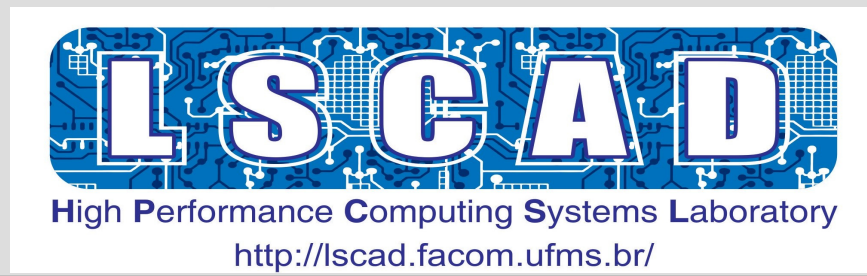
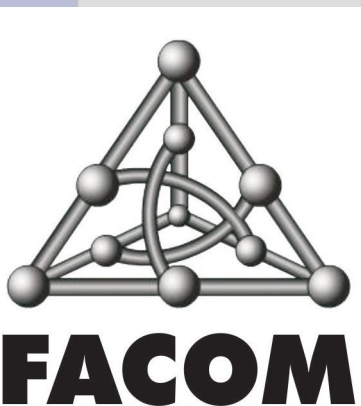


Ciclo de Palestras em Computação

09/11/2011

Do Átomo ao Bit: desvendando o processo de fabricação de circuitos integrados e o impacto em arquitetura de processadores

Ricardo R. Santos



CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS.

Com massas atômicas referidas ao isótopo 12 do Carbono

PERÍODO

PERÍODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.º (K)	1 1.00797 H 1 Hidrogênio										2 4.0026 He 2 Hélio	
2.º (L)	3 6.939 Li 3 Lítio	4 9.0122 Be 4 Berílio										
3.º (M)	11 22.9898 Na 11 Sódio	12 24.312 Mg 12 Magnésio										
4.º (N)	19 39.102 K 19 Potássio	20 40.08 Ca 20 Cálcio	21 44.956 Sc 21 Escândio	22 47.90 Ti 22 Titânio	23 50.942 V 23 Vanádio	24 51.996 Cr 24 Cromo	25 54.938 Mn 25 Manganês	26 55.847 Fe 26 Ferro	27 58.933 Co 27 Cobalto	28 58.71 Ni 28 Níquel	29 63.54 Cu 29 Cobre	30 65.37 Zn 30 Zinco
5.º (O)	37 85.47 Rb 37 Rubídio	38 87.62 Sr 38 Estrôncio	39 88.905 Y 39 Ítrio	40 91.22 Zr 40 Zircônio	41 92.906 Nb 41 Nióbio	42 95.94 Mo 42 Molibdênio	43 98.906 Tc 43 Técneço	44 101.07 Ru 44 Rutênio	45 102.905 Rh 45 Ródio	46 106.4 Pd 46 Paládio	47 107.870 Ag 47 Prata	48 112.40 Cd 48 Cádmio
6.º (P)	55 132.905 Cs 55 Césio	56 137.34 Ba 56 Bário	57 138.91 La 57 Lantânio	72 178.49 Hf 72 Háfnio	73 180.948 Ta 73 Tântalo	74 183.85 W 74 Wolfrâmio	75 186.2 Re 75 Rênio	76 190.2 Os 76 Ósmio	77 192.2 Ir 77 Iridio	78 195.08 Pt 78 Platina	79 196.967 Au 79 Ouro	80 200.59 Hg 80 Mercúrio
7.º (Q)	87 (223) Fr 87 Frâncio	88 (226) Ra 88 Rádio	89 (227) Ac 89 Actínio	104 (261) Ku 104 Kurchatovio	105 (262) Ha 105 Háfnio	106 (263) U 106 Urânio	107 (264) Np 107 Netúnio	108 (265) Pu 108 Plutônio	109 (266) Am 109 Americio	110 (267) Cm 110 Cúrio	111 (268) Bk 111 Berquélio	112 (269) Cf 112 Califórnia

ATENÇÃO:

- O carbono 12 serve como referência às massas atômicas.
- Os elementos artificiais são apresentados em cor verde.
- São chamados:
 - representativos ou não de transição os elementos dos grupos - A (todos)
 - B (somente 1B e 2B)
- transição simples: 3B até 8B
- transição interna: Terras Raras (Lantanídeos (57 a 71) Actinídeos (89 a 103))

ELEMENTOS DE TRANSIÇÃO

LEGENDA:



Metais



Não-Metais



Artificiais



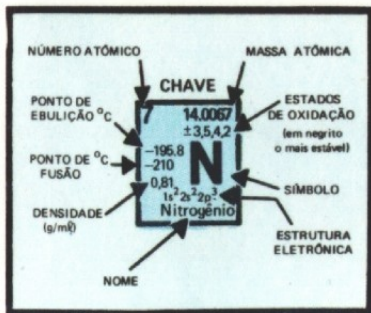
Gases e Não-Metais



Semimetais



Líquidos



★

★

★

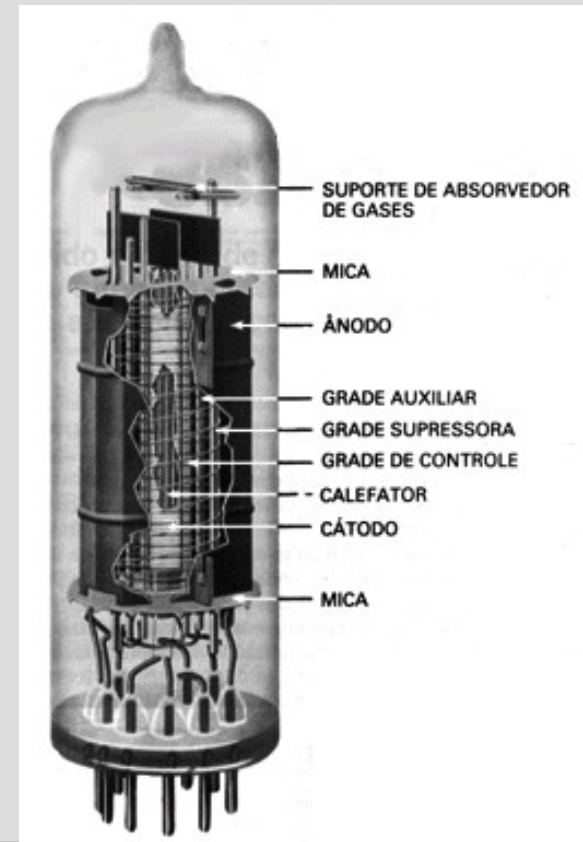
58 140.12 3,4 Ce 368 795 6,67 [Xe]4f¹ 5d¹ 6s² Cério	59 140.907 3,4 Pr 3127 935 6,77 [Xe]4f³ 5d¹ 6s² Praseodímio	60 144.24 3 Nd 3027 1024 7,00 [Xe]4f⁴ 5d¹ 6s² Neodímio	61 (147) 3 Pm (1027) - 7,54 [Xe]4f⁵ 5d¹ 6s² Promécio	62 160.35 3,2 Sm 1900 1072 7,54 [Xe]4f⁶ 5d¹ 6s² Samário	63 151.96 3,2 Eu 1439 826 5,26 [Xe]4f⁷ 5d¹ 6s² Európio	64 157.25 3 Gd 3000 1312 7,89 [Xe]4f⁷ 5d² 6s² Gadolínio	65 168.924 3,4 Tb 2800 1356 8,27 [Xe]4f⁹ 5d¹ 6s² Térbio	66 162.50 3 Dy 2600 1407 8,54 [Xe]4f¹⁰ 5d¹ 6s² Disprósio	67 164.930 3 Ho 2600 1461 8,80 [Xe]4f¹¹ 5d¹ 6s² Hólmio	68 167.26 3 Er 2900 1497 9,05 [Xe]4f¹² 5d¹ 6s² Érbio	69 168.934 3,2 Tm 1727 1545 9,33 [Xe]4f¹³ 5d¹ 6s² Túlio	70 173.04 3,2 Yb 1427 824 9,98 [Xe]4f¹⁴ 5d¹ 6s² Íterbio	71 174.97 3 Lu 3327 1652 9,84 [Xe]4f¹⁴ 5d¹ 6s² Lutécio
90 232.038 4 Th 3850 1750 11,7 [Rn]5f⁴ 6d² 7s² Tório	91 (231) 4 Pa (1230) 15,4 [Rn]5f³ 6d¹ 7s² Protactínio	92 238.03 5,4,3 U 3818 1132 19,07 [Rn]5f³ 6d¹ 7s² Urânio	93 (237) 5,4,3 Np 637 19,5 [Rn]5f⁴ 6d¹ 7s² Netúnio	94 (242) 5,4,3 Pu 3235 640 11,7 [Rn]5f⁶ 6d¹ 7s² Plutônio	95 (243) 5,4,3 Am 11,7 [Rn]5f⁷ 6d¹ 7s² Americio	96 (247) 3 Cm [Rn]5f⁷ 6d² 7s² Cúrio	97 (247) 4,3 Bk [Rn]5f⁹ 6d¹ 7s² Berquélio	98 (249) 3 Cf [Rn]5f¹⁰ 6d¹ 7s² Califórnia	99 (254) 3 Es [Rn]5f¹¹ 6d¹ 7s² Einstênio	100 (253) 3 Fm [Rn]5f¹² 6d¹ 7s² Férmio	101 (256) 3 Md [Rn]5f¹³ 6d¹ 7s² Mendelévio	102 (254) 3 No [Rn]5f¹⁴ 6d¹ 7s² Nóbélio	103 (257) 3 Lw [Rn]5f¹⁴ 6d¹ 7s² Lawrêncio

Introdução

- ❑ Transistor
 - Dispositivo controlado eletricamente em escala atômica que funciona como uma chave que libera ou impede a passagem de corrente elétrica
- ❑ Circuitos integrados: muitos transistores em um chip
- ❑ *Very Large Scale Integration* (VLSI): milhares de transistores em um chip
- ❑ *Complementary Metal Oxide Semiconductor*
 - Técnica para construção de transistores
 - Rápida, barata, gera transistores de baixa tensão

Perspectiva Histórica

- ❑ ENIAC , construído na II guerra, foi o primeiro computador de propósito geral
 - Utilizava 18.000 válvulas
 - Realizava 1900 adições por segundo



