

# Memòries

Josep Amat Fèlix Ferrer

## Introducció

La ràpida evolució que la indústria dels semiconductors ha experimentat durant l'última dècada ha tingut una forta ressonància en el camp de les memòries digitals. En termes generals, es pot dir que la densitat de les memòries de semiconductors s'ha quadruplicat cada dos anys. El 1969 la indústria desenvolupava memòries de 64 bits per pastilla; actualment s'han aconseguit ja els 64 K bits. Aquestes xifres no fan més que traduir l'evolució constant de les tècniques utilitzades per a millorar la densitat i la mida dels circuits. Els resultats són coneguts i els productes indicats a la figura 1 en són només una mostra. La raó principal d'aquesta cursa cap a la complexitat és essencialment econòmica. El cost d'un circuit integrat és funció directa del nombre de components que es poden integrar en una pastilla. Paral·lelament, n'han augmentat la velocitat d'operació i la fiabilitat, i s'ha reduït el consum i el cost per bit emmagatzemat. El conjunt d'aquests factors ha portat que el volum total de vendes de memòries de semiconductors seguis un ritme de creixement com el que s'ensenyà a la figura 2. L'any 1975, el volum de vendes de memòries de semiconductors superà el de les memòries de nucli; la substitució era ja un fet.

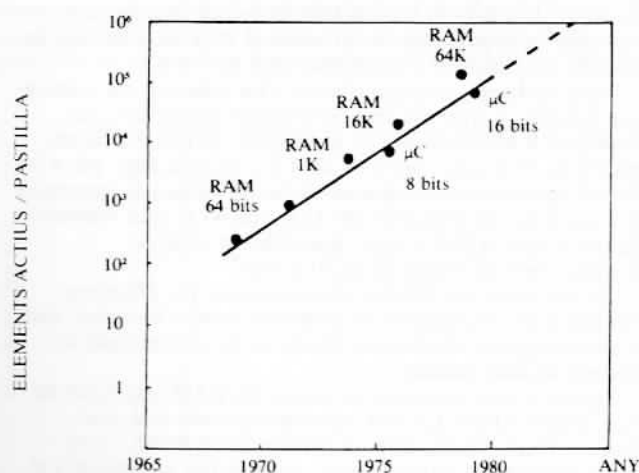


Figura 1.

Per tal de donar una ullada a l'evolució haguda ens referirem per separat a cadascuna de les categories en què es poden classificar les memòries de semiconductors (figura 3). Farem també menció dels recents avenços aconseguits amb les memòries de bombolles magnètiques, i dels estudis realitzats amb altres tècniques.

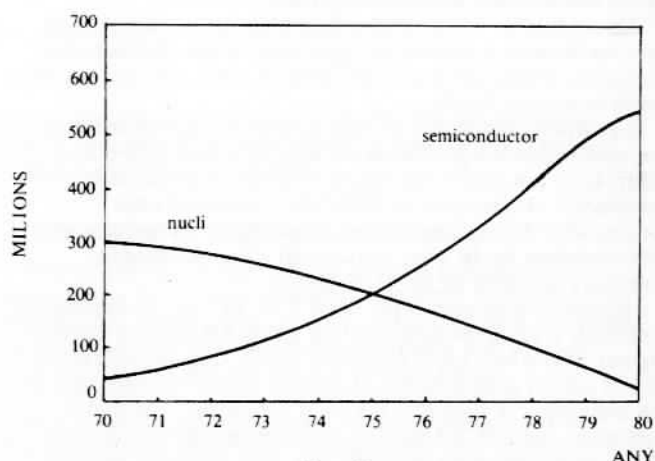


Figura 2.

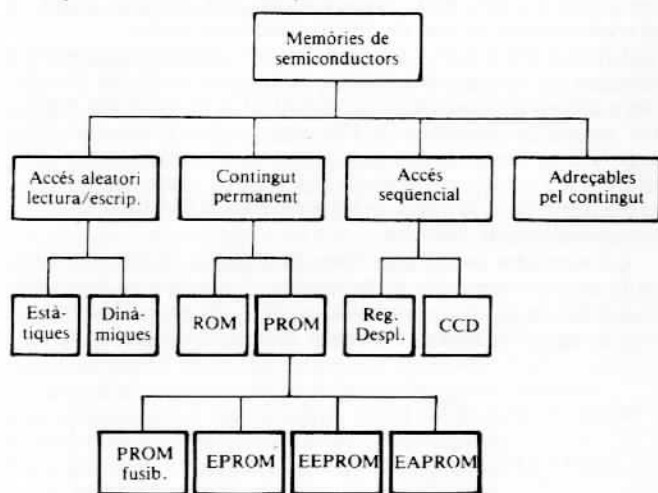


Figura 3.

