

Evolução de Microeletrônica a Micro-Sistemas

Jacobus W. Swart
CCS e FEEC - UNICAMP

1 Introdução:

A microeletrônica apresenta uma história longa num período muito curto. Como fatos históricos mais marcantes temos o descobrimento do efeito transistor em 1947 na Bell Labs e o desenvolvimento do processo planar para a fabricação de CI's (circuitos integrados) em 1959 na Fairchild, resultando nos primeiros CI's comerciais em 1962. Assim, a idade do CI's é de apenas aproximadamente 40 anos (2000). Podemos afirmar que nenhum outro tipo de produto assistiu a evoluções a níveis similares ao do CI. Uma lâmpada de hoje ainda é similar ao de 100 anos atrás. Um automóvel de hoje é razoavelmente evoluído se comparado ao de 100 anos atrás, porém esta evolução é totalmente desprezível ao da evolução do CI. Na verdade, os carros e as lâmpadas mais modernos tem suas características mais atraentes graças à incorporação de microeletrônica. Além desta rápida evolução da tecnologia, a história da microeletrônica apresenta outros fatores incomparáveis em outras áreas:

- Apresentou um crescimento de mercado de aproximadamente 16% anuais em média durante as suas 4 décadas de vida. Este alto crescimento, inigualável em qualquer outra área econômica, fez com que a eletrônica se tornasse hoje o maior mercado mundial, de valor total anual de aproximadamente 1 trilhão de dólares (maior que o da automobilística e de petróleo por exemplo).
- Ela produziu uma nova revolução na história humana, alterando profundamente todas as atividades humanas. A importância da área é tamanha, que podemos chamar a nossa era como a "idade do silício", dado ser o silício o material básico para a fabricação dos "chips" e outros dispositivos. Isto em alusão à prática comum histórica de classificar as sociedades pela sua habilidade em manipular e usar predominantemente um dado material (idade da pedra, do bronze, etc.)

A tecnologia de microfabricação foi desenvolvida inicialmente visando aplicações de microeletrônica (dispositivos discretos e circuitos integrados). Além da imensa evolução havida na tecnologia de microfabricação, chegando-se mesmo à tecnologia de nanofabricação, hoje ela extrapola sua área de aplicações, incluindo a seguinte lista:

- Dispositivos e circuitos integrados eletrônicos
- Dispositivos e circuitos integrados optoeletrônicos
- Estruturas e circuitos fotônicos
- Dispositivos tipo microssores e microatuadores
- Estruturas e dispositivos de micromecânica
- Estruturas para biologia.
- Fabricação e montagem de placas de circuitos impressos

Neste trabalho apresentaremos inicialmente, item 2, uma revisão da evolução da microeletrônica e das técnicas de microfabricação. Uma revisão da história da microeletrônica no país será apresentada em seqüência, no item 3. No item 4 será apresentada uma introdução aos microssores, que fazem uso das mesmas técnicas de microeletrônica.

2. Evolução da Microeletrônica¹⁻⁵

No século 19, pouco se sabia a respeito de semicondutores e muito menos de dispositivos feito com estes materiais. Houve, no entanto, alguns trabalhos empíricos. É o caso da invenção do retificador a estado sólido, apresentado por F. Braun, em 1874. Este retificador foi feito com cristal de PbS, soldado com um fio metálico (diodo de ponta de contato). Este diodo apresentava característica muito instável e foi abandonado temporariamente, até uma época em que os diodos a válvula não atendiam à demanda de uso de frequências mais altas.

O início do século 20 por sua vez foi fundamental para o desenvolvimento da microeletrônica, pois houve um enorme progresso na teoria física, com o desenvolvimento da mecânica quântica, por Bohr, de Broglie, Heisenberg, Schrödinger e outros, notadamente durante os anos 20. Em paralelo a este fato, foi proposto um primeiro conceito de desenvolvimento de um transistor de efeito de campo em estado sólido. Em 1928, Lilienfeld, um homem muito à frente do seu tempo, patenteou a idéia de modular a condutividade de um semicondutor por meio de um campo elétrico, chamado como dispositivo de efeito de campo. Lilienfeld, no entanto, não teve sucesso na realização prática da sua proposta. Na década seguinte, dos anos 30, houve um forte crescimento no desenvolvimento de teorias quânticas em sólidos, ou seja, a aplicação da mecânica quântica em sólidos, com os conceitos de bandas de energias, banda proibida, mecânica estatística, portadores, etc, pelos trabalhos apresentados por Peieris, Wilson, Mott, Franck e vários outros (a maioria da Inglaterra). Estes conceitos teóricos permitiram entender os semicondutores e motivar a pesquisa por dispositivos semicondutores.

No ano de 1936 a Bell Labs decide criar um grupo de pesquisa específico para estudar e desenvolver dispositivos semicondutores, com o objetivo de fabricar o transistor de efeito de campo. Um outro grupo bastante ativo nesta área e que contribuiu significativamente com o trabalho na Bell Labs era o grupo da universidade de Purdue. Em 1940, R. Ohi identifica pela primeira vez semicondutores de Si tipo p e tipo n. No mesmo ano, J. Scaff e H. Theuerer mostram que o nível e o tipo de condutividade do Si é devido à presença de traços de impurezas. Durante os anos seguintes da II Guerra mundial, as pesquisas nesta área são suspensas na Bell Labs, devido a outras prioridades.

Em meados dos anos 40, ao final da II Guerra mundial, o status da eletrônica era baseado nos seguintes dispositivos básicos:

- Válvulas termiônicas, que apresentavam as seguintes características: muito frágeis, caras e alto consumo de potência.
- Relés elétrico-mecânicos, que por sua vez eram de comutação muito lenta.

Estas limitações destes dispositivos motivaram o reinício da pesquisa e desenvolvimento de novos dispositivos a estado sólido. Assim, em 1946, a Bell Labs recria seu grupo de pesquisa em estado sólido, agora sob liderança de William Shockley, concentrando esforços na pesquisa dos semicondutores Ge e Si e de transistores de efeito de campo. Nesta época, um dos pesquisadores do grupo, Bardeen, sugere uma explicação pelo insucesso na obtenção do transistor FET baseado na alta densidade de estados de superfície dos semicondutores (dentro da banda proibida). Mas persistindo na pesquisa da invenção do FET, Bardeen e Brattain descobrem por acaso o efeito de transistor bipolar, em final de 1947, mais precisamente em 16 de dezembro. Este transistor e esquema elétrico são mostrados na Fig. 1. O transistor era constituído por uma base de Ge tipo n (contato de base pelas costas da amostra) e duas junções de contato tipo p na superfície, sendo um de emissor e outro o coletor, feitos um próximo ao outro. Após os cuidados necessários para patentear o invento e convencer o exército americano, que queria mantê-lo como segredo, a Bell Labs o anuncia publicamente em junho de 1948. O descobrimento do efeito transistor bipolar é sem dúvida atribuído aos pesquisadores Bardeen e Brattain, mas quem desenvolveu a teoria e explicação sobre o funcionamento do transistor bipolar foi o chefe deles, W. Shockley, em janeiro de 1948. A teoria de Shockley, de injeção de portadores minoritários pela junção emissor-base, foi comprovada por meio de um transistor vertical fabricado em fevereiro de 1948, por J. Shive. Esta teoria torna-se amplamente acessível com o lançamento do livro "Electrons and Holes in Semiconductors" por W. Shockley em 1950. Mais tarde, em 1956, Shockley, Brattain e Bardeen são condecorados com o prêmio Nobel de física pelas contribuições referentes ao transistor bipolar. A pesquisa pela obtenção do transistor de efeito de campo foi mantida, apesar do descobrimento do transistor bipolar, sendo que em 1952, I. Ross e G. Dacey demonstram o primeiro transistor tipo JFET. Neste caso, a porta é constituída por uma junção pn, que controla a passagem de corrente pelo canal. Desta forma, contornou-se o problema de estados de superfície, que ainda não tinha sido resolvido até então.

Um fato histórico que contribuiu muito com o desenvolvimento da microeletrônica foi o fato da Bell Labs licenciar seu invento a outras empresas. Por um preço de US\$ 25.000,00, empresas como Texas Instruments e Sony (na época com outro nome), compraram a licença para aprender e usar a tecnologia de fabricação de transistores. A tecnologia foi transferida através de um workshop realizado na Bell Labs em abril de 1952. Sony foi a primeira empresa a fabricar um radio totalmente transistorizado e comercializá-lo em escala, criando assim o mercado de consumo para transistores.

Em 1955, Shockley deixa a Bell Labs e funda sua própria empresa, Shockley Semiconductors, que marca a origem do Vale do Silício, no estado de Califórnia. A sua empresa em si não foi marcante, porém ela começou com pesquisadores e empreendedores de alto nível, que depois criaram a Fairchild (1957) e Intel (1968), entre muitos outros. Entre estes pesquisadores destacam-se Gordon Moore, Robert Noyce e Andrew Grove.

Uma vez dominados alguns processos de fabricação de transistores, nasceu a idéia de se fazer um circuito integrado. Este conceito foi proposto e patenteado por J. Kilby, da Texas Instruments, no ano de 1958. Kilby demonstrou sua idéia com um circuito fabricado sobre um único bloco de Si, contendo um transistor (em estrutura tipo mesa), um capacitor e um resistor. Estes dispositivos eram, no entanto, interconectados por meio de fios soldados nos contatos dos mesmos. Uma fotografia deste circuito integrado rudimentar é mostrado na Fig. 2. Em paralelo, um grupo da Fairchild desenvolve um processo superior para fabricar transistores (J. Hoerni) e chamado de processo planar. Este mesmo processo é adaptado logo em seguida, no mesmo ano, por R. Noyce do mesmo grupo, para a fabricação de circuitos integrados. Este processo foi fundamental para o progresso da microeletrônica, já que seu princípio básico, acrescida de várias inovações e evoluções, vem sendo usado até hoje na fabricação dos modernos CI's. O início da comercialização de CI's inicia-se a partir do ano de 1962, não parando mais de crescer em termos de volume e de densidade de transistores por chip. A Fig. 3 mostra a fotografia do primeiro CI fabricado pelo processo planar. Marcos precursores e fundamentais para a invenção do processo planar foram: a) em 1952, C. Fuller da Bell Labs, publica seu estudo sobre difusão de dopantes

doadoras e aceitadoras em Si; b) em 1955, Frosch e Derick usam camadas de SiO_2 para delimitar as áreas de difusão; c) em 1955, Andrus e Bond desenvolvem materiais tipo fotorresiste para a litografia e gravação de padrões em filmes de SiO_2 .

O estudo e desenvolvimento de processos de oxidação de Si permitiram finalmente o desenvolvimento do tão sonhado transistor de efeito de campo com porta isolada, ou seja, o transistor MOSFET ou simplesmente MOS. Em 1960, um grupo da Bell Labs, D. Kahng e M. Atalla, demonstram o transistor MOS. A interface SiO_2/Si é uma interface de muito boa qualidade, com baixa densidade de estados de superfície. Mas apesar disto, os dispositivos MOS apresentavam uma estabilidade pobre, causando um atraso de mais 10 anos para seu uso em grande escala. O motivo deste problema era a falta de controle de contaminação de impurezas. Mais especificamente,



Fig. 1 a) Fotografia do primeiro transistor bipolar de contato descoberto em dezembro de 1947, por pesquisadores da Bell Labs, b) esquema elétrico correspondente.



Fig. 2 Fotografia do primeiro circuito integrado desenvolvido por J. Kilby, em 1958.