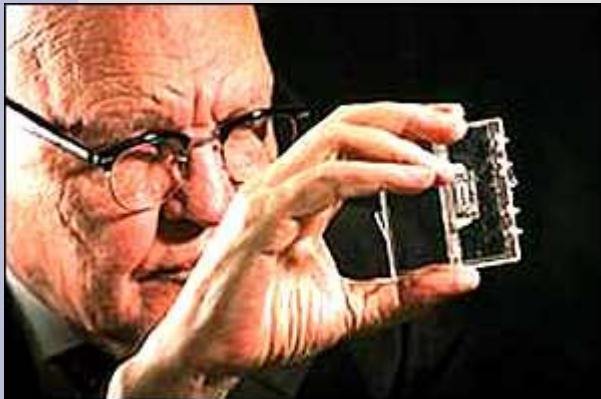
Perspectiva Histórica



Bardeen, Shockley, Brattain

Robert Noyce

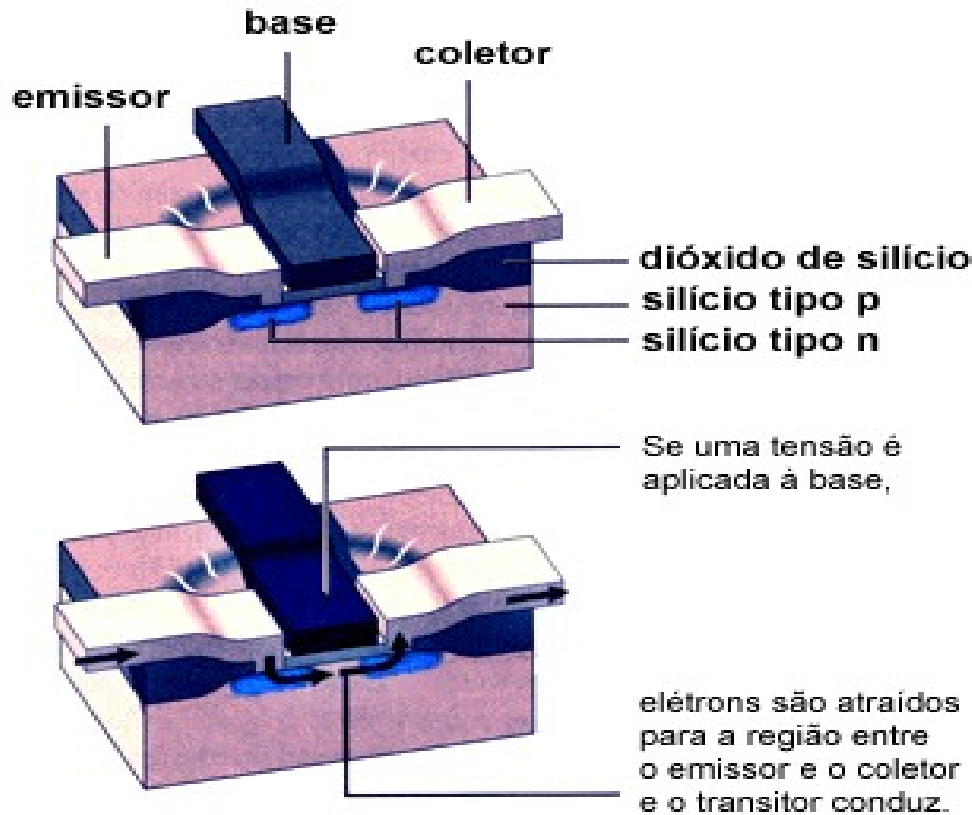
Jack Kilby



Perspectiva Histórica

- Amplificação e chaveamento

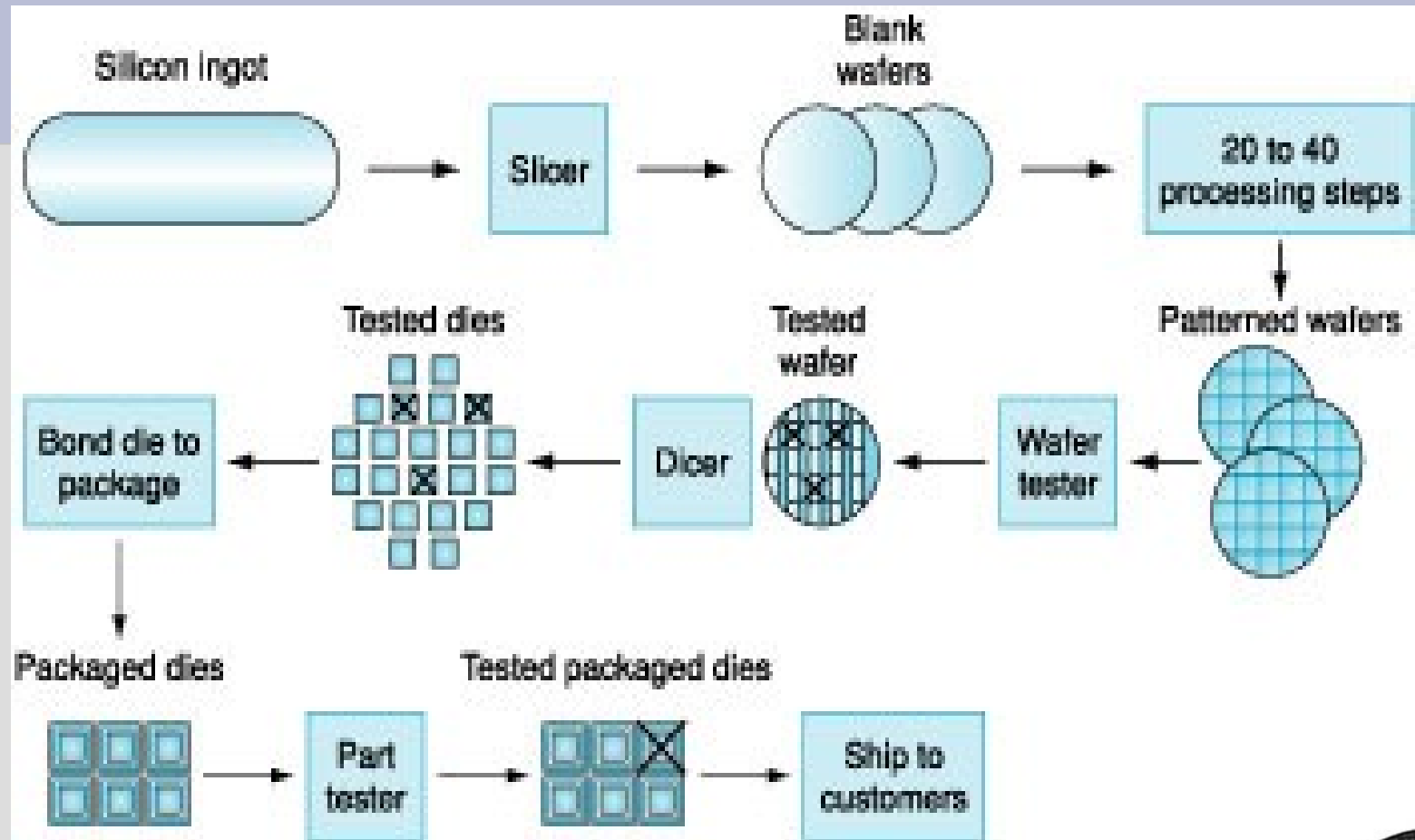
Como o transistor funciona (transistor do tipo NMOS)



Mais informações em:

<http://www.intel.com/education/transworks/index.htm>

Processo de Fabricação de um Chip

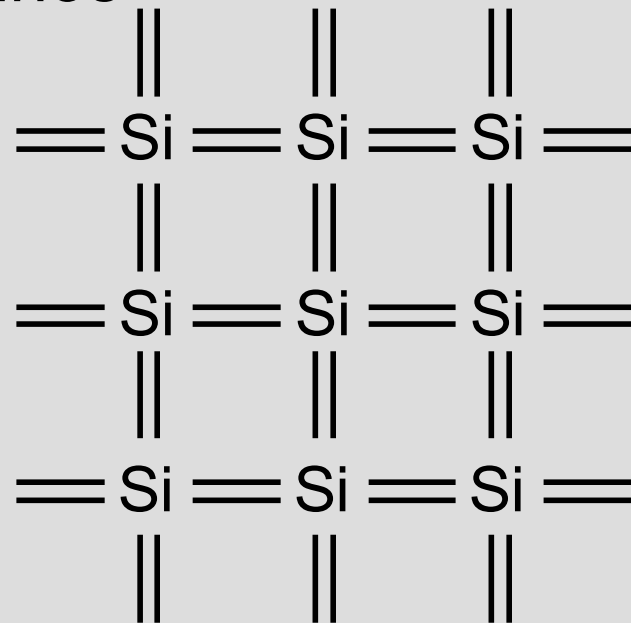


Entendendo o processo de alto nível

- ❑ Assistam os Vídeos:
 - Sand to Silicon - the Making of a Chip
 - From Sand to Chip – How a CPU is made

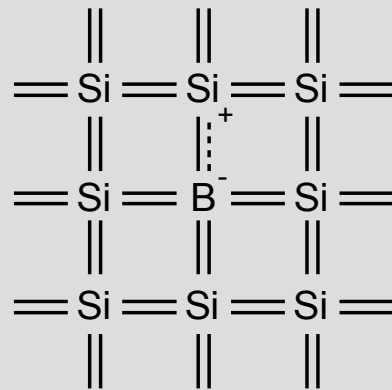
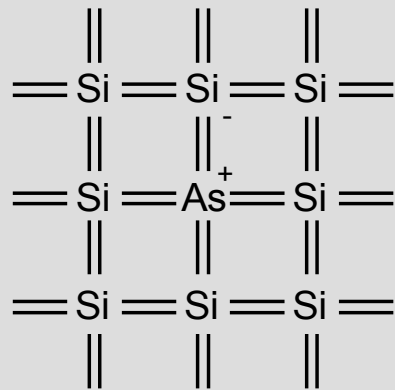
Silício

- ❑ Transistores são construídos tomando como base o silício (semicondutor)
- ❑ Forma estrutura cristalina com ligações para quatro vizinhos