## 1. Memòries de lectura-escritura d'accés aleatori.

Les memòries de lectura-escritura d'accés aleatori, conegudes normalment com a memòries RAM (random-access memory), són aquelles memòries cadascuna de les cèl·lules de les quals pot ser llegida i escrita directament, sense necessitat de llegir o escriure en cap més cèl·lula. L'adreça es presenta de forma codificada, i la sortida o entrada de dades es realitza per terminals comuns a totes les cèl·lules o a totes les paraules, depenent del tipus d'organització interna escollida per a cada memòria.

Des del punt de vista de la tecnologia utilitzada, les RAMs poden ser bipolars o MOS; i dins de cada tecnologia es pot distingir també entre diferents tipus de memòria, depenent del circuit utilitzat com a cèl·lula elemental. El camp d'aplicacions depèn fonamentalment del temps d'accés i de la capacitat de la memòria. La taula 1 dona una idea d'aquestes aplicacions.

TAULA 1

Aplicacions	$T_{AA}$ (nseg)	Tipus
Anotacions	50	RAM bipolar
Cache	20 a 80	RAM bipolar, RAM MOS estàtica
Buffer	20 a 80	RAM bipolar, RAM MOS estàtica
Grans estructures	100 a 350	RAM MOS dinàmica, estàtica
Estructures mitjanes	200 a 500	RAM MOS dinàmica, estàtica
Minicomputadors	100 a 250	RAM MOS dinàmica, RAM bipolar
Microcomputadors	200 a 500	RAM MOS estàtica, dinàmica

### 1.1. Memòries RAMs bipolars

La cèl·lula de les memòries RAM bipolars és constituïda per un bistable a transistors, cosa que fa que ofereixin més velocitat, menys densitat, més consum i més cost que les fetes amb tecnologia MOS.

Les RAMs bipolars TTL han arribat ja quasi al seu límit en aconseguir temps d'accés de 20 a 25 n segs. L'evolució seguida es pot veure a la figura 4. El gruix actual de la producció se centra en els 1024 bits. Després d'estar anunciades durant més de dos anys, finalment han aparegut les memòries de 4K bits, i encara no s'han aconseguit resultats tangibles de les de 16 K bits.

El futur de les memòries RAM TTL és fosc. Probablement tendiran a ser substituïdes per les RAM MOS per a densitats iguals i superiors a 4 K bits, i per les ECL en les aplicacions on es precisi gran velocitat. La corba d'evolució esperada és la indicada a la figura 5. Per tal d'aconseguir una major velocitat, algunes RAMs TTL utilitzen actualment circuits ECL amb traductors de nivell TTL-ECL per a les entrades i ECL-TTL per a les sortides.

Fins fa molt poc era difícil de justificar la utilització de memòries bipolars ECL, perquè encara que donaven temps d'accés menors, el cost de desenvolupament no ho justificava. Però amb l'aparició dels nous microprocessadors bipolars, la velocitat del sistema s'ha tornat un factor decisiu. Actualment ja hi ha memòries RAM ECL de 1024 bits amb un temps d'accés màxim de 10 n segs., i de 4 K bits amb 25 n segs. En un terme de dos anys s'espera rebaixar el temps d'accés a 3 n segs. per a les de 4 K bits. El ritme de creixement de la densitat de les memòries RAM ECL és comparativament moderat.

Cal esmentar també que s'han fet bastants estudis per a la utilització en memòries de la família I<sup>2</sup>L (integrated-injection-logic) des de la seva introducció el 1972. És amb I<sup>2</sup>L quan s'aconsegueix la més alta densitat d'integració bipolar; el

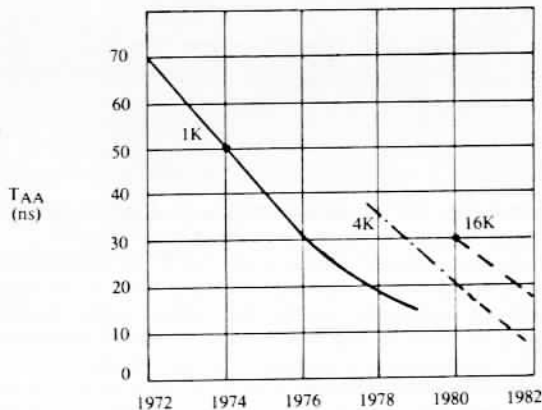


Figura 4.

