



As primeiras memórias monolíticas eletrônicas

A evolução da tecnologia microeletrônica permitiu desenvolver pequenos circuitos de memória digital, monoliticamente integrados numa pastilha de semiconductor. Os bits de informação digital podem ser guardados nestes reservatórios de bits de forma volátil (que desaparecem ao fim de certo tempo, ou se o circuito for desligado (sem alimentação de energia), ou de forma permanente¹ (a informação permanece intacta mesmo depois do circuito ser desligado). Nas memórias digitais permanentes a informação é guardada na forma de uma carga elétrica contínua (analogica), na polarização permanente de um dielétrico ou na polarização magnética de uma camada magneto resistiva. Estas polarizações podem controlar transístores capazes de disponibilizar uma corrente elétrica proporcional ao valor analógico armazenado, sendo este, depois, traduzido num número digital.

Os transístores usados nas memórias

Os atuais circuitos microeletrônicos são maioritariamente feitos com transístores de efeito de campo MOSFET ou por transístores de junção bipolar TJB. O MOSFET tem uma implementação mais simples e aproxima-se mais do interruptor ideal do que o TJB.

O TJB foi inventado em 1951, logo a seguir ao transístor de contacto de 1947, nos Laboratórios Bell nos EUA. O Prémio Nobel da Física de 1956 foi atribuído aos 3 cientistas inventores (Shockley, Bardeen e Brattain).

O transístor MOSFET foi inventado em 1959 pelos cientistas Dawon Kahng (1931 - 1992) e Mohamed Atalla (1934 - 2009), dois investigadores dos Laboratórios Bell nos EUA. Estes cientistas fabricaram os primeiros dispositivos MOSFET, PMOS e NMOS, com um processo monolítico com uma resolução geométrica de 20 μm . O substrato P de um MOSFET proporciona um canal de condução de eletrões entre a Fonte e o Dreno positivo, sendo controlado pelo campo elétrico E, gerado pela diferença de potencial P entre a Porta do transístor e o Substrato do tipo P. A corrente de dreno será dependente da tensão entre a Porta e a Fonte, de modo semelhante ao representado a Fig. 1.

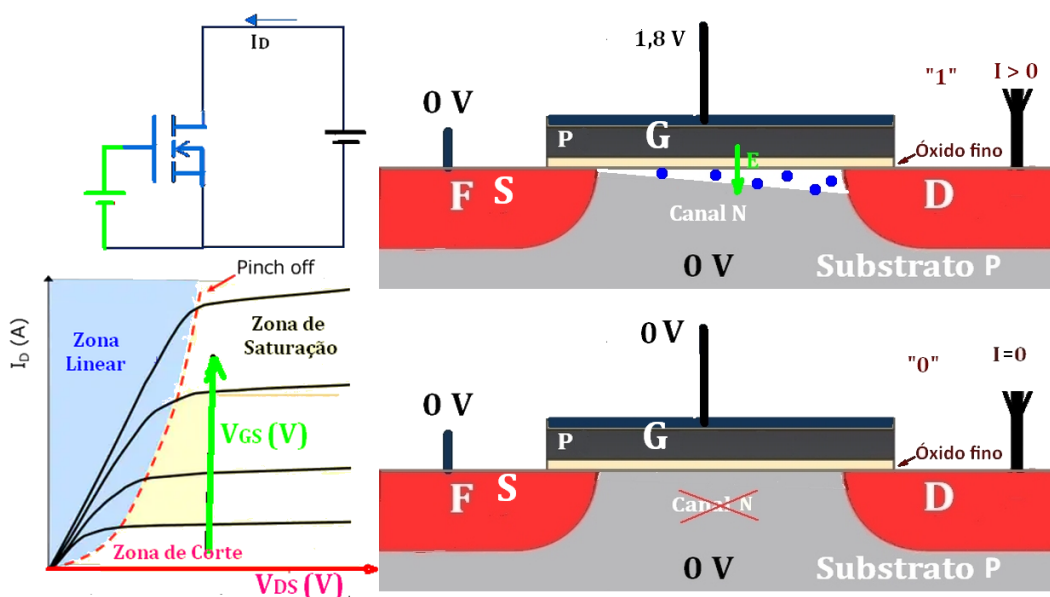


Fig.1 – Transistor MOSFET N: Símbolo, características e estado ON OFF.