Fig. 3 Fotografia do primeiro circuito integrado fabricado por processo planar na Fairchild em 1961.

impurezas de Na, que são responsáveis por cargas positivas dentro do isolante de porta e que causa um desvio na tensão de limiar dos transistores (altera a densidade de portadores induzidos no canal). A combinação de transistores MOS de canal n e de canal p num mesmo substrato, levou F. Wanlass a propor a tecnologia CMOS em 1963. Outros marcos históricos que contribuíram enormemente para o avanço das tecnologias MOS foram, a) o uso de filme de silício policristalino dopado como material de porta de transistores, a partir de 1966, e b) o uso da técnica de implantação de íons para o ajuste da tensão de limiar do transistores, pela dopagem da região de canal com muita precisão.

Além dos dispositivos descritos acima, muitos outros foram inventados, ao longo do meio século de vida da era dos dispositivos semicondutores. K. K. Ng apresenta uma revisão ampla destes dispositivos ("A Survey of Semiconductor Devices", IEEE Trans. Electr. Dev., vol.43, no. 10, p.1760, Oct. 1996). Ele classifica como sendo 67 dispositivos distintos, com mais aproximadamente 110 outros dispositivos relacionados, com pequenas variações em relação aos primeiros, como parcialmente ilustrado na Fig. 4. Uma relação resumida destes dispositivos é apresentada na tabela 1, com os mesmos organizados em grupos, baseado em suas funções e/ou estruturas.

O estudo e entendimento destes diversos dispositivos requerem basicamente os seguintes conhecimentos:

- a) Conhecimento dos blocos construtivos de dispositivos. Existem apenas 5 blocos construtivos para os dispositivos, como representados na Fig. 5:
 - Interface metal-semicondutor
 - Interface de dopagem de homojunção, ou seja, junção p-n
 - Heterojunção
 - Interface semicondutor-isolante
 - Interface isolante-metal
- b) Conhecimento dos mecanismos de transporte. A seguir relacionamos estes mecanismos juntamente com exemplos de dispositivos onde os mesmos se aplicam:
 - Deriva resistores, transistores FET
 - Difusão junções p-n, transistores bipolares
 - Emissão termiônica / barreiras Schottky, diodos PDB
 - Tunelamento diodo túnel, contato ôhmico
 - Recombinação LED, Laser, diodo p-i-n
 - Geração célula solar, fotodetector
 - Avalanche diodo IMPATT, diodo Zener, diodo APD.

Tabela 1 Grupos de dispositivos semicondutores, organizados por função e/ou estrutura.

Grupo	Sub-grupo	Dispositivos
Diodos	Retificadores	Diodo p-n
		Diodo p-i-n
		Diodo Schottky
		Diodo de barreira dopada panar - PDB
		Diodo de heterojunção
	Resistência negativa	Diodo túnel
		Diodo de transferência de elétrons
		Diodo túnel ressonante
		Diodo RST
		Diodo IMPATT
		Diodo BARITT
Resistivos	Resistor	
	Contato ôhmico	
Capacitivos	Capacitor MOS	
	CCD's (Charge-coupled devices)	
Chaves de 2 terminais	MISS (Metal-Insulator-Semicond. Switch)	
	PDB (Planar-Doped-Barrier Switch)	
Transistores	Efeito de Campo	MOSFET
		JFET
		MESFET
		MODFET
		PBT
	Efeito de Potencial	BJT – Bipolar Junction Transistor
		HBT – Heterojunction Bipolar Trans.
		MBT – Metal Base Transistor
		RTBT – Resonant-Tunneling Bipolar
Memórias não voláteis	FAMOS	
	MNOS	
Tiristores	SCR – Silicon-Controlled Rectifier	
	IGBT – Insulated-Gate Bipolar Trans.	
	Transistor unijunção	
	SIThy – Static-Induction Thyristor	
Fontes de Luz	LED	
	Laser	
	VCSEL – Vertical-cavity surface emitting laser	
Fotodetetores	Fotocondutor	
	Fotodiodo p-i-n	
	Fotodiodo de barreira Schottky	
	CCIS – Charge-coupled image sensor	
	APD – Avalanche Photodiode	
	Fototransistor	
	MSM – metal-semicondutor-metal	
Dispositivos Ópticos Biestáveis	SEED – Self-electrooptic-effect device	
	Etalon bi-estável	
Outros Dispositivos Fotônicos	Célula solar	
	Modulador eletro-óptico	
Sensores	Termistor	
	Sensor Hall	
	Strain Gauge (piezoelétrico)	
	Transdutor Interdigital, tipo SAW	
	ISFET – Ion-sensitive FET	

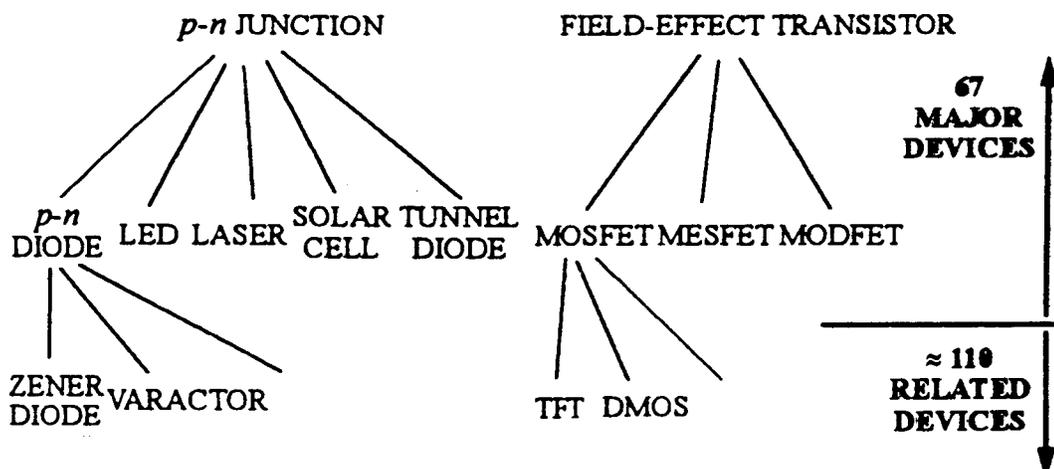


Fig. 4 Parte da árvore de dispositivos semicondutores

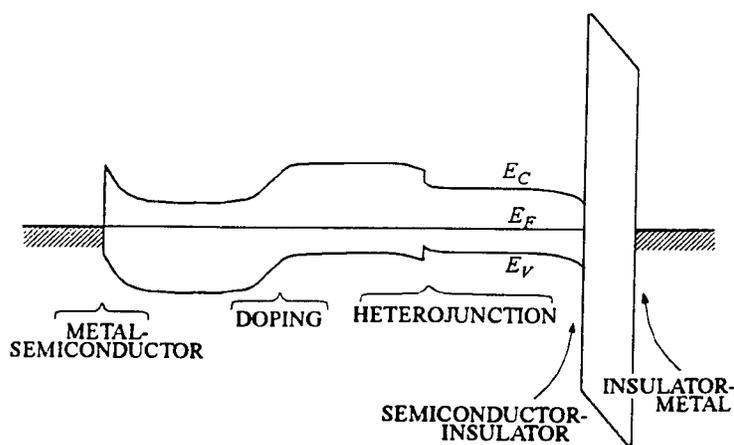


Fig. 5 Diagrama de bandas de energia, mostrando as interfaces dos 5 blocos construtivos básicos de dispositivos.

Este número grande de tipos dispositivos justifica-se pelas necessidades específicas nas diversas aplicações. Dentro dos circuitos integrados, no entanto, os dispositivos e tecnologias predominantes são as tecnologias MOSFET e BJT, como mostram os dados da Fig. 6. Estes dados são restritos ao período de 1974 a 1986. Desde aquela época, a mesma tendência de redução relativa da participação da tecnologia BJT e do aumento do uso da tecnologia MOSFET, em particular a CMOS, continuou. Atualmente, na virada do século 20 ao 21, mais de 85% do mercado de semicondutores corresponde à tecnologia CMOS.

A evolução da microeletrônica não se restringe ao desenvolvimento de novos dispositivos, apresentados acima, mas apresenta também outros aspectos tão importantes quanto. Estes outros aspectos incluem os seguintes:

- Uma redução contínua das dimensões mínimas, como indicado na Fig. 7. Esta evolução corresponde a uma redução com fator 2 a cada 6 anos. Esta evolução foi possível graças a avanços tecnológicos nos processos de fabricação em geral e em especial, nos processos de fotolitografia.
- Uma evolução na área máxima dos chips, como mostra a Fig. 8. Esta evolução corresponde a um aumento de fator 2 na área do chip a cada 4 anos. A área máxima dos chips está relacionada com a densidade de defeitos por unidade de área, que garanta um rendimento aceitável de produção. A evolução na qualidade dos processos de fabricação resulta numa redução gradual da densidade de defeitos e como consequência permite este aumento gradual da área dos chips.
- Uma evolução na eficiência de empacotamento, ou seja, do número de dispositivos por área de dimensão mínima da tecnologia. Esta evolução está quantificada na Fig. 9 e está relacionada a otimização do layout empregado e do uso de novas estruturas físicas dos dispositivos, isolamento e interconexões. No início, havia muito espaço de melhoria, resultando numa média de aumento de 21

vezes por década. Após os anos 70, houve uma redução na taxa de aumento da eficiência de empacotamento para 2.1 vezes por década.

- A combinação das 3 evoluções citadas acima, de redução nas dimensões mínimas, aumento da área dos chips e aumento na eficiência de empacotamento, levou a um aumento assombroso no número de dispositivos por chip, como mostra a Fig. 10. Associado a cada faixa de número de dispositivos por chip convencionou-se chamar o nível de integração pelas siglas: SSI (Small Scale Integration), MSI (Medium Scale Integration), LSI (Large Scale Integration), VLSI (Very Large Scale Integration), ULSI (Ultra-Large Scale Integration) e GSI (Giga Scale Integration). Atualmente, na virada do século, estamos entrando na era do GSI. O crescimento contínuo do número de dispositivos por chip é de aproximadamente um fator 2 a cada 18 meses, ao longo das últimas 3 a 4 décadas. Este crescimento é conhecido como a lei de Moore.
- Uma evolução contínua na redução do custo por transistor ou por bit de informação é mostrada na Fig. 11a. Esta redução de custo tem levado a um enorme crescimento do uso de eletrônica, com um crescimento médio anual de 16% no mercado de semicondutores ao longo das últimas décadas. Ressaltamos que nenhum outro setor econômico teve tal crescimento na história da humanidade. A Fig. 11b mostra o aumento contínuo do número de bits de DRAM produzidos.

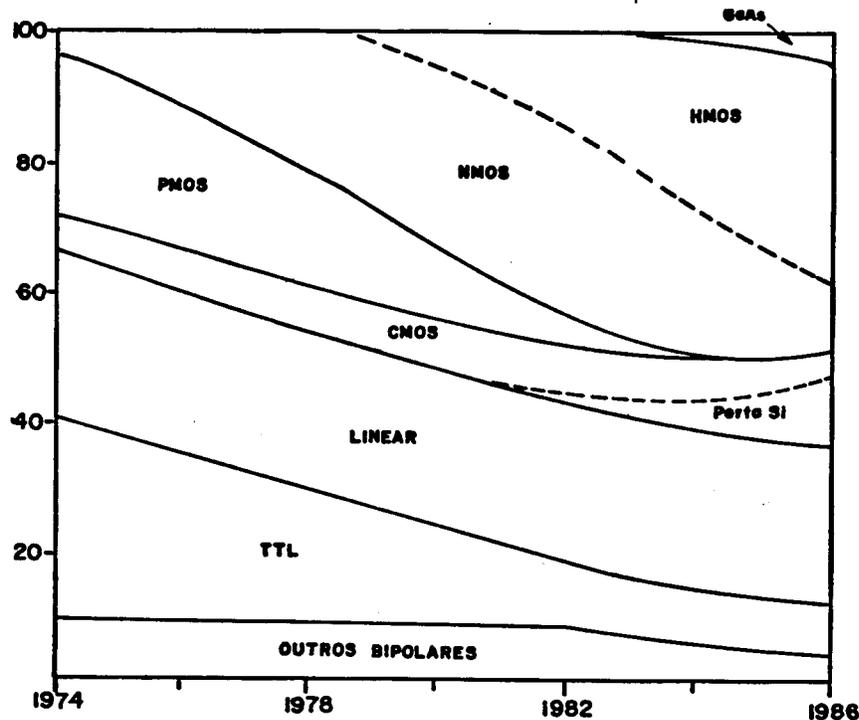


Fig. 6 Evolução da participação das diversas tecnologias do mercado de semicondutores, no período de 1974 a 1986.