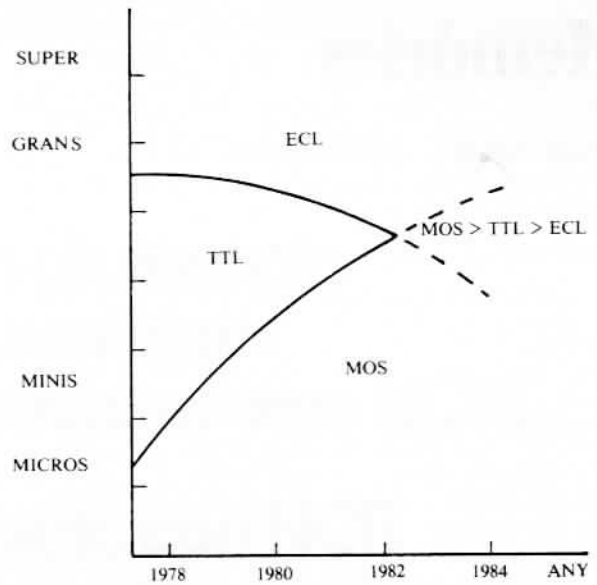


Figura 5.

consum i el temps d'accés és més petit que en TTL. Aquestes característiques són ja pròximes a les ofertes per les memòries de tecnologia MOS, i possiblement arribaran a millorar-les.

### 1.2. Memòries RAM MOS

Les possibilitats d'integració a gran escala de la família lògica MOS han fet possible que s'adoptés la tecnologia MOS per a realitzar memòries de gran capacitat. En principi aquestes memòries s'han utilitzat en aquelles aplicacions on el temps d'accés a la memòria no en fos el requisit fonamental. Però el gran desenvolupament d'aquesta tecnologia ha portat a un progressiu desplaçament de les RAMs bipolars en aquelles àrees on la velocitat és comparable. Depenent de la forma en què s'aconsegueix l'emmagatzematge de la informació (mitjançant dispositius en conducció/tall, o pel carregament/descarregament d'una capacitat estructural), cal distingir entre les RAM MOS estàtiques i les RAM MOS dinàmiques. Els seus respectius camps d'aplicació s'han posat ja breument de manifest a la taula 1.

### 1.3. Memòries RAM MOS estàtiques

A l'estil de les memòries RAM bipolars, la cèl·lula de memòria és constituïda per un bistable, que li confereix la seva característica estàtica. L'evolució ha estat també constant. Des dels 64 bits en PMOS de què es disposava en finalitzar la dècada dels 60, es passà el 1972 als 1024 bits en NMOS, i actualment s'ha arribat als 8 K i 16 K.

Paral·lelament, el temps d'accés s'ha reduït de tal manera que suposen ja avui dia una forta competència per a les memòries RAM bipolars, en aconseguir un temps d'accés màxim de 35 n segs. per a les de 4 K i de 85 n segs. per a les de 8 K. Els dissenys continuen al mateix ritme i es comencen ja a anunciar les memòries de 32 K i de 64 K amb velocitats de 150 n segs. a 200 n segs., que s'espera rebaixar posteriorment al marge de 60-70 n segs.

Cal fer notar que un dels desavantatges que ofereixen respecte a les dinàmiques, el major consum, s'ha reduït amb la implementació de diverses tècniques de commutació a manera de baix consum.

Capítol a part mereixen les memòries RAM estàtiques de tecnologia CMOS. La seva naturalesa permet una alta densitat d'integració, amb un consum molt reduït i petit temps d'accés. Progressivament, la velocitat, la densitat i el cost de les memòries CMOS s'aproximen als aconseguits per les memòries estàtiques NMOS en aprofitar en el disseny de la pastilla les característiques pròpies de CMOS i treure avantatge de la seva capacitat paràsita per a eliminar components. Com a benefici suplementari, es pot assenyalar que, a diferència de NMOS, CMOS és relativament immune a les partícules alfa.