¹ Aqui o termo permanente pode referir-se a alguns anos ou dezenas de anos.



A tensão V_{GF} acima de um certo limiar, V_{th} torna o transistor condutor, podendo este ficar na zona linear ou na zona de saturação de corrente, de acordo com a tensão V_{DF} aplicada.

As memórias RAM e DRAM

Têm particular interesse as memórias que permitem ter acesso direto a cada célula de memória, designadas por RAM (*Random Access Memory*) que, por facilidade, são organizadas de forma matricial em linhas e colunas em que cada célula pode ser acedida pela seleção da linha e da coluna correspondente. Por exemplo, uma memória de 64bit com possibilidade de acesso direto a cada célula poderia ser organizada numa matriz quadrada de 8 x 8 células. Externamente bastavam 3 bit de endereço de linha, que seriam decodificados para individualizar as 8 linhas e 3 bit de endereço para ceder às colunas. O conteúdo de cada célula seria disponibilizado numa única linha de saída de dados.

Todavia, a matriz da memória podia ser subdividida em matrizes menores, por exemplo, uma memória que armazena 64 bit pode ser constituída por 16 palavras de 4 bit cada: significa que são necessários 4 bit de endereço (16 palavras) para aceder a conjuntos de 4 células cujas 4 saídas de dados serão obtidas simultaneamente. Esta memória teria 4 bit de endereçamento e 4 linhas de saída de dados.

Nas chamadas memórias **RAM estáticas**, a informação fica guardada em células de memória normalmente realizadas com circuitos de memória do tipo [flip-flop](#), envolvendo vários transistores por célula, enquanto o circuito estiver alimentado. Outro tipo de memórias pode recorrer, por exemplo, a cargas elétricas armazenadas em condensadores, que se podem ir descarregando, obrigando a refrescar essa carga para não se perder a informação. Essas memórias designam-se por **Dynamic RAM ou DRAM** pois exigem um refrescamento dinâmico periódico da informação da célula, normalmente constituída por um único transistor e um condensador.

O condensador como elemento de memória

Em 1964, Arnold Farber e Eugene Schlig, engenheiros da IBM, criaram uma célula de memória discreta com dois transistores e duas resistências, que ficou conhecida como a célula de Farber-Schlig. Esta célula [substituiu um protótipo anterior baseado num díodo de túnel](#), uma invenção recente que foi a primeira aplicação do tunelamento quântico microscópico, ver artigo. Em 1965, a IBM criou um chip de memória de silício de 16 bits, composto por 80 transistores bipolares, 64 resistências e 4 díodos.

Em 1965, a Toshiba fez a primeira aplicação prática de uma DRAM de 180 bits na sua calculadora eletrônica Toscal BC-1411. A memória era feita com 2 transistores de junção bipolar e um condensador, mas precisava de ser refrescada devido à descarga do condensador. Mas foram os transistores MOSFET que acabariam por simplificar o conceito de memória dinâmica.

A primeira memória RAM estática integrada

Em 18 de julho de 1969 foi fundada a empresa INTEL por [Gordon Moore](#) (1929 – 2023) e [Robert Noyce](#) (1927 - 1990). O seu primeiro nome foi **NM**electronics². Estes investigadores procuraram realizar o primeiro circuito integrado de uma memória estática. Em abril de 1969, a INTEL fabricou o seu primeiro circuito integrado monolítico designado por C3101, que foi a primeira memória de estado sólido num chip de silício usando a tecnologia bipolar de transistores Schotky, com

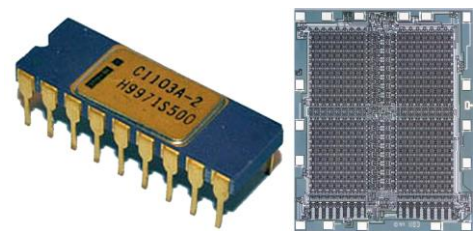


Fig. 2 - C1103 com 2,87 mm por 3,53 mm (10,13

² NM – letras iniciais dos fundadores.



células ([TTL Tansistor-Transistor Logic](#))³. A memória de 64 bit (16 palavras de 4 bit), era uma memória estática com acesso aleatório (SRAM - Static Random Access Memory). Pode ver aqui os [detalhes construtivos desta primeira memória](#). Tinha um tempo de acesso de 50 ns e foi duas vezes mais rápida que qualquer memória existente na época, apesar de apenas consumir 300 mW de uma fonte de 5 V DC (4,68 mW/bit). O chip interno tinha a dimensão de 2,39 mm por 3,65 mm e a célula básica era do tipo flip-flop com 2 transístores com emissor duplo. Em 1969, esta memória custava \$100 dólares dos EUA (equivalente a 910 dólares de 2026).