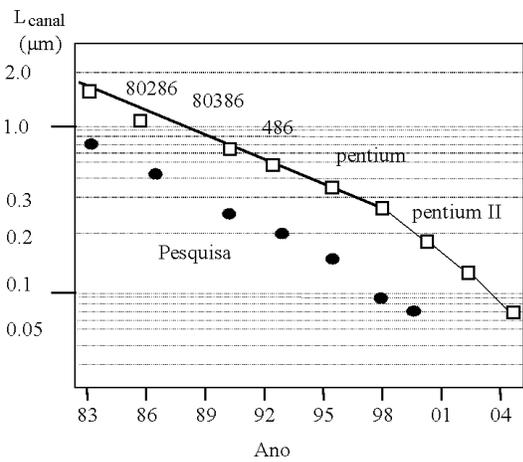
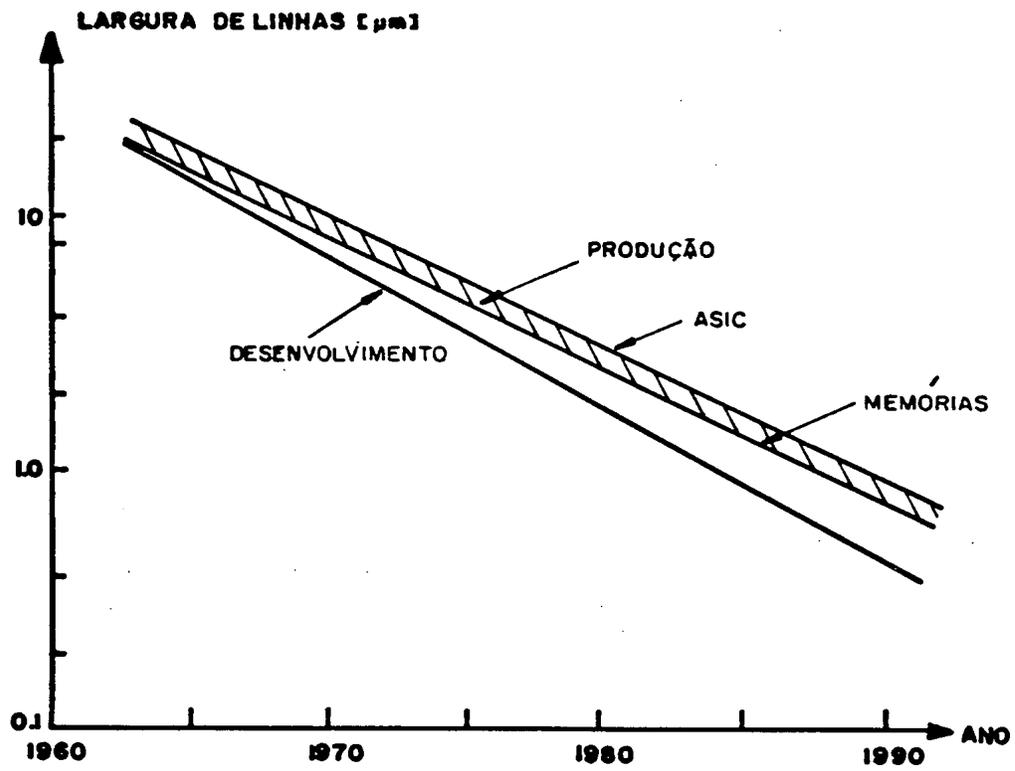


Fig. 7 Evolução nas dimensões mínimas empregadas nas estruturas em CI's.

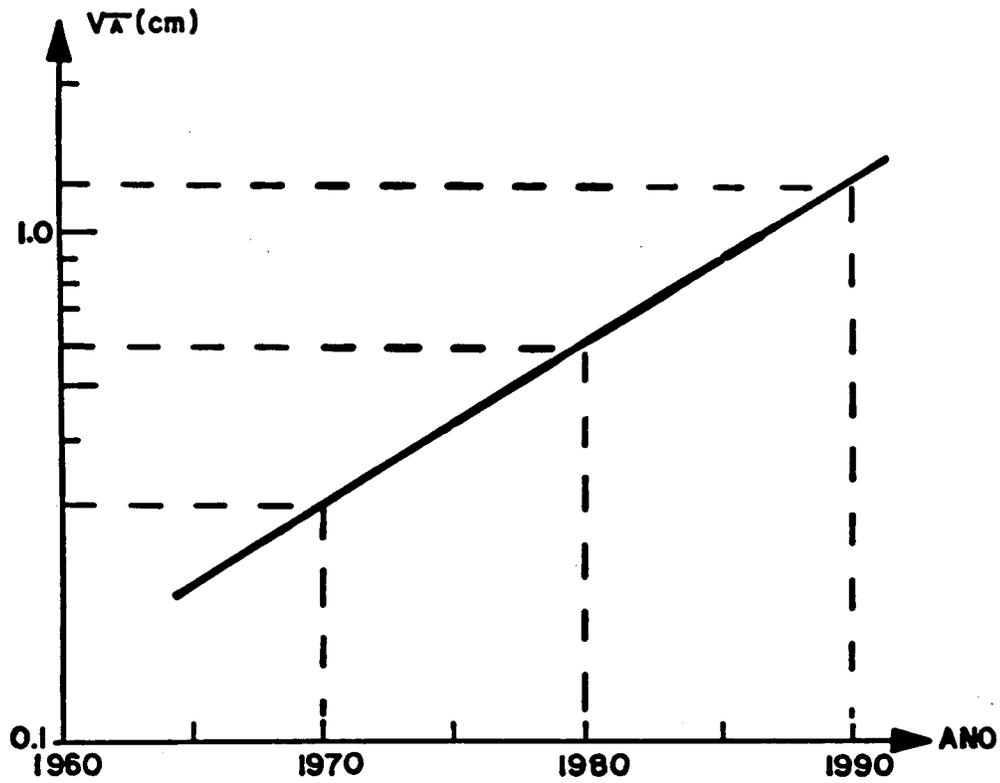


Fig. 8 Evolução da área máxima de chips.

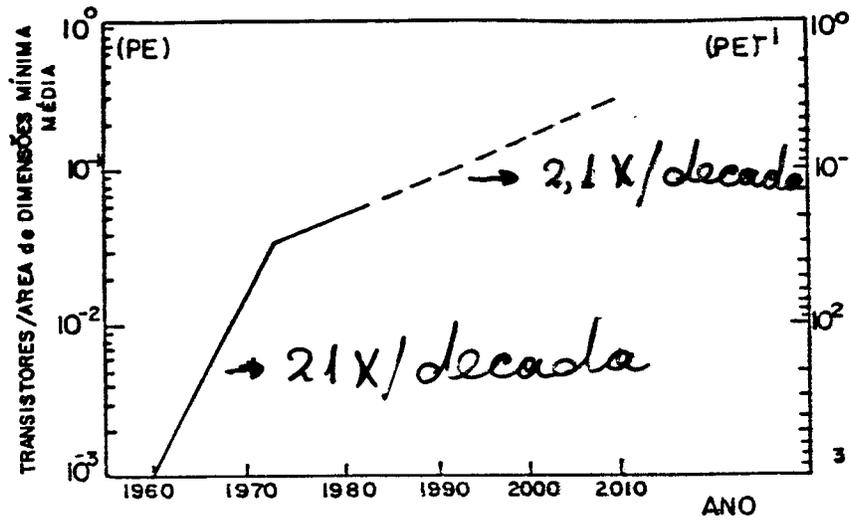


Fig. 9 Evolução na eficiência de empacotamento

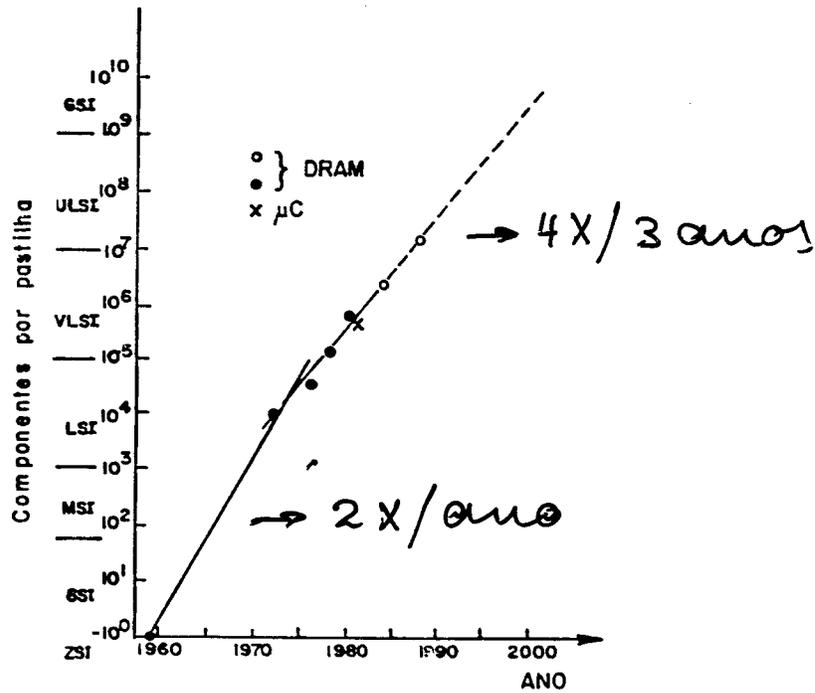


Fig. 10 Evolução do número de dispositivos por chip (nível de integração).

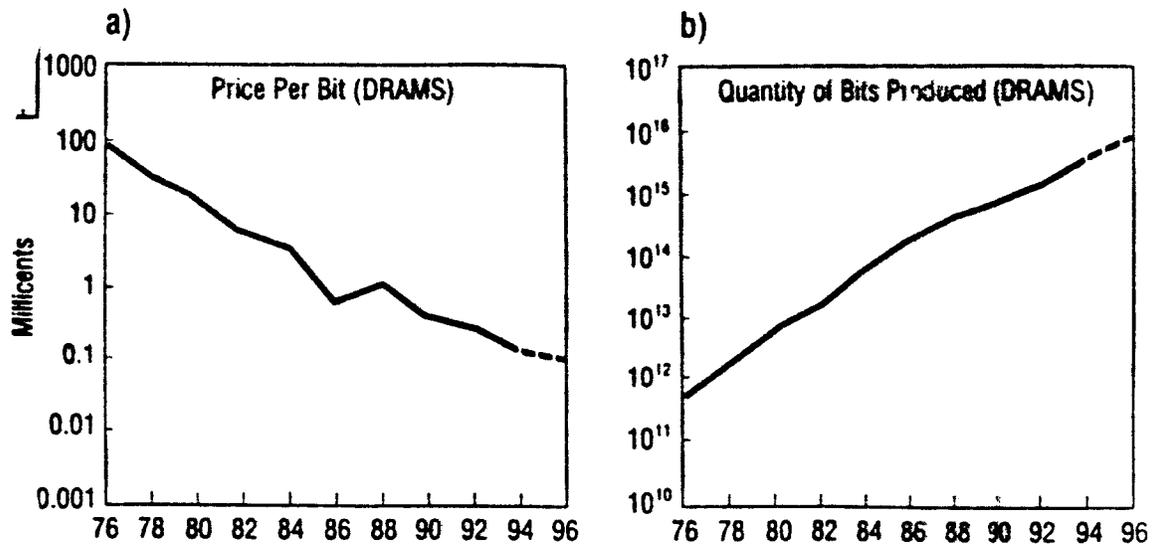


Fig. 11 a) Evolução na redução do custo de bit de memória (DRAM) e b) evolução da quantidade de bits de memória (DRAM) produzidos por ano.