La clau, però, del desenvolupament CMOS està en la tecnologia SOS, de silici sobre safir, que capitalitza els

avantatges dels circuits CMOS amb la velocitat i densitat dels NMOS, en solucionar el problema primari de la limitació de velocitat de CMOS i multiplicar per 4 la capacitat d'integració. Els esforços en el desenvolupament de productes CMOS/SOS no donaren, però, resultats significatius fins l'any 1977. Actualment, les úniques memòries RAM CMOS/SOS disponibles són les de  $4\text{ K} \times 1$  i de  $1\text{ K} \times 4$ , subministrades només per un fabricant.

#### 1.4. Memòries RAM MOS Dinàmiques

Els transistors MOS tenen dues característiques que poden ser aprofitades per a aconseguir una elevada densitat d'informació emmagatzemada per unitat de superfície de substrat: capacitats estructurals i molt alta resistència d'entrada. Aquestes característiques foren les que portaren al desenvolupament de les memòries RAM MOS dinàmiques.

Les memòries RAM dinàmiques de 1024 bits foren, el 1971, les primeres memòries de semiconductors en ser àmpliament acceptades. Desenvolupades amb la tecnologia PMOS, la seva cèl·lula constava de 3 transistors i utilitzava l'efecte capacitiu de la seva estructura per a emmagatzemar la càrrega. L'evolució fou ràpida i un any després s'aconseguí ja quadruplicar la densitat de la pastilla. Però el canvi determinant vingué l'any següent en abandonar-se pràcticament la tecnologia PMOS i introduir els 1024 bits amb tecnologia NMOS. El fet d'utilitzar el canal N va permetre rebaixar la tensió límit de nivell, i aconseguí la compatibilitat amb TTL; la velocitat augmentà i les possibilitats d'integració amb densitats més elevades s'incrementaren notablement. Acompanyant el procés NMOS, vingué un nou disseny de la cèl·lula de memòria, i permeté la memorització de la unitat d'informació en una cèl·lula de només un transistor.

Convé assenyalar que el canvi de 3 transistors per cèl·lula a 1 transistor portava un problema de difícil solució en aquells moments: la implementació dels nous dissenys d'amplificadors de nivell que feien falta per a incrementar els petitíssims nivells de senyal que havien d'esser detectats. Quan s'en consolidà el disseny, la RAM dinàmica de 4096 bits es convertí en un estàndard industrial.

L'augment en la complexitat d'integració ha seguit dues línies paral·leles: per un cantó, la reducció del nombre d'elements per cèl·lula; per l'altre, la reducció bidimensional de la seva geometria. La figura 6 dona una idea dels resultats obtinguts. El pendent del gràfic reflecteix el mecanisme de compressió; els salts, la reducció de la cèl·lula. A la regió dels 4 K s'observa un canvi, produït per un canvi en el procés. De la utilització de la porta de metall (SPIN) es passà a la de la porta de silici (POLY I, POLY II), i s'aconseguí una significativa reducció de l'àrea. Cada nova generació ha quadruplicat el nombre de bits amb només el doble de la grandària de la pastilla, fins a arribar als 64 K bits actuals.

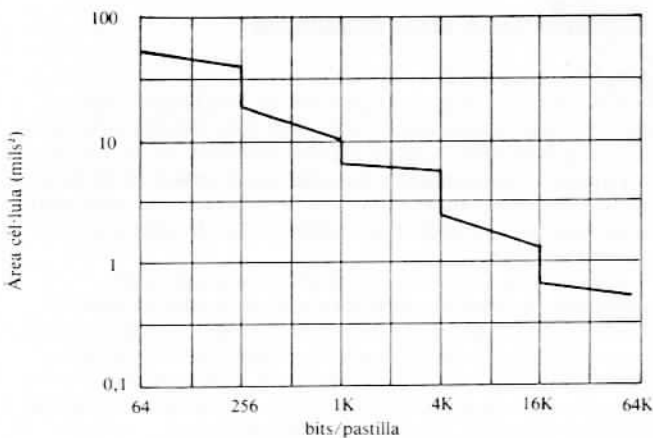


Figura 6.