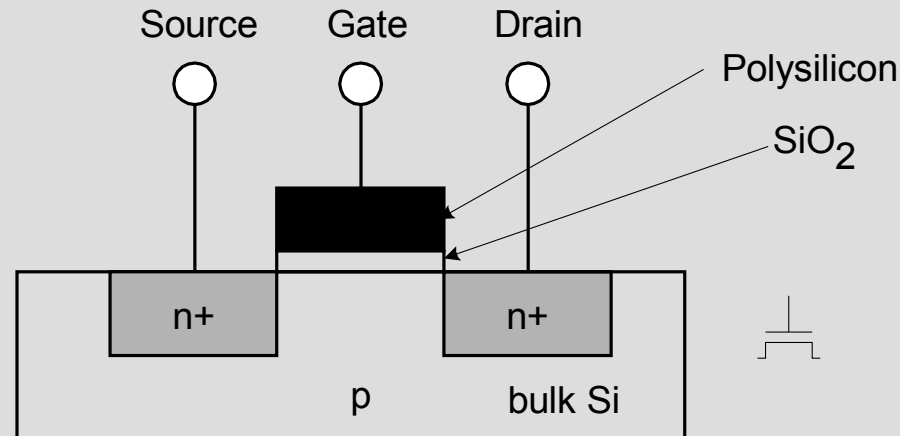
Dopantes

- ❑ Silício puro não possui elétrons livres e apresenta pouca condutividade
- ❑ Adicionar dopantes aumenta condutividade
- ❑ Elementos do grupo V: doa elétron (n-type)
- ❑ Elementos do grupo III: recebe elétron (p-type)



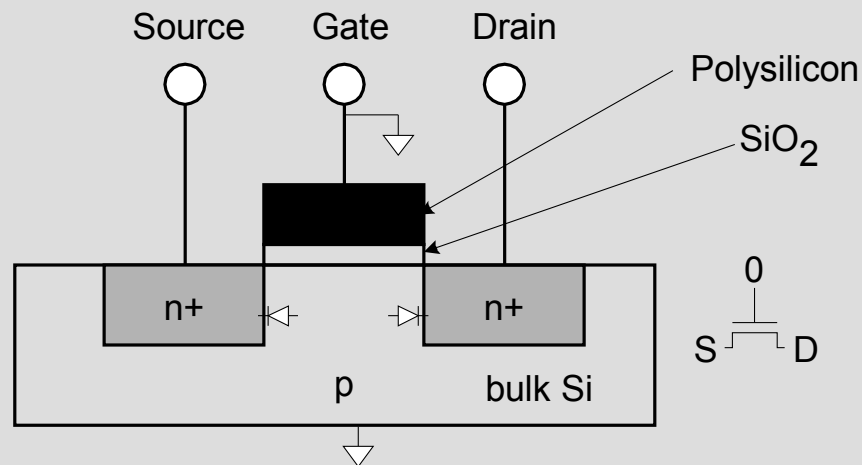
Transistor nMOS

- ❑ Quatro terminais: chave, fonte, dreno, corpo
 - Funcionamento similar a um capacitor
 - chave e corpo são condutores
 - SiO_2 (óxido) é um isolante



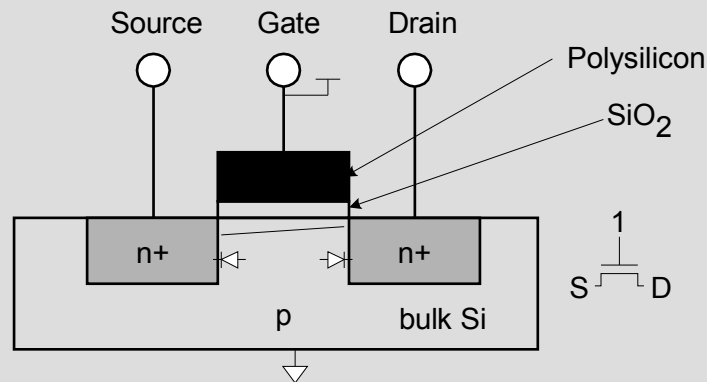
Operação nMOS

- ❑ Corpo é conectado ao terra (0 V)
- ❑ Quando chave está desconectada
 - Diodos Fonte-Corpo e Dreno-Corpo estão desligados (OFF)
 - Não há corrente fluindo, transistor está desligado (OFF)



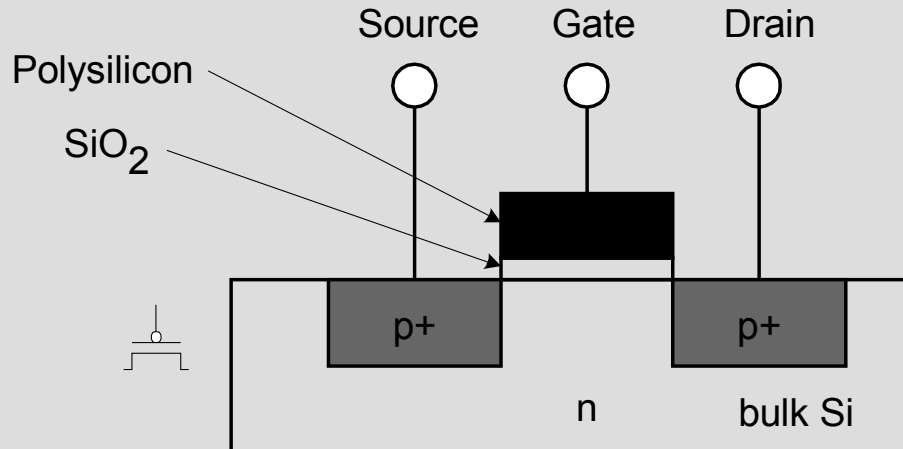
nMOS Operação (cont.)

- ❑ Quando a chave está conectada:
 - Carga elétrica na chave
 - Carga negativa é atraída para corpo
 - Formação de canal n-type sob a chave
 - Agora, a corrente pode fluir através do silício da fonte para o dreno



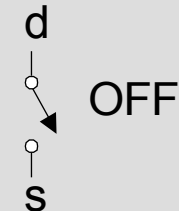
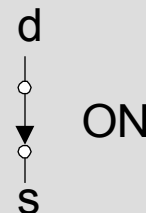
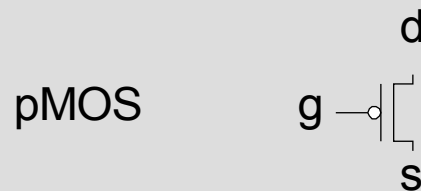
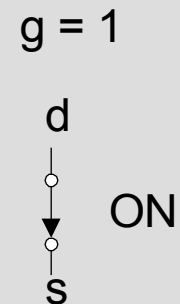
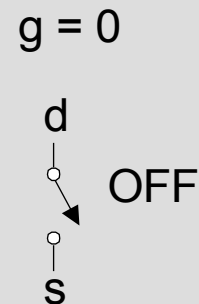
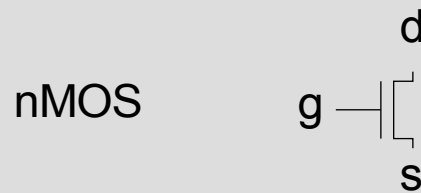
Transistor pMOS

- ❑ Similar ao nMOS, mas dopante e tensões são invertidas
 - Corpo ligado à fonte de alimentação (V_{DD})
 - Chave desligada: transistor ON
 - Chave ligada: transistor OFF



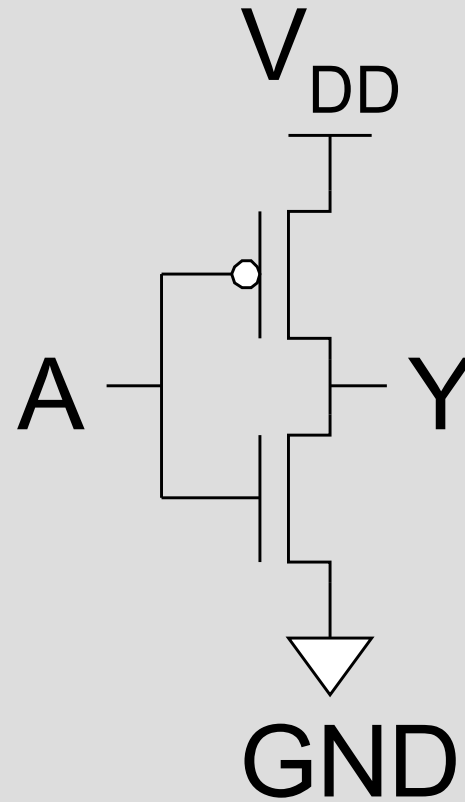
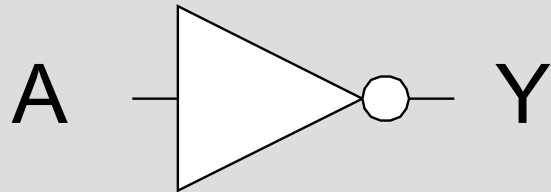
Transistores como Chaves

- ❑ Pode-se entender transistores MOS como chaves controladas eletricamente
- ❑ Tensão na chave controla o caminho de elétrons da fonte para o dreno



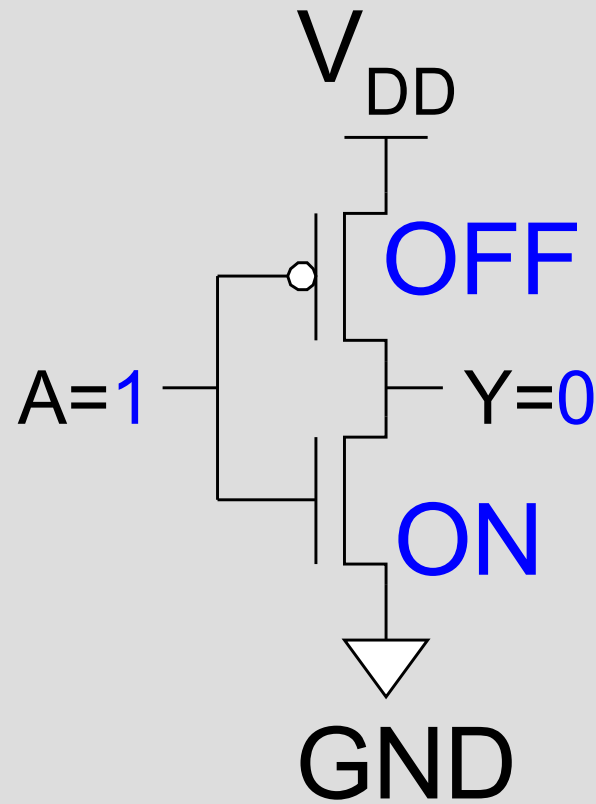
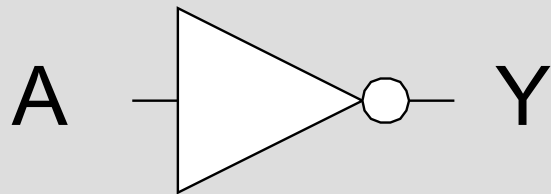
Inversor CMOS