A primeira memória RAM estática MOSFET

A tecnologia PMOS com porta de silício (Silicon-Gate PMOS) foi uma inovação revolucionária da Intel que viabilizou a produção em massa de circuitos monolíticos complexos. Os transístores tinham portas de silício policristalino em vez de alumínio, o que permitiu chegar ao processo “*Self Aligned Gate*”, com transístores muito mais fáceis de fabricar sem precisar de grande precisão no alinhamento das máscaras de fabrico.

Na Fairchild R&D, [Federico Faggin](#) (1941 - ...) e [Tom Klein](#) () redesenharam um circuito multiplexador analógico existente, de 8 canais com porta metálica e canal P, utilizando a nova tecnologia e, em 1968, a Fairchild lançou o primeiro circuito integrado com porta de silício, o multiplexer 3708.

O circuito Intel 1101 foi a primeira memória estática realizada com tecnologia PMOS (transístores MOS de canal P com portas de silício em substrato NMOS). Era uma memória estática RAM (SRAM) com a capacidade de armazenar 256 bit numa área de silício de 7,8 mm² (2,4 mm x 3,2 mm) menor do que a usada na Intel 3101, mas com um tempo de acesso 30 vezes menor e um consumo menor (1,95 mW por bit).

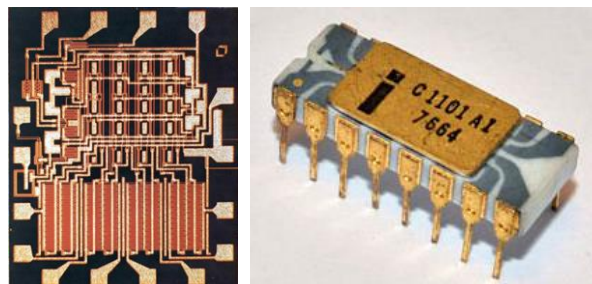


Fig. 4 - Circuitos PMOS- multiplexer Fairchild 3708 e a memória Intel

A primeira memória DRAM

Em 4 de junho de 1968, a patente da memória RAM dinâmica DRAM, foi concedida a [Robert Dennard](#) (1932 - 2024), do TJ Watson da IBM. A patente US 3387286 continha as ideias de uma célula de memória dinâmica de transistor único e de uma célula com três transístores, que tinha sido submetida no ano anterior. [Ver vídeo sobre esta descoberta revolucionária.](#)

Em outubro de 1970, a Intel produziu o circuito integrado monolítico Intel 1103, uma memória DRAM que se tornaria no *chip* mais importante da história inicial da Intel. Foi a primeira memória DRAM com 1024 bit de capacidade e que teve um enorme sucesso comercial, tornando a Intel numa empresa lucrativa. A memória 1103 foi 5 vezes mais rápida que a antecessora memória estática 1101 e tinha um consumo de energia menor, de apenas 0,36 mW / bit.

³ Veja como evoluíram os circuitos lógicos neste [artigo de Ian Young \(Intel\)](#).

As memórias dinâmicas têm uma estrutura muito simples com 1 único transistor e a própria capacidade da porta/substrato do transistor funciona simultaneamente como condensador de armazenamento da minúscula carga elétrica por célula (atualmente esta capacidade é de cerca de 25 fentofarades), que se vai descarregando, o que obriga a que a pequena carga elétrica armazenada tenha de ser reposta periodicamente⁴. Outro problema adicional é o de que ao ser lida a carga armazenada na célula, ela é destruída e tem de ser reposta nova carga, logo a seguir. Estas memórias exigem um circuito eletrónico controlador para endereçar, escrever, ler as células e refrescar o seu estado. Na figura representa-se o controlador de uma memória de DRAM de 4 Mbit, com refrescamento automático (1024 refrescamentos em