Per a aconseguir-ho ha fet falta aplicar la tècnica d'escalat tridimensional al procés Poly II. Arribats en aquests nivells d'integració, per a les noves versions a 5 V dels circuits existents s'ha necessitat incloure la quarta dimensió,

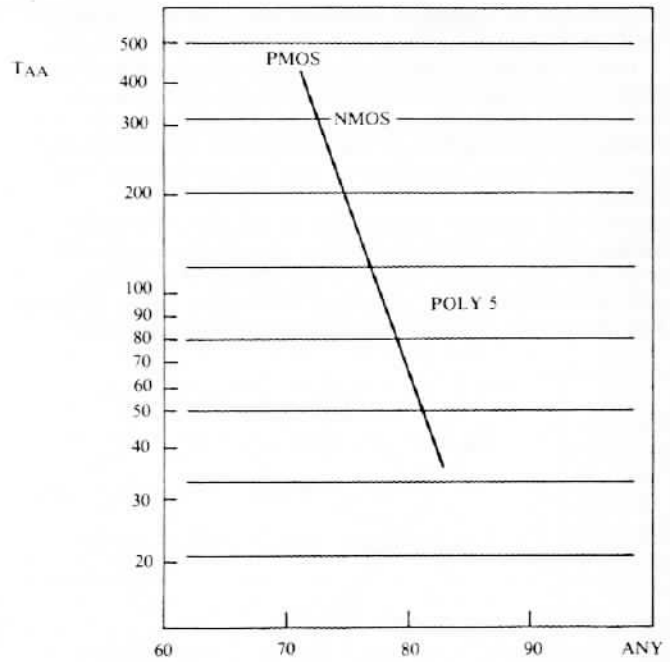


Figura 7.

desenvolupant el procés Poly 5 escalat. Mitjançant aquest procés no solament se n'augmenta la densitat sinó també la velocitat i la fiabilitat. (Figura 7).

## 2. Memòries de contingut permanent.

Dins d'aquesta categoria hi ha aquelles memòries especialment fabricades per a emmagatzemar dades que generalment només s'han de llegir. Un cop escrites, les dades no es poden modificar fàcilment mitjançant una operació d'escriptura sinó que cal sometre-les a un procés d'esborraments o, si no admeten una segona escriptura, substituir-les per unes de noves. Podem subdividir-les en memòries només de lectura i en memòries principalment de lectura.

## 3. Memòries només de lectura.

### 3.1. Memòries ROM.

En les memòries conegudes per ROM (read-only-memory), el contingut s'escriu en una part del procés de fabricació. Per aquest motiu, són una solució de baix cost per a volums grans d'utilització. El seu gran inconvenient, però, és la inflexibilitat als canvis, que en fa inaplicable l'ús en prototipus i en sistemes de baixa quantitat de producció.

La primera ROM aparegué l'any 1967. Era una memòria MOS de 64 bits, organitzada en 16 paraules de 4 bits. Ja l'any següent s'aconseguí una ROM de 1024 bits, i temps després, en augmentar la densitat d'integració, es començà a utilitzar el terme «firmware» (software a la ROM). Les memòries ROM MOS han tingut una forta acceptació i així ho demostra el gran nombre de subministradors. Després d'haver aparegut ja les memòries ROM MOS de 32 K i de 64 K, se'n falta poc per fer-ho les de 128 K i 256 K. Paral·lelament, s'han desenvolupat memòries ROM CMOS fins a 64 K.

Les memòries ROM bipolars, de temps d'accés més petits, es fabriquen amb tecnologia TTL Schottky. Fins a l'any 1978, es disposaven memòries ROM bipolars amb densitats que anaven des dels 256 bits als 16384 bits. Però a causa de la naturalesa de la fabricació, d'acord amb les especificacions del client, i a l'increment dels marges d'utilització dels altres tipus de memòries, actualment només hi ha tres fabricants que subministren memòries ROM bipolars, que han de tenir un mínim de 8 K.

### 3.2. Memòries PROM.

El contingut de les memòries PROM és inalterable, però l'escriptura no es fa durant la fabricació sinó que la

programació es realitza normalment destruint o conservant un fusible disposat en sèrie amb la cèl·lula.