É relativamente difícil imaginar o significado das dimensões mínimas e números apresentados acima. Para melhor compreendê-los, considere as seguintes comparações:

- Na Fig. 12 mostramos uma fotografia de microscópio eletrônico de um fio de cabelo sobre uma estrutura de memória DRAM de 4 Mbit, correspondente a uma tecnologia (já ultrapassada) de 1986, com dimensões mínimas de aproximadamente 1 μm .
- Ao invés de fabricar estruturas de dispositivos, poderíamos usar a mesma tecnologia para desenhar um mapa. Logicamente ninguém consegue fazer um negócio rentável com tal produto, já que não é nada prático usar tal mapa, seria necessário o uso de microscópio, e atualmente, microscópio eletrônico. Na Fig. 13 apresentamos uma seqüência de mapas que poderiam ser desenhados em chips com as diversas fases tecnológicas. Ou seja, atualmente (~2000) poderíamos desenhar um mapa da América do Sul num chip, contendo todas as ruas, rios e estradas, em escala.

- c) Atualmente (~2000), o número de transistores produzidos anualmente no mundo é da ordem de 10^{17} . Este número corresponde a aproximadamente o número de formigas existente no mundo e a 10 vezes o número de grãos de cereais produzidos no mundo por ano.

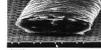


Fig. 12 Fotografia tirada por microscópio eletrônico de um fio de cabelo sobre um chip de memória DRAM inacabada e de tecnologia do ano de 1986, ilustrando estruturas gravadas de largura de $2\ \mu\text{m}$.

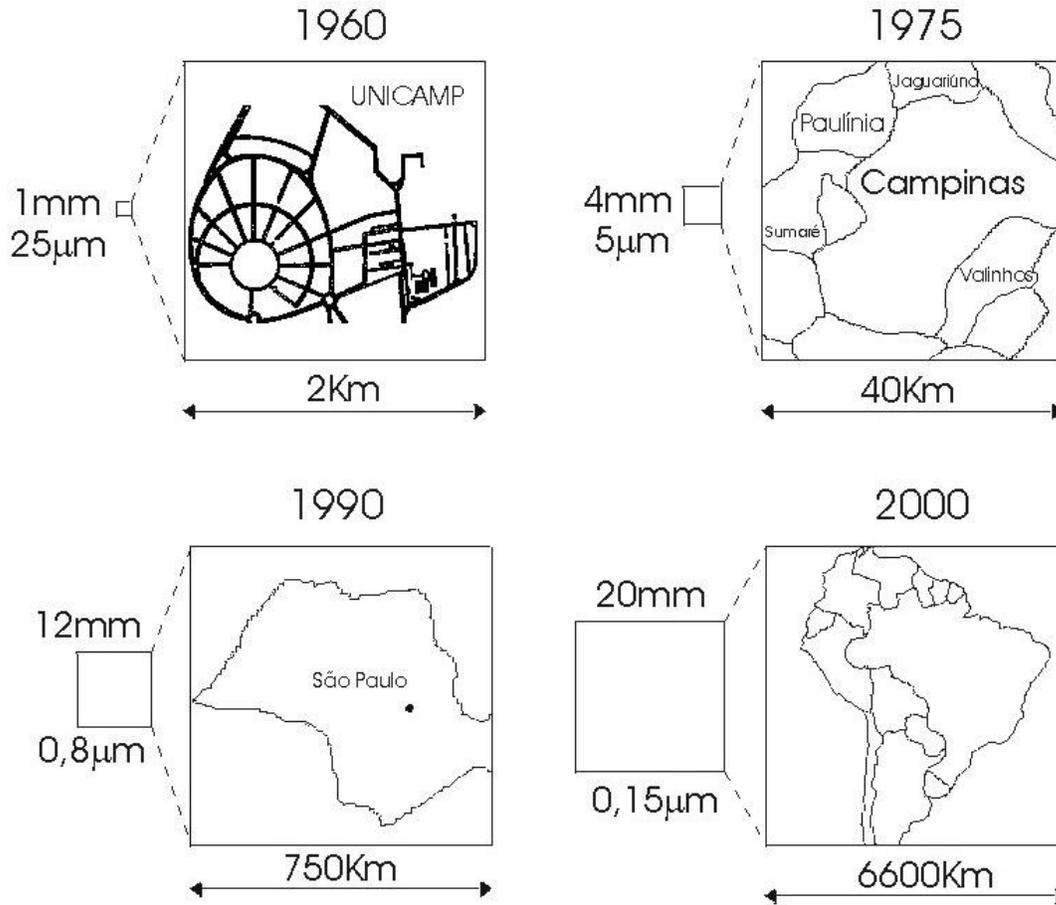


Fig. 13 Ilustração de mapas desenhados, contendo detalhes de todas as ruas, em áreas de chips nas diversas fases tecnológicas.

Os números e analogias apresentados mostram que a microeletrônica cresceu desproporcionalmente em relação a outras áreas tecnológicas, representando uma área fascinante de engenharia. Mais e mais caminhamos para sistemas completos em um único chip. Isto significa que o projeto em eletrônica resumir-se-á ao projeto do chip. Uma pergunta natural seria, quais são as forças propulsoras para tão rápido avanço tecnológico, ou ainda, para que complicar tanto? A força propulsora fundamental é o capital, ou seja, o mercado. Mas o desenvolvimento não agrada apenas o dono do capital, mas também os engenheiros e cientistas que trabalham nos desafios de conseguir sempre um produto melhor ou uma nova invenção. Portanto, a evolução tem procurado soluções que resultem em produtos melhores e mais baratos ou mais rentáveis. No caso, a evolução da microeletrônica como apresentada inclui os seguintes aspectos:

- Maior densidade de integração. Considerando uma mesma função, isto resulta em maior número de chips por lâmina e aumento do rendimento (supondo uma densidade fixa de defeitos). Portanto, isto resulta em ganho econômico.
- Maior velocidade de operação. Com dimensões menores têm-se menores capacitâncias, o que resulta em menores tempos de chaveamento das portas, melhorando, portanto, o desempenho do CI. Os dados de tempos de atrasos por porta e por linha de interconexão estão mostrados na Fig. 14, simulados para interconexões de linhas de Al e linhas de Cu, envoltos por filmes dielétricos de SiO_2 e de material de baixa constante dielétrica, respectivamente.

- Menor consumo de potência. Novamente, devido às menores dimensões e menores capacitâncias, bem como devido à menor tensão de alimentação, a energia associada na mudança da tensão em cada nó do circuito será menor, e como consequência, teremos um menor consumo de potência.
- Menor número de chips por sistema. Considerando agora chips mais complexos, com mais funções integradas, poderemos fabricar sistemas com menor número de chips, e no limite, com um único chip. Este fato traz como vantagem, menor número de conexões entre chips. Isto por sua vez resulta em aumento da confiabilidade do sistema, uma redução do seu tamanho e uma redução do custo de montagem do mesmo.

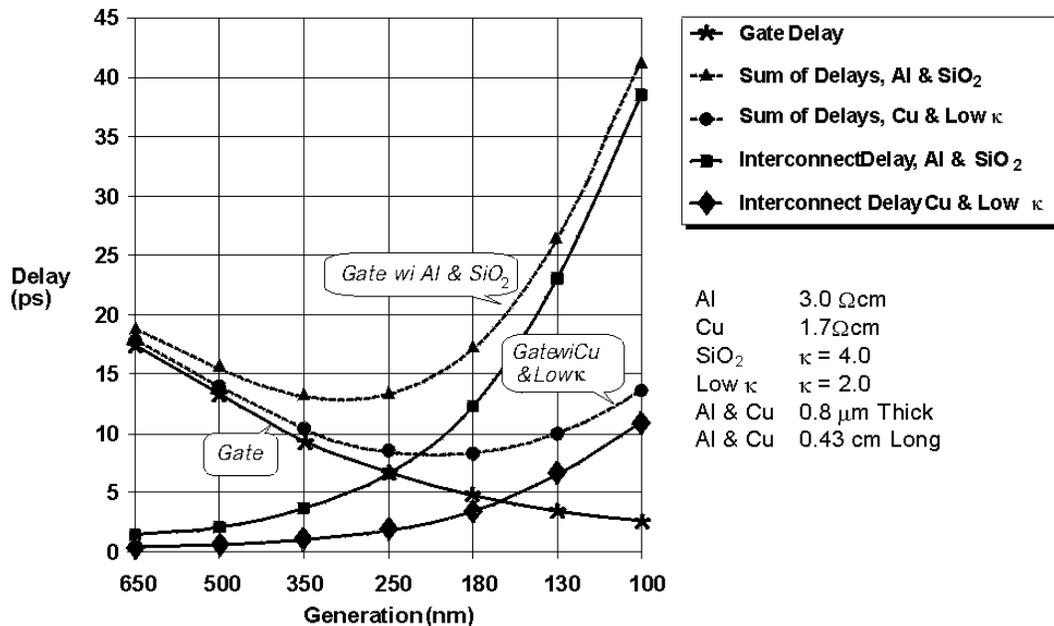


Fig. 14 Tempos de atrasos de propagação de sinal através de portas e de linhas de interconexões, considerando linhas de Al e de Cu e dois tipos de dielétricos (SiO₂ e outro de baixa constante dielétrica).

A evolução obtida até este ponto, bem como a que está por vir, é resultado de um esforço muito grande de muitas pessoas, empresas e instituições de ensino e pesquisa. Nenhuma empresa sozinha, nenhum país sozinho, poderia ter trilhado tão rapidamente este caminho. Os países avançados e suas empresas têm consciência deste fato, que se torna mais necessário ainda para o futuro. Os avanços futuros necessitam de recursos mais volumosos ainda e portanto de ações conjuntas de pesquisa e desenvolvimento. Com o intuito de guiar este trabalho de desenvolvimento, a SIA (Semiconductor Industry Association) do USA, elabora um relatório trienal, onde ela propõe um mapa de estrada para o futuro (The National Technology Roadmap for Semiconductors). Na tabela 2 apresentamos alguns dados do relatório publicado em 1997²³. Assim, prevê-se uma evolução gradual até pelo menos dimensões mínimas de 50 nm (ano 2012). Dados mais recentes encontram-se nas referências 24 e 25, indicando a previsão de dimensão mínima de 35 nm e nível de integração acima de 10¹¹ dispositivos por chip em 2014. A partir deste ponto, provavelmente as várias limitações, físicas e tecnológicas, impedem a realização de transistores com comprimento de canal muito menor que 25 nm. Portanto, novos conceitos físicos devem ser usados para inventar dispositivos alternativos aos dos tradicionais MOSFET e bipolares. Entre estes já existem os dispositivos de bloqueio Coulombiano, entre outros dispositivos de um único elétron. São propostos também os dispositivos quânticos, onde se controla o estado do elétron de um átomo (hidrogênio, por exemplo). Estruturas de nano-tubos de carbono é outra idéia proposta. São tubos de 1.4 nm de diâmetro e de 10 μm de comprimento que constituem canais de corrente e que permitem realizar circuitos tipo moleculares. Chaveamento a frequência de 10 THz é previsto. Certamente não chegamos no final do túnel da evolução.

