

Trabalho de Sistemas Digitais - EEL 5310

Gustavo Henrique Nihei, Léo Willian Kölln, Renato Besen

2006-08-11

Sumário

1	Memórias	1
1.1	Terminologias Básicas	1
1.2	Princípios de Operação	4
1.2.1	Entrada de Endereços	5
1.2.2	A Entrada $R\bar{W}$	5
1.2.3	Habilitação da memória	5
1.3	Classificação	6
1.4	Aplicações	7
2	Famílias Lógicas e Circuitos Integrados	9
2.1	Tecnologia de fabricação	9
2.2	Parâmetros operacionais	11
2.2.1	Níveis de Integração de Circuitos	14
2.3	Famílias TTL, MOS e CMOS	14
2.3.1	TTL - Transistor-Transistor Logic	14
2.3.2	MOS - Metal-Oxide-Semiconductor	17
2.3.3	CMOS - Complementary MOS	17

Resumo

A tecnologia tem nos permitido fabricar componentes eletrônicos cada vez menores, mais baratos e eficientes. Hoje, tais dispositivos são empregados em larga escala, desde simples cafeteiras aos mais luxuosos veículos automotivos.

Neste trabalho, discorreremos sucintamente sobre memórias e circuitos integrados.

A fabricação dos circuitos integrados foi possível graças à descobertas experimentais que mostraram que dispositivos feitos de materiais semicondutores (transistores) podiam executar as funções das válvulas termiônicas, e aos avanços na fabricação de tais dispositivos no meio do século 20.

A integração de um grande número de transistores num único chip foi um grande avanço na fabricação de equipamentos eletrônicos. A capacidade de produção em massa tornou a adoção e padronização de tais dispositivos muito rápida.

Meio século depois do seu desenvolvimento ter sido iniciado, os CIs se tornaram indispensáveis. Milhares de aparelhos eletrônicos que dependem dos CIs são parte do nosso cotidiano. Muitos estudiosos acreditam que a revolução digital trazida pelos circuitos integrados foi um dos eventos mais importantes da humanidade.

As principais vantagens dos circuitos integrados são o baixo custo e o alto desempenho, além do tamanho reduzido e da resistência a choques mecânicos, já que tais dispositivos são "formados", e não "montados".

Memória é todo dispositivo capaz de armazenar informação. Aqui trataremos apenas dos dispositivos semicondutores que sejam capazes de armazenar dados, de forma temporária ou permanente. Como as memórias semicondutoras são normalmente utilizadas na construção de computadores, faremos dela nosso foco no decorrer deste trabalho.

Capítulo 1

Memórias

1.1 Terminologias Básicas

Célula de Memória - Dispositivo ou circuito elétrico capaz de armazenar um único bit, 0 ou 1. Em DRAM (Dynamic Random Access Memory), uma célula é composta de um transistor e um capacitor. Em SRAM (Static Random Access Memory), uma célula pode ser composta de, no máximo, seis transistores. Exemplos de célula de memória um flip-flop, um capacitor carregado e um pequeno local numa fita ou disco magnético.

Palavra de Memória - Um grupo de bits (células) em uma memória que representa instruções ou dados de algum tipo. Por exemplo, um registrador de oito FFs pode ser considerado uma memória que está armazenando uma palavra de 8 bits. Os tamanhos de palavra nos computadores modernos variam tipicamente de 4 a 64 bits, dependendo do porte do computador.

Byte - Um termo especial usado para um grupo de oito bits. Um byte sempre é constituído de 8 bits. Tamanhos de palavra podem ser expressos em bytes assim como em bits. Por exemplo, uma palavra de 8 bits é também uma palavra de um byte; uma palavra de 16 bits tem dois bytes, e assim por diante.

Capacidade - Uma maneira de especificar quantos bits podem ser armazenados em um determinado dispositivo de memória ou num sistema de memória completa. Para ilustrar, suponha que temos uma memória capaz de armazenar 4.096 palavras de 20 bits. Isto representa uma capacidade total de 81.920 bits. Poderíamos também expressar essa capacidade de memória coma 4.096×20 .

Densidade - Um outro termo para capacidade. Quando dizemos que um dispositivo de memória tem uma densidade maior do que um outro, queremos dizer que ele pode armazenar mais bits no mesmo espaço. Ele é mais denso.

Endereço - É um identificador único para um local da memória na qual um processador ou um outro dispositivo pode armazenar pedaços de dados. Em computadores modernos com endereçamento por byte, cada endereço

identifica um byte de armazenamento. Endereços sempre existem num sistema digital como um número binário, embora, por conveniência, números em octal, hexadecimal e decimal sejam freqüentemente utilizados para representar o endereço. Na figura a seguir, podemos ver uma pequena memória constituída de 8 palavras de memória.

Endereços	
000	Palavra 0
001	Palavra 1
010	Palavra 2
011	Palavra 3
100	Palavra 4
101	Palavra 5
110	Palavra 6
111	Palavra 7

Cada uma dessas oito palavras tem um endereço específico representado por um número de 3 bits que varia de 000 até 111. Sempre que nos referimos a uma posição específica na memória, utilizamos seu código de endereço para identificá-la.

Operação de Leitura - Operação na qual a palavra binária armazenada numa determinada posição (endereço) de memória é detectada e então transferida para outro dispositivo. A operação de leitura freqüentemente é chamada de operação de busca, pois a palavra está sendo buscada da memória. Utilizaremos os dois termos indistintamente.

Operação de Escrita - Operação na qual uma nova palavra é colocada numa determinada posição de memória. Também é chamada de operação de armazenamento. Sempre que uma nova palavra é escrita numa posição de memória, ela substitui a palavra que estava previamente armazenada nessa posição.

Tempo de Acesso - O tempo de acesso, ou latência da memória, é o tempo necessário para realizar uma operação de leitura. Em outras palavras, é o tempo entre o início de um pedido por um byte ou uma palavra na memória e o momento em que o mesmo é entregue. Esta é uma boa forma de medir a velocidade da memória: quanto menor o tempo de acesso ou latência, maior a velocidade da memória.