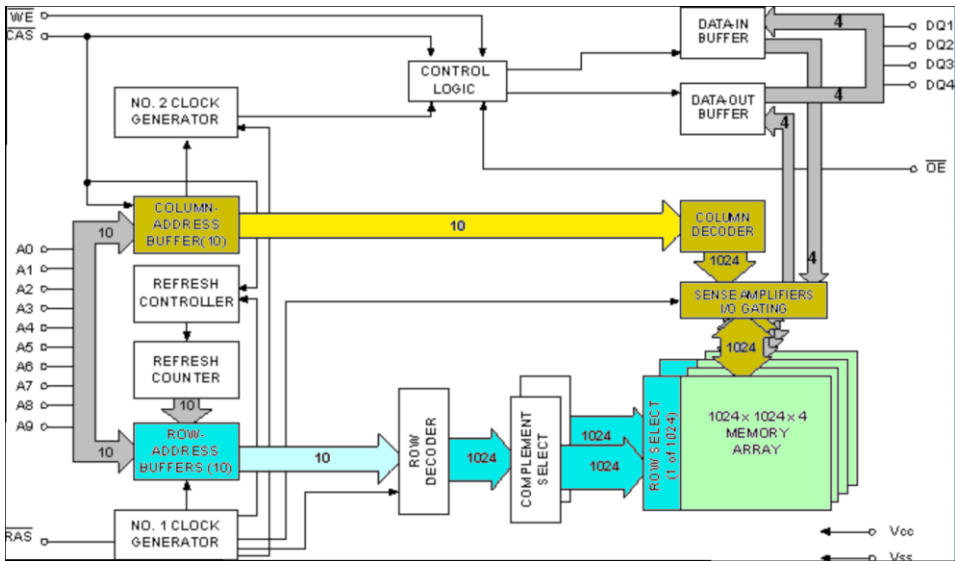


Fig. 5 - [Arquitetura típica de Memória DRAM de 4 Mbit](#)

16 ms a 128 ms). A memória está organizada em 4 planos de 1 Mbit e entrada / saída num barramento de 4 bit. Atualmente, as memórias DRAM DDR5 são feitas com os transistores muito pequenos (14 nm x 14 nm) e são as memórias eletrónicas mais compactas existentes. Endereços multiplexados 10 bit de linhas e 10 bit (colunas) 4 Bit linhas de dados.

Em 1993, foi definido o padrão [JEDEC](#), SDR, Single Data Rate, para as memórias SDRAM, *Synchronous Dynamic Random-Access Memory*, de funcionamento destas memórias dinâmicas, de modo a que os modelos feitos pelos vários fabricantes pudessem ser intercambiáveis. Seguiu-se, no ano de 2000, o padrão DDR, *Double Data Rate*, e os futuros novos padrões, que pode consultar na Tabela.

Padrão	Data	Largura de Banda GB/s	Tensão V
SDR	1993	1,6	3,3
DDR	2000	3,2	2,5 – 2,6
DDR2	2003	8,5	1,8
DDR3	2007	17	1,35-1,5
DDR4	2014	25,6	1,2
DDR5	2019	32	1,1
DDR6	2027	134,4	1

Tab.1 - Parâmetros básicos das memórias DRAM

⁴ - Para uma capacidade de 25 fentofarad e 1,1 V de porta/substrato, cada célula armazena cerca de 18000 eletrões, que se vão perdendo ao longo do tempo, devido a fugas. Para uma memória DDR5 de 16 Gb o tempo de refrescamento das células de um bloco é de cerca de 350 ns e toda a memória tem de ser refrescada em cerca de 32 ms. Isto é feito sem perda de tempo do acesso para o dispositivo computador.



Os chips de DRAM são organizados em módulos eletrônicos padronizados para serem facilmente intercambiáveis em placas de processadores. Ver por exemplo a [fabricação da Kingston](#).



Fig.6- Módulo de DRAM para PC

Os transístores que retêm a memória

Com a tecnologia atual os transístores mais usados para retenção de memória são do tipo MOSFET. Os três princípios básicos que afetam o estado de condução do transistor MOSFET: Carga elétrica na porta, polarização eletrostática, polarização permanente dielétrica e efeito magneto-resistivo do transistor, Fig. -7.