Durant els darrers deu anys han anat apareixent tota una sèrie de memòries PROM bipolars que utilitzen diferents dissenys de cèl·lules de memòria amb diferents tipus de fusible (microm, polisilici i titani-tungstèn). Però el disseny que afavoreix més l'augment de densitat, de velocitat i de fiabilitat, és el de la cèl·lula que fa servir el díode base-emissor del transistor amb fusible de polisilici. Utilitzant aquest tipus de cèl·lula, la densitat s'ha duplicat cada dos anys, fins a arribar als actuals 16 K bits (amb un temps d'accés de 60-90 nsegs., depenent de l'organització), i a la tot just introduïda de 16 K bits i 35 nanosegons. (Figura 8).

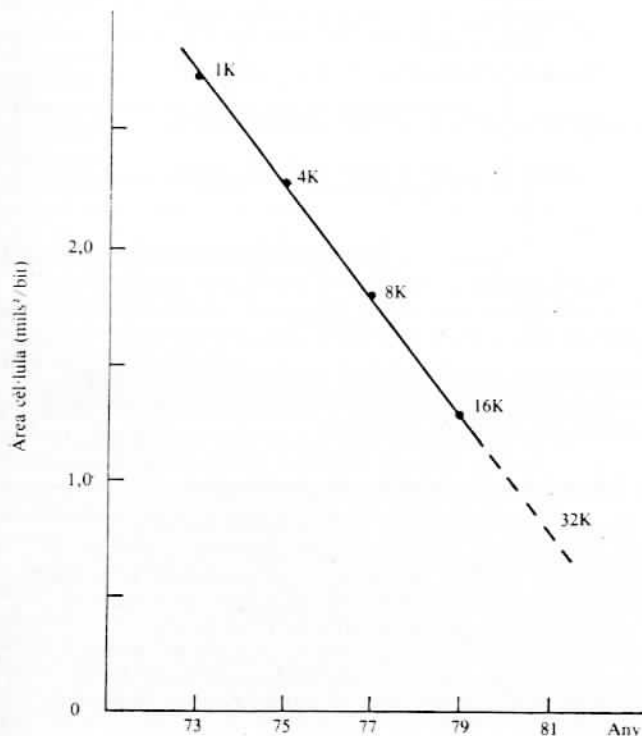


Figura 8.

## 4. Memòries principalment de lectura.

### 4.1. Memòries EPROMS.

Les memòries EPROM (erasable-programmable-read-only memory) permeten la programació del seu contingut per l'usuari, i el seu esborrament mitjançant l'exposició a la llum ultravioleta.

La primera memòria EPROM, de 2 Kbits, aparegué l'any 1972, utilitzant la tecnologia FAMOS. Malgrat ser típicament de 5 a 10 vegades més lentes que los PROM bipolars i necessitar alimentació múltiple, el volum de vendes augmentà ràpidament a causa que les seves característiques les fan especialment aptes per al desenvolupament de prototipus i per a aplicacions on s'hagin de canviar tot sovint les dades emmagatzemades.

El creixement n'ha estat accelerat: l'estàndard industrial és ja avui dia de 16 K bits; recentment s'ha introduït les memòries de 32K i molt aviat ho faran les de 64 K bits. També es disposa ja de les primeres memòries EPROM CMOS.

### 4.2. Memòries EAROM.

Les memòries EAROM (electrically alterable read only memory) es poden modificar sense necessitat d'un esborrament total. A causa de la tecnologia MNOS amb la qual han estat desenvolupades (metal nitride oxide semiconductor) la cèl·lula es pot carregar i descarregar selectivament mitjançant senyals aplicats a un electrode de porta. Això permet que la memòria pugui ésser programada elèctricament al mateix circuit, i que les alteracions es puguin fer de forma selectiva.

Aquestes memòries són particularment útils en aplicacions on sigui inadmissible la pèrdua de dades (exemple, per interrupcions freqüents de l'alimentació; en ambients amb molt soroll). Però per raó de la seva lentitud (temps de lectura de 0,95 a 5 nsegs.) no es poden fer servir en la majoria dels sistemes que treballen en temps real. La seva facilitat de programació i d'alteració fa que s'utilitzin cada cop més en sistemes remots, inaccessibles per a canvis rutinaris, i en satèl·lits. Actualment es disposa ja d'una petita varietat de memòries EAROM. La capacitat més alta aconseguida és de 8 K. El procés de fabricació presenta fortes dificultats i, consegüentment, els productes són cars.

### 4.3. Memòries EEROM.

Les memòries EEROM (electrically erasable read only memory) utilitzen la mateixa tecnologia que les EPROM. Els temps d'accés i de retenció de les dades són similars als de les EPROM, però el temps necessari per a l'esborrament és menor. Ara tot just s'han començat a introduir pràcticament en el mercat.