Memória Volátil - Memória volátil é o tipo de memória que necessita de uma fonte externa de energia para manter dados armazenados. Caso seja removida essa fonte, todos os dados contidos na memória são perdidos. A maioria das modernas RAM são voláteis, incluindo DRAM e SRAM. Também existem as não-voláteis, como as memórias magnéticas, flash e ROM. Essas podem manter dados mesmo sem necessitar de energia.

Memória de Acesso Randômico/Aleatório (Random Access Memory)

- RAM refere ao formato de armazenamento de informação que permite o acesso aos dados em qualquer ordem, ou seja, aleatoriamente. Nesse tipo de memória, a posição física real de uma palavra da memória não tem efeito sobre o tempo necessário para ler ou escrever nesta posição. Em outras palavras, o tempo de acesso é o mesmo para qualquer endereço na memória. A maioria das memórias semicondutoras é de acesso aleatório.

Memória de Acesso Seqüencial (Sequential Access Memory) - Acesso seqüencial

significa que um conjunto de elementos é acessado de uma maneira ordenada, pré-determinada. SAM é Um tipo de memória no qual o tempo de acesso não é constante, mas varia dependendo do endereço. Uma determinada palavra armazenada é encontrada percorrendo todos os endereços até que o endereço desejado seja alcançado. Isto produz tempos de acesso que são muito maior do que os das memórias de acesso aleatório. Um exemplo de dispositivo de memória de acesso seqüencial é uma fita magnética.

Memória de Leitura e Escrita (RWM-Read/Write Memory) - É um tipo de memória à qual se pode facilmente tanto ler como escrever.**Memória Somente de Leitura (ROM-Read-Only Memory)** - Uma vasta

classe de memórias semicondutoras, projetadas para aplicações nas quais a razão entre as operações de leitura e escrita é muito alta. Teoricamente, "ROM" só pode ser lida, mas todas as ROMs permitem que nelas sejam escritos dados ao menos uma vez, ou durante o processo de fabricação ou programando-a. Algumas ROMs podem ser apagadas e reprogramadas múltiplas vezes, embora elas continuem sendo chamadas "somente leitura", pois a reprogramação envolve um processo infreqüente de apagar completamente a memória.

Dispositivos de Memória Estática (Static RAM) - É um tipo de RAM que retém seu conteúdo armazenado enquanto nela houver energia aplicada.**Dispositivos de Memória Dinâmica (Dynamic RAM)** - É um tipo de RAM

que armazena cada bit de dados em um capacitor separado. Como os capacitores de hoje não são ideais e, conseqüentemente, ocorre o vazamento de elétrons, a informação normalmente se perde a não ser que o capacitor seja recarregado. Entenda-se "recarga do capacitor" como a reescrita dos dados. Essa operação é também denominada "refresh". Sua vantagem em relação às SRAM é a sua simplicidade estrutural: somente um transistor e um capacitor são necessários por bit armazenado, comparados os seis transistores nas SRAM.

Memória Principal - Também chamada de memória de trabalho do computador. Ela armazena instruções e dados que a CPU está acessando no momento. É a memória mais rápida num computador. Sempre é uma memória semicondutora. Um exemplo de memória principal é a cache do processador.**Memória Auxiliar** - É a memória que não está diretamente acessível ao processador de um computador, necessitando do uso dos canais de I/O do

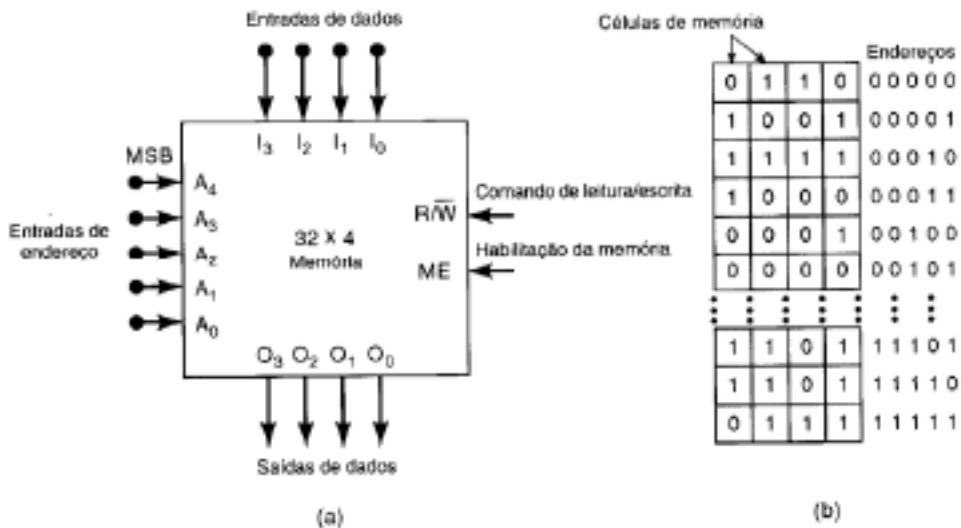
computador. Também chamada de memória de massa porque ela armazena grandes quantidades de informação externamente à memória principal. É mais lenta do que a memória principal e sempre é não-volátil. Discos magnéticos e CDs são dispositivos comuns de memória auxiliar.

1.2 Princípios de Operação

Apesar das diferenças existentes na implementação de cada tipo de memória, um conjunto de princípios básicos de operação permanece o mesmo para todos os sistemas de memória. Cada sistema requer um conjunto de linhas de entrada e saída para realizar as seguintes funções:

- Selecione o endereço na memória que está sendo acessado para uma operação de leitura ou escrita.
- Selecione uma operação de leitura ou uma de escrita a ser realizada.
- Fornecer os dados de entrada a serem armazenados na memória durante uma operação de escrita.
- Manter os dados de saída vindos da memória durante uma operação de leitura.
- Habilitar (ou desabilitar) a memória de modo que ela responda (ou não) as entradas de endereçamento e ao comando de leitura/escrita.

