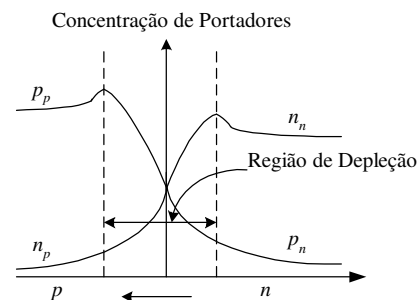
### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

Numa **junção  $p-n$**  algumas lacunas passam para o lado  $n$  e alguns electrões para o lado  $p$ , por difusão. Após a difusão estes portadores passam a ser minoritários e recombina-se rapidamente. Assim, estabelece-se na junção  $p-n$  uma tensão  $\Psi_0$  dada por:

$$\Psi_0 = V_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \cong 26 \text{ mV a } 25^\circ\text{C},$$

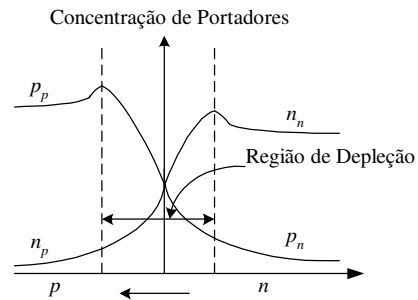
sendo  $k$  a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura e  $q$  é a carga do electrão.



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Fundamentos Físicos dos Dispositivos Semicondutores

Ao se aplicar na junção uma diferença de potencial  $V$  diferente de zero, na interface das regiões do tipo  $p$  e do tipo  $n$ , que provoca uma diferença de potencial igual a  $(\psi_0 - V)$ , estabelece-se um campo eléctrico  $E$ . A corrente que atravessa a junção,  $I$ , é composta por lacunas da região  $p$  e por electrões da região  $n$  que têm energia suficiente para atravessar a barreira de potencial da junção.



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados

- OS circuitos integrados (ICs) são circuitos electrónicos implementados numa única pastilha de um material semiconductor (geralmente silício) também designados por circuitos monolíticos ou por “chips”.
- A teoria dos circuitos integrados remonta a 1925 com o aparecimento do transistor-MOS (Metal-Óxido-Semiconductor) sendo apenas o primeiro circuito integrado desenvolvido nos anos 50 por Jack Kilby da **Texas Instruments** e por Robert Noyce da **Fairchild Semiconductor**. No entanto, problemas de controlo de qualidade e a utilização de alguns materiais permitiram a sua comercialização apenas nos anos 70.
- Os circuitos integrados são utilizados numa enorme variedade de dispositivos nomeadamente, em microcomputadores, equipamento de vídeo e áudio, telefones celulares, relógios, aplicações biomédicas, electrónica de automóveis, etc..

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados

#### Importância dos Circuitos Integrados:

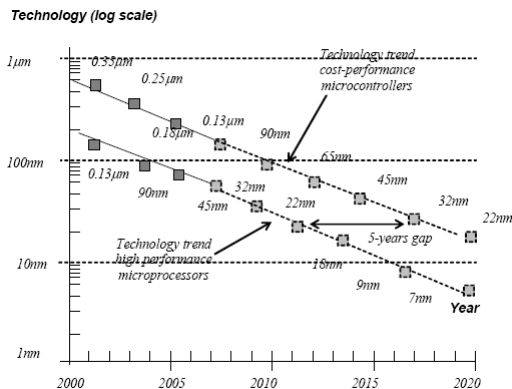
- São mais fiáveis e robustos.
- São mais pequenos e leves.
- Têm uma menor dissipação de potência.
- Apresentam menores capacidades parasitas = velocidade mais elevada.
- A integração reduz o custo de fabrico – não necessitam praticamente de intervenção humana.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados

#### Lei de Moore

- **Gordon Moore:** co-fundador da Intel.
- Previu que o número de transístores por integrado iria crescer exponencialmente (duplicando a cada 18 meses).
- A evolução exponencial da tecnologia é um processo natural: e.g. Steam Engines - Dynamo – Automobile.