## 5. Memòries adreçables pel contingut

Les memòries adreçables pel contingut (o memòries CAM) són indicades per a aplicacions en les quals calgui saber si una informació és o no continguda a la memòria, sense necessitat de llegir-la i sense saber en quina posició es troba. Entre les seves aplicacions es poden esmentar:

- reconeixement de formes
- algorismes aritmètics
- implementació d'operacions programables de control seqüencial
- buffer

Les memòries CAM existents són normalment organitzades en paraules de 2, 4 i 8 bits. La seva qualitat més important és la velocitat, i per això s'han fabricat normalment amb tecnologia bipolar. Una CAM bipolar té temps de resposta de 20 a 30 nsegs., comparant paraules de 4 bits, però la seva capacitat és generalment baixa.

Els esforços que s'han fet durant tota la dècada dels 70 per a aconseguir memòries CAM d'alta densitat han resultat infructuosos. Les raons es poden trobar en el fet que resulten bastant més cares que les memòries RAM, i que hi ha solucions software efectives que no requereixen memòries especials.

Capacitat		Dimensió lineal cèl·lula		Velocitat	
dispon.	project.	dispon.	project.	dispon.	project.
64K bit	4M bit	5 $\mu$ m	1 $\mu$ m	1-5 Mbit seg	5-20 Mbit seg

## 6. Memòries d'accés seqüencial

### 6.1. Memòries CCD

Les memòries d'accés seqüencial CCD (charge couple device) foren desenvolupades el 1970 com una resposta de la tecnologia del silici a les ja ideades memòries de bombolla magnètica. El seu impacte ha estat, però, reduït en el camp de les memòries, encara que la seva utilització ha estat molt significant en el camp de la imatge i en el del processament de senyals.

L'estructura de les CCD prometia, en un principi, memòries de densitats superiors a les de qualsevol tipus de RAM. Els fets immediats foren molt diferents, i fins passada la primera meitat de la dècada no s'aconseguien resultats importants. La indústria sembla haver donat una nova empenta en aquests dispositius, i així es disposa avui dia de CCDs de 64 Kbits. La taula 2 mostra les seves característiques, comparades a les de les noves CCDs que són projectades per als propers anys.

## 7. Memòries de bombolla magnètica

El descobriment, fet abans d'acabar els anys 60, del fenomen de les bombolles magnètiques (petits dominis

magnètics que adquirien la propietat de l'estabilitat en aplicar un camp magnètic estàtic) estava destinat a tenir un gran impacte en el camp de les memòries. L'aplicació de les bombolles com a elements de memòria fou quasi immediatament aparent: la presència d'una bombolla podia representar un 1 lògic; la seva absència, un 0 lògic. Les densitats possibles teòricament —quan encara les memòries de semiconductors no arribaven més que a uns cents de bits per pastilla— eren quasi increïbles: milions de bits per polzada al quadrat. A més, les memòries de bombolles magnètiques no serien volàtils i, per tant, podrien retenir les dades en el cas d'una fallada d'alimentació. Malgrat aquestes perspectives, les dificultats de fabricació i el fort desenvolupament que experimentà la indústria dels semiconductors en frenaren la comercialització pràctica en gairebé una dècada. Actualment, es consideren com a estàndard els 256 K, encara que ja s'han aconseguit els 1Mb amb un temps d'accés aleatori de 40 m segs.

## 8. Perspectives

El ritme en què s'ha incrementat la densitat d'integració de les diferents memòries no sembla que es pugui mantenir molts anys més, no per barreres tecnològiques sinó més aviat per raons comercials, al menys amb les memòries RAM i EPROM. Sembla probable la desaparició progressiva de les memòries ROM bipolars i, fins i tot, de les RAM TTL. En canvi, les memòries CCD i les de bombolles magnètiques continuaren segmentant la seva capacitat i disminuint els preus fins a desplaçar algunes memòries externes de computador.

En relació a la tecnologia futura de les memòries RAM, sembla que comptin amb més probabilitats les de silici sobre safir, d'arseniür de galli i, per aplicacions de molt alta velocitat, les unions superconductores Josephson, que ja han donat resultats molt satisfactoris al laboratori.

J. Amat  
F. Ferrer