A figura abaixo ilustra essas funções básicas num diagrama simplificado de uma memória de 32 X 4, ou seja, armazena trinta e duas palavras de quatro bits:



1.2.1 Entrada de Endereços

Como esta memória armazena 32 palavras, ela tem 32 posições de armazenamento diferentes, e portanto possui 32 endereços binários diferentes, variando de 00000 até 11111 (0 a 31 em decimal). Logo, existem cinco entradas de endereço, A0 até A4. Para acessar uma das posições de memória para uma operação de leitura ou escrita, o código de endereçamento de cinco bits para essa posição é aplicado nas entradas de endereço. De um modo geral, N entradas de endereço são necessárias para uma memória que possui uma capacidade de 2N palavras. Podemos visualizar a memória da figura acima como um arranjo de 32 registradores, no qual cada registrador guarda uma palavra de quatro bits, conforme mostra a parte (b) da mesma. Cada posição é mostrada contendo quatro células de memória, que guardam 1s ou 0s, que formam a palavra de dados armazenada nesta posição. Por exemplo, a palavra de dados 0110 está armazenada no endereço 00000, a palavra de dados 1001 está armazenada no endereço 00001, e assim por diante.

1.2.2 A Entrada $R\bar{W}$

Esta entrada controla qual operação deve ser realizada na memória: leitura (R) ou Escrita (W). A entrada é identificada por R/\bar{W} , e, como não existe a barra sobre R, isto indica que a operação de leitura ocorre quando $R/\bar{W} = 1$. A barra sobre W indica que a operação de escrita acontece quando $R/\bar{W} = 0$. Outros identificadores são usados frequentemente para essa entrada. Dois dos mais comuns são \bar{W} (escrita) e $\bar{W}E$ (write enable - habilitação de escrita). Novamente, a barra indica que a operação de escrita ocorre quando a entrada está em BAIXO. Fica subentendido que a operação de leitura ocorre para nível ALTO. Uma ilustração simplificada das operações de leitura e escrita é mostrada na figura abaixo:



1.2.3 Habilitação da memória

Muitos sistemas de memória têm algum modo de desabilitar completamente uma parte ou toda a memória, de modo que ela não responde as outras entradas. Isto é representado na figura 4 pela entrada **ME**, embora ela possa ter nomes diferentes nos vários sistemas de memória, tais como chip **enable (CE)** ou

chip **select (CS)**. Aqui ela é mostrada como uma entrada ativa em ALTO que habilita a memória a operar normalmente quando é mantida em ALTO. Um nível BAIXO nesta entrada desabilita a memória, de modo que ela não respondera as entradas de endereço e de R/\bar{W} . Esse tipo de entrada é útil quando vários módulos de memória são combinados para formar uma memória maior. Examinaremos essa idéia mais tarde.

1.3 Classificação

As memórias semicondutoras podem ser divididas em dois grupos:

- ROM => memórias somente de leitura (Read-only Memory)
- RWM => memórias de escrita e leitura (Read-Write Memory)

Como a grande maioria das RAM são RWM, o termo "RWM" freqüentemente é substituído pelo termo "RAM", e assim será feito no decorrer deste trabalho. Dentre as memórias ROM, temos:

ROM Programada por Máscara (Mask-programmed ROM) - Uma das primeiras formas de ROM não-volátil, a ROM Programada por máscara era desenvolvida para conter dados específicos. Uma vez que a máscara era usada para criar circuitos integrados, os dados eram gravados na pedra (ou no silício) e não poderiam ser alterados. Independente se fosse 0 ou 1 que estivesse lá gravado, assim ficaria para sempre. Devido ao alto custo inicial e a impossibilidade de fazer revisões, sua produção só é viável economicamente caso seja produzido um número muito grande de ROMs com a mesma máscara.

ROM Programável (Programmable ROM / PROM) - É uma forma de memória digital onde o estado de cada bit está trancado por um fusível ou antifusível. A memória pode ser programada só uma vez depois do fabrico pelo "rebetamento" dos fusíveis (usando um PROM blower), o que é um processo irreversível. O rebetamento de um fusível abre uma ligação, enquanto que o rebetamento de um antifusível fecha uma ligação (daí o nome). A programação é feita pela aplicação de pulsos de alta voltagem, que não são encontrados durante a operação normal (tipicamente, de 12 a 21 volts). Read-only, ou só de leitura, significa que, ao contrário do que acontece com a memória convencional, a programação não pode ser alterada (pelo menos não pelo usuário final).

ROM Programável Apagável (Erasable PROM / EPROM) - Uma EPROM é programada por um dispositivo eletrônico que dá voltagens maiores do que os usados normalmente em circuitos elétricos. Uma vez programado, uma EPROM pode ser apagada apenas por exposição a uma forte luz ultravioleta, e seu apagamento não é seletivo (todos os dados serão perdidos). Uma EPROM programada mantém seus dados por aproximadamente dez a vinte anos e pode ser lida ilimitadas vezes. Para se programar uma EPROM, é necessário utilizar um equipamento conhecido como Programador. O Gravador tipo Willem é um exemplo desse tipo de equipamento.

ROM Eletricamente Programável Apagável (Electrically Erasable PROM / EEPROM)

- Pode ser escrita e apagada (lentamente) através de sinais elétricos. É bastante usada para armazenar configurações de hardware em computadores (BIOS dos IBM-PC). Este tipo de memória soluciona o problema das EPROM, que precisam ser retiradas do soquete para ser apagada. Também, nas EPROM, o processo de apagar remove todo o conteúdo da mesma, portanto, isto obriga a sua reprogramação completa. A desvantagem das EEPROM é a necessidade de um conversor externo para gerar as tensões de programação (21V e -21V), no entanto, os dispositivos mais recentes já incorporam este conversor.