Há dois tipos de transístores MOSFET adequados à retenção permanente do seu estado de condução e que, por isso, são usados na realização de memórias eletrônicas permanentes (que retêm informação mesmo quando não estão alimentadas). São os transístores de porta flutuante e os transístores de porta ferroelétrica. As portas (gates) de controlo destes transístores armazenam uma carga elétrica ou uma polarização dielétrica.

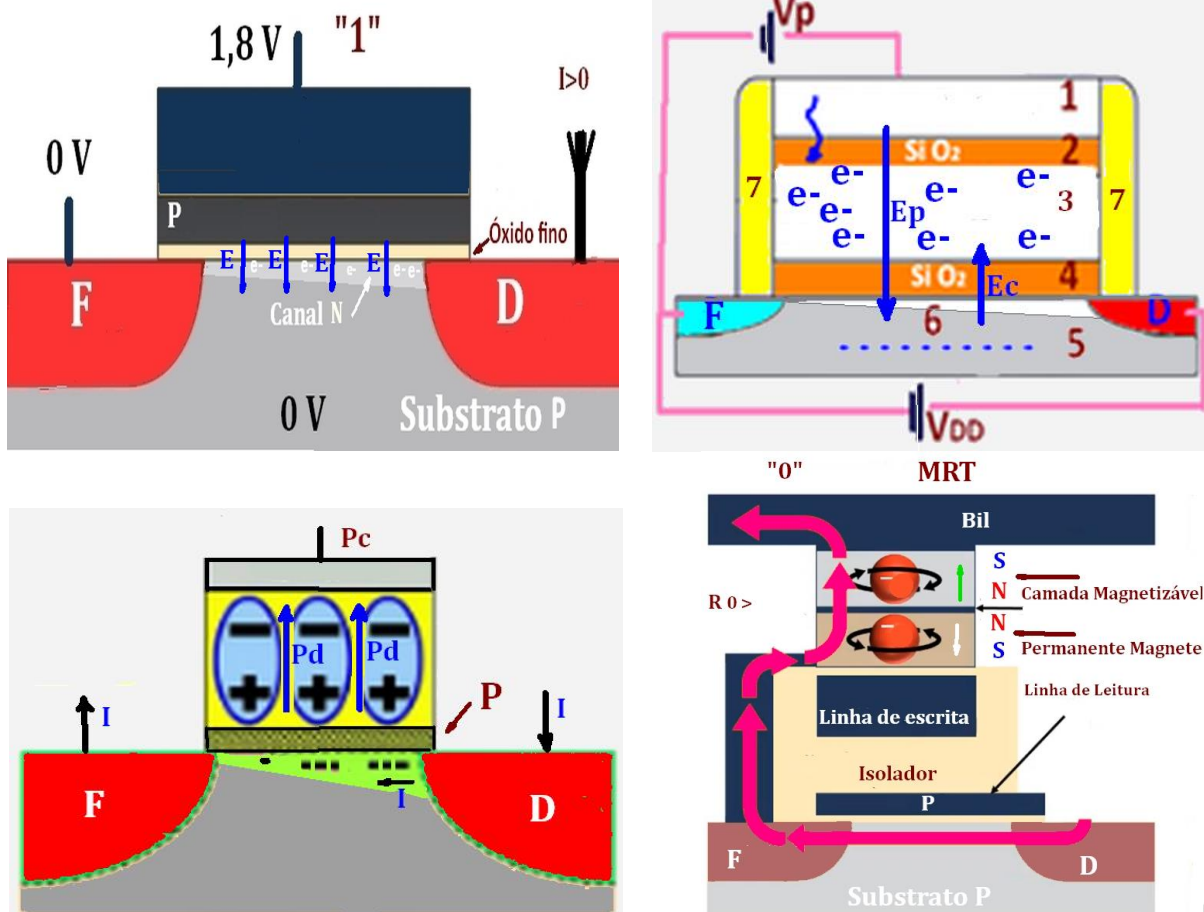


Fig. 7 – MOSFETs : Transistor convencional; MOSFET de porta flutuante; MOSFET de polarização dielétrica e MOSFET magneto-resistivo.