A	Y
0	
1	



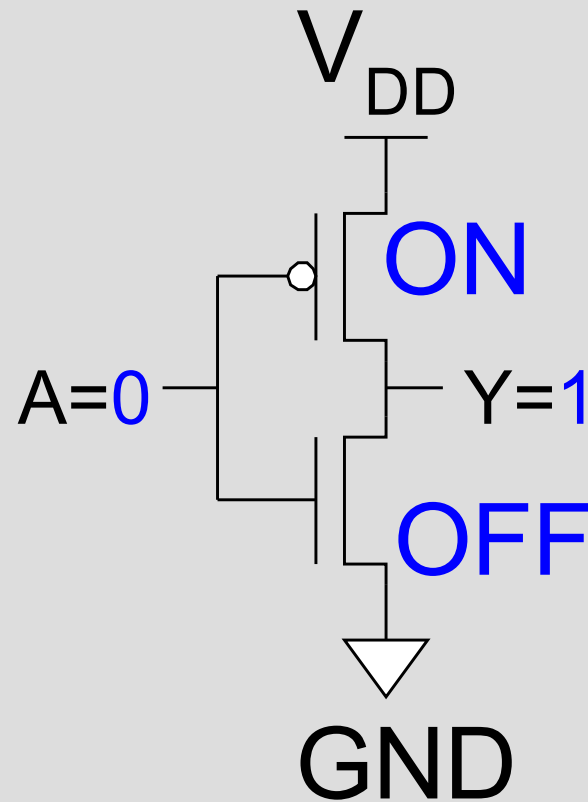
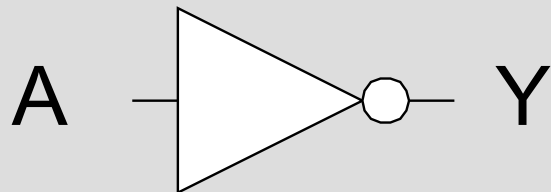
Inversor CMOS

A	Y
0	
1	0



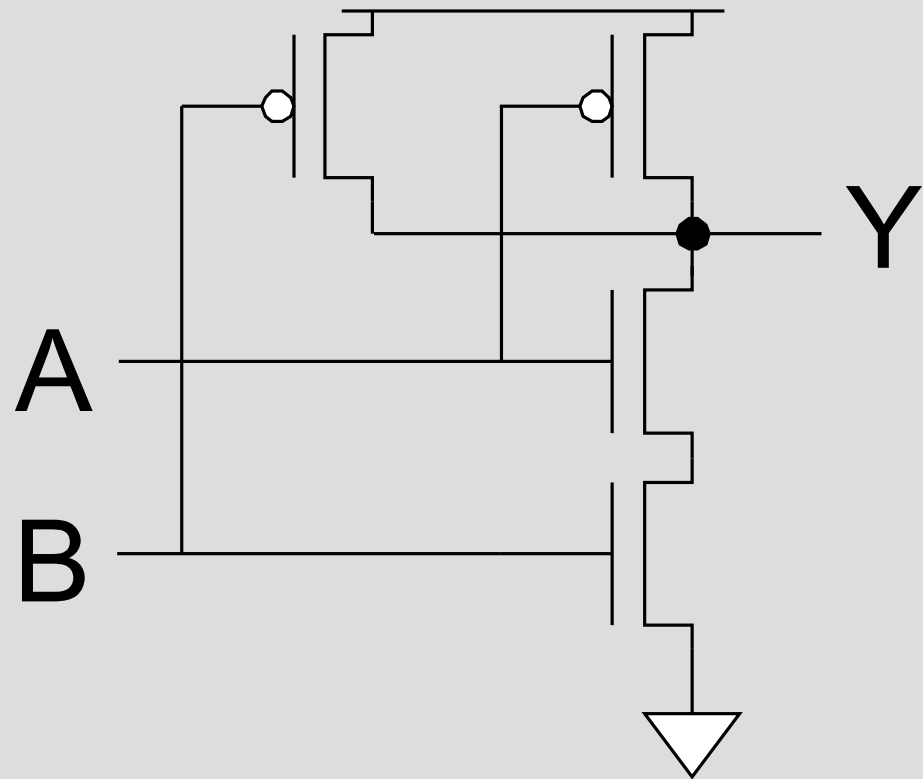
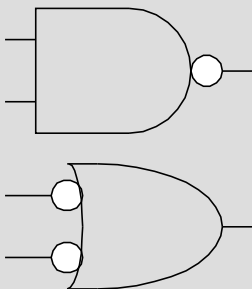
Inversor CMOS

A	Y
0	1
1	0



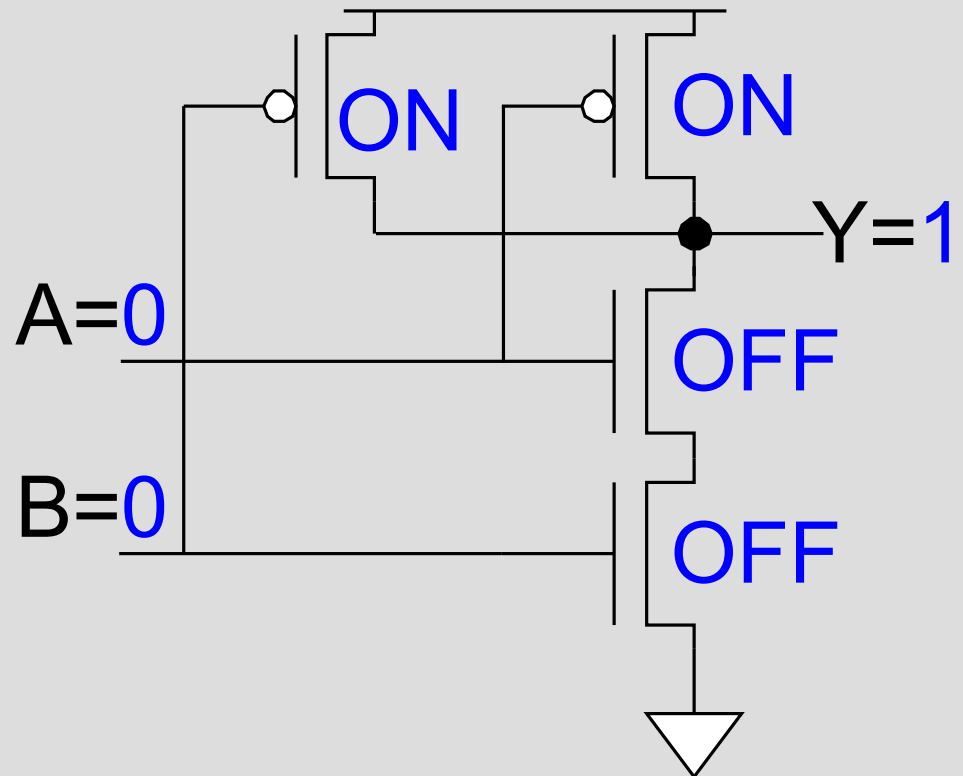
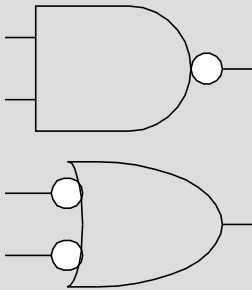
Porta NAND CMOS

A	B	Y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	



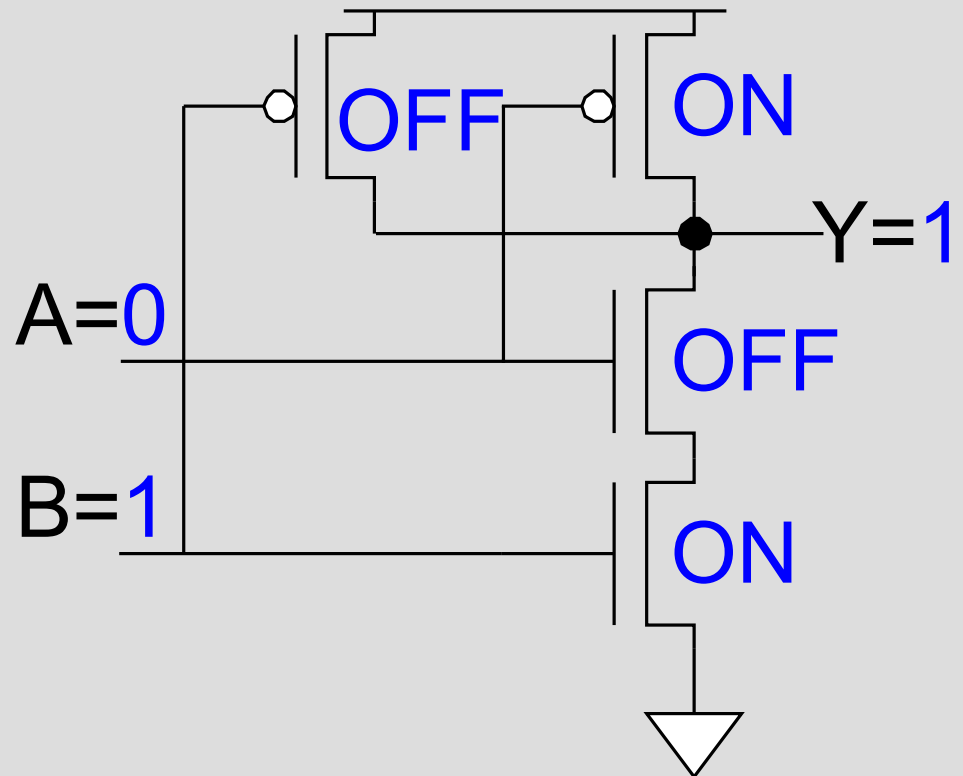
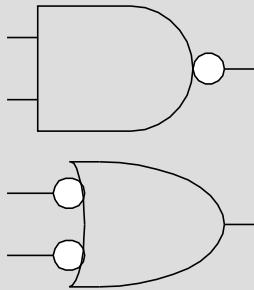
Porta NAND CMOS