Tabela 2 Dados de previsão de evolução extraídos do relatório da SIA de 1997.

Dado\Ano	1997	1999	2001	2003	2006	2009	2012
L_{MIN} (nm)	250	180	150	130	100	70	50
DRAM (bits)	256M	1G	-	4G	16G	64G	256G
Área chip DRAM (mm ²)	280	400	480	560	790	1120	1580
Diâmetro / lâmina (mm)	200	300	300	300	300	450	450
Níveis de metal (lógica)	6	6-7	7	7	7-8	8-9	9
Compr. metal (lógica) (m)	820	1480	2160	2840	5140	10000	24000
V_{DD} (V)	2.5	1.8	1.5	1.5	1.2	0.9	0.6
F_{MAX} de relógio (MHz)	750	1250	1500	2100	3500	6000	10000
Número máscaras	22	23	23	24	25	26	28
Defeitos (m ⁻²) ¹	2080	1455	1310	1040	735	520	370
Custo/bit DRAM inicial (μc)	120	60	30	15	5.3	1.9	0.66

Nota: ¹ para rendimento inicial de 60% e memória DRAM.

3. História da Microeletrônica no Brasil

Desde a década de 50, as universidades brasileiras (ITA a partir de 1953, IFUSP a partir do início dos anos 60, seguido por muitos outros)⁶ tiveram atividades de pesquisa em semicondutores e dispositivos, ou seja, sempre acompanhamos de perto o desenvolvimento da área e inclusive, o país contribuiu de alguma forma com o desenvolvimento da mesma.

Já bem no início da história dos dispositivos semicondutores, em meados dos anos 60, a Philco instala fábrica de diodos e transistores em São Paulo. Ou seja, apenas 10 anos após a liberação e disseminação da tecnologia pela Bell Labs, o Brasil iniciou atividades industriais de microeletrônica. Esta atividade contribuiu com a motivação para se montar um laboratório de microeletrônica, LME, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por iniciativa de um grupo de professores (J. A. Zuffo, C. I. Z. Mammana, R. Marconato, A. Ferreira), em 1968, estando operacional em 1970. A coordenação do laboratório ficou a cargo do Prof. Carlos Américo Morato, e não podemos omitir a grande colaboração do professor visitante, Dr. R. Anderson, do USA. Este laboratório pioneiro foi responsável pelo desenvolvimento de várias tecnologias de microeletrônica, pela formação de um número considerável de profissionais na área e por várias iniciativas tipo "spin-off", algumas industriais e outras acadêmicas.

Marcos de desenvolvimento tecnológico ocorridos no LME incluem entre outros:

- Desenvolvimento de tecnologia de diodos e transistores bipolares, com transferência desta tecnologia para a empresa Transit, em Montes Claros, MG, em 1974.
- Desenvolvimento do primeiro circuito integrado no país, em 1971, com lógica ECL (Dr. J. A. Zuffo).
- Desenvolvimento de tecnologia de transistores nMOS em 1973, incluindo o projeto e construção do primeiro CI com tecnologia MOS na América Latina (Dr. Edgar Charry Rodriguez)⁷.
- Projeto e fabricação de memórias tipo ROM com a tecnologia nMOS com capacidade de 512 e 2k bits em 1975 e 1978 respectivamente (Fig. 15). Estes circuitos podem ser considerados os primeiros circuitos integrados em nível MSI (Medium Scale Integration) e LSI (Large Scale Integration) respectivamente, no país. A primeira memória SRAM também foi realizada com a mesma tecnologia em 1978⁸.
- Desenvolvimento de um implantador de íons (Dr. Joel Pereira de Souza)⁹.
- Desenvolvimento de tecnologias nMOS com carga tipo depleção e porta metálica e porta de si-poli, em 1978 e 1987 respectivamente^{10,11}.
- Desenvolvimento de tecnologias CMOS com porta metálica e porta de si-poli em duas versões, em 1979, 1987 e 1988 respectivamente¹²⁻¹⁴.
- Desenvolvimento de tecnologia CCD com canal enterrado e portas de si-poli, em 1981¹⁵ (Fig. 16).
- Desenvolvimento de tecnologia de circuitos híbridos de filme fino para aplicações de microondas, sob coordenação do Prof. J. K. Pinto.

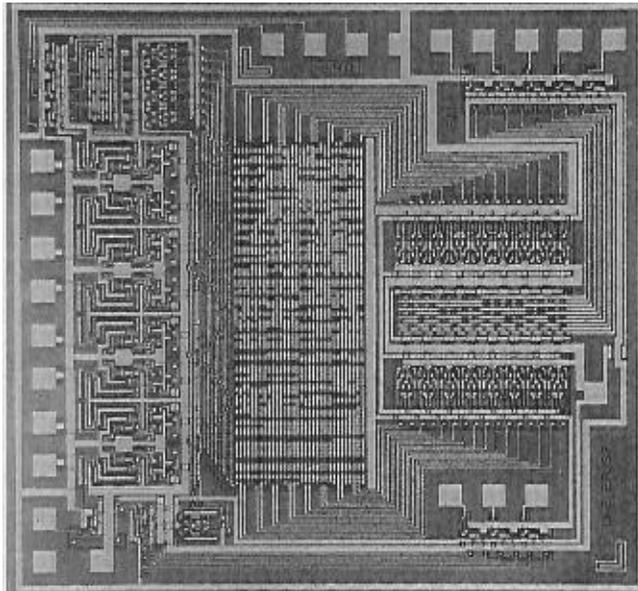


Fig. 15 Fotografia ampliada do chip de memória ROM de 2k bit, desenvolvido no LME/EPUSP em 1978 (E. Charry R, J. P. de Souza e J. W. Swart).

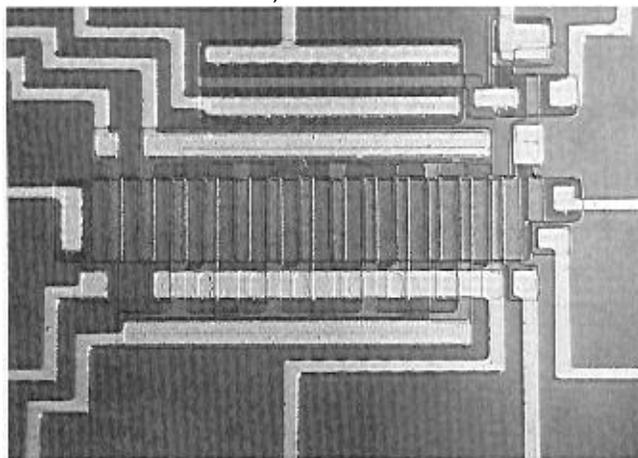


Fig. 16 Fotografia ampliada do dispositivo CCD desenvolvido no LME/EPUSP em 1981 (J. W. Swart).

Em 1974, o Prof. Carlos I. Z. Mammana deixa o LME da EPUSP e dá início à montagem de um novo laboratório de microeletrônica, chamado LED (Laboratório de Eletrônica e Dispositivos) na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Vale lembrar a grande contribuição dada pelo Prof. Yukio à montagem do LED. Este laboratório teve como ênfase inicial o desenvolvimento de equipamentos de microeletrônica, incluindo: fornos térmicos, sistemas CVD, sistema de corrosão por plasma, implantador de íons, fotorepetidora, entre outros. Além dos equipamentos, este laboratório também procurou desenvolver tecnologias nMOS e bipolares (lógica I2L). O LED também teve uma atividade de desenvolvimento de tecnologia de fabricação de diodos para transferência industrial, no caso para empresa Ober, no período de final dos anos 80. Este laboratório passou por algumas reestruturações, sendo atualmente transformado no Centro de Componentes Semicondutores, diretamente ligado à reitoria da universidade, ou seja, administrativamente independente de unidade de ensino. Suas atividades atuais concentram-se em pesquisas relacionadas a tecnologias CMOS e micros sensores, além de oferecer cursos de laboratório de microfabricação.

Em 1975, o Prof. João Antônio Zuffo criou um novo laboratório na EPUSP, chamado LSI (Laboratório de Sistemas Integrados). Este laboratório, com espectro de atuação mais amplo que apenas microeletrônica, deu ênfase inicialmente à pesquisa em etapas de processos de microeletrônica, tendo como um dos gestores, o incansável e grande entusiasta, o Prof. Armando A. M. Laganã. O grupo realizou pesquisa de alto nível nas atividades de obtenção e caracterização de silicetos, processos de plasma para deposição de filmes finos e de corrosão, processos de limpeza e de oxidação de Si. Em seguida, o grupo concentrou esforços no desenvolvimento de micro-sensores de Si.

Em 1981, o Prof. Joel Pereira de Souza deixou o LME da EPUSP e iniciou a construção de um Laboratório de Microeletrônica no Instituto de Física da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Este

laboratório adquiriu alguns e construiu outros equipamentos básicos de microeletrônica. Este laboratório prima por suas atividades em pesquisa na técnica e aplicações de implantação de íons, tendo dado grandes contribuições em publicações, patentes e formação de recursos humanos neste tema. Adicionalmente, o grupo recentemente resgatou conhecimentos anteriores e re-implantou a tecnologia nMOS porta metálica carga tipo depleção no seu laboratório, demonstrando a fabricação de um circuito integrado tipo matriz de chaveamento de 4 entradas x 4 saídas.

Em meados dos anos 80, um novo laboratório foi implantado no Instituto de Física da Universidade Federal de Pernambuco, sob responsabilidade do Prof. Eronides da Silva. Este laboratório também possui os equipamentos básicos para microeletrônica e tem sua ênfase de pesquisa centrada em pesquisa de dielétricos de porta MOS.

Os 5 grupos acima constituem os grupos universitários com instalações completas de microeletrônica de Si. Além destes, existem grupos que atuam em temas específicos associados a processos de microeletrônica. Como exemplo temos o grupo de Engenharia Elétrica da UnB, Brasília, Prof. José Camargo, e o grupo do Departamento de Física do ITA, Prof. Homero Maciel, com atividades em processos de plasma.

Embora o Si seja o semicondutor mais usado comercialmente, ocupando da ordem de 98% do mercado de semicondutores, semicondutores compostos tipo III-V são necessários para nichos de aplicações. Pesquisas sobre estes semicondutores vem sendo feitas essencialmente em institutos de física de diversas universidades, vários dos quais equipados com modernas e caras máquinas de crescimento epitaxial de camadas, tipo MBE, CBE ou OMVPE. Entre estes grupos citamos:

- LPD do IFGW da UNICAMP, em Campinas.
- IF da USP em São Paulo.
- IFQ da USP em São Carlos
- IF da PUC-RJ em Rio de Janeiro.
- IF da UFMG em Belo Horizonte.

Entre estes 5 grupos, o LPD apresenta maior tradição no desenvolvimento de dispositivos semicondutores, incluindo Lasers e transistores (MESFET, HEMT e HBT). Este grupo, inicialmente sob liderança do Prof. J. E. Ripper, introduziu e desenvolveu tecnologia de fabricação de Laser semicondutor, já a partir do início da década de 70¹⁶. Esta tecnologia foi posteriormente transferida para o CPqD da Telebrás.

Além dos grupos universitários, temos um número menor de institutos de pesquisa, que no entanto receberam investimentos mais volumosos para instalação de laboratórios avançados. Entre estes citamos o CPqD, ITI, LNLS e INPE.