A memória flash é uma variação moderna da EEPROM, mas existe na indústria uma convenção para reservar o termo EEPROM para as memórias de escrita bit a bit, não incluindo as memórias de escrita bloco a bloco, como as memórias flash. As EEPROM necessitam de maior área que as memórias flash, porque cada célula geralmente necessita de um transistor de leitura e outro de escrita, ao passo que as células da memória flash só necessitam de um.

As RAM podem ser divididas em:

SRAM - A célula básica de armazenamento da informação binária é um flip-flop, que armazena 1 bit; ele permanece nesse estado até ser explicitamente alterado. Embora sejam mais caras e ocupem mais espaço, quando comparadas às DRAMs, possuem a vantagem de serem bem mais rápidas, justificando seu uso nas memórias cache L1 e L2 de processadores.

DRAM - A célula básica de armazenamento da informação binária é um capacitor que armazena 1 bit; ele precisa ser periodicamente recarregado (refresh) para permanecer em 1, caso armazene um bit ativo. Embora esse fenômeno da perda de carga não ocorra nas memórias SRAM, as DRAMs possuem a vantagem de terem custo muito menor e densidade de bits muito maior (o que em parte explica o menor custo), possibilitando em um mesmo espaço armazenar muito mais bits.

1.4 Aplicações

ROM

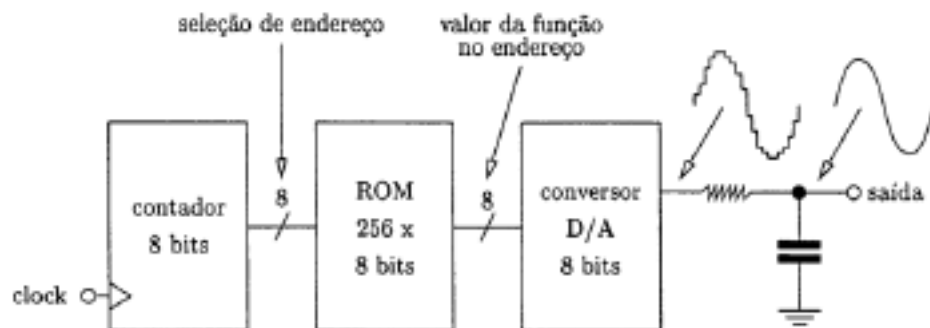
Firmware - Guardar programas residentes em sistemas usando microprocessadores, como equipamentos de vídeo, eletrodomésticos, brinquedos, controladores industriais, etc.

Bootstrap - Memória de inicialização de computadores, contendo as instruções iniciais a executar para lançar o equipamento (testes de hardware, mensagens, carga do sistema operacional a partir de um disco, etc.).

Tabelas de Dados - Armazenamento de dados fixos como tabelas de senos, cossenos, etc. Com isso pode-se ganhar um tempo considerável evitando cálculos complexos e freqüentes.

Conversão de Dados - Podemos usar as memórias ROM para converter dados entre diferentes formatos binários, considerando o endereço como dado de entrada e o conteúdo da memória naquele endereço como dado de saída. Por exemplo, podemos armazenar em uma ROM de 256x8 bits o valor do complemento 2 para cada endereço. Então, selecionando um determinado endereço teremos na saída o respectivo valor complementado.

Geração de funções - Podemos produzir formas de onda específicas armazenando os valores correspondentes a um período da função em uma memória ROM. Esta pode então ser percorrida seqüencialmente para reconstituir a forma de onda, de acordo com o circuito a seguir:



Armazenamento de configurações - Como usado para armazenar as configurações de BIOS dos computadores compatíveis IBM-PC (EEPROM).

RAM

Cache de processadores - Na memória cache dos processadores são utilizadas SRAM's.

Memória Principal em Computadores - Para memória principal, diversos tipos de DRAM são utilizados, como por exemplo as SDRAM (Synchronous Dynamic RAM).

Circuitos de Processamento Digital de Sinais - São utilizadas SRAM do tipo DPRAM (Dual-ported RAM), que permite múltiplas leituras ou escritas ao mesmo tempo, ou quase ao mesmo tempo, diferentemente do modelo "single-ported" que permite somente um acesso por vez.

Capítulo 2

Famílias Lógicas e Circuitos Integrados

2.1 Tecnologia de fabricação

O processo de fabricação de semicondutores pode ser resumido nos seguintes passos:

- **Projeto do Chip:** Onde os engenheiros projetam o chip, ou seja, como o chip irá funcionar. Desta etapa vêm várias máscaras (que são uma espécie de planta de como o chip deve ser fabricado) que serão usadas na fabricação do wafer.
- **Fabricação do Wafer:** Este é o principal processo de fabricação de um chip, que explicaremos em detalhes mais adiante.
- **Preparação do Núcleo:** Este passo consiste basicamente em cortar os chips do wafer.
- **Encapsulamento:** Neste passo os terminais e o invólucro são adicionados ao chip.
- **Teste:** O chip é testado e então vendido.

Cada um desses passos pode subdividido em vários outros passos.

Quando dizemos “fabricação de chip” normalmente pensamos sobre o processo de fabricação do wafer, que é a parte mais complicada. O wafer é o principal elemento usado na fabricação dos chips. O wafer “virgem” é feito de silício puro, que é extraído da areia da praia. O wafer é criado através de um método chamado Czochralski, onde um pedaço de cristal de silício é colocado em uma vareta e então mergulhado em silício derretido. A vareta é suspensa e girada ao mesmo tempo, formando um grande cilindro de cristal de silício, também conhecido como lingote (ou “ingot”, em inglês).

O lingote resultante deste processo mede de um a dois metros de comprimento e pode ter até 300 mm de diâmetro (é daí que vêm termos como "wafer de 300 mm"). O lingote é então "fatiado" em wafers. Esses wafers são polidos e enviados para a fabricação do chip. Em cima deste wafer "virgem" é que os chips serão fabricados.