Em 1967, [Dawon Kahng](#) (1931 - 1992) e [Simon Sze](#) (1936 - 2023), dos Laboratórios Bell, descreveram como a porta flutuante de um dispositivo semiconductor MOSFET poderia ser usado como célula de uma ROM (Read Only Memory) reprogramável.

O conceito de usar carga armazenada para controlar transistores para memorizar informação foi patenteado, separadamente, pela primeira vez, por [Jack Morton](#) (- 1971) e [Ian Ross](#) (1927 – 2013), em 1955, nos Laboratórios Bell. Ian Ross foi o proponente do método muito importante de crescimento epitaxial sobre silício.

A porta flutuante é eletricamente isolada, não está eletricamente ligada e está separada de outros condutores por óxido de silício que é um excelente isolador elétrico, formando um condensador excelente. Uma vez injetada carga na porta flutuante esta permanecerá armazenada durante muitos anos, influenciando, ou não, a realização de um canal condutor de corrente entre dreno e fonte.

Na Fig. 7, pode ver-se a estrutura simplificada de um transistor de porta flutuante. O condutor 3 da figura pode ser eletrizado por um campo elétrico elevado resultante de V_p e colocar cargas elétricas na porta flutuante (3) que influencia a realização do canal (6) de ligação entre a fonte (source) S e o dreno D. A passagem das cargas pelo isolador óxido fino 2 dá-se por [tunelamento microscópico ou por injeção de elétrons “quentes”](#). Depois, quando V_p for anulado, os elétrons ficam retidos na porta flutuante onde permanecerão durante um tempo muito longo. De acordo com a carga elétrica armazenada na porta flutuante, esta define o valor do campo elétrico estático para o canal que vai controlar a passagem de elétrons entre a Fonte, S, e o Dreno, D, quando se estabelecer uma tensão elétrica entre D e S. Desligando todas as fontes de tensão, a carga armazenada fica retida na porta flutuante, influenciando o futuro estado de condução do transistor, construindo uma memória permanente de carga – uma espécie de gaiola eletrostática de carga.

Este conceito foi a base das atuais memórias Flash, que será tratado com mais detalhe no documento “A Gaiola Eletrostática de Bits”.

O transistor de porta ferroelétrica

A memória ferroelétrica (FeRAM) é um tipo de memória não volátil que é muito rápida. Tem a capacidade de retenção de dados da memória eletrostática a que junta o elevado desempenho e a durabilidade da RAM. Os dados são armazenados pela polarização elétrica de cristais, permitindo um baixo consumo de energia.

Os materiais ferroeletricos são utilizados em memória não volátil, como RAM ferroeletrica (FeRAM), que combina a velocidade das memórias voláteis com a persistência das não voláteis. Isso resulta em eficiência energética e desempenho melhorado em dispositivos eletrônicos.

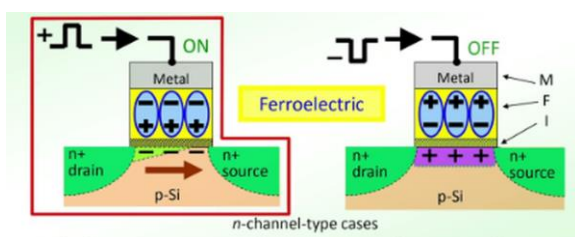


Fig. 8 - Transistor MOSFET de porta ferroelétrica.

A invenção do conceito das memórias ferroelétricas (ou FRAM/FeRAM) pertence ao estado-unidense [Dudley Allen Buck](#) (1927 – 1959), que em 1952, na tese de mestrado realizada no MIT, propôs estas memórias.

As memórias FeRam são altamente robustas. Por exemplo, a empresa [Ramtron](#) afirma que as



suas memórias suportam "100 triliões" de ciclos úteis de leitura/escrita. As memórias ferroelétricas são extremamente resistentes à radiação cósmica e, por isso, são muito usadas na exploração espacial. A empresa [Texas Instruments](#), TI, está a apostar muito nas memórias FeRam para uso no espaço. Pode ver aqui [algumas das vantagens oferecidas pelas FeRam sobre as memórias Flash](#). O nanosatélite [ISTSat-1](#) usa este tipo de memórias da TI, no Processador de Comunicações.

Pode saber tudo sobre o IStSat-1 no [ChatBot Cegonha do Museu Faraday do IST](#).