O CPqD foi criado em meados dos anos 70, com objetivos de P&D bem amplos em telecomunicações. Na área de microeletrônica ele nunca se dedicou à tecnologia de fabricação de CI's de Si, concentrando-se nas seguintes áreas:

- Tecnologias de filmes espessos para CI's híbridos
- Tecnologias de filmes finos para CI's híbridos
- Tecnologia tipo SAW
- Tecnologias de Lasers semicondutores.
- Projeto de CI's de Si e de GaAs.

Estas atividades foram, no entanto, todas descontinuadas, sobretudo após a privatização do sistema Telebrás, ao final dos anos 90. Esta descontinuidade de atividades de microeletrônica e optoeletrônica no CPqD representa uma grande perda do investimento, sobretudo em pessoal, feito ao longo de duas décadas, dado que o pessoal foi todo redirecionado para outras atividades.

O ITI foi criado no início dos anos 80, com o intuito de realizar atividades de P&D em tecnologias de CI's de Si, entre outras atividades. Este objetivo inicial não foi completamente concretizado ao longo de sua trajetória, tendo suas atividades de microeletrônica sido restritas a:

- Linha piloto de encapsulamento de CI's
- Linha de testes, confiabilidade e análise de falhas.
- Linha de fabricação de máscaras.
- Linha de prototipagem rápida de interconexão para circuitos tipo "gate array".
- Projeto de CI's de Si.
- Tecnologia tipo SAW

O LNLS foi criado em janeiro de 1987, sob coordenação do Prof. Cylon Gonçalves da Silva, em Campinas. Este laboratório projetou e construiu um sistema de anel de elétrons para produzir feixes de luz síncrotron, ou seja, radiação eletromagnética com frequência variando desde infravermelho até raios X moles. Esta fonte de luz vem sendo utilizada, essencialmente para a análise de materiais, bem como para a fabricação de microestruturas por litografia profunda de raio X, para microssensores e

micromecânica. O LNLS inclusive oferece um serviço de prototipagem de microestruturas por programa tipo PMU, chamado de programa MUSA.

INPE de São José dos Campos é o centro mais antigo dos citados aqui. Ele foi criado já em 1961. O INPE realiza atividades amplas na área de ciências espaciais, o que inclui algumas atividades de microeletrônica, tais como P&D em células solares e sensores. O INPE possui algumas das instalações necessárias para estas atividades, inclusive um sistema MBE para crescimento de semicondutores do tipo IV-VI, e vem interagindo com os outros grupos para complementar as instalações que lhe faltam.

Até aqui descrevemos as iniciativas acadêmicas e de desenvolvimento na área de tecnologias de fabricação de microeletrônica. Estas atividades não fazem muito sentido, se não forem acompanhadas por uma correspondente aplicação industrial. As duas áreas, acadêmica e industrial devem andar concomitantemente, já que as duas são mutuamente dependentes, com demandas complementares. Analisaremos abaixo os vários empreendimentos industriais de microeletrônica no país¹⁷⁻¹⁸.

Como já citamos acima, a Philco iniciou uma fábrica de diodos e transistores em São Paulo, SP, em 1966. Mais tarde, em meados dos anos 70, esta fábrica foi transferida para Contagem, MG, agora em parceria com a RCA. A fábrica, modernizada e ampliada, implantou também processos de fabricação de CI's lineares com tecnologia bipolar e dimensões mínimas de aproximadamente 6 µm. No entanto, no ano 84 aproximadamente, a fábrica foi fechada e colocada a venda. O grupo SID/Sharp, com participação do banco Bradesco, interessou-se pela aquisição da mesma e assim criou a SID Microeletrônica, que até hoje é dona dela. Porém, em meados de 1996 ela decidiu por descontinuar as operações de difusão de componentes semicondutores, mantendo apenas as atividades de montagem e encapsulamento, sendo esta também descontinuada em 2000.

Uma Segunda iniciativa industrial foi o caso da Transit. Esta empresa foi criada a partir de 1974 e montou sua fábrica em Montes Claros, MG. Ela iniciou a produção de diodos e transistores bipolares em 1976, baseado em tecnologia desenvolvida no LME da EPUSP e visando o mercado de entretenimento. Em 1978 ela adquiriu uma tecnologia da SGS-Ates, da Itália, para a fabricação de componentes para o mercado profissional. Devido a vários erros ocorridos na implementação desta fábrica, ela não conseguiu sobreviver por muitos anos, tendo sido fechada ainda no final dos anos 70.

Tivemos duas empresas internacionais, a Icotron, do grupo Siemens, com fábrica em Gravataí, RS, e a Semicron, com fábrica em Cotia, SP, que tinham uma linha completa de difusão de diodos e tiristores de potência. Atualmente a Semicron continua com sua linha completa de fabricação destes dispositivos. A Icotron doou seus equipamentos de difusão para a UFRGS em 1998. Uma terceira empresa, também atuando na produção destes componentes é a AEGIS, que foi criado em 1982 por dois ex-pesquisadores do LME da EPUSP e do LED da UNICAMP. Um deles, Wanderley Marzano, continua dirigindo esta empresa, que heroicamente se manteve, sobrevivendo a todas as crises políticas e econômicas que o país atravessou nestes últimos 20 anos. Esta empresa é um exemplo vivo da existência de oportunidades de microeletrônica em nichos de mercados, mesmo para empresas de pequeno e médio porte.

A Itautec possui uma fábrica de encapsulamento de circuitos integrados, sobretudo tipo memórias, em Jundiaí, SP.

Outras empresas tiveram fábricas de montagem e encapsulamento de componentes semicondutores no país. Entre estas citamos a Texas Instruments, Fairchild, Philips, Sanyo e Rhom. Estas empresas no entanto fecharam suas operações de produção de componentes semicondutores no início da década de 90 com a ampla e súbita abertura do nosso mercado.

Duas empresas atuaram na área de componentes optoeletrônicos. A ASA Microeletrônica realizava montagem e encapsulamento de diodos tipo LED, com fábrica em São Paulo, SP. Esta fábrica foi fechada recentemente (meados dos anos 90). A outra empresa é a ASGA Microeletrônica, que monta receptores ópticos e emissores a Laser, para a área de comunicações ópticas, com fábrica localizada em Paulínia, SP, inaugurada no início dos anos 90.

Por fim temos a empresa Heliodinâmica, com fábrica em Vargem Grande Paulista, SP, que produz tarugos de Si monocristalinos de até 8" de diâmetro, lâminas de Si monocristalino e/ou semicristalino, além de células solares fotovoltaicas de Si, módulos e sistemas fotovoltaicos para diversas aplicações. Heliodinâmica foi criada em 1980 e atende o mercado local bem como internacional.

Observamos dos dados acima, que tivemos atividades de microeletrônica desde a década de 60 e que havia um bom estágio de desenvolvimento tecnológico na 2ª metade dos anos 70. Inclusive, podemos afirmar que na época, este estágio era superior aos dos países hoje chamados de Tigres Asiáticos. Durante as duas décadas de 80 e 90, a área passou por um estágio de estagnação, constituindo um paradoxo para a retórica da política de reserva de mercado de informática. Investiu-se recursos volumosos numa fábrica de máscaras enquanto que as indústrias clientes não se instalaram, como havia sido planejado. Hoje o país apresenta um déficit comercial superior a vários bilhões de dólares anuais em componentes eletrônicos (relatório setorial no. 1, 1999, do BNDES). Instalação de

uma ou mais fábricas de CI's é uma necessidade real para equilibrar a balança comercial e promover o desenvolvimento econômico do país.

Um requisito necessário para a instalação de uma fábrica de CI's e para o desenvolvimento de novos produtos inteligentes para as diversas aplicações, é a capacidade de projetar os CI's. A atividade de projeto de CI's requer um investimento muito menor em instalações, porém requer um grande número de profissionais com experiência no tema. Vários grupos no país atuam nesta área. A seguir apresentamos uma lista (não completa) de grupos universitários, institutos e empresas com atuação na área.

- a) Universidades:
- UFRGS, Porto Alegre, RS
 - UFSC, Florianópolis, SC
 - LAC/COPEL, Curitiba, PR
 - FEEC/UNICAMP, Campinas, SP
 - EPUSP, São Paulo, SP
 - EESC/USP, São Carlos, SP
 - FEG/UNESP, Guaratinguetá, SP
 - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ
- DCC/UFMG, Belo Horizonte, MG
 - DEE/EFEI, Itajubá, MG
 - DEE/UnB, Brasília, DF
 - UFPB, Campina Grande, PB
- b) Centros de P&D:
- CTI, Campinas, SP
- c) Empresas:
- Motorola, Campinas, SP
 - Idea, Campinas, SP

Comparado à área de tecnologias de fabricação, o país teve um desenvolvimento mais intenso na área de projeto de CI's durante estas duas últimas décadas. Esta atividade foi estimulada pela disponibilidade de programas internacionais de fabricação de protótipos tipo MPC (Multi Project Chip) ou PMU (Projeto Multi Usuário). Durante os últimos 15 anos o CTI organizou um programa similar brasileiro e durante os 6 últimos anos, a FAPESP financiou a fabricação de 80 chips no exterior, para grupos do estado de São Paulo, para usarem diretamente os programas internacionais (CMP da França, Europractice da UEE, Iberchip da Espanha, MOSIS do USA). O desenvolvimento geral da eletrônica requer o uso de CI's de aplicação específica em grande escala. Assim, necessitamos ampliar ainda muito mais esta atividade e estimular as empresas a conhecer e adotar esta solução.

Para o desenvolvimento de Microssistemas completos necessita-se tanto da disponibilidade das técnicas de microfabricação como da capacitação em projeto de CI's, já que os microssistemas são compostos por chips contento o sensor ou atuador, co-integrados com o circuito de controle e/ou processamento do sinal.

Nota: esta revisão da história da microeletrônica no país certamente não está completa, poderá ter alguns erros e deverá ser revisada para novas edições. Ficaremos muito gratos em receber informações com dados históricos e/ou sugestões.

4. Introdução a Microssistemas^{19-22, 26}

Microssistemas, também chamado de IMEMS (Integrated MicroElectroMechanical Systems) refere-se ao universo de sistemas microeletrônicos com interface ao mundo não eletrônico. Ou seja, ela inclui circuitos integrados com microssensores e microatuadores, possivelmente, no mesmo chip. Outros nomes comuns são MEMS e MOEMS (MicroElectroMechanical Systems e MicroOpticalElectroMechanical Systems, respectivamente). Estes dois nomes, no entanto, apresentam uma limitação por não incluírem o efeito químico presente em alguns dispositivos. Desta forma, o nome microssistema teria um significado mais amplo, embora todos os nomes sejam usados como sinônimos indistintamente. Os microssistemas apresentam uma importância crescente em diversas aplicações em várias áreas, entre os quais temos: saúde, transporte, indústria de manufatura automatizada, monitoramento ambiental, agricultura, defesa e consumo. O desenvolvimento de microssistemas gera novas aplicações para CI's, resultando num crescimento adicional deste enorme mercado.

O sensor é um dispositivo que converte um estímulo físico-químico num outro sinal, normalmente elétrico. O atuador executa a função inversa. O sensor e atuador também são chamados de transdutores. O estímulo ou a energia físico-química pode ser do tipo: calor, luz, som, pressão, magnetismo, movimento mecânico, potencial químico, pH, entre outros. Sensores e atuadores não são novos e inicialmente eram feitos por outras técnicas que não eram de microfabricação. Com a disponibilidade do processo planar para microfabricação, desenvolvido para microeletrônica, o passo natural foi empregar os mesmos conceitos tecnológicos para a fabricação de microssensores e microatuadores. A grande motivação para este procedimento é o baixo custo para produzi-los, comparado às técnicas anteriores. Numa mesma lâmina de Si pode se produzir centenas ou mesmo milhares de microssensores. A dimensão de microssensores pode variar de fração de μm até da ordem de mm, como é ilustrado na Fig. 17.