Os chips são fabricados no wafer através de um processo chamado fotolitografia. Neste processo, produtos químicos sensíveis à luz ultravioleta são usados. Quando exposto à luz ultravioleta, eles podem se tornar "moles" ou "duros". Este processo consiste basicamente em bloquear a luz ultravioleta dos produtos químicos no wafer usando uma máscara (as tais máscaras criadas pelos engenheiros), removendo as partes "moles", e então repetindo o processo novamente com uma outra máscara, até a fabricação do chip ser finalizada.

Claro que cada máscara possui um padrão diferente e cada padrão determina como os transistores e fios dentro do chip serão fabricados. O número de máscaras usadas varia dependendo do projeto.

A primeira coisa que é feita no wafer virgem é a aplicação de dióxido de silício (SiO_2), através da exposição do wafer a gás e calor extremo. Este processo é similar a forma como os metais enferrujam-se quando molhados, mas este processo acontece de maneira bem mais rápida.

No passo seguinte, o wafer é coberto por uma substância fotossensível, que é solúvel quando exposta à luz ultravioleta. A primeira máscara é aplicada e o wafer é exposto à luz ultravioleta. A parte mole da substância fotossensível é removida usando solvente e então partes da camada de dióxido de silício que foi revelada é removida em um processo chamado etching. O resto da camada fotossensível é removido, então temos agora o wafer com uma camada de dióxido de silício com a mesma forma da primeira máscara.

Uma outra camada de dióxido de silício é aplicada no wafer e uma camada de polisilício é aplicada por cima. Em seguida uma outra camada de substância fotossensível é aplicada. A segunda máscara é aplicada e o wafer é exposto à luz ultravioleta novamente. A parte mole da camada fotossensível é removida usando solvente e então as partes da camada de polisilício e de dióxido de silício que foram reveladas são removidas usando o processo chamado etching. O resto da camada fotossensível é removido e agora temos o wafer com uma camada de dióxido de silício com a mesma forma da primeira máscara e em cima dela uma camada de polisilício e de dióxido de silício com a mesma forma da segunda máscara.

Após esses passos, um processo chamado dopagem (ou ionização) acontece. Aqui áreas expostas do wafer são bombardeadas com vários íons, para alterar a forma como essas áreas conduzem eletricidade. As áreas expostas serão transformadas em semicondutor do tipo P (carga positiva) ou o tipo N (carga negativa), dependendo do produto químico usado: fósforo, antimônio e arsênico são geralmente usados para criar semicondutores do tipo N, enquanto que bromo, índio e gálio são geralmente usados para criar camadas de semicondutor

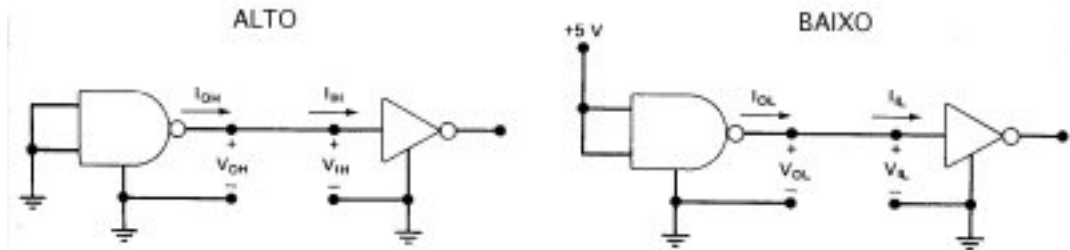
P. O empilhamento de camadas com materiais do tipo P e N é que criarão os transistores.

O processo de aplicação das camadas e máscaras é repetido, seguindo o layout da próxima máscara. Um metal é então aplicado ao wafer, preenchendo eventuais buracos que foram criados para fazer a conexão elétrica entre as camadas. Um outro processo de aplicação de máscara e remoção (etching) são feitos e as conexões elétricas são estabelecidas.

Este processo é repetido novamente até o chip ficar pronto, isto é, até que todas as máscaras sejam aplicadas. O processo de fabricação exato e número de camadas dependem do componente sendo fabricado. Por exemplo, um processador Pentium 4 usa 26 máscaras e 7 camadas de metal.

Os chips no wafer são então testados e o wafer é enviado para o próximo passo no processo de fabricação, onde os chips são cortados, recebem seus terminais e são encapsulados. Após isso, eles são testados, rotulados e vendidos.

2.2 Parâmetros operacionais



V_{IH} (**mínimo**) - Tensão de Entrada Correspondente ao Nível Lógico Alto. É o nível de tensão necessário a representar o nível lógico 1 na entrada de um circuito digital. Qualquer tensão abaixo deste nível não será considerada nível lógico ALTO por um circuito digital.

V_{IL} (**máximo**) - Tensão de Entrada Correspondente ao Nível Lógico Baixo. É o nível de tensão necessário a representar o nível lógico 0 na entrada de um circuito digital. Qualquer tensão acima deste nível não será considerada nível lógico BAIXO por um circuito digital.

V_{OH} (**mínimo**) - Tensão de Saída Correspondente ao Nível Lógico Alto. É o nível de tensão necessário a representar o nível lógico 1 na saída de um circuito digital. Tal parâmetro normalmente é especificado por seu valor mínimo.

V_{OL} (**máximo**) - Tensão de Saída Correspondente ao Nível Lógico Baixo. É o nível de tensão necessário a representar o nível lógico 0 na saída de um circuito digital. Tal parâmetro normalmente é especificado por seu valor máximo.

I_{IH} (**mínimo**) - Corrente de Entrada Correspondente ao Nível Lógico Alto. Valor da corrente que circula na entrada de um circuito digital, quando um nível lógico alto é aplicado em tal entrada.

I_{IL} (**máximo**) - Corrente de Entrada Correspondente ao Nível Lógico Baixo. Valor da corrente que circula na entrada de um circuito digital, quando um nível lógico baixo é aplicado em tal entrada.

I_{OH} (**mínimo**) - Corrente de Saída Correspondente ao Nível Lógico Alto. Valor da corrente que circula na saída de um circuito digital, quando um nível lógico alto é gerado em tal circuito, respeitadas as limitações para carregamento da saída.