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados

Os circuitos integrados são geralmente classificados pelo número de transístores e de outros componentes electrónicos que contêm:

**SSI** (“*Small-Scale Integration*”): até 100 componentes electrónicos.

**MSI** (“*Medium-Scale Integration*”): de 100 a 3 000 componentes electrónicos.

**LSI** (“*Large-Scale Integration*”): de 3 000 a 100 000 componentes electrónicos.

**VLSI** (“*Very Large-Scale Integration*”): de 100 000 a 1 000 000 componentes electrónicos.

**ULSI** (“*Ultra Large-Scale Integration*”): mais de 1 000 000 de componentes electrónicos.

**ASICs** → “Application-Specific Integrated Circuits”.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados

**Tecnologias de fabrico:**

➤ **Bipolar.**

➤ **pMOS** – substrato do tipo *p*.

➤ **nMOS** – substrato do tipo *n*. De fácil integração com a BiCMOS.

➤ **CMOS** (“*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*”) - Permite um processo do tipo *n* e do tipo *p* e a definição de tubos finos de um destes tipos.

➤ **BiCMOS.**

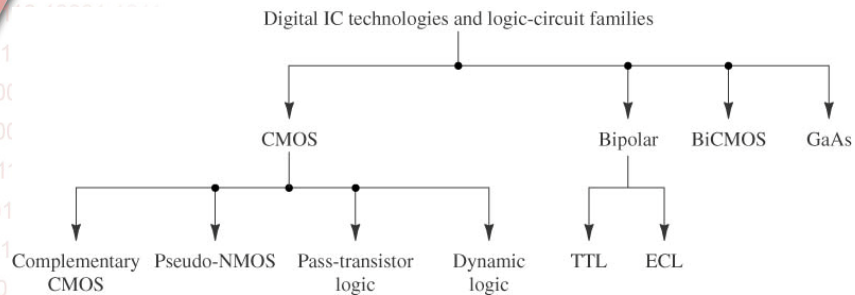
➤ **GaAs.**

A tecnologia de ICs foi inicialmente dominada pela tecnologia bipolar, sendo substituída nos anos 80 pela tecnologia CMOS. No final da década de 80 surgiu a tecnologia BiCMOS que reúne as vantagens e as possibilidades de ambas as tecnologias. Apresenta, no entanto, um elevado custo.



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologias de Fabrico de Circuitos Integrados



## Tecnologia de Circuitos Integrados

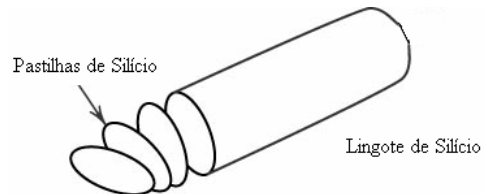
### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Componentes Disponíveis

- Condensadores de boa precisão relativa +/- 0,1 a 0,4% e de razoável precisão absoluta (5 a 20%).
- Resistências de polisilício e de difusão com boa linearidade mas com precisão absoluta muito má (+/- 20 a 50%).
- Díodos de junção.
- Transístores NMOS e PMOS com óptimas características em termos de velocidade e de precisão.
- Transístores bipolares NPN ou PNP dependendo, respectivamente, se o substrato é tipo P ou tipo N. Fraco ganho de corrente e mau desempenho devido à existência de um colector parasita ligado ao substrato.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico

#### ➤ Preparação do substrato:



**Substrato** – Bolacha ou pastilha de um cristal de silício intrínseco com 400-600  $\mu\text{m}$  de espessura e devidamente polida.

Vários materiais são depositados sobre o **Semicondutor** que constitui o substrato durante o processo de fabrico nomeadamente, o **Oxido** isolante e os **Metais** condutores (**MOS**).

O silício é o semicondutor mais barato mas também existem tecnologias que utilizam GaAs e SiGe.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico

➤ **Oxidação** – Processo químico no qual, por exemplo, o silício reage com o oxigénio formando-se o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ).

➤ **Difusão** – Processo que corresponde ao movimento dos átomos de zonas de grande concentração para zonas de baixa concentração – Método de dopagem.

➤ **Implantação Iónica** – Método de dopagem superficial: os iões de materiais dopantes são acelerados por um campo eléctrico e ao chocarem com a superfície do material ficam retidos na respectiva rede cristalina.