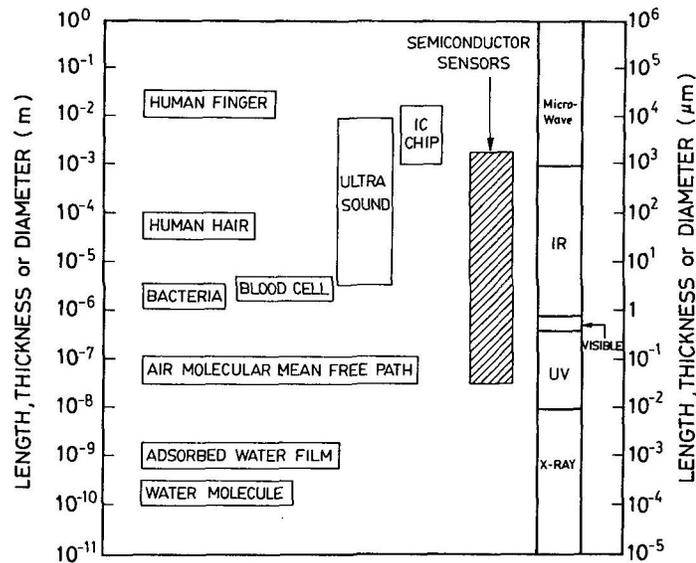


Fig. 17 Escala comparativa das dimensões de microssores.

Os sensores e atuadores convertem os seguintes tipos de sinais ou energias:

1. Químico
2. Elétrico
3. Magnético
4. Mecânico
5. Radiante
6. Térmico

A Fig. 18 ilustra um sistema genérico. O sensor realiza a primeira conversão de sinal para um sinal elétrico. Este é processado, condicionado ou modificado por um circuito eletrônico, para em seguida eventualmente ser re-convertido em outra forma de energia pelo atuador. Os processos de conversão de energia são classificados como:

1. Biológicos:
 - Transformação bioquímica
 - Transformação física
 - Efeitos sobre organismos de teste
 - Espectroscopia
 - Outros
2. Físicos:
 - Termoelétrico
 - Fotoelétrico
 - Fotomagnético
 - Magnetoelétrico
 - Elastomagnético
 - Termoelástico
3. Químicos:
 - Elastoelétrico
 - Termomagnético
 - Termoóptico
 - Fotoelástico
 - Outros

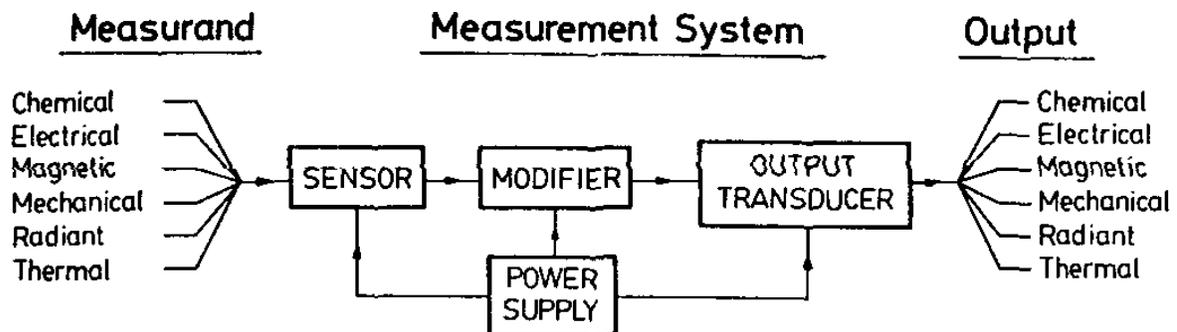


Fig. 18 Representação esquemática de um microsistema genérico.

Os sensores e atuadores devem ser projetados e caracterizados quanto aos seguintes aspectos gerais, que se aplicam aos mais diversos tipos de dispositivos:

- Condições ambientais permitidos: as condições ambientais podem afetar o desempenho do sensor. Deve-se conhecer a faixa de condições em que o sensor funcione dentro da sua faixa de tolerância.
- Escala total do sinal de saída: refere-se à máxima variação do sinal de saída.
- Histerese: refere-se à variação do sinal de saída para um mesmo sinal de entrada, dependendo do sentido da variação do sinal de entrada.
- Linearidade: é quão próxima a curva de transferência se aproxima de uma linha reta.
- Faixa de medida: representa a faixa de variação do sinal de entrada que o sensor consegue medir.
- "Offset": refere-se ao sinal na saída, na temperatura ambiente, sem aplicação de sinal na entrada.
- Tempo de vida de operação: representa o tempo de vida média do sensor, durante o qual ele mantém suas características de funcionamento dentro das margens de tolerâncias especificadas.
- Formato de saída: a saída é normalmente um sinal elétrico variável com o sinal de entrada. O sinal de saída pode vir em várias formas: digital, analógico ou de frequência.
- Característica de sobrecarga: refere-se ao máximo sinal na entrada do sensor que não altere as características de funcionamento do mesmo além da sua faixa de tolerância especificada.
- Repetibilidade: é a habilidade de produzir o mesmo sinal de saída em medidas repetidas e iguais.
- Resolução: representa a mínima variação de entrada necessária para produzir uma variação detectável na saída.
- Seletividade: é a habilidade do sensor identificar e medir um sinal de entrada (ex. um elemento químico) na presença concomitante de várias entradas.
- Sensibilidade: é a razão da variação da saída pela variação na entrada, ou seja, é a derivada da curva de transferência do sensor:

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}$$

- Velocidade de resposta: é o tempo que demora para o sinal de saída alcançar 63% (1/e) do seu valor final, em resposta a uma variação brusca na entrada (função degrau).
- Estabilidade: representa o tempo durante o qual o sensor mantém suas características de funcionamento dentro do seu limite de tolerância especificada.

Microsistemas vem apresentando um crescimento vertiginoso e hoje representa um mercado de aproximadamente US\$ 13 bilhões (prevê-se US\$ 34 bilhões no ano 2002). Este mercado apresente uma taxa de crescimento anual variando entre 16 e 35 % Apresentamos a seguir uma lista de exemplos de microssensores e suas aplicações (existem muitos outros exemplos):

- Acelerômetros para disparo do sistema "airbag" de automóveis e outras aplicações.
- Sensor de pressão para área médica, automóveis e industrial.
- Microválvulas para injetor de tinta de impressoras, para liberação controlada de medicamento em pacientes e outras aplicações.
- ISFET para medir pH, para medicina, alimentos, agricultura, etc
- Medida de variação de condutividade de filmes sensíveis a produtos químicos, para indústria, automóveis, medicina, alimentos, agricultura, etc
- Sensor Hall para medidas magnéticas, medidores de corrente elétrica, medidores de posição, etc.
- Micromotores, microválvulas, microbombas, microfiltros, canais e misturadores, necessários para a área de microfluídica, para medicina, análise clínica, etc
- Espelhos e matrizes de espelhos (DMD – Digital Mirror Device) para aplicações ópticas (chaves ópticas para redes de fibras ópticas) e projeção de imagens (para canhão de imagens para conferência, cinema e até para TV doméstico).
- Chaves de RF para comunicações sem fio.
- Anemômetros (mede perda de calor) para medida de fluxo de gases e líquidos, para medicina, automóveis, ambiente, controle de processo, etc.
- Mostradores de imagens (microplasma e micropontas)
- Sensores de Infra-vermelho para visão noturna para transporte.
- Microponteiras para microscopia de força atômica, AFM, ou de tunelamento atômico, ATM.

- Sistema de microponteiras para armazenamento de informação, movendo átomos e depois detectando-os (prevê-se da ordem de 30 Gb/cm²)

Questões críticas para o desenvolvimento dos transdutores e microssistemas são: a) processos de fabricação, b) encapsulamento, c) testes, d) Infraestrutura de CAD.

A microeletrônica constitui o embrião do desenvolvimento de microssistemas, tendo em vista que emprega boa parte dos materiais, processos, conceitos e dispositivos da microeletrônica. No entanto ele também requer um número grande de outros materiais e processos específicos, como ilustra a Fig. 19. Muitos dispositivos sensores e atuadores podem ser incorporados em tecnologia CMOS, por etapas de processos de pós-processamento, realizadas após a conclusão da fabricação do circuito eletrônico. Os processos podem ser classificados como de superfície (surface micromachining) e como de corpo (bulk). No primeiro, os componentes não eletrônicos são fabricados em camadas específicas (muitas vezes de Si-policristalino), removendo uma camada sacrificial, de sustentação durante sua deposição. Nos processos de micro-usinagem de corpo, estes podem ser feitos pela frente ou pela costa da lâmina, por micro-usinagem do Si, por processo úmido ou seco (por plasma). Como os processos usados em microssistemas usam normalmente regras de projeto de aproximadamente duas gerações anteriores da microeletrônica, muitas fábricas destas últimas podem ser convertidas em fábricas de microssistemas. O uso de lâminas de 150 mm vem sendo tornando comum na produção em massa de microssistemas, enquanto que fábricas estado da arte de microeletrônica já usam lâminas de 300 mm. Além das várias fábricas para produção própria (Analog Devices, Texas Instruments, Motorola, Lucent Technologies, Silicon Microstructures Inc., Honeywell, Agilent, outros), existem também várias fábricas ou programas que oferecem serviços de fabricação de microssistemas. Entre estas temos: LNLS em Campinas, Br; CMP e Tronics Microsystems na França; Surface Technology Systems na Grã Bretanha; Sensoror na Noruega; Institute of Microelectronics em Singapura; CSEM na Suíça; BFGoodrich Advanced MicroMachines (Ohio), Cronos Integrated Microsystems (NC), IntelliSense (Massachusetts), ISSYS (Michigan), Kionix (N.Y.), MEMX (Albuquerque) no USA.

Encapsulamento e teste de microssistemas é bem mais complexo que de microeletrônica. Em MEMS podemos ter partes móveis, interface com sinal óptico, interface com meio ambiente (pressão, temperatura, meio químico ou biológico, etc). Estas condições impõem requisitos específicos e complexos para o empacotamento. Os testes também tornam-se complexos por dois motivos: necessidade de manipular mais formas de energia, além da eletrônica; impossibilidade de realizar as medidas na lâmina, antes do encapsulamento. Como consequência, encapsulamento e testes de MEMS é bem mais caro que no caso de microeletrônica.

Na área de CAD, começou-se usando pacotes de software de microeletrônica (Tanner Tools) e de mecânica (ANSYS). Mais recentemente, pacotes específicos vem sendo disponibilizados, com inclusão de efeitos eletrônicos, mecânicos, térmicos e alguns outros efeitos físicos (CFD Research Corp., Coventor, IntelliSense Corp., Integrated Systems Engineering, MEMScaP).

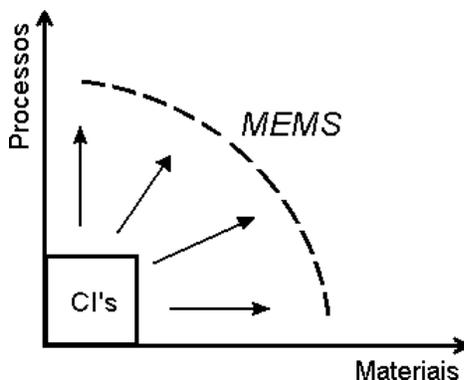


Fig. 19 Ilustração do número de materiais e processos usados em MEMS comparativamente à microeletrônica.