A	B	Y
0	0	1
0	1	
1	0	
1	1	



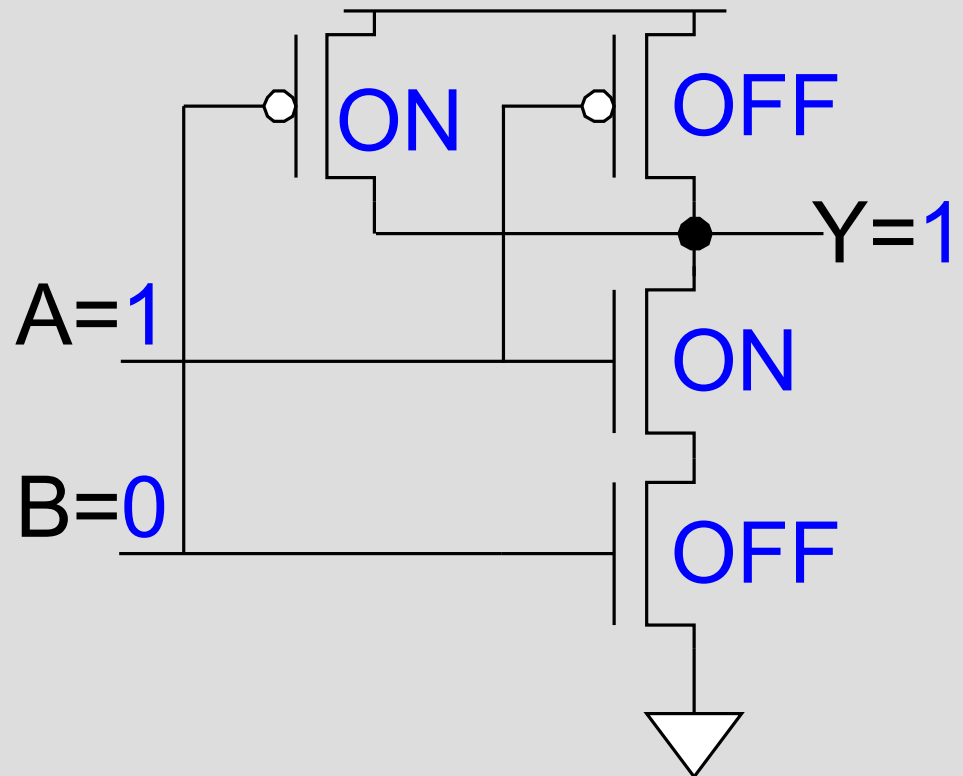
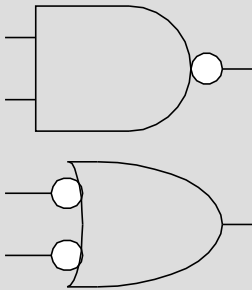
Porta NAND CMOS

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	
1	1	



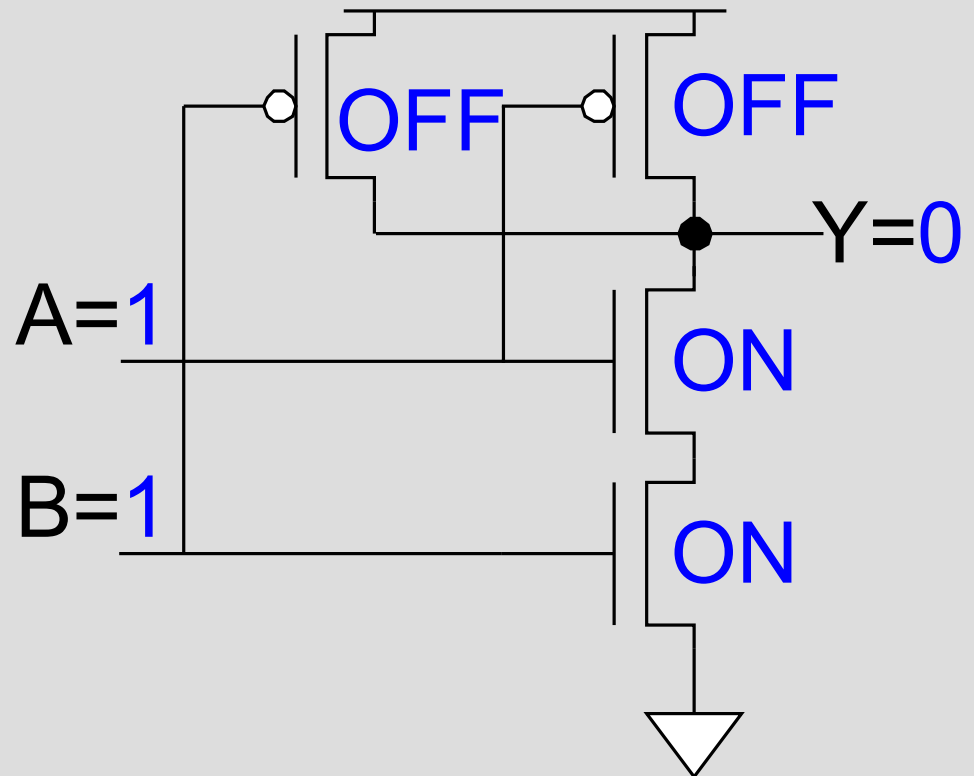
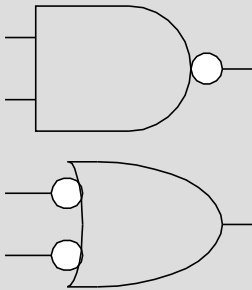
Porta NAND CMOS

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	



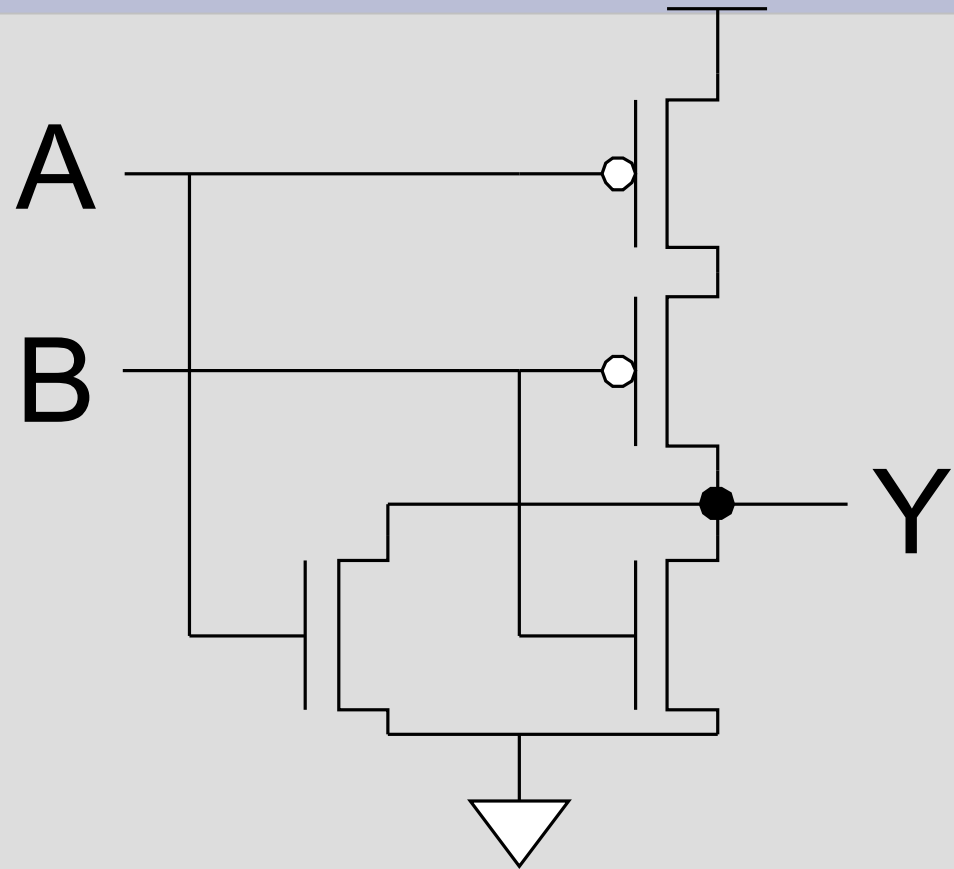
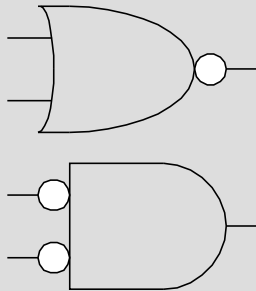
Porta NAND CMOS

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Porta NOR CMOS

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



Processo de Fabricação de Circuitos CMOS

- ☐ Transistores CMOS são fabricados sobre o wafer de silício
- ☐ Processo de litografia é similar ao processo de impressão
- ☐ Em cada passo, diferentes materiais são depositados ou “entalhados” sobre o wafer

Passos do Processo de Fabricação de um inversor CMOS

- ❑ Iniciar com um wafer “vazio”
- ❑ Construir inversor de baixo para cima
- ❑ Primeiro passo é formar n-well
 - Cobrir wafer com camada de SiO_2 (óxido)
 - Remover camada onde n-well deveria ser construído
 - Implantar ou difundir n dopantes sobre o wafer exposto
 - Retirar SiO_2

p substrate

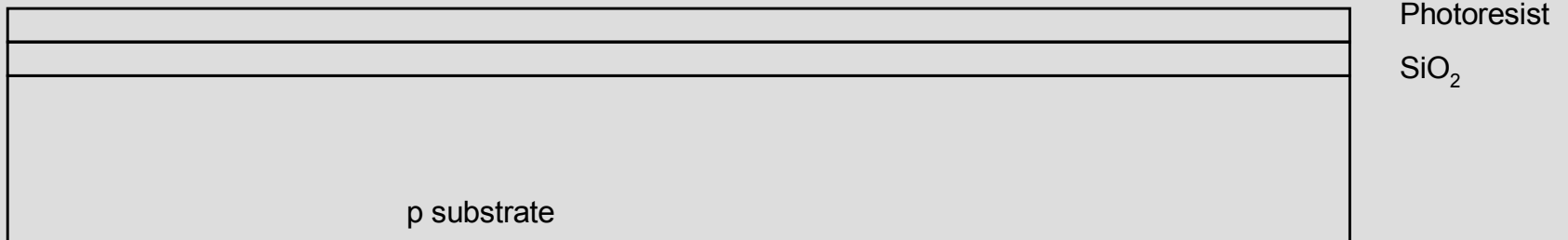
Oxidação

- ❑ Aumentar SiO_2 sobre o wafer Si
 - 900 – 1200 C com H_2O ou O_2 para oxidação