➤ **Deposição Química em Fase Vapor (CVD – “Chemical-Vapor Deposition”)** – Processo pelo qual gases reagem quimicamente originando a deposição de um sólido num substrato.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

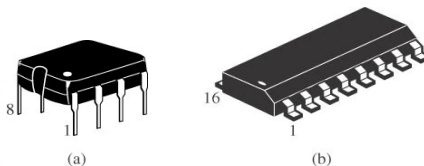
### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico

- **Metalização** – É geralmente efectuada por um processo de pulverização catódica (“sputtering”).
- **Fotolitografia** – Geração de máscaras fotográficas (negativo com o tamanho real) para as diferentes etapas de fabrico do IC. Estas máscaras permitem proteger da luz incidente zonas de um material fotorresistente depositado sobre a superfície do substrato. As zonas de material fotorresistente não protegidas alteram as suas propriedades. O material fotorresistente não modificado é retirado da superfície do substrato com uma solução química adequada, obtendo-se o molde necessário para o processo de fabrico que se segue.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico

- **Encapsulamento** – No final do processo os “chips” são encapsulados em caixas cerâmicas ou plásticas com pinos metálicos.



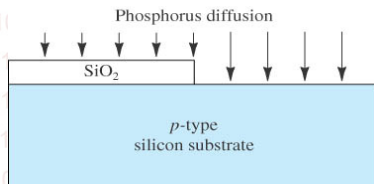
(a) Um encapsulamento (“package”) duplo linear de 8 pinos.

(b) Um encapsulamento para montagem superficial de 16 pinos.

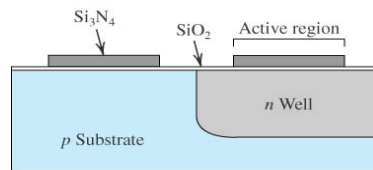
## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico de Transístores NMOS e PMOS

(a) Difusão do Fósforo (1ª máscara)



(b) Definição das regiões activas (2ª máscara)



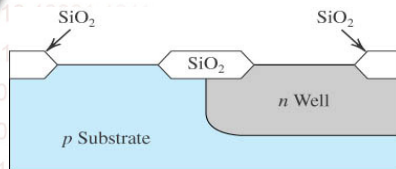
**Legenda:**

- ❖ O Silício é um semicondutor (4 electrões de valência).
- ❖  $p$ - é Silício levemente dopado com P ou AS (impureza penta-valente).
- ❖  $p+$  é Silício fortemente dopado com P ou AS (impureza penta-valente).
- ❖  $n$ - é Silício levemente dopado com B (impureza tri-valente).
- ❖  $n+$  é Silício fortemente dopado com B (impureza tri-valente).
- ❖ Poli-Silício é um condutor fraco (maior resistividade que o alumínio).

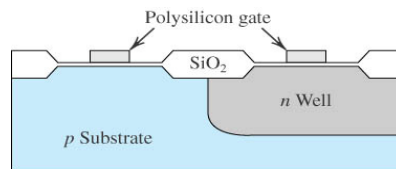
## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico de Transístores NMOS e PMOS

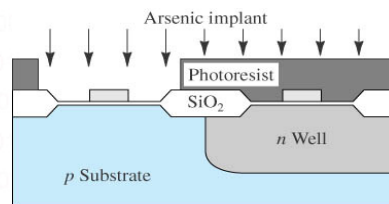
(c) Oxidação



(d) Porta de Poli-Silício (3ª máscara)

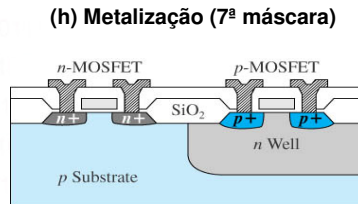
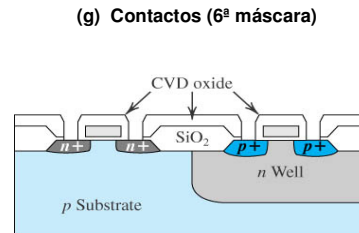
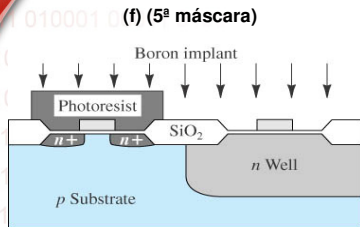


(e) (4ª máscara)