Como ilustração de microssistemas, apresentamos nas figuras 20 e 21, dois exemplos de dispositivos de maior utilização. A Fig. 20 mostra a fotografia de um microssistema de controle de "airbag" e a Fig. 21 mostra a fotografia de matriz de espelhos para sistemas de projeção de imagens. A parte central do chip da Fig. 20 refere-se à estrutura do acelerômetro. Os micro-espelhos do chip da Fig. 21 são apropriadamente posicionados eletrostaticamente, conforme cor da luz do pixel desejado. Um circuito CMOS sob os espelhos chaveia os eletrodos eletroestáticos.

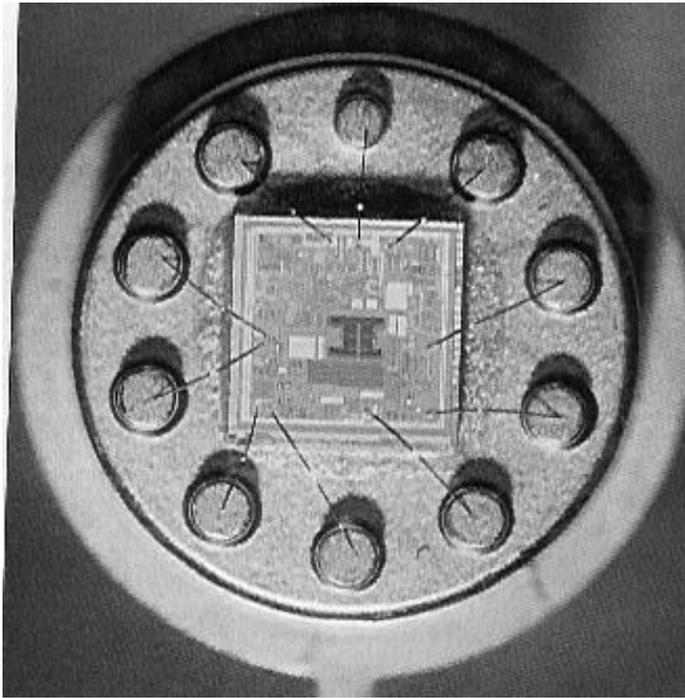


Fig. 20 Microfotografia de microsistema de controle de disparo de "airbag".

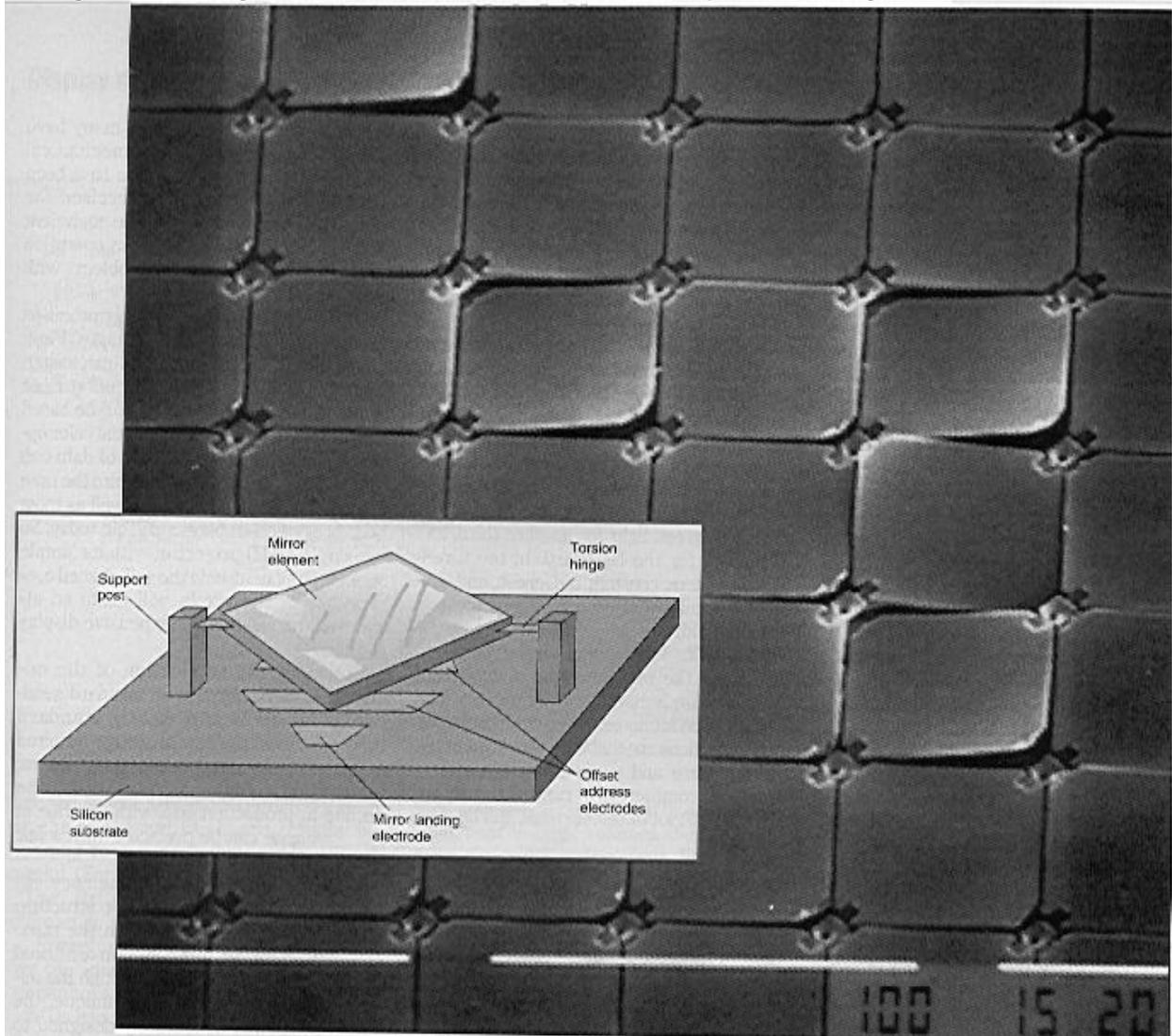


Fig. 21 Microfotografia de matriz de espelhos para sistema de projeção de imagens.

5. Conclusões:

Mostramos que a história da evolução da microeletrônica e microssistemas é muito longa, porém ocorreu num tempo muito curto, menor que 50 anos. A área e mercado de microeletrônica e microssistemas cresceram enormemente, participando direta ou indiretamente em todas as atividades humanas. Adicionalmente, é graças a ela que todas as outras áreas do conhecimento humano conseguem avançar. A área é também extremamente multidisciplinar, envolvendo conhecimentos e profissionais das seguintes áreas: engenharia eletrônica, engenharia e ciência de materiais, física, química, biologia, medicina e ciências da computação. Ciências humanas, tais como economia, sociologia, história e educação, também têm muito a ver com a área, tendo em vista as enormes conseqüências destas tecnologias sobre a economia, defesa, segurança, empregos, vida social, educação, saúde, etc. Estes fatos todos nos levam a dois importantes proposições:

- É inconcebível que, um país de tamanho continental como o Brasil, que pretende ser um país forte economicamente e socialmente, não participe ativamente da atividade produtiva e do mercado da área de microeletrônica e de microssistemas. É urgente o país estabelecer uma Política tecnológica séria e executá-la também.
- A complexidade e multidisciplinaridade da área tornam proibitivo a formação de ilhas. É primordial que haja uma forte colaboração entre os diversos grupos e setores e das diversas áreas no país, bem como uma forte interação com instituições e empresas do exterior. Uma boa Política pode dirigir e promover esta colaboração.

Referências:

1. W. Brinkman et. al. "A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us", IEEE J. Solid-St. Circ. Vol. 32, no. 12, pp. 1858-1865 (1997).
2. Vários artigos do número especial sobre "50th Aniversary of the Transistor!", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no.1, pp.1-308 (1998).
3. Vários artigos do número especial sobre "Solid-State Century – The Past, Present and Future of the Transistor", Scientific American, Special Issue 1997.
4. K. Ng, "A Survei of Semiconductor Devices", IEEE, Trans. Electr. Dev., vol. 43, no. 10, pp. 1760-1765 (1996).
5. L. Geppert, Technology 1998 Analysis & Forcast – Solid State", IEEE Spectrum, vol. 35, no. 1, pp.23-28 (1998).
6. J. R. Leite, Brazil Builts on Its Semiconductor Heritage", III-Vs Review, vol. 11, no. 5, pp.40-44 (1998).
7. E. Charry R., "Desenvolvimento e Aplicações de uma Tecnologia MOS Canal n de Porta Metálica", Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1974.
8. W. A. M. Van Noije, "Uma Contribuição ao Estudo Teórico e Experimental de uma Memória RAM Estática Monolítica com Dispositivos nMOS", Dissertação de Mestrado, EPSUP, 1978.
9. J. P. de Souza, "Produção de Íons Positivos para Implantação em Semicondutores", Dissertação de mestrado, EPUSP, 1973.
10. J. P. de Souza, "Uma Tecnologia Simples para Circuitos Digitais MOS Canal n com Carga em Depleção de Alta Velocidade", Tese de doutorado, EPUSP, 1978.
11. L. S. Zasnicoff, "Desenvolvimento de um processo NMOS de alto desempenho: Análise, caracterização e extração de parâmetros elétricos e tecnológicos", Tese de doutorado, EPUSP, 1987.
12. A M. Kuniyoshi, "Desenvolvimento Básico de uma Tecnologia CMOS Porta Metálica", Dissertação de mestrado, EPUSP, 1979.
13. L. C. M. Torres, "Projeto e Desenvolvimento de uma Tecnologia CMOS com Porta de Silício Policristalino e Geometria Fechada"; Tese de doutorado, EPUSP, 1987.
14. "João Antonio Martino, "Um Processo CMOS de Cavidade Dupla para Comprimento de Porta de 2um", Tese de doutorado, EPUSP, 1988.
15. J. W. Swart, "O BCCD: Estudo Teórico-Experimental e desenvolvimento de um Processo de fabricação", Tese de doutorado, EPUSP, 1981.
16. J. E. Ripper e R. C. C. Leite, "Physics in a developing country.", Proc. International Conference on Physics in Industry, Dublin, 221-223 (1976).
17. J. Martinez, "Os Componentes Estratégicos da Independência Tecnológica", Dados e Idéias, Vol. 1, no. 5, pp.43-45 (1976).
18. J. Martinez, "Semicondutores: Um Mercado em Idade de Crescimento", Dados e Idéias, vol. 3, no. 5, pp.34-37 (1978).

- 19 S. M. Sze, editor, "Semiconductor Sensors", L. Wiley & Sons, Inc., 1994.
- 20 A. Rasmussen, M. E. Zaghoul, "In the Flow with MEMS", IEEE Circuits & Devices, vol. 14, no. 4, pp.12-25 (1998).
- 21 Vários artigos no número especial sobre "Integrated Sensors, Microactuators, & Microsystems (MEMS)", Proceedings of the IEEE, vo. 86, no. 8, pp. 1529-1812 (1998)
- 22 Vários artigos no número especial sobre "Sensors Into the Next Century", The Electrochemical Soc. Interface, vol. 7, no. 4, pp. 18-38 (1998).
- 23 Semiconductor Industry Association, "National Technology Roadmap for Semiconductors", San Jose, CA, : SIA, 1997.
- 24 Semiconductor Industry Association, "International Technology Roadmap for Semiconductors", San Jose, CA: SIA, 1999.
- 25 J. D. Plummer, P. B. Griffin, "Material and Process Limits in Silicon VLSI Technology", Proceedings of The IEEE, vol. 89, no. 3, pp. 240-258 (2001).
- 26 D. J. Nagel, M. E. Zaghoul, "MEMS: Micro Technology, Mega Impact", IEEE Circuits & Devices, vol. 17, no. 3, pp 14-25 (2001).