I_{OL} (**máximo**) - Corrente de Saída Correspondente ao Nível Lógico Baixo. Valor da corrente que circula na saída de um circuito digital, quando um nível lógico baixo é gerado em tal circuito, respeitadas as limitações para carregamento da saída.

Fan-Out em geral, a saída de um circuito lógico é projetada para alimentar várias entradas de outros circuitos lógicos. O fan-out, também chamado fator de carga, é definido como o número máximo de entradas de circuitos lógicos que uma saída pode alimentar de maneira confiável. Se tal número não for respeitado, os níveis de tensão na saída do circuito poderão não respeitar as especificações.

Exemplo: Uma porta lógica com fan-out de 10 pode alimentar até 10 entradas lógicas padrão. Para determinar quantas entradas diferentes a saída de um CI pode alimentar, precisamos conhecer I_{OL} (máx) e I_{OH} (máx) de tal CI e as necessidades de corrente de cada entrada, I_{IL} e I_{IH} . Estas informações estão sempre presentes nas especificações do chip fornecidas pelo fabricante. Assim,

$$\begin{aligned} \bullet \text{ fan-out(BAIXO)} &= \frac{I_{OL(max)}}{I_{IL(max)}} \\ \bullet \text{ fan-out(ALTO)} &= \frac{I_{OH(max)}}{I_{IH(max)}} \end{aligned}$$

Se o fan-out para o nível BAIXO for diferente do fan-out para o nível ALTO, como ocorre em alguns casos, devemos escolher o menor dos dois.

Obs.: O Fan-In indica a quantidade máxima de saídas que podemos ligar a uma entrada.

Retardo de Propagação - Um sinal lógico sempre sofre retardo em sua passagem através de um circuito. Os dois tempos correspondentes aos retardos de propagação são definidos como:

- tPLH: tempo de retardo correspondente à passagem do nível lógico 0 para o nível lógico 1 (BAIXO para ALTO).
- tPHL: tempo de retardo correspondente à passagem do nível lógico 1 para o nível lógico 0 (ALTO para BAIXO).

Em geral t_{PLH} e t_{PHL} possuem valores diferentes, variando também em função das condições de carregamento a que o circuito está submetido. Tais valores são usados para compararem as velocidades de operação dos circuitos lógicos.

Exemplo: Um circuito com retardo de propagação em torno de 10ns é mais rápido do que um circuito com retardo da ordem de 20 ns.

Exigências para alimentação - Cada CI precisa de uma determinada quantidade de potência elétrica para operar. Tal potência é suprimida por uma ou mais fontes de tensão, conectadas aos pinos de alimentação do chip. Normalmente, só é necessário operar um único pino para alimentação do chip, denominado VCC para a família TTL e VDD para os dispositivos MOS (descritos posteriormente).

A quantidade de potência que um CI precisa para funcionar é determinada pela corrente ICC que ele puxa da fonte que fornece VCC, sendo seu valor numérico obtido pelo produto $ICC \times VCC$. Para muitos CIs, o consumo de corrente vai variar, dependendo dos níveis lógicos dos circuitos dos chips.

Exemplo: Considere um chip NAND, em que todas as saídas estão no nível lógico ALTO. Neste caso, a corrente que sai da fonte VCC é chamada de ICCH. Considere o mesmo chip NAND, com todas as suas saídas no nível lógico BAIXO. Neste caso, a corrente que sai da fonte VCC é denominada ICCL. Em geral, ICCH e ICCL têm valores diferentes, sendo o valor médio de tais correntes $ICC(\text{média}) = \frac{ICCH + ICCL}{2}$

Produto Velocidade-Potência - Historicamente, as famílias de circuitos integrados têm como características marcantes a sua velocidade de operação e a potência consumida. Em geral, o projeto de tais circuitos busca um retardo de propagação baixo (alta velocidade de operação) e valores baixos de potência dissipada. Um meio comum de medir e comparar a performance global de uma família de circuitos integrados é através do produto velocidade-potência (speed-power), obtido através da multiplicação do retardo de propagação pela potência dissipada.

Exemplo: Suponha uma determinada família de circuitos integrados que tenha um retardo médio de propagação de 10 ns, e uma potência dissipada média de 5mW. O produto velocidade-potência é 50pJ. Fica claro que, quanto mais baixo for o valor deste produto, melhor será o desempenho global da família em questão.

Imunidade ao Ruído - Picos de corrente elétrica e campos magnéticos podem induzir tensões nas conexões existentes entre os circuitos lógicos. Tais sinais, indesejados e espúrios, são denominados ruídos. A imunidade ao ruído de um circuito lógico refere-se à capacidade deste circuito tolerar

tensões geradas por ruído em suas entradas, sem alterar o seu funcionamento. A quantidade medida de imunidade ao ruído é denominada margem de ruído. A margem de ruído para o nível alto, V_{NH} , é definida como $V_{NH} = V_{OH}(\text{mínimo}) - V_{IH}(\text{mínimo})$. A margem de ruído para o nível baixo, V_{NL} , é definida como $V_{NL} = V_{IL}(\text{máximo}) - V_{OL}(\text{máximo})$.

Obs: Estritamente falando, as margens de ruído definidas são chamadas de margens de ruído dc. Tal termo pode parecer não apropriado quando se trata de definir ruído, que geralmente é um sinal ac. Ocorre que, nos circuitos integrados atuais, em que a velocidade de operação é extremamente alta, um pulso de 1ms de duração é considerado longo e pode ser tratado como um pulso dc, levando-se em conta que o circuito responderá normalmente a tal pulso.

2.2.1 Níveis de Integração de Circuitos

Os cinco níveis de integração de circuitos são mostrados a seguir.

