


Arquitetura de Sistemas Embarcados


Edna Barros (ensb@cin.ufpe.br)

 Centro de Informática - UFPE

Capítulo 5: Memória

Roteiro

- Habilidade de escrita em memória e permanência da informação
- Tipos comuns de memórias
- Compondo memórias
- Hierarquia de Memória e Memória Cache
- RAM Avançadas

 Engenharia de Sistemas Embarcados 3

Introdução

- Aspectos funcionais de sistemas embarcados
 - Processamento
 - Processadores
 - Transformação nos dados
 - Armazenamento
 - Memória
 - Retenção dos dados
 - Comunicação
 - Barramentos
 - Transferência de dados

Engenharia de Sistemas Embarcados 4

Memória: Conceitos Básicos

- Armazena grande número de bits
 - $m \times n$: m palavras de n bits cada
 - $k = \log_2(m)$ sinais de endereço
 - ou $m = 2^k$ palavras
 - ex., Memória 4,096 x 8 :
 - 32,768 bits
 - 12 sinais de endereços
 - 8 sinais de dados (input/output)
- Acessos a Memória
 - r/w: seleciona leitura ou escrita
 - enable: sinal que permite leitura ou escrita
 - multiporta: acessos múltiplos a diferentes endereços simultaneamente

Engenharia de Sistemas Embarcados 5

Habilidade de Escrita/Permanência da Informação

- Diferenças tradicionais entre ROM/RAM:
 - ROM
 - Somente leitura, bits
 - Permanência da informação na falta de potência
 - RAM
 - Leitura e escrita,
 - Perda de informação na falta de potência
- Evolução tecnológica
 - Tecnologia de escrita em ROM's
 - e.g., EEPROM
 - Tecnologia permite permanência de informação em RAMs
 - e.g., NVRAM
- Habilidade de Escrita
 - Maneira e velocidade que a memória pode ser escrita
- Permanência da Informação
 - Habilidade da memória manter a informação após bits terem sido escritos

Write ability and storage permanence of memories, showing relative degrees along each axis (not to scale).

Engenharia de Sistemas Embarcados 6

Habilidade de Escrita

- Limites da habilidade de escrita
 - High end
 - Processador escreve na memória de forma simples e rápida
 - ex. RAM
 - Middle range
 - processador escreve na memória mas de forma lenta
 - ex. FLASH, EEPROM
 - Lower range
 - Equipamento especial "gravador" deve ser usado durante escrita
 - ex. EPROM, OTP ROM
 - Low end
 - Bits são armazenados durante gravação
 - Ex. ROM programável por máscaras
- Memória interna (In-system programmable memory)
 - Pode ser escrita pelo processador
 - Habilidade de escrita entre high end e middle end

UFPA Universidade Federal do Pará Sistemas Embarcados 7

Permanência de Armazenamento

- Limites da Permanência de Armazenamento
 - High end
 - Informação nunca é perdida
 - Ex. ROM
 - Middle range
 - Armazena informação durante dias, meses ou anos após desligamento da fonte de energia
 - Ex. NVRAM
 - Lower range
 - Armazena informação enquanto energia permanece ligada
 - Ex. SRAM
 - Low end
 - Inicia perda de informação logo após a escrita
 - Ex. DRAM
- Memória não volátil
 - Armazena informação sem fornecimento de energia

UFPA Universidade Federal do Pará Engenharia de Sistemas Embarcados 8

ROM: Memória "Read-Only"

- Memória não-volátil
- Pode ser lida porém não pode ser escrita pelo processador
- Programada antes de ser inserida no sistema embutido
- Usos:
 - Armazena software para processador de propósito geral
 - Instruções do programa podem ser palavras da ROM
 - Armazena dados a serem usados pelo sistema
 - Implementa Circuito combinacional

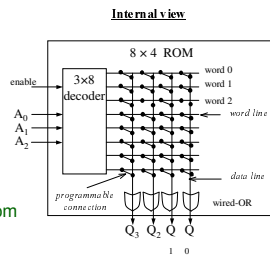
External view

```
graph LR
    enable --> ROM[2^k x n ROM]
    A0[A_0] --> ROM
    A1[A_1] --> ROM
    A_k_1[A_{k-1}] --> ROM
    ROM --> Q_k_1[Q_{k-1}]
    ROM --> Q_k_2[...]
    ROM --> Q_0[Q_0]
```