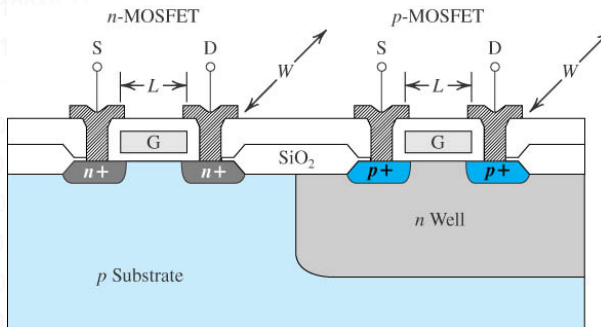
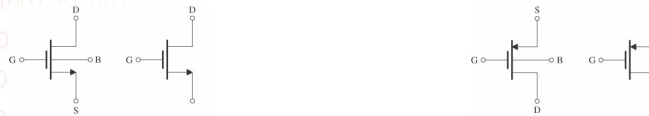
# Tecnologia de Circuitos Integrados

## Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico de Transístores NMOS e PMOS



# Tecnologia de Circuitos Integrados

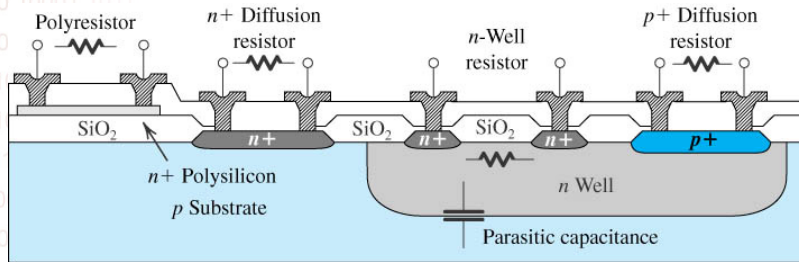
## Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Etapas de Fabrico de Transístores NMOS e PMOS



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

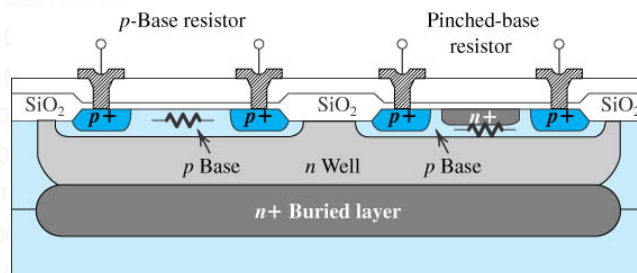
#### Tipos de Resistência em CMOS



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

#### Tipos de Resistência em CMOS

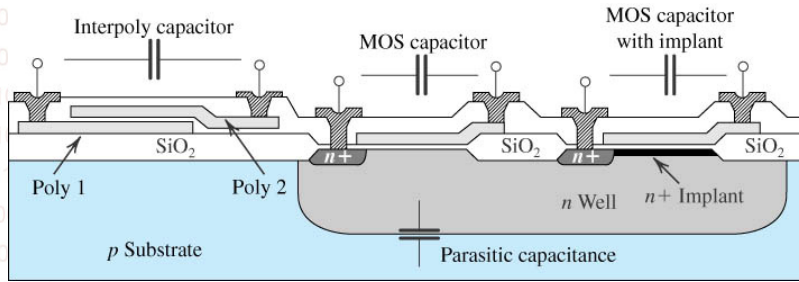


Processo utilizado para resistências de valor elevado → definição de tubos finos.

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

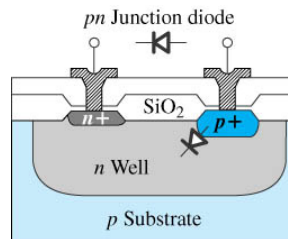
#### Tipos de Condensador em CMOS



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

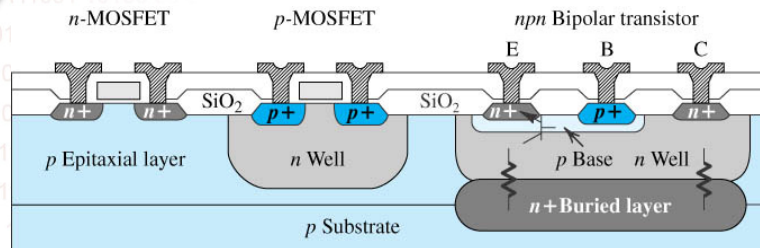
#### Diodos em CMOS



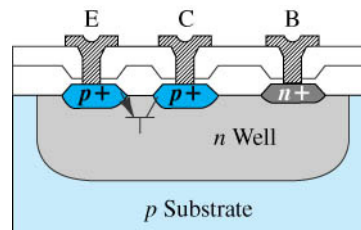
## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

#### Transístores numa Tecnologia BiCMOS



#### Transístor PNP Lateral



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

“Layout” – Representação gráfica dos componentes do circuito e das suas interligações.