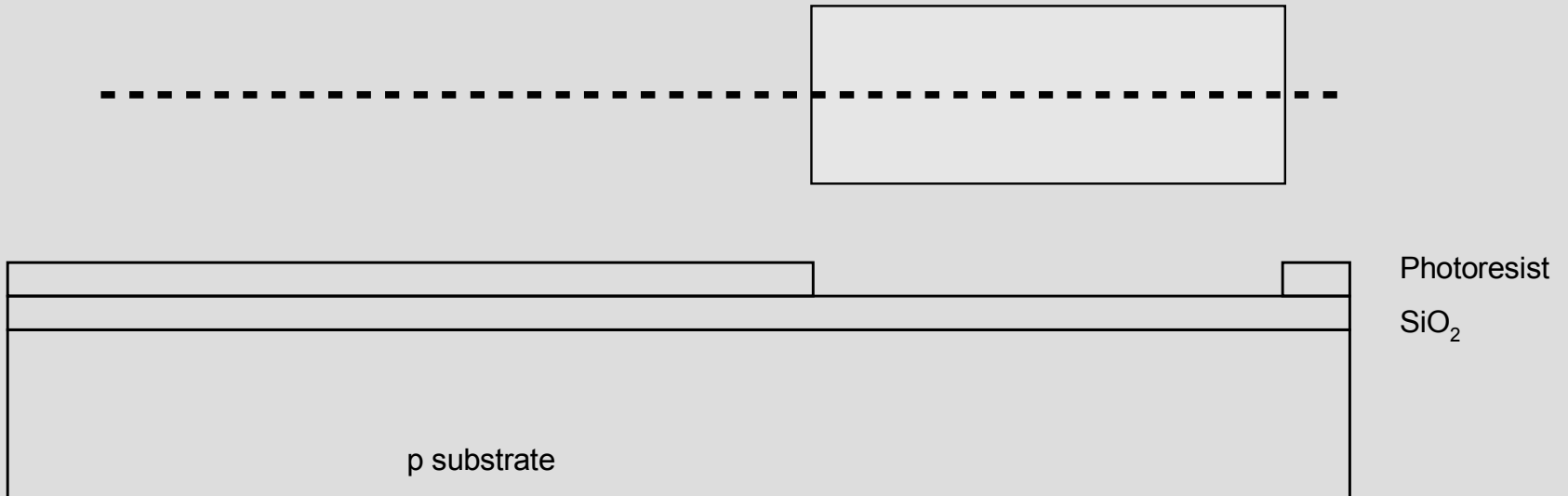
Photoresist

- ❑ Espalhamento de photoresist
 - Photoresist é um polímero orgânico sensível a luz
 - Sensibilidade onde exposto a luz



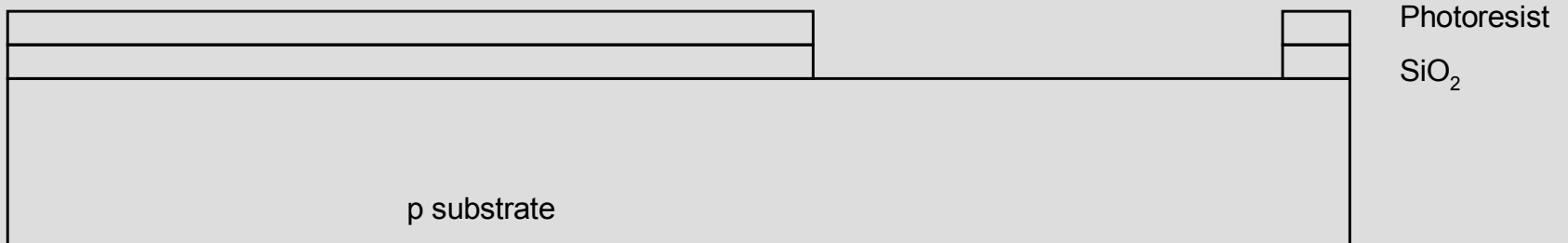
Litografia

- ❑ Expor photoresist através de mascaras n-well
- ❑ Retirar photoresist exposto



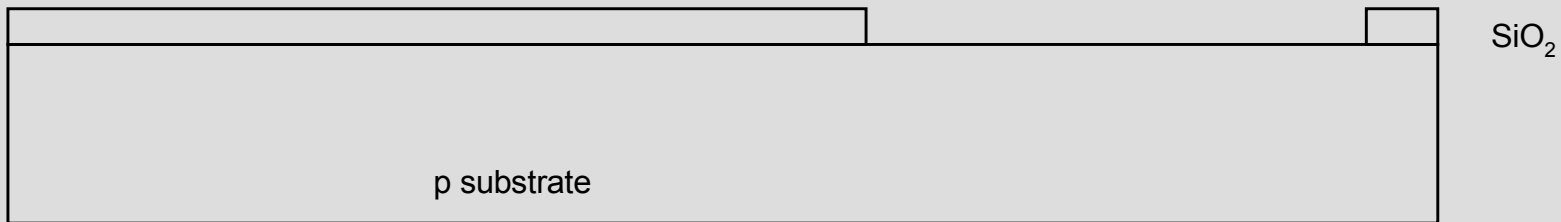
Etch (Marcação/Entalhe)

- ☐ Uso de ácido hidrofúorídrico (HF) sobre SiO_2
- ☐ Tem efeito apenas no óxido que o photoresist deixou exposto



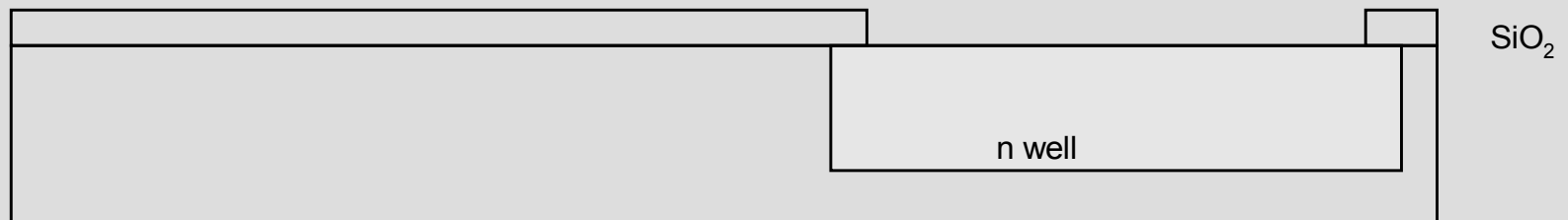
Retirar photoresist

- ❑ Retirar o excesso de photoresist
- ❑ Necessário pelo fato que photoresist não será derretido no próximo passo



n-well

- ❑ n-well é formado através de difusão ou implantação de íons
- ❑ Difusão
 - Aquecer wafer com gás arsênico
 - Aquecer até que átomos As possam se difundir com Si que está exposto
- ❑ Implantação de íons
 - Emitir raios de íons AS sobre o wafer
 - Ions são bloqueados por SiO_2 , entram apenas no Si que está exposto