Nível de Integração	Número de Portas
Integração em Pequena Escala (SSI)	Menos de 12
Integração em Média Escala (MSI)	12 a 90
Integração em Grande Escala (LSI)	100 a 9.999
Integração em Muito Grande Escala (VLSI)	10.000 a 99.999
Integração Ultra Grande Escala (ULSI)	100.000 ou mais

2.3 Famílias TTL, MOS e CMOS

2.3.1 TTL - Transistor-Transistor Logic

Transistor-Transistor Logic (TTL) é uma classe de circuitos digitais construídos a partir de junções bipolares de transistores (BJT) e resistores. É uma família de circuito integrado (IC) usada em muitas aplicações como computadores, controles industriais, sintetizadores de música e instrumentos eletrônicos de teste e medidas.

Graças a esta família ser largamente usada, entradas e saídas de equipamentos eletrônicos podem ser chamadas de Entradas e Saídas "TTL", especificando assim compatibilidade com os níveis de voltagem usados.

Esta família é mais usada nas escalas de integração MSI e SSI.

História

TTL tornou-se popular entre os designers de sistemas eletrônicos em 1962, após a Texas Instruments introduzir a série de circuitos integrados 7400, que tinha uma grande quantidade de blocos de funções lógicas. A família Texas Instruments tornou-se um padrão industrial, mas os dispositivos TTL eram feitos pela Motorola, Signetics, SGS-Thomson, National Semiconductor e muitas outras companhias.

TTL tornou-se importante porque ela foi a primeira família de Circuitos Integrados de baixo custo, tornando possível o uso de técnicas digitais para se fazer o que era feito anteriormente através de métodos analógicos.

Características Padrão

TTL apresenta duas versões: 54 Especificações militares (-50°C a +125°C) e 74 Especificações comerciais (0°C a +75°C).

Retardo de propagação : 9ns

Consumo : 10mW

Subtipos

54/74 L - Baixa potência é caracterizada pela troca da velocidade de "switch" por uma significativa redução no consumo de energia (atualmente suplantado essencialmente pela família lógica CMOS).

Retardo de propagação : 9ns

Consumo : 10mW

54/74 H - Alta velocidade, os circuitos desta série, ao contrário da anterior, tem todos os resistores diminuídos. Como resultado, todas as constantes de tempo serão diminuídas (alta velocidade) às custas de um aumento de potência (consumo).

Retardo de propagação : 6ns

Consumo : 23mW

54/74 S - Schottky, que usa diodos de Schottky nas entradas das portas para prevenir uma possível "guarda" de cargas e aumentar a velocidade de "switch". Estas portas operam mais rapidamente, mas possuem uma maior dissipação de energia. A série Schottky evita a saturação clássica do transistor usando um diodo de junção de barreira Schottky (SBD) entre a base e o coletor, com tensão de corte de 0,25v. Quando o transistor entra em condução, parte da corrente é desviada pelo diodo SBD evitando a saturação e diminuindo, assim, os atrasos de propagação.

Retardo de propagação : 3ns

Consumo : 20mW

54/74 LS - Schottky de baixa potência usa altos valores de resistência assim como os TTL de baixa potência e os diodos de Schottky para permitir uma boa combinação entre velocidade e reduzido consumo de energia. Provavelmente o tipo de TTL mais comum dos que são usados como "cola lógica" em microcomputadores.

Retardo de propagação : 9,5ns

Consumo : 2mW

54/74 AS - Schottky avançada, esta série tem um conjunto de inovações no projeto com relação à série 54/74S, a mesma possui velocidade de operação e baixo consumo de potência. Outra vantagem é a necessidade de correntes de entrada (IIL, IIH) extremamente baixas o que resulta em "fan-outs" maiores.

Retardo de propagação : 1,7ns

Consumo : 8mW

54/74 ALS - Schottky avançada de baixa potência, apresenta uma sensível melhora com relação à 54/74LS. Esta série tem o mais baixo produto velocidade-potência de todas as series TTL. Pelo exposto, é de se esperar que em médio prazo os dispositivos 54/74 ALS serão os mais utilizados da família TTL.

Retardo de propagação : 4ns

Consumo : 1,2mW

LVTTL - TTL de baixa voltagem para alimentação de 3 volts e interfaceamento com memórias.

Outros

- Dispositivos resistentes à radioatividade para aplicações espaciais.
- Níveis especiais de qualidade e de alta confiabilidade são usados para fins militares e aplicações aeroespaciais.

Aplicações

Antes do advento dos dispositivos VLSI, circuitos integrados usando TTL eram um padrão nos métodos de construção de processadores dos mini-computadores e processadores "Mainframe"; como os Digital Equipment Corporation VAX e Data General Eclipse, e equipamentos como ferramentas de controle numérico, impressoras e terminais de vídeo.

No passo que os microprocessadores ficavam mais funcionais, dispositivos TTL passaram a ser importantes em aplicações de "cola lógica", como drivers de barramentos de alta velocidade em placas mãe, que agregam em blocos as funções realizadas que são realizadas em elementos VLSI.

Saídas

Saídas em Coletor Aberto Para permitir a configuração wired - AND (ligação E por fio), alguns circuitos TTL são projetados com saídas a coletor aberto.

No circuito a(!!REF!!) coletor aberto são eliminados Q3, D1, e R4 da saída toten - pole.

Ligação E por fio (wired AND) Para permitir a ligação E por fio, um resistor externo de pull up (R_p) deve ser conectado ao coletor de Q4, conforme a figura de modo que o nível lógico apropriado apareça na saída.

2.3.2 MOS - Metal-Oxide-Semiconductor

A tecnologia MOS tem seu nome extraído do fato de sua estrutura básica ser formada por um eletrodo de metal conectado a uma camada de oxido isolante, que por sua vez, é depositada sobre um substrato de silício.

Os transistores MOS são transistores por efeito de campo (field effect transistor) decorrente deste fato, são chamados de MOSFETs.

O MOSFET pode ser visto como uma chave eletrônica controlada pela tensão da porta. A tensão porta-fonte VGS e a tensão de entrada, que é usada para controlar a resistência entre o dreno e a fonte.

Quando $V_{GS} = 0$, a chave estará aberta.