Ferramentas de CAD (“Computer-Aided Design”)

Quando o “layout” está terminado as ferramentas de CAD permitem, recorrendo a uma ferramenta auxiliar, validar o circuito (DRC – “Design-Rule Checker”).

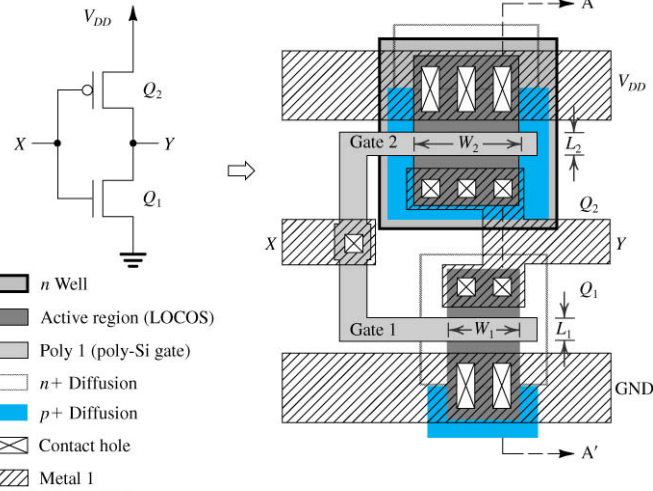
Finalmente, a ferramenta gera as máscaras para o processo de fabrico do IC.



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

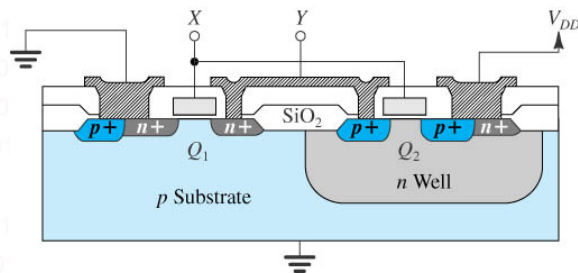
Exemplo do "layout" de uma porta inversora:



## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

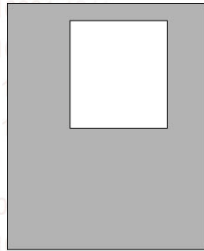
Exemplo do "layout" de uma porta inversora –  
corte transversal do respectivo IC:



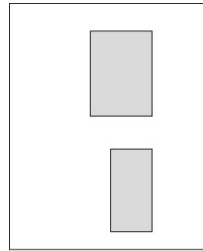
## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

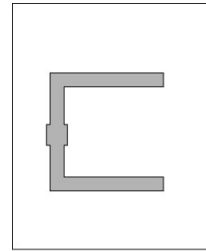
Máscaras geradas para o fabrico da porta inversora:



(a)  $n$  Well



(b) Active region

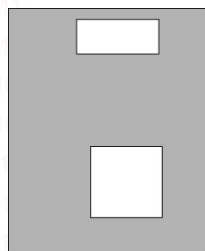


(c) Poly 1

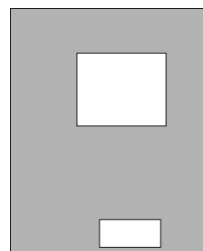
## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

Máscaras geradas para o fabrico da porta inversora:



(d)  $n+$  Diffusion

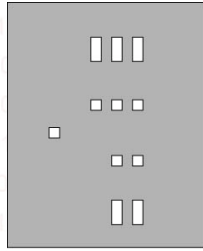


(e)  $p+$  Diffusion

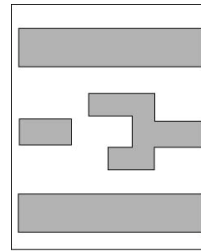
## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

Máscaras geradas para o fabrico da porta inversora:



(f) Contact hole



(g) Metal 1

## Tecnologia de Circuitos Integrados

### Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (MOS)

Exemplo de um IC