UFPA Universidade Federal do Pará Engenharia de Sistemas Embarcados 9

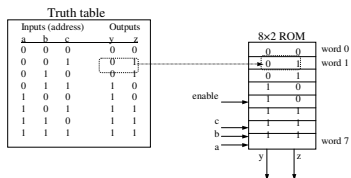
Example: 8 x 4 ROM

- Linhas horizontais = palavras
- Linhas Verticais = dados
- Decodificador seta 2a. Linha se endereço = 010
- Linhas de Dados Q₃ e Q₁ são setadas (conexão programada com palavra na 2a. Linha)
- Palavra 2 não está conectada com linhas de dados Q₂ e Q₀
- Saída é 1010



Implementando a Função Combinacional

- Qualquer circuito combinacional de n funções das mesmas k variáveis pode ser feito com uma ROM $2^k \times n$



ROM Programável por Máscara

- Conexões programadas durante fabricação
- Pouquíssima habilidade de escrita
 - Somente uma vez
- Permanência do Armazenamento
 - bits nunca mudam (exceto devido a falhas)
- Usada tipicamente no projeto final de sistemas com alto volume de produção



OTP ROM: One-time programmable ROM

- Conexões programadas após manufatura pelo usuário
 - Usuário fornece arquivo de conteúdo da ROM
 - Uso de gravador
 - Cada conexão programável é um fusível
 - Gravador queima fusíveis quando a conexão não existe
- Pouca habilidade de escrita
 - Necessita de gravador
- Alta permanência de armazenamento
- Comumente usada em produtos finais
 - Barata, difícil de ser modificada involuntariamente

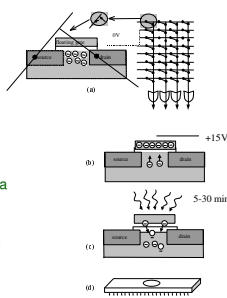


Engenharia de Sistemas Embarcados 13

EPROM: Erasable programmable ROM

• Componente Programável é um transistor MOS

- Transistor tem "floating" gate
- (a) Carga Negativa forma canal entre source e drain armazenando valor lógico 1
- (b) Grande tensão positiva causa cargas negativas se moverem para fora do canal armazenando o valor lógico 0
- (c) (Apagamento) Aplicando raios ultra-violeta na superfície causa o retorno das cargas negativas restaurando o nível lógico 1
- (d) Uma EPROM possui janela de quartzo para permitir a aplicação da luz

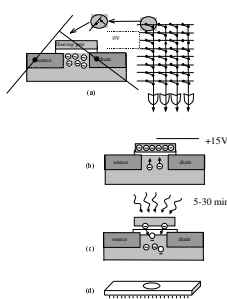


Engenharia de Sistemas Embarcados 14

EPROM: Erasable programmable ROM

• Melhor habilidade de escrita

- Pode ser apagada e reprogramada milhares de vezes
- **Permanencia de Armazenamento Reduzida**
 - Informação permanece por cerca de 10 anos mas é sensível a radiação ou ruído elétrico
- **Usada durante desenvolvimento**



Engenharia de Sistemas Embarcados 15

EEPROM: Electrically erasable programmable ROM

- Programada e apagada eletronicamente
 - Tipicamente usada com tensão maior que normal
 - Pode-se programar e apagar palavras individuais
- Melhor habilidade de escrita
 - Pode ser programada internamente a partir de circuito que forneça tensão maior que normal
 - Escrita bastante lenta (devido apagamento e escrita)
 - Pino "busy" pin indica ao processador que a memória ainda escreve.
 - Pode ser apagada e programada várias vezes
- Permanência similar a EPROM (cerca de 10 anos)
- Mais conveniente que EPROMs porém mais cara



Engenharia de Sistemas Embarcados 16

Memória Flash

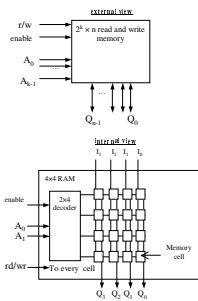
- Melhoramento da EEPROM
 - Mesmo principio
 - Mesma habilidade de escrita e permanência do armazenamento
- Apagamento mais rápido
 - Grandes blocos são apagados de uma vez (em vez de uma palavra)
 - Blocos possuem milhares de bytes
- Escrita de palavras simples pode ser bastante lento
 - O bloco completo deve ser lido, atualizado e o bloco completo de ser escrito antes
- Usado em sistemas embutidos para armazenar grande quantidade de informações
 - Ex. Camara digital, TV set-top boxes, telefones celulares



Engenharia de Sistemas Embarcados 17

RAM: "Random-access" memory

- Memória tipicamente volátil
- Leitura e Escrita facilitada durante s execução do sistema
- Estrutura Interna mais complexa que a ROM
 - Uma palavra consiste de várias células, cada uma armazenando 1 bit
 - Cada linha de entrada e saída conectam com as linhas de dados de entrada e saída
 - rd/wr conectado a cada célula
 - Quando uma linha é liberada pelo decodificador, cada célula tem uma lógica que armazena informação no caso de escrita ou disponibiliza informação no caso de leitura



Engenharia de Sistemas Embarcados 18

Tipos Básicos de Memória RAM

- SRAM: Static RAM
 - Célula de Memória usa flip-flop para armazenar bits
 - Requer 6 transistores
 - Armazena informação enquanto existe potência
- DRAM: Dynamic RAM
 - Célula de Memória usa transistor MOS e capacitor para armazenar um bit
 - Mais compacta que a SRAM
 - Necessidade de "Refresh"
 - Taxa de refresh: 15.625 microsec.
 - Acesso mais lento que SRAM

memory cell internals

Engenharia de Sistemas Embarcados 19

Variações de Ram

- PSRAM: Pseudo-static RAM
 - DRAM com controlador de refresh embutido
 - Alternativa popular e de baixo custo para a SRAM
- NVRAM: Nonvolatile RAM
 - Mantem informação após remoção da fonte
 - RAM com Bateria
 - SRAM com sua própria bateria conectada permanente
 - Escritas tão rápidas quanto leituras
 - Não limita número de escritas
 - SRAM com EEPROM ou flash
 - Cópia de RAM em EEPROM ou flash antes de desligamento da fonte de energia

Engenharia de Sistemas Embarcados 20

Exemple: HM6264 & 27C256 RAM/ROM

- Dispositivos de baixo custo e baixa capacidade
- Usada em microcontroladores de 8-bits
- Primeiros dois dígitos indicam tipo:
 - RAM: 62
 - ROM: 27
- Dígitos subsequentes indicam capacidade em kilobits

| Device | Access Time (ns) | Standby Power (mW) | Active Power (mW) | Vcc Voltage (V) |
|--------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| HM6264 | 85-100 | 40 | 15 | 5 |
| 27C256 | 90 | 5 | 100 | 5 |

Engenharia de Sistemas Embarcados 21

Exemplo: TC55V2325FF-100

- Memória SRAM de 2-megabit, síncrona, com pipeline e burst
- Projetada para uso com processadores de 32 bits
- Capaz de leituras e escritas sequenciais rápidas

Block diagram: TC55V2325FF P=100

Timing diagram: Shows signals CLK, /A[15:0], /OE, /ADV, /A[15:0], /WE, /A[15:0], /CS1, /CS2, /CS1 and /CS2, /CS1, and data[31:0].

A single read operation: Shows the sequence of signals for a read cycle.

Engenharia de Sistemas Embarcados 22

Composição de Memória

- Tamanho da memória necessário difere do tamanho das memórias disponíveis
- Quando a memória disponível é maior: ignore bits do endereço não usados
- Quando a memória disponível for menor: composição de memórias menores
 - Conexão lado a lado para aumentar palavra
 - Conexão topo com início para aumentar número de palavras

Increase width of words: Shows three $2^m \times n$ ROMs connected side-by-side to form a $2^m \times 3n$ ROM.

Increase number of words: Shows a $2^{m+1} \times n$ ROM formed by connecting two $2^m \times n$ ROMs in a top-to-bottom configuration.

Engenharia de Sistemas Embarcados 23

Hierarquia de Memória

- Desejado: memória barata e rápida
- Memória principal:
 - Grande, barata e lenta
- Cache
 - Pequena, caras e rápidas armazena cópia de partes acessadas da memória principal
 - Pode haver múltiplos níveis de cache

Processor
↓
Registers
↓
Cache
↓
Main memory
↓
Disk
↓
Tape

Engenharia de Sistemas Embarcados 24

Cache

- Usualmente feita com SRAM
 - Rápida porém mais cara que DRAM
- Usualmente no mesmo do processador
 - Espaço limitado,
 - Acesso rápido (1 ciclo apenas)
- Operação da Cache :
 - Requisita acesso a memória principal
 - Verifique se cópia está na cache
 - cache hit
 - Cópia está na cache
 - cache miss
 - Cópia não está na cache, leitura de várias palavras de cache
- Escolhas no Projeto da Cache
 - Mapeamento, políticas de substituição e técnicas de escrita

Engenharia de Sistemas Embarcados 25

Mapeamento de Cache

- Poucos endereços podem estar na cache
- Está o conteúdo de um endereço na cache?
- Mapeamento de Cache usado para atribuir endereço de memória a endereço de cache causando um hit ou um miss
- Tres técnicas básicas:
 - Mapeamento direto
 - Mapeamento Completamente Associativo
 - Associativa por conjunto
- Caches são particionadas em blocos indivisíveis ou linhas de endereços de memória adjacentes
 - Usualmente 4 ou 8 endereços por linha

Engenharia de Sistemas Embarcados 26

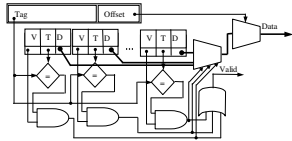
Mapeamento Direto

- Endereço é dividido em dois campos:
 - Índice
 - Endereço da cache
 - Número de bits determinado pelo tamanho da cache
 - Tag
 - É comparado com o tag armazenado na cache
- Bit Válido
 - Indica se o dado no slot é valor válido lido da memória
- Offset
 - Usado para encontrar determinada palavra na linha de cache

Engenharia de Sistemas Embarcados 27

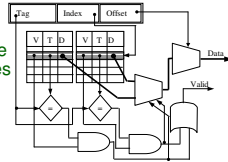
Mapeamento Completamente Associativo

- Endereço de memória completo está armazenado em cada endereço de cache
- Todos os endereços são comparados simultaneamente com o endereço desejado
- Comparação simultânea entre endereços da cache e endereço procurado
- Bit de Validade



Mapeamento Set-associativo

- Compromisso entre mapeamento direto e mapeamento completamente associativo
- Índice igual a mapeamento direto
- MAS cada endereço contém tags e conteúdo de 2 ou mais localizações de memória
- Tags de um mesmo conjunto são comparados simultaneamente
- Cache com tamanho chamada N-way set-associative
 - 2-way, 4-way, 8-ways são comuns



Política de Substituição de Cache

- Qual bloco deverá ser substituído?
 - Quando uma cache completamente associativa está cheia
 - Quando a linha de cache associativa por conjunto está cheia
- Técnicas
 - Randomica
 - LRU: least-recently used
 - Substitua bloco não acessado por mais tempo
 - FIFO: first-in-first-out
 - Empilhe bloco quando acessado
 - Substitua bloco do topo da pilha

Técnicas de Escrita em Cache

- Como manter a consistência entre endereços na cache e na memória?
 - Write-through
 - Atualiza memória sempre que cache é escrita
 - Fácil de implementar
 - Processador deve esperar pela atualização da memória
 - Escritas não necessárias
 - Write-back
 - Memória é atualizada quando bloco é substituído
 - Bit extra "dirty" indica escrita em cache
 - Número de acessos a memória é reduzido



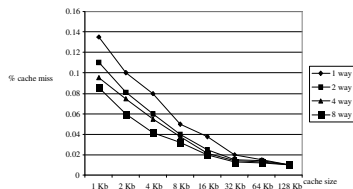
Impacto da Cache no Desempenho do Sistema

- Principais parametros
 - Tamanho total da cache
 - Número total de bytes de dado da cache
 - Tags, bits de validade e outros bits de controle
 - Grau de Associatividade
 - Tamanho do Bloco
- Caches maiores permitem taxas de faltas menores mas a custo maior
 - Cache de 2 Kbyte: miss rate = 15%, custo de hit = 2 ciclos, custo de miss = 20 ciclos
 - Custo médio de acesso a memória = $(0.85 * 2) + (0.15 * 20) = 4.7$ ciclos
 - Cache de 4 Kbyte: miss rate = 6.5%, custo de hit = 3 ciclos, custo de miss: mesmo
 - Custo médio de acesso a memória = $(0.935 * 3) + (0.065 * 20) = 4.105$ ciclos
(melhora)
 - Cache de 8 Kbyte: miss rate = 5.565%, custo de hit = 4 ciclos, custo de miss: mesmo
 - Custo médio de acesso a memória = $(0.94435 * 4) + (0.05565 * 20) = 4.8904$ ciclos
(piora)



Melhorando o Desempenho da Cache

- Melhorando a taxa de hits sem aumentar tamanho da cache
 - Aumento de bloco
 - Aumento da Associatividade



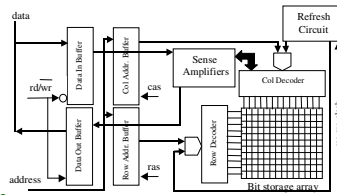
RAM Avançada

- DRAMs são usadas como memória principal em sistemas embarcados baseados em microprocessadores
 - Grande capacidade de armazenamento e baixo custo
- Variações de DRAMs
 - Necessidade de acompanhar velocidade do processador
 - FPM DRAM: fast page mode DRAM
 - EDO DRAM: extended data out DRAM
 - SDRAM/ESDRAM: synchronous and enhanced synchronous DRAM
 - RDRAM: rambus DRAM



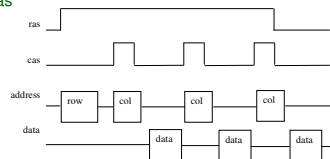
Basic DRAM

- Barramento de endereço multiplexado para acessar linha e coluna
- Endereços de linha e coluna são armazenados através da ativação dos sinais *ras* e *cas*
- Circuito de refresh pode ser interno ou externo
 - Ativar endereços consecutivos ativa processo de refresh
 - Circuito de refresh desativado durante operação de leitura ou escrita



Fast Page Mode DRAM (FPM DRAM)

- Cada linha de memória é vista como página
- Página contém múltiplas palavras
- Palavras individuais endereçadas pelo endereço da coluna
- Diagrama temporal
 - Envia endereço da linha (página)
 - Leitura de 3 palavras consecutivas pelo envio de endereços das colunas



Extended data out DRAM (EDO DRAM)

- Versão melhorada da FPM DRAM
- Latch extra antes de buffer de saída
 - Permite ativação do *cas* antes de completar operação de leitura
- Reduz latência de leitura/escrita devido a ciclos adicionais

Engenharia de Sistemas Embarcados 37

(S)ynchronous and Enhanced Synchronous (ES) DRAM

- SDRAM armazena dado a cada transição de clock
- Elimina tempo para detectar sinais *ras/cas* e *rd/wr*
- Um contador inicializado com endereço da coluna é incrementado a cada transição de clock para acessar endereços consecutivos
- ESDRAM = versão melhorada da SDRAM
 - Buffers foram adicionados para sobreposição de endereçamento de colunas
 - Clock mais rápido e menor latência de leitura/escrita

Engenharia de Sistemas Embarcados 38

Problemas de Integração das DRAMs

- SRAM facilmente integrável no mesmo chip do processador
- DRAM integração mais difícil
 - Diferença no processo de integração entre DRAM e lógica convencional
 - Objetivos da lógica convencional:
 - Minimizar capacitância para reduzir retardo e consumo de potência
 - Objetivos dos projetistas de DRAMs:
 - Criar capacitores para reter informação armazenada

Engenharia de Sistemas Embarcados 39

Memory Management Unit (MMU)

- Papel da MMU
 - Trata DRAM refresh, interface com barramento e arbitragem
 - Cuida do compartilhamento de memória entre vários processadores
 - Traduz endereços virtuais (do processador) para endereços físicos da DRAM
- CPUs modernas possuem MMU interno