A mesma estará fechada para $V_{GS} = 1,5$ Volts

Vantagens e Desvantagens dos MOSFETs sobre a tecnologia Bipolar

Vantagens

- Construção relativamente simples.
- Custo de fabricação baixo.
- Área utilizada no CI muito pequena (50 vezes menor que Bipolar).
- Consumo de potência muito pequeno.
- Alta densidade de integração propicia construção de circuitos LSI e VLSI.

Desvantagens

- Baixa velocidade em relação à tecnologia Bipolar.
- Sensibilidade à eletricidade estática.

2.3.3 CMOS - Complementary-symmetry/Metal-Oxide Semiconductor

Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor (CMOS) é uma das principais classes de circuitos integrados. Chips CMOS incluem microprocessadores, microcontroladores, RAM estática e outros circuitos lógicos digitais.

A família lógica MOS complementar ou CMOS utiliza tanto FETs de canal-N quanto canal-P no mesmo circuito aproveitando as vantagens de cada um deles. São circuitos extremamente complexos comparados com outras famílias MOS, mas compensam pela alta velocidade e menor consumo. Encontra-se em CIs com escala de integração LSI e MSI, muitas vezes superando a lógica TTL.

A impedância de entrada destes circuitos, é extremamente elevada, podendo ser da ordem de 10 GO em paralelo com 5pF.

Duas importantes características dos dispositivos CMOS são grande tolerância a ruídos e baixo consumo de energia. Uma quantidade significativa de energia é gasta apenas quando seu transistor está trocando entre os estados Alto e Baixo (On / Off); conseqüentemente os dispositivos CMOS não produzem tanto calor comparado a outras famílias lógicas como, por exemplo, a TTL. CMOS também permite uma grande densidade de funções lógicas em um chip graças a suas dimensões reduzidas.

Um Chip com um grande número de transistores CMOS é algumas vezes conhecido como CHMOS ("Complementary High-density metal-oxide-semiconductor").

A combinação de sensores MEMS com processadores de sinais digitais é também conhecida como CMOSens.

História

Os Circuitos CMOS foram inventados em 1963 por Frank Wanlass na Fairchild Semiconductor. O primeiro circuito integrado CMOS foi feito pela RCA em 1968 por um grupo liderado por Albert Medwin. Originalmente uma alternativa de baixa potência mas de velocidade inferior se comparado ao TTL, CMOS foi logo adotado na indústria de relógios e em outras áreas onde a duração de baterias era mais importante do que a velocidade.

Vinte anos depois, CMOS tornou-se a tecnologia predominante em circuitos integrados digitais. Isto se deve essencialmente a características como a área que ocupa, velocidade de operação, eficiência energética e custos de fabricação. Somado a isso, comparativamente, a simplicidade e baixa dissipação de energia dos circuitos CMOS permitiram integrações que antes não era possíveis com transistores de junção bipolar.

O padrão lógico discreto CMOS esteve originalmente disponível apenas na série 4000 de circuitos lógicos integrados. Mais tarde muitas funções da série 7400 começaram a ser fabricadas utilizando CMOS, NMOS, BiCMOS e outras variantes.

Séries CMOS

4000/14000 - Foram introduzidas pela Motorola e RCA, respectivamente e foram as primeiras series da família CMOS.

A primeira linha foi lançada com o nome 4000-A, imediatamente foi disponibilizada a linha 4000-B, que apresentava maior capacidade de corrente de saída.

Tensão de alimentação : 3 a 15V

Margem de ruído : 1,5V (VDD = 5V)

Fan-out : ≈ 50

Consumo de potência : Varia em função da frequência de trabalho.

Velocidade de comutação : 50ns

74C - Esta série CMOS é compatível, pino por pino e função por função com os dispositivos TTL da mesma numeração. Isto possibilita a substituição de alguns circuitos TTL pelo seu equivalente CMOS.

Tensão de alimentação : 3 a 15V

Margem de ruído : 1,5V (VDD = 5V)

Fan-out : ≈ 50

Consumo de potência : Varia em função da frequência de trabalho.

Velocidade de comutação : 50ns

74HC - É uma versão melhorada da série 74C, tendo uma velocidade 10 vezes superior e sendo compatível em velocidade com os dispositivos TTL-LS. Outra melhoria nesta série é sua capacidade de fornecer altas correntes de saída.

Tensão de alimentação : 2 a 6V

Margem de ruído : 6,9V (VDD = 5V)

Fan-out : ≈ 50

Consumo de potência : Varia em função da frequência de trabalho.

Velocidade de comutação : 8ns

74HCT - Esta também é uma série de alta velocidade. A principal diferença entre esta e 74HC é que foi desenvolvida para ser compatível em termos de tensões com dispositivos da família TTL.

Tensão de alimentação : 2 a 6V

Margem de ruído : 0,7V (VDD = 5V)

Fan-out : ≈ 50

Consumo de potência : Varia em função da frequência de trabalho.

Velocidade de comutação : 8ns

Referências Bibliográficas

- [1] TOCCI, Ronald J., WIDMER, Neal S. **Digital Systems, Principles and Applications**. Prentice Hall, Sétima Edição, 1998.
- [2] Wikipedia, the free encyclopedia. **Transistor-Transistor Logic**. Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor-transistor_logic (*Verificado em 11/08/2006*)
- [3] Wikipedia, the free encyclopedia. **MOSFET**. Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_Oxide_Semiconductor (*Verificado em 11/08/2006*)
- [4] Wikipedia, the free encyclopedia. **CMOS**. Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/CMOS> (*Verificado em 11/08/2006*)
- [5] SAVI, Hanilson. **Livro texto de Sistemas Digitais**
- [6] Wikipedia, the free encyclopedia. **Computer Memory**. [http://en.wikipedia.org/wiki/Memory_\(computers\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Memory_(computers)) (*Verificado em 11/08/2006*)
- [7] Answers.com, the world's greatest encyclopedictionalmanacapedia. **Static RAM**. <http://www.answers.com/main/ntquery?s=static+RAM&gwp=13> (*Verificado em 11/08/2006*)