Cada célula da memória é constituída por um filme fino de material ferroelétrico depositado sobre cada transistor MOSFET realizado com a tecnologia CMOS tradicional. Estas memórias [têm excelentes características](#) e resistem à radiação cósmica.

É um filme fino de titanato de bário e chumbo, com a espessura menor do que 1 micrómetro cristalizado num filme fino. Pode ver aqui como a empresa dos EUA, Symetrix Corporation, do [Prof. Carlos Paz de Araujo](#) () [faz os filmes ferroelétricos](#).

O princípio de funcionamento dos transístores ferroelétricos [está bem descrito na patente do Prof. Carlos Araújo](#). O Prof. Carlos Araújo é autor de [várias patentes sobre a Ciência da Computação](#).

A matéria-prima dos filmes ferroelétricos cristalizados sai de limões e laranjas

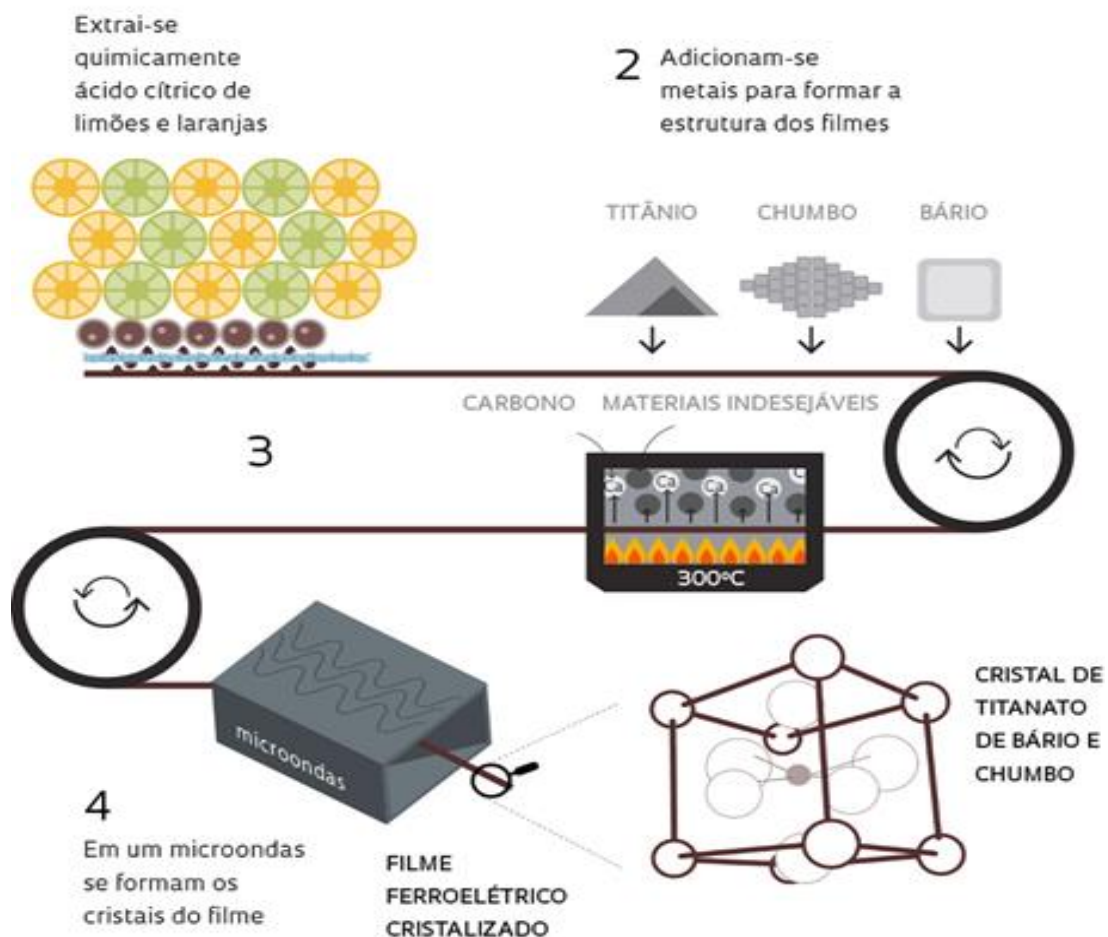


Fig. 9 - Processo de produção de filme ferroelétrico.