

Do radar à junção PN de semicondutores

Até 1923, a maior parte dos rádios usava válvulas, mas o detetor de sinal era feito maioritariamente com detetores de cristais¹ de galena e de silício. A partir de 1923, nos rádios novos, as válvulas foram substituindo lentamente os detetores de cristal (que eram muito eficientes), não só porque o seu preço foi ficando mais reduzido como também pelo facto de o detetor de cristal ser pouco prático, pois precisava de ser ajustado pelo utilizador para encontrar no cristal um bom ponto de deteção (*sweet point*). Até mesmo Lee de Forest, o inventor da válvula eletrónica, nas primeiras gerações do seu [rádio D10](#)² e D12 usou um cristal de galena, mas na 2ª geração (que saiu em 1924) já usou o tríodo a funcionar como detetor.

Depois dos [trabalhos de Marconi](#), realizados no seu navio-laboratório Electra, terem demonstrado que conseguia fazer feixes de rádio muito estreitos com frequências muito elevadas e de ter mostrado à Marinha Inglesa que conseguia desenhar o mapa da costa marítima a partir do eco do sinal recebido, a Marinha encomendou-lhe o sistema de antenas apropriado para o radar e mandou construir 20 radares a válvulas. Nestes radares a função de deteção dos sinais era também realizada por válvulas mas tinha um desempenho pouco satisfatório.



George Clark Southworth

Quando a 2ª guerra mundial começou, o radar foi considerado uma arma estratégica de enorme importância; organizaram-se grupos de trabalho secretos na Grã-Bretanha e nos EUA para acelerar o desenvolvimento dos radares a válvulas. No lado dos EUA, coube aos *Bell Laboratories (Bell Labs)* de Murray Hill, onde já havia alguma investigação em semicondutores, investir muito dinheiro na investigação de válvulas especiais detetoras dos sinais de radar, mas os resultados obtidos não foram satisfatórios. O mesmo aconteceu no outro lado do Atlântico, no Reino Unido.

Foi a incapacidade das válvulas eletrónicas fazerem a deteção eficiente de sinais de radar que obrigou os investigadores a recorrerem aos antigos detetores de cristal semicondutor. Daqui resultou o estudo de novas propriedades dos semicondutores que levaram à descoberta do transístor. Assim, a descoberta do transístor não teve por motivação principal a substituição da válvula eletrónica, mas esta acabou por acontecer.

Em 1939, George Southworth, especialista em micro ondas e em guias de onda na divisão de rádio dos *Bell Labs* de Holmdel, a cerca de 50 km de Murray Hill, também não conseguiu que os detetores a válvulas funcionassem nas frequências usadas pelo radar. Decidiu experimentar os detetores de “bigodes de gato” (*cat’s – whisker*) de silício³, nomeadamente o [detetor de Pickard](#), de que ele já tinha muita experiência, adquirida na primeira guerra mundial quando servia na *Army Signal Corps*⁴. Southworth teve sucesso imediato com este tipo de detetor de cristal de silício.



Russel Schoemaker Ohl

Entusiasmado com a solução encontrada, George Southworth pediu ao seu colega Russel Ohl, especialista na condução em cristais, para verificar o resultado alcançado e estudar cristais de materiais alternativos. Todavia, o sucesso da deteção obtida pelo cristal de silício tinha alguns problemas. A ponta metálica tinha de encontrar um ponto bom no cristal (*sweet point*), mas com um pequeno desvio podia já não se fazer a deteção ou fazer-se a deteção mas a

¹ - Detetor de galena de J. Bose e detetor de silício de J. Pickard.

² - Ver este rádio no Museu Faraday do IST - https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTechnology/Forest_Radio_D10.pdf.

³ - Os *cat’s whiskers* já não eram produzidos mas G. Southworth encontrou uma unidade num antiquário em Nova Iorque.

⁴ - Entidade das Forças Armadas dos EUA que coordena o desenvolvimento de tecnologias de guerra.

corrente detetada poderia até ter o sentido contrário⁵. Ohl distinguiu estas duas situações de deteção e chamou-lhes P, positiva, quando a corrente ia da ponta metálica para o cristal e N, negativa, quando a corrente era ao contrário, ou seja, vinha do cristal para a ponta⁶.

Russel Ohl achou que este comportamento era provavelmente devido a impurezas existentes no cristal. Este detetor não poderia ser usado no radar, não só porque a fase dos sinais é importante, como também porque os operadores do radar, em guerra, não podem andar à procura de um ponto no cristal que fosse bom para deteção dos sinais.

Hoje sabe-se que os antigos detetores de cristal de semicondutores só funcionavam porque os cristais não eram perfeitos e continham impurezas. Os *sweet points* ocorriam em regiões com determinado tipo de impurezas.

Em agosto de 1939, Russel pensou em purificar o silício, tendo em vista a fabricação de detetores de cristal, com a ajuda de metalurgistas dos *Bell Labs*, nomeadamente de Jack Scaff e Henry Theuerer. Fundiram silício num tubo de ensaio de quartzo e com o arrefecimento lento (*annealing*) as impurezas deveriam flutuar ou ficar no fundo do tubo. Ohl pediu a Joseph Becker, dos Bell Labs de Murray Hill, para medir a resistência elétrica de um varão de silício purificado por este processo, mas Becker não conseguiu obter medidas estáveis e respondeu: *Its behavior was so erratic that no consistent values could be reported*".

Então Ohl ensaiou um varão de silício no seu laboratório para verificar a relação entre a tensão aplicada e a corrente e assim poder traçar uma característica $i(v)$ do varão de silício, que ele esperava que fosse a de uma resistência. Observou num osciloscópio a existência de uma característica $i(v)$ dotada de histerese e começou a desconfiar da existência de uma barreira de potencial no varão. Esta barreira teria de ser eliminada para se poder usar o varão para o fabrico de detetores de rádio baseados no contacto entre uma ponta metálica e o silício, que era o seu principal objectivo.

Intrigado com o fenómeno, o metalurgista Jack Staff cortou uma fatia longitudinal do um varão cilíndrico de silício. Submetendo a fatia a um ataque com ácido nítrico ficaram visíveis duas regiões ligeiramente diferentes. Staff designou uma região por silício purificado e a outra por silício comercial (não purificado); a provável barreira de potencial estaria entre estes dois tipos de silício. Ao deslizarem um contacto metálico ligado a uma fonte de tensão aplicada à fatia do varão, Ohl e Staff verificaram que numa das regiões só havia condução quando a corrente entrava para a fatia a partir do contacto metálico (ou seja, que a corrente era positiva, P), mas, na outra metade da fatia, só havia condução quando o sentido da corrente era do semiconductor para a ponta metálica (ou seja, a corrente era negativa, N). Ohl, a uma das metades da fatia chamou semiconductor do tipo P e à outra chamou semiconductor do tipo N.

Mais tarde, os investigadores dos *Bell Labs* verificaram que numa das metades do varão tinha ficado uma predominância de impurezas pertencentes à 3ª coluna da tabela periódica de Mendeleev⁷ (átomos dadores de lacunas de electrões) e na outra metade tinha ficado com uma predominância de impurezas pertencentes à 5ª coluna (átomos dadores de electrões).

⁵ - Nos rádios a inversão da corrente não coloca qualquer problema, mas no radar coloca.

⁶ - Mais tarde verificou-se que a ponta metálica injetava portadores minoritários (electrões) numa região P (com falta de electrões) do semiconductor, mas logo ao lado podia haver uma região N (com excesso de electrões).

⁷ - Dmitri Mendeleev, propôs a tabela periódica dos elementos e esta é considerada uma das maiores descobertas científicas da humanidade pois permitiu descobrir os restantes elementos.

Em fevereiro de 1940, Ohl voltou aos ensaios experimentais e verificou acidentalmente que a o calor de um ferro de soldar e até a iluminação de uma lâmpada incandescente alteravam a histerese da característica $i(v)$ e, com estas experiências, acabou por explicar o facto dos *Bell Labs* de Murray Hill não terem conseguido medir a resistência do varão de silício. Mostrou o resultado ao seu diretor de investigação, Harald Friis, mas em Holmdel não encontraram qualquer explicação para o fenómeno observado. Mais interessante ainda foi observar que mesmo sem uma tensão aplicada o varão de silício gerava uma corrente elétrica que fazia mover o ponteiro de um amperímetro ligado aos seus terminais.

Ohl quis mostrar aos especialistas de semicondutores dos *Bell Labs* de Murray Hill o que tinha conseguido fazer e pretendeu que a sua descoberta fosse investigada. O diretor de investigação Mervin Kelly chamou, com urgência ao seu escritório, os cientistas Joseph Becker e Walter Brattain para observarem um novo fenómeno criado nos laboratórios de Holmdel (a divisão de rádio dos *Bell Labs*). Becker argumentou que tinha de acabar umas medidas experimentais e não era boa ideia interrompê-las. Mervin insistiu, dizendo “deixe isso e venha já aqui”.

Ohl disparou a luz de uma lâmpada de *flash* sobre o varão de silício, ligado a um amperímetro; mais tarde, Brattain, disse que nem quis acreditar no fenómeno que tinha presenciado, pois nunca tinha visto tanta energia elétