



La struttura delle memorie

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
alberto.borghese@unimi.it

Università degli Studi di Milano

Riferimento Patterson v.5: 2.11 – 5.2, 5.5, 5.12, B8, B9.



Sommario

SRAM.

DRAM.

Codici di errore



Memoria Principale



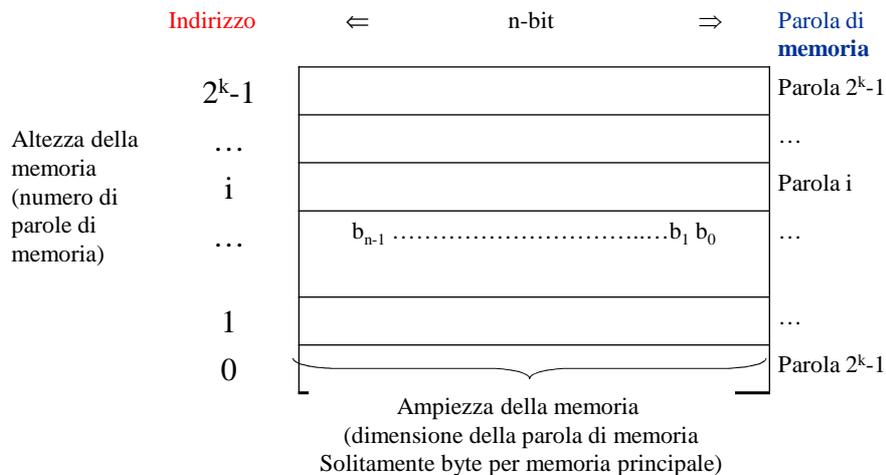
- Le memorie in cui ogni locazione può essere raggiunta in un breve e prefissato intervallo di tempo misurato a partire dall'istante in cui si specifica l'indirizzo desiderato, vengono chiamate memorie ad accesso casuale (*Random Access Memory – RAM*)
- Nelle RAM il *tempo di accesso alla memoria* (tempo necessario per accedere ad una parola di memoria) è *fisso e indipendente* dalla posizione della parola alla quale si vuole accedere.
- Il contenuto delle locazioni di memoria può rappresentare sia istruzioni che dati, sui quali l'architettura sta lavorando.
- La memoria può essere vista come un array monodimensionale.



La memoria



- La memoria è vista come un unico grande array uni-dimensionale.
- Un **indirizzo di memoria** costituisce un **indice** all'interno dell'array.





Indirizzi nella memoria principale



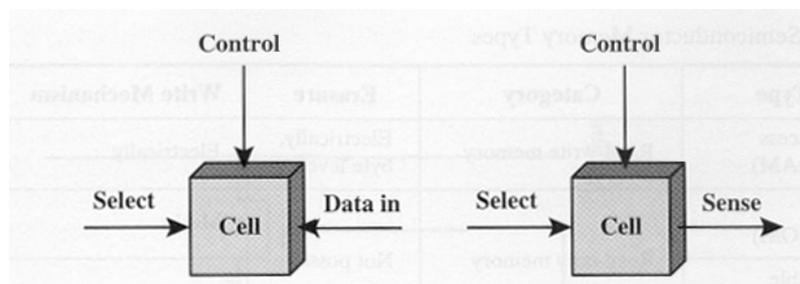
- La memoria è organizzata in *parole* composte da n -bit che possono essere indirizzati separatamente.
- Ogni **parola** di memoria è associata ad un **indirizzo** composto da k -bit.
- I 2^k indirizzi costituiscono lo *spazio di indirizzamento* del calcolatore. Ad esempio un indirizzo composto da 32-bit genera uno spazio di indirizzamento di 2^{32} o 4Gbyte.
- Ottimizzazione della struttura
 - Tecnologia three-state
 - Struttura a matrice



Cella di memoria



La memoria è suddivisa in celle, ciascuna delle quali assume un valore binario stabile.
Si può scrivere il valore 0/1 in una cella.
Si può leggere il valore di ciascuna cella.

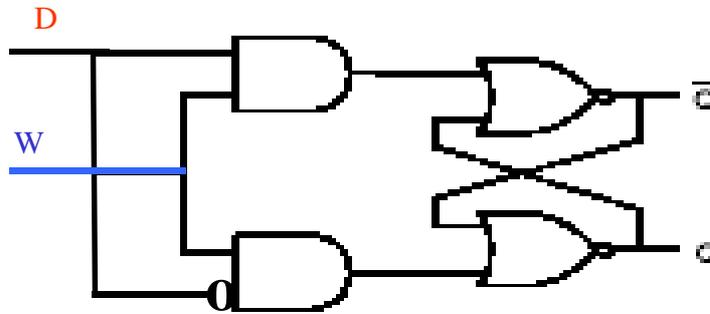


Quale struttura di memoria abbiamo già incontrato?

Control (lettura – abilitazione; scrittura)
Select (cf. dataport)
Data in & Sense (Data in & Data out).



Cella SRAM



Selezione (porta di lettura e porta di scrittura)
 Lettura - sempre disponibile in uscita
 Scrittura - segnale esplicito (in AND con il clock in caso di cella sincrona).



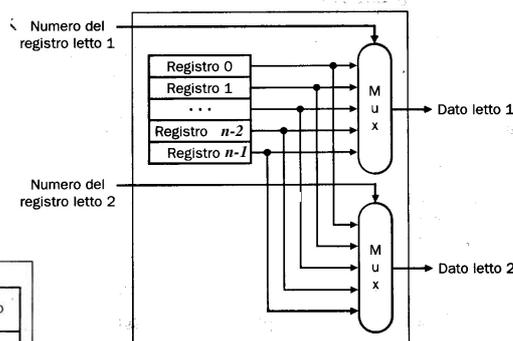
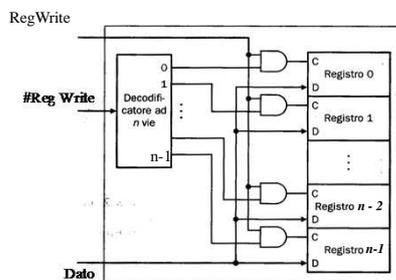
Register file



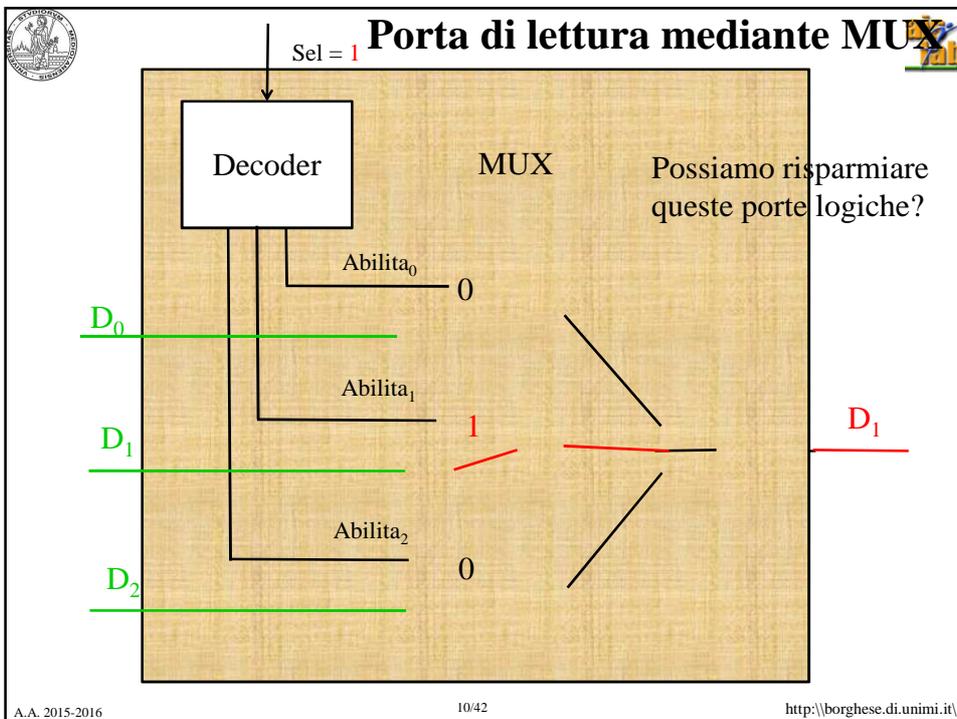
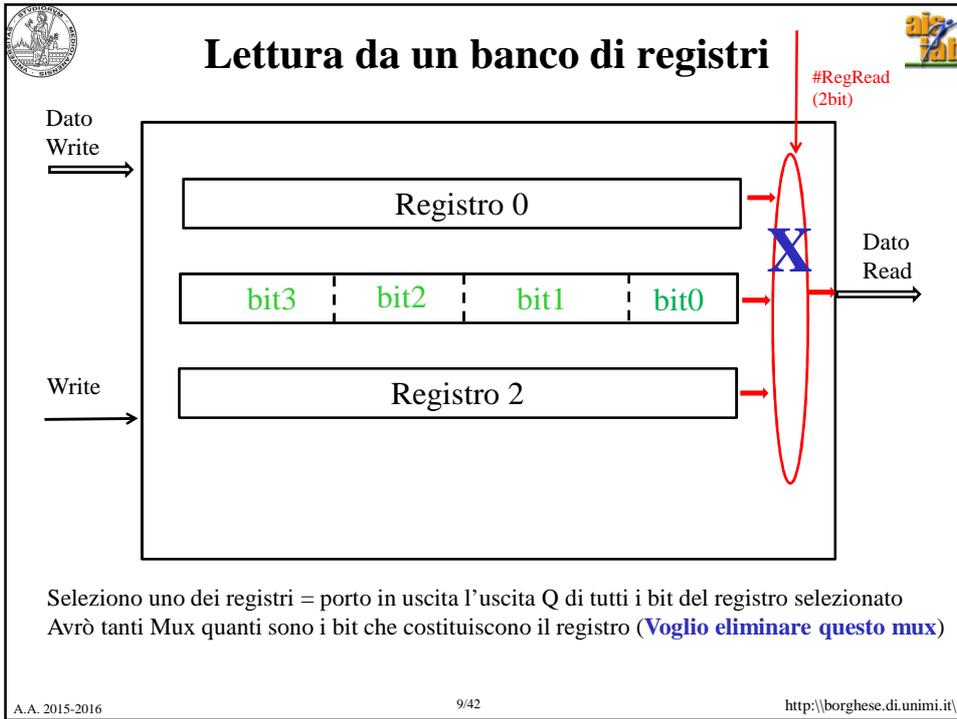
Il tempo di lettura dipende dal cammino critico dei Mux.

Il tempo di scrittura dipende dal cammino critico del Decoder.

Numero_registro = selettore.

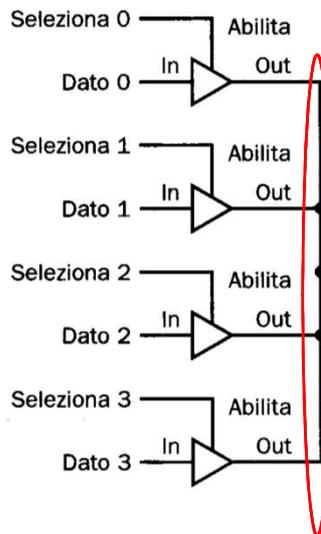


Selezione - #registro
 Lettura - sempre disponibile in uscita (dopo tempo di commutazione del MUX)
 Scrittura - segnale esplicito (in AND con il clock in caso di cella sincrona).



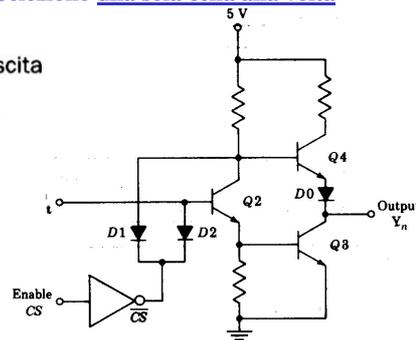


Memoria three-state (soluzione HW)

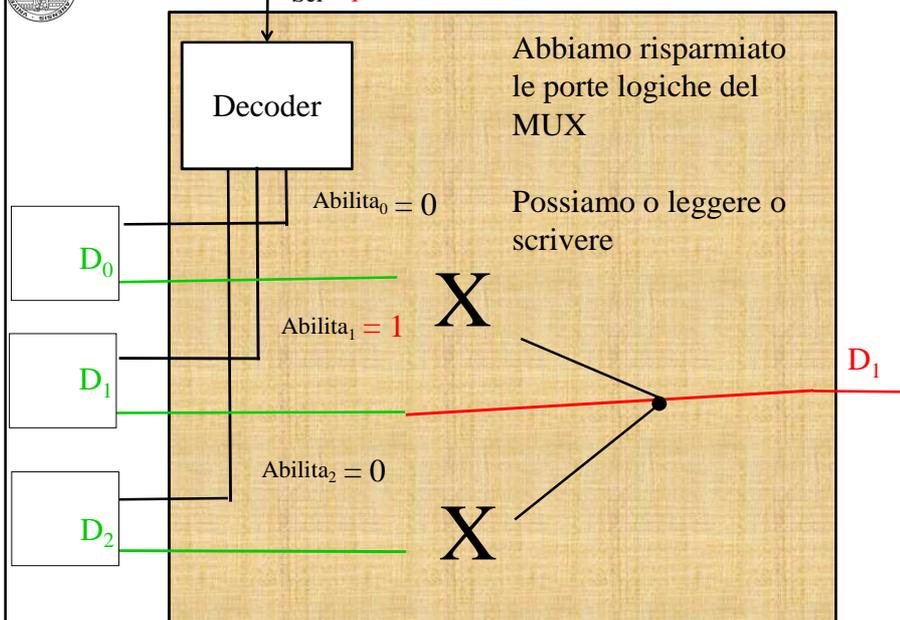


Tutte le uscite delle celle sono collegate ad un'uscita comune => E' necessario evitare conflitti fra le uscite.

Stadio di uscita "isolata" con porte di uscita *three-state*
 Seleziono una sola cella alla volta



Porta di lettura three state



Abbiamo risparmiato le porte logiche del MUX

Possiamo o leggere o scrivere

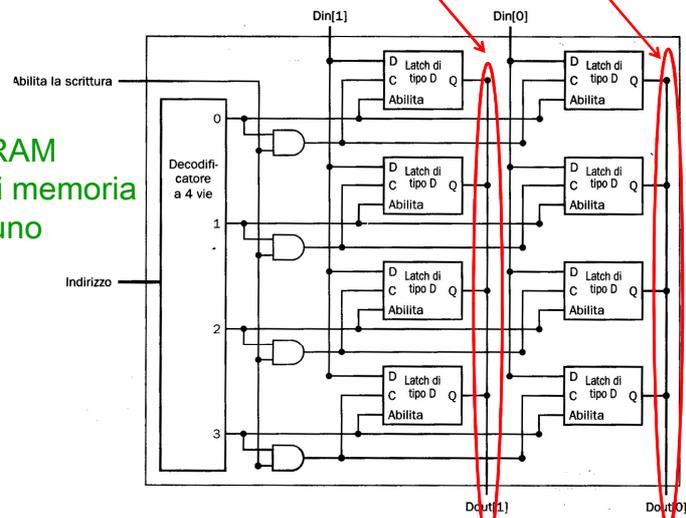


Esempio di SRAM

Risparmio il Mux di uscita



Esempio: SRAM
4 elementi di memoria
x 2 bit ciascuno



Problemi con il crescere del numero di linee. Esempio: SRAM $2M \times 16$ ($2M$ elementi x 16 bit)
Decodificatore a 21 ($\log_2 2M$) bit. 16 uscite. $2M$ linee di abilitazione e di selezione (ingresso C) dei bistabili.



Migliore strutturazione



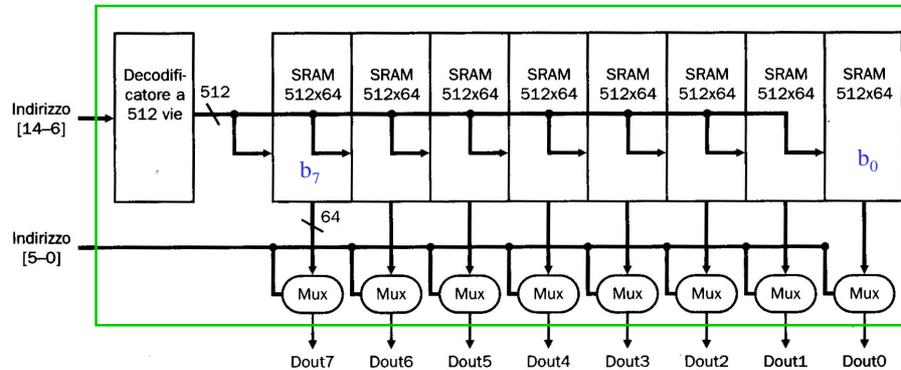
- C'è un limite elettrico al numero di linee che si possono collegare assieme.
- È più conveniente separare la lettura delle linee dalla lettura delle colonne (estrazione di una linea «lunga» dalla memoria).



Indirizzamento SRAM a matrice



Esempio: SRAM 32K x 8 bit. Trasformo 32K linee in una matrice: 512 linee x 64 elementi.
Ciascun elemento della matrice contiene 8 bit.



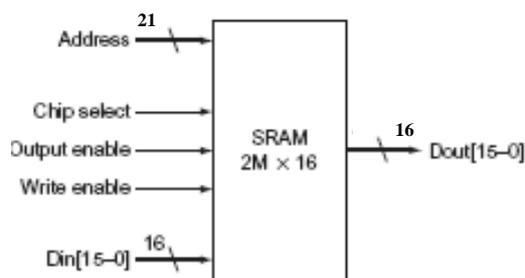
Il decodificatore sarà a 9 bit ($\log_2 512$) per selezionare una delle 512 linee (cf. cache). Ciascuna linea fornisce 64 bit. Ne seleziono uno con il Mux (controllato dai 6 bit meno significativi).

Nell'approccio non a matrice avrei avuto bisogno di un decodificatore a 15 bit ($\log_2 32K$). Qual è il vantaggio?

Quale gruppo di 64 bit associati al b_j bit della parola su 8 bit leggo dalle SRAM?



Chip di SRAM (2M x 16)



Tempo di accesso:
da Address a Dout.

Selezione – indirizzo + Chip select.
Scrittura – Write enable.
Lettura – Output enable.

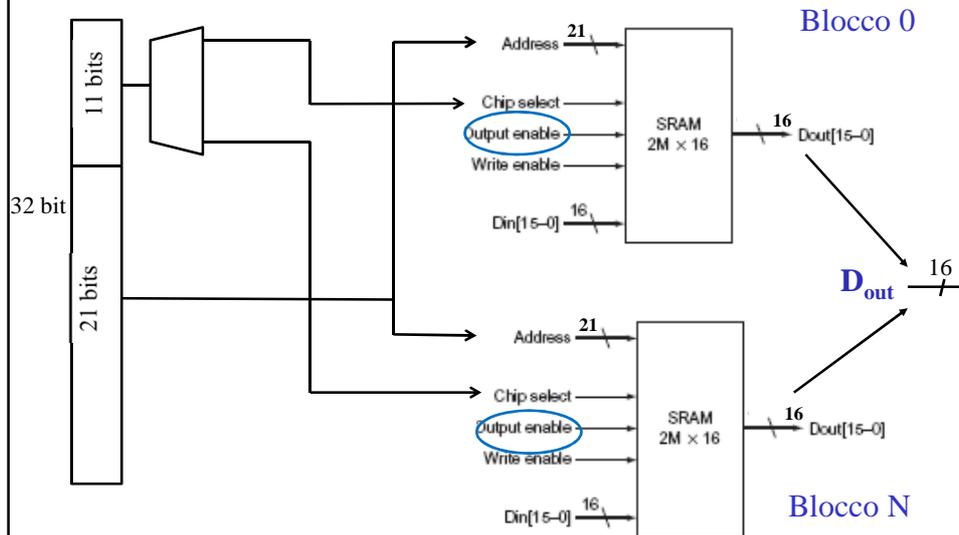
E' una memoria veloce, ma costosa.



Memoria RAM come insieme di chip



Capacità totale = $2M * N$ Byte



Questi chip “tappezzano” la struttura logica della memoria



Sommario



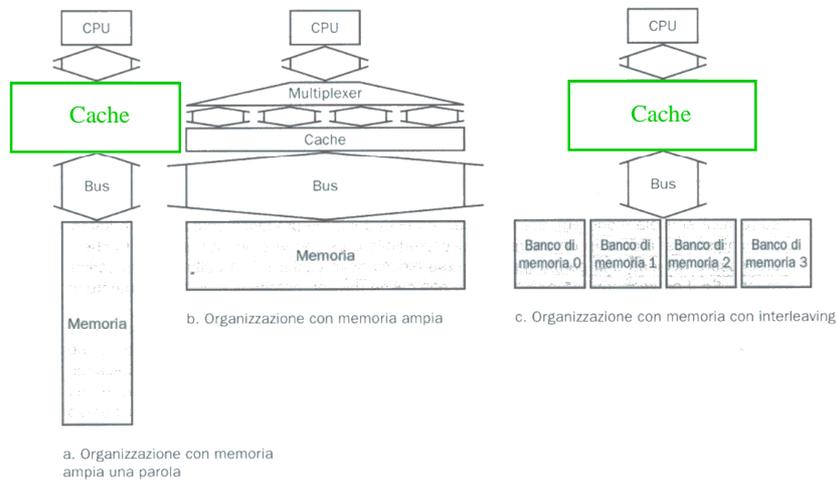
SRAM

DRAM

Codici di errore



Riduzione del miss penalty

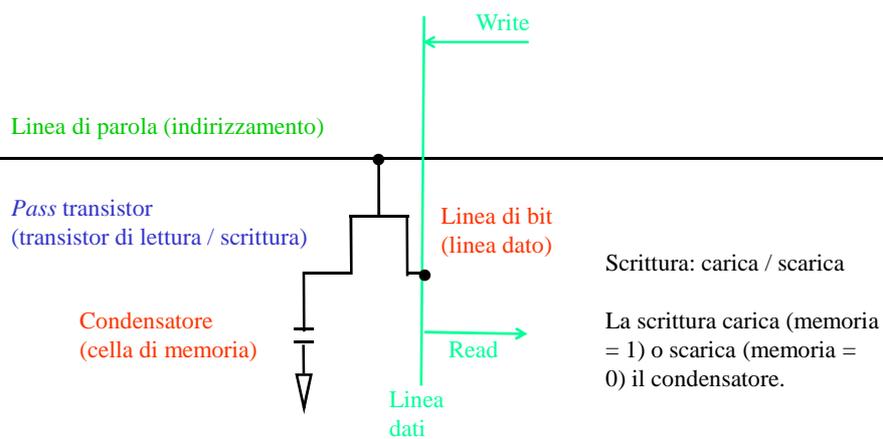


Interleaving (interallacciamento). Banche che potrebbero essere trasferiti in parallelo alla cache.



Memorie DRAM - scrittura

Dynamic RAM. Condensatore che viene caricato. \forall bit (1 condensatore contro 4-6 SRAM).



1 Pass transistor + 1 condensatore.



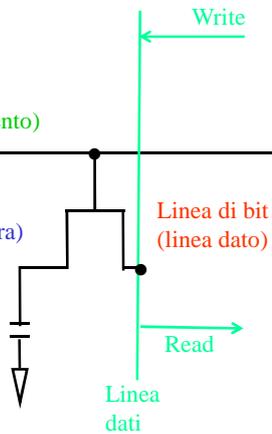
Memorie DRAM - lettura



Linea di parola (indirizzamento)

Pass transistor
(transistor di lettura / scrittura)

Condensatore
(cella di memoria)

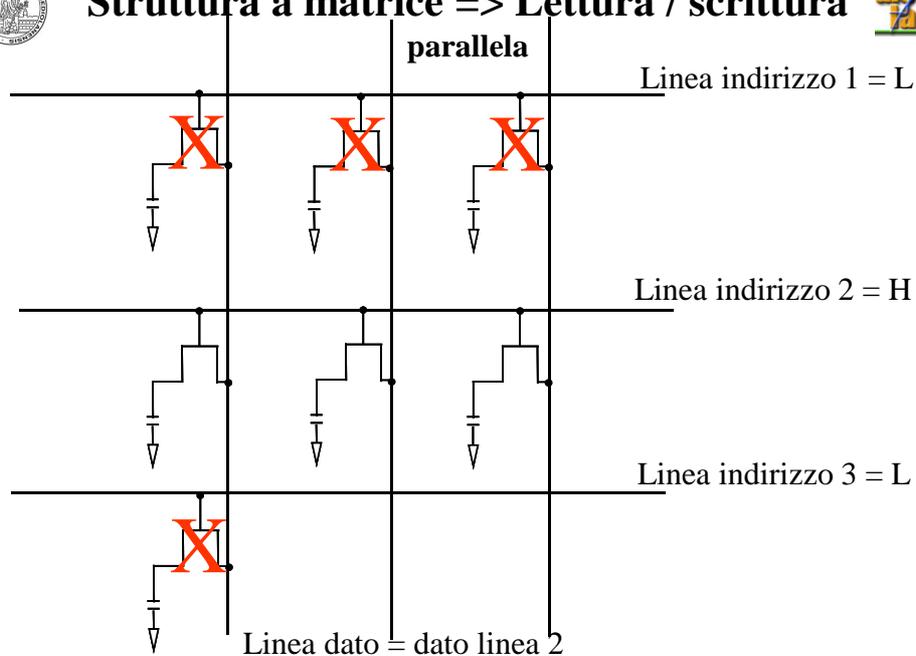


Letture: la linea di bit è portata ad una tensione intermedia, e poi tirata verso low o high a seconda che il condensatore sia carico / scarico: amplificazione della carica.

1 Pass transistor + 1 condensatore.
La lettura scarica la memoria che deve essere ricaricata.



Struttura a matrice => Lettura / scrittura





I problemi delle DRAM



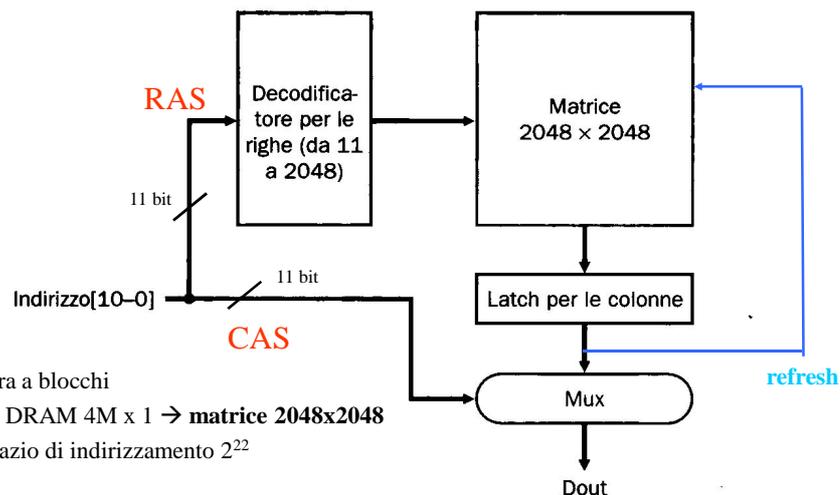
I condensatori si scaricano (qualche millisecondo)

refresh gestito autonomamente dal controllore della memoria mediante ciclo lettura/scrittura

Cosa leggo/scrivo? Quale/i bit?



Struttura a 2 livelli (matrice) di una DRAM



- Struttura a blocchi
 - es. DRAM 4M x 1 → matrice 2048x2048
 - Spazio di indirizzamento 2^{22}

•Accesso:
selezione riga (RAS) + selezione colonna (CAS)
Efficiente per il refresh (refresh di riga) – (35-70ms, tempo di carica dei condensatori).
Utilizzo per la Memoria Principale.



Specifiche delle DRAM (Patterson and Hennessy, 2008)



Year introduced	Chip size	\$ per GB	Total access time to a new row/column	Column access time to existing row
1980	64 Kbit	\$1,500,000	250 ns	150 ns
1983	256 Kbit	\$500,000	185 ns	100 ns
1985	1 Mbit	\$200,000	135 ns	40 ns
1989	4 Mbit	\$50,000	110 ns	40 ns
1992	16 Mbit	\$15,000	90 ns	30 ns
1996	64 Mbit	\$10,000	60 ns	12 ns
1998	128 Mbit	\$4,000	60 ns	10 ns
2000	256 Mbit	\$1,000	55 ns	7 ns
2004	512 Mbit	\$250	50 ns	5 ns
2007	1 Gbit	\$50	40 ns	1.25 ns

Tempo di accesso della cache primaria = 0,16ns
Tempo di accesso della cache secondaria = 0.3ns



Evoluzione delle SRAM e DRAM



Synchronous version.

Trasferimento *burst* o a pagina: trasferimento consecutivo di parole ad indirizzi consecutivi (e.g. RAM EDO).

SDRAM (Synchronous DRAM)

La fase di indirizzamento e di recupero dei dati vengono separate in modo da ridurre al minimo l'impatto della latenza.

Tra l'indirizzamento ed il recupero dei dati, il processore può eseguire altri compiti (NB il processore può essere la CPU o il controllore della memoria, o altro: il dispositivo che controlla la memoria).

DDR-SDRAM. Riescono a trasferire 2 bit per ciclo di clock. Frequenza doppia rispetto alla frequenza del clock del bus.



Prestazione di una memoria



Tempo di accesso.

Per una memoria a **random-access**, è il tempo richiesto per eseguire un'operazione di lettura / scrittura. Più precisamente è il tempo che intercorre dall'istante in cui l'indirizzo si presenta alla porta di lettura della memoria all'istante in cui il dato diventa disponibile.

Per una memoria **non random-access**, è il tempo richiesto per posizionare il dispositivo di lettura / scrittura in corrispondenza dell'informazione da leggere / scrivere.

Memory cycle time: si applica ad una memoria random-access. E' il tempo di accesso più il tempo necessario perchè possa avvenire un secondo accesso a memoria.

Transfer rate: quantità di informazione trasferita nell'unità di tempo si misura in:

Numero_dati (in byte) / s.



Organizzazione della memoria



Organizzazione a matrice (cf. cache)

Organizzazione gerarchica.



Sommario



SRAM.

DRAM.

Codici di errore



Errori nella memoria



Mean Time To Failure (MTTF) di un disco arriva a 1.000.000 di ore = 114 anni.

Un grosso centro di calcolo può contenere 50.000 server, ciascuno contiene facilmente 2 dischi per un totale di 100.000 dischi.

Numero di ore in un anno è: $24 \times 365 = 8.760$ ore / anno

MTTF = 1.000.000 di ore corrisponde a un Annual Failure Rate (AFR) =
 $8.760 / 1.000.000 = 0,876\%$

Un AFR di 0,876% corrisponde per 100.000 dischi a una media di 876 guasti per anno, cioè più di 2 guasti al giorno!

Da qui la ragione di proteggere i dati.

Per i dati in Memoria a semiconduttore si usano i codici di parità.



ECC



- Errori dovuti a malfunzionamenti HW o SW.
 - Date le dimensioni delle memorie (**10^{10} celle**) la probabilità d'errore non è più trascurabile.
 - Per applicazioni sensibili, è di fondamentale importanza gestirli.
- **Codici rivelatori d'errore**
 - Es: codice di parità.
 - Consente di individuare errori singoli in una parola.
 - Non consente di individuare su quale bit si è verificato l'errore.
- **Codici correttori d'errore (error-correcting codes – ECC)**
 - Consentono anche la correzione degli errori.
 - Richiedono più bit per ogni dato (più ridondanza)
 - Per la correzione di 1 errore per parole e l'individuazione di 2 errori, occorrono 8bit /128 bit.



Codice rilevatore di errore: il codice di parità



- **Es: Bit di parità (even):**
 - aggiungo un bit ad una sequenza in modo da avere un n. pari (even) di "1"
 - 0000 1010 0 ← bit di parità
 - 0001 1010 1
 - Un errore su uno dei bit porta ad un n. dispari di "1"
- Prestazioni del codice
 - mi accorgo dell'errore, ma non so dov'è
 - **rivelo ma non correggo errori singoli**
 - **COSTO: 1 bit aggiuntivo ogni 8** → $9/8 = +12,5\%$



Codici correttori d'errore



- **Es: Codice a ripetizione**
 - Ripeto ogni singolo bit della sequenza originale per altre 2 volte → triplico ogni bit
 $0\ 00\ 1\ 11\ 1\ 11\ 0\ 00\ 1\ 11\ 0\ 00\ 0\ 00\ 1\ 11\ \dots$
 - Un errore su un bit di ciascuna terna può essere corretto:
 $000 \rightarrow 010 \rightarrow 000$
 $111 \rightarrow 110 \rightarrow 111$
- Prestazioni del codice
 - **rivelo e correggo** errori singoli
 - **COSTO**: 2 bit aggiuntivi ogni 1 $\rightarrow 3/1 = +200\%$



Definizioni



- **Distanza di Hamming**, d (tra 2 sequenze di N bit)
 - il numero di cifre differenti, giustapponendole
 01001000
 $01000010 \rightarrow d = 2$
- **Distanza minima** di un codice, d_{MIN}
 - il valor minimo di d tra tutte le coppie di sequenze di un codice
- Capacità di **rivelazione** di un codice: $t = d_{MIN} - 1$
- Capacità di **correzione** di un codice: $r = (d_{MIN} - 1) / 2$
- **Esempi**:
 - Codice a bit di **parità**: $d_{MIN} = 2 \rightarrow t=1, r=0$
 - Codice a **ripetizione (3,1)**: $d_{MIN} = 3 \rightarrow t=2, r=1$

Codice ECC di Hamming (Turing award del 1968)



Come calcolare il codice ECC Hamming



- 1) Enumeriamo i bit partendo da sinistra: ($d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8$).
- 2) Segnare le posizioni potenze di 2 come posizione dei bit di parità (1, 2, 4, 8, 16...)
- 3) I bit dei dati vanno inseriti in tutti gli altri bit (3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, ...)
- 4) La posizione del bit di parità determina di quali bit sarà responsabile (p_1 di tutti i bit che hanno indirizzo che termina con 1: i numeri dispari; p_2 di tutti i bit che hanno il secondo bit da destra = 1: 2,3 – 10,11; 6,7 – 110,111; 10,11 – 1010,1011,...).

Bit position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Encoded data bits	p1	p2	d1	p4	d2	d3	d4	p8	d5	d6	d7	d8
Parity bit coverage	p1	X		X		X		X		X		X
	p2		X	X			X	X			X	X
	p4				X	X	X	X				X
	p8								X	X	X	X

Le quattro cifre $p_1p_2p_3p_4$ ci dicono dove c'è un errore eventualmente e quindi ci dà la possibilità di correggerlo (e.g. se valessero 1011, l'errore sarebbe in posizione 11 (d_7)).

Con un parola a 12 bit possiamo correggere errori su dati a 8 bit.



Esempio



Dato: 10011010 = 154 in base 10

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 1000 1001 1010 1011 1100
 p1 p2 d1 p3 d2 d3 d4 p4 d5 d6 d7 d8

Determino i 4 bit di parità:

p_1 . Considero i bit la cui posizione contiene un 1 nel bit meno significativo: 1, 3, 5, 7, 9, 11:

p_1 p_2 $\underline{1}$ p_3 $\underline{0}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ p_4 $\underline{1}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ $\underline{0}$ => bit di parità $p_1 = 0$

p_2 . Considero i bit la cui posizione contiene un 1 nel secondo bit meno significativo: 2, 3, 6, 7, 10, 11:

p_1 p_2 $\underline{1}$ p_3 $\underline{0}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ p_4 $\underline{1}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ $\underline{0}$ => bit di parità $p_2 = 1$

p_3 . Considero i bit la cui posizione contiene un 1 nel terzo bit meno significativo: 4, 5, 6, 7, (12, 13, 14, ...):

p_1 p_2 $\underline{1}$ p_3 $\underline{0}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ p_4 $\underline{1}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ $\underline{0}$ => bit di parità $p_3 = 1$

p_4 . Considero i bit la cui posizione contiene un 1 nel quarto bit meno significativo: 8,9,10,11,...

p_1 p_2 $\underline{1}$ p_3 $\underline{0}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ p_4 $\underline{1}$ $\underline{0}$ $\underline{1}$ $\underline{0}$ => bit di parità $p_4 = 0$

Parola memorizzata: 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0



Errore di 1 bit



Codice memorizzato:

0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
 p1 p2 d1 p3 d2 d3 d4 p4 d5 d6 d7 d8

Supponiamo un errore nel bit d6 (bit 10) -> dato letto: 1001 1110 invece di 1001 1010. La parola di memoria conterrà:

0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
 p1 p2 d1 p3 d2 d3 d4 p4 d5 d6 d7 d8

Analizzo i bit di parità (parità pari, 0 = numero pari di 1)

	prima	dopo	
P1: 0 -> 0 OK	0	0	1 1 0 0 1 0 1 1 1 0
P2: 1 -> 0 Not OK	0	1	1 1 0 0 1 0 1 1 1 0
P4: 1 -> 1 OK	0	1	1 1 0 0 1 0 1 1 1 0
P8: 0 -> 0 Not OK	0	1	1 1 0 0 1 0 1 1 1 0

I bit di parità che sono cambiati sono: 2 e 8 -> il bit dati che ha errore è il bit 2+8 = 10.



Esempio



Dato: 10011010 = 154 in base 10, dato letto: 10011110

Confronto i 2 codici:

Codice memorizzato: 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0
 Codice memorizzato con errore: 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0

Dato: 10011010 = 154 in base 10. Dato letto con errore: 11011010 (bit 5 del codice)

Confronto i 2 codici:

Codice memorizzato: 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0
 Codice memorizzato con errore: 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0

Analizzo i bit di parità

P1: 0->1 Not OK
 P2: 1->1 Ok
 P4: 1->0 Not OK
 P8: 0->0 OK

I bit di parità che sono cambiati sono: 1 e 4 -> il bit dati che ha errore è il bit 1+4 = 5 (cioè d2).



Dimensione di codici ECC



- Conviene applicare ECC a parole più lunghe possibile → aggiungo meno ridondanza → maggiore efficienza del codice
 - A costo di complessità maggiori di codifica/decodifica

Data Bits	Single-Error Correction		Single-Error Correction/ Double-Error Detection	
	Check Bits	% Increase	Check Bits	% Increase
8	4	50	5	62.5
16	5	31.25	6	37.5
32	6	18.75	7	21.875
64	7	10.94	8	12.5
128	8	6.25	9	7.03
256	9	3.52	10	3.91

E' conveniente avere parole di memoria lunghe.



Applicazioni nelle memorie



- RAM con controllo di parità
 - Aggiungo un bit di parità ad ogni byte
 - Es: RAM 1 M x 9 bit (8+1)
- RAM con codice correttore di errori (ECC)
 - si usa nelle memorie cache
 - codici ECC evoluti (alta efficienza)
 - Hamming, CCITT-32, Reed Solomon, ...



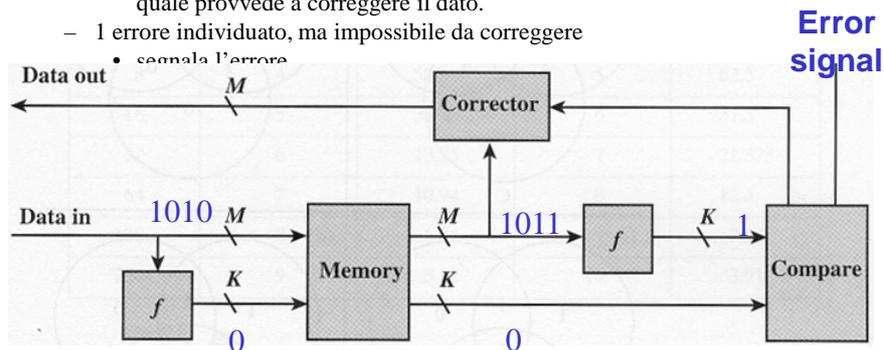
Correzione degli Errori



Il controllore della memoria gestisce l'accesso e il riconoscimento degli errori.

OUT possibili:

- No errors detected
 - I dati letti possono essere inviati in uscita così come sono.
- 1 errore è stato individuato e corretto
 - I bit del dato, più il codice associato vengono inviati al correttore, il quale provvede a correggere il dato.
- 1 errore individuato, ma impossibile da correggere
 - segnala l'errore



f può essere ad esempio il codice di parità e K il codice di parità



Sommario



- Memorie associative
- Memorie n-associative
- Codici di errore