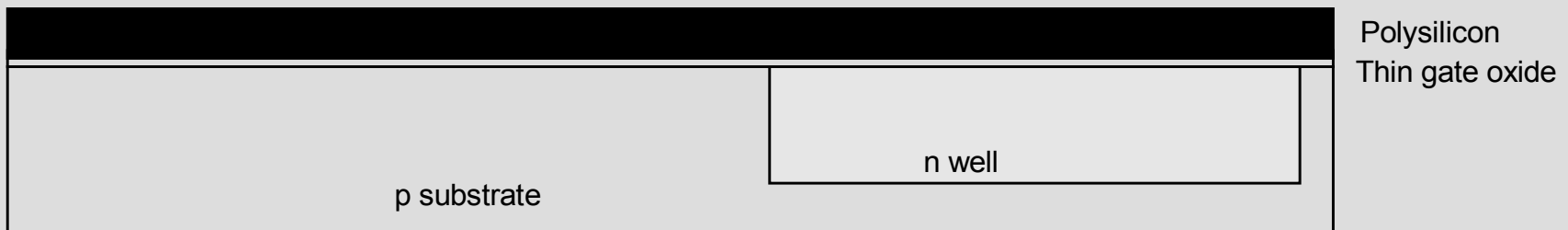
Retirada do óxido

- ☐ Retirar óxido remanescente
- ☐ Retorna para wafer “normal” com n-well



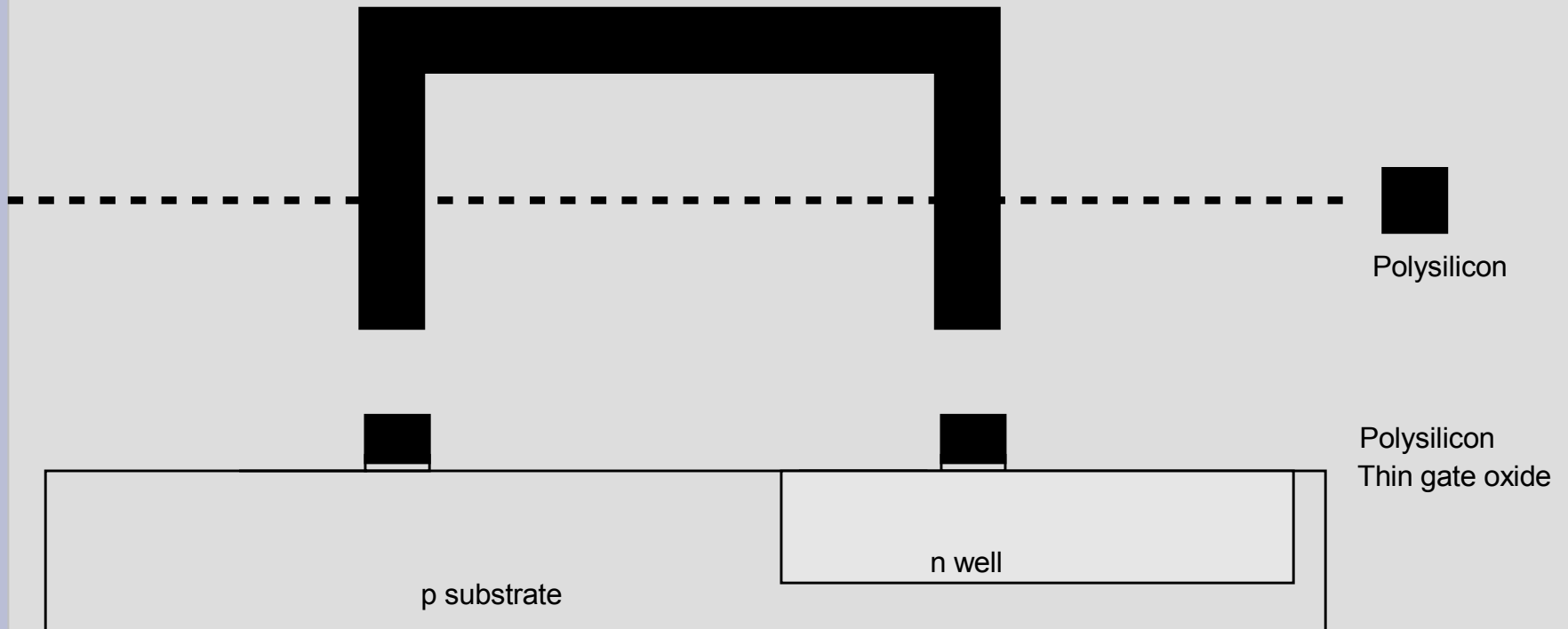
Polisilício

- ❑ Depositar camada fina de óxido
 - $< 20 \text{ \AA}$ (6-7 camadas de átomos)
- ❑ Depósito de vapor químico da camada de silício
 - Aquecer wafer com gas SiH_4
 - Formação de pequenos cristais chamados de polisilício
 - Altamente dopado para se tornar bom condutor



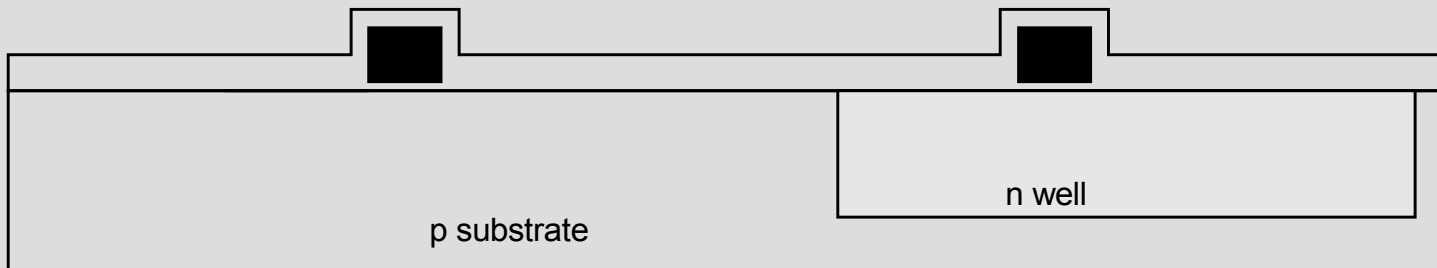
Moldagem de Polissilício

- ❑ Uso do mesmo processo de litografia para moldar polissilício



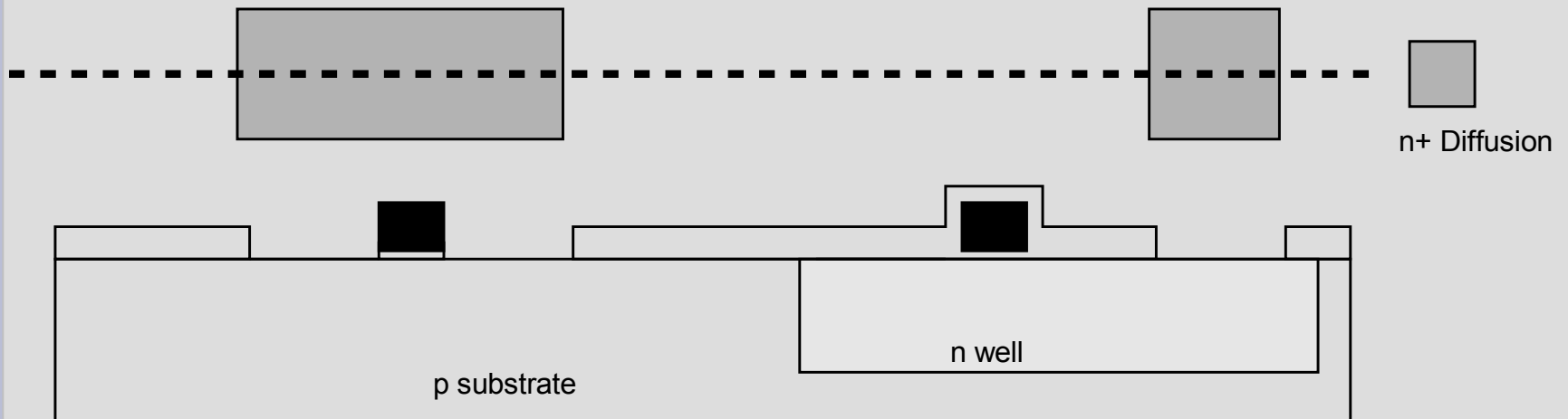
Processo *Self-Aligned*

- ❑ Usar oxido e máscaras para expor onde dopantes n^+ devem ser difundidos ou implantados
- ❑ N-difusão forma nMOS fonte, dreno, e contatos sobre n-well



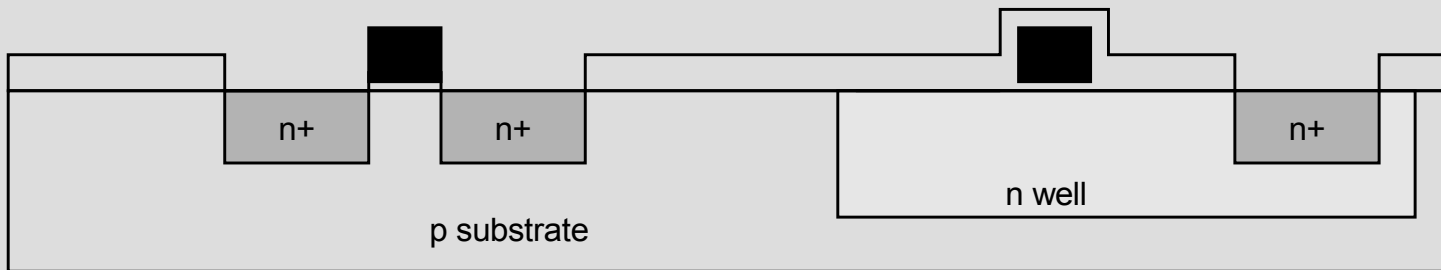
N-difusão

- ❑ Padrões de óxido para formar regiões n+



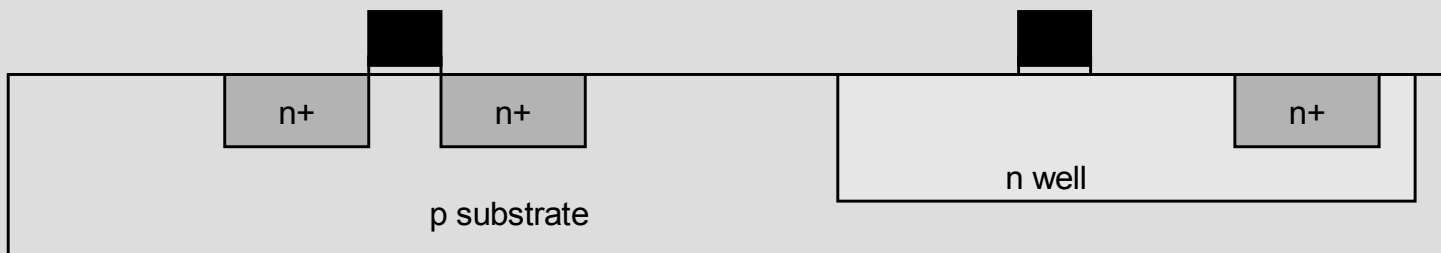
N-difusão (cont.)

- ❑ Historicamente, dopantes eram difundidos no substrato
- ❑ Atualmente, usa-se implantação de íons



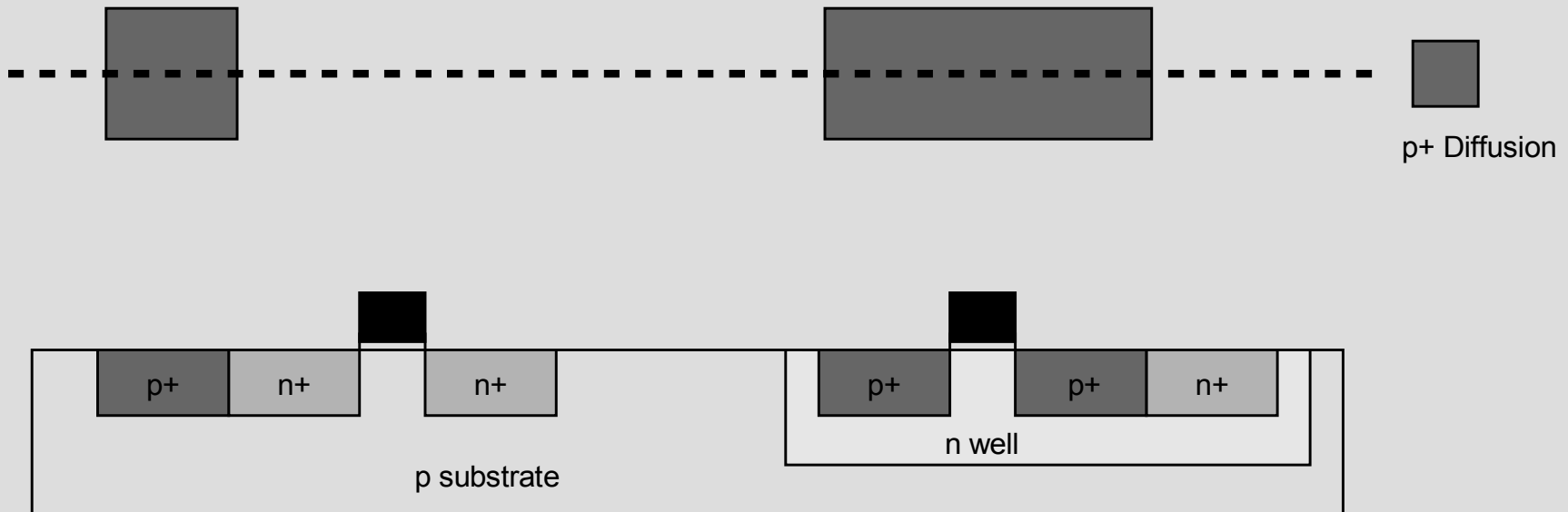
N-difusão (cont.)

- ❑ Extrair óxido para completar passos do padrão



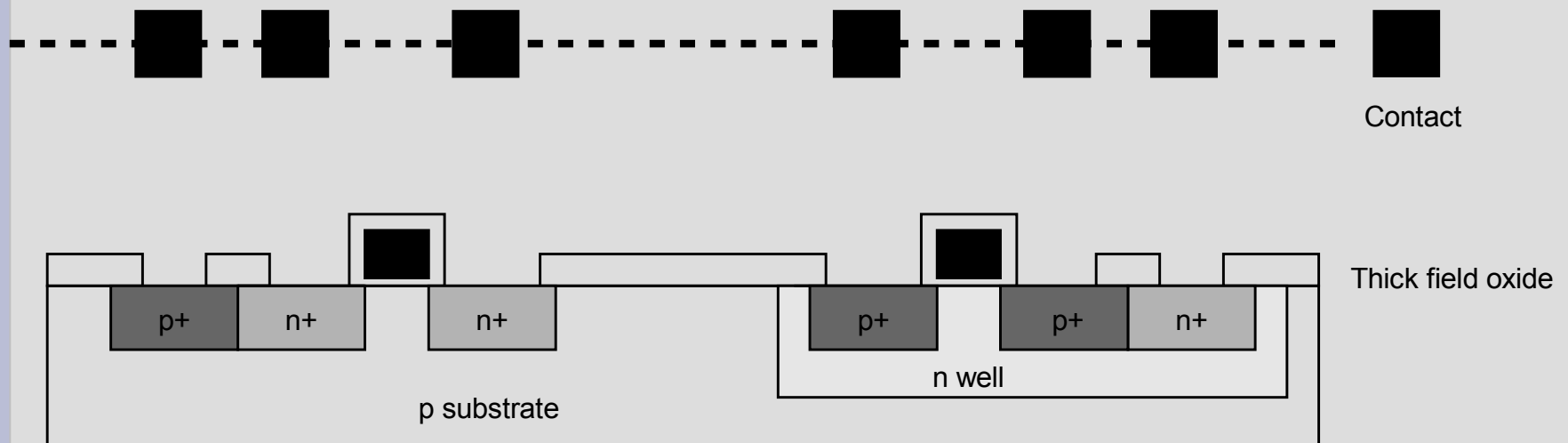
P-Difusão

- ❑ Conjunto de passos similares formam regiões p^+
- ❑ Difusão para fonte e drenopMOS e pontos de contato no substrato



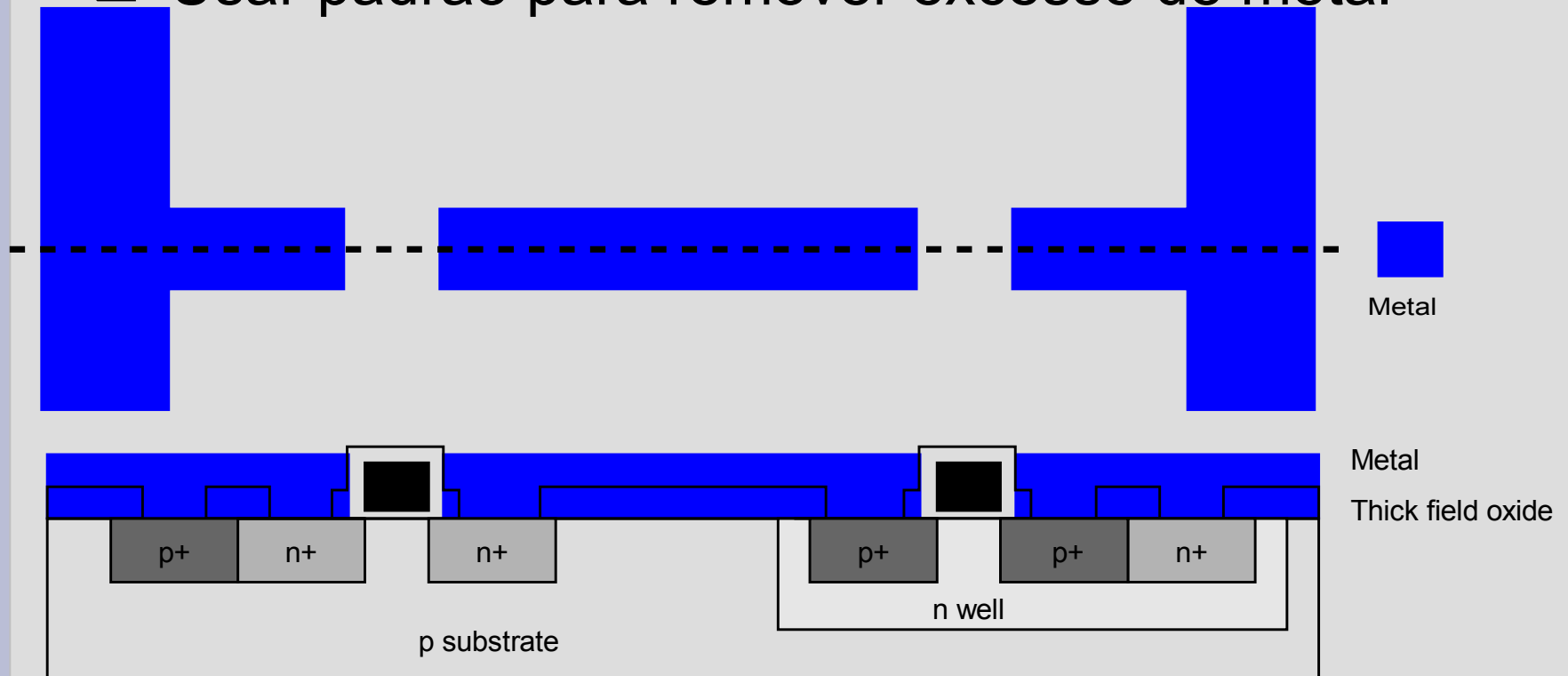
Pontos de Contato

- ❑ É necessário conectar os dispositivos
- ❑ Cobrir o chip com camada de óxido
- ❑ Marcar pontos de contato no wafer



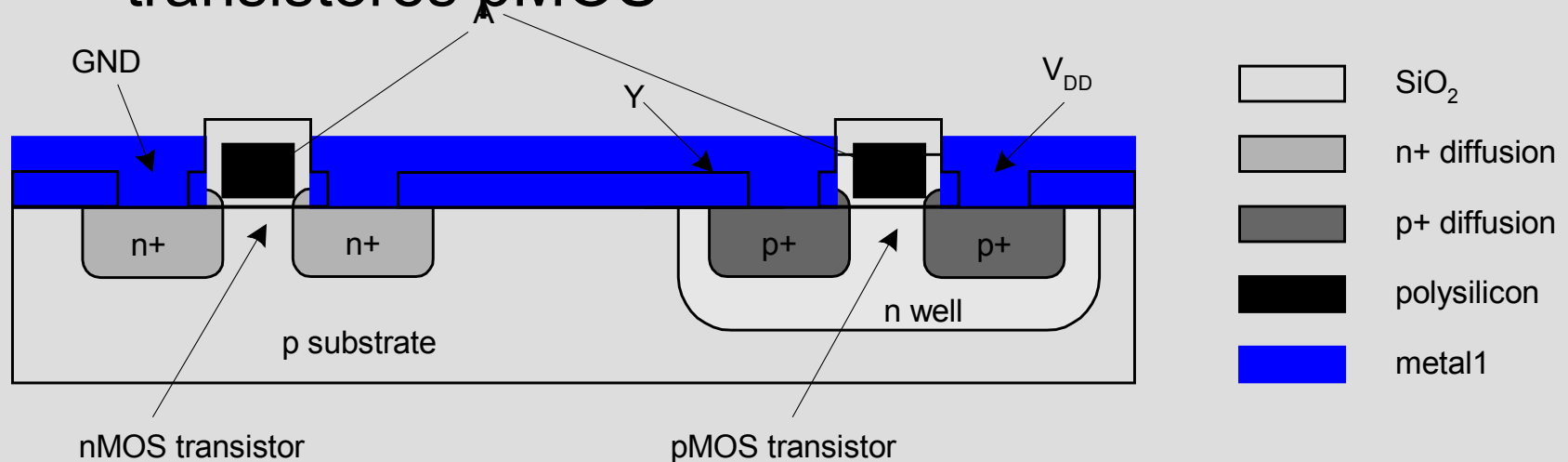
Metalização

- ❑ Espalhar partículas de alumínio sobre o wafer
- ❑ Usar padrão para remover excesso de metal



Visão *Cross-section* do Inversor CMOS

- ❑ Uso de substrato tipo-p para transistores nMOS
- ❑ Requer poço tipo-n (*n-well*) para o corpo de transistores pMOS



Resumo...

- ❑ Transistores MOS são compostos por várias camadas de silício, implantação de íons, metais,
- ❑ Transistores Pode ser visualizado como “chaves” controladas eletricamente
- ❑ Portas lógicas são construídas a partir dessas chaves
- ❑ Máscaras especificam os layouts dos transistores e são as responsáveis pelos custos do processo de fabricação

Questões atuais decorrentes do processo de fabricação

- ❑ Quanto custa fazer um chip?
- ❑ O que é Grafeno?
- ❑ Problemas atuais:
 - *Dark Silicon?*
 - *Memory Wall?*
- ❑ Por que não temos uma fábrica de chips (de produção) no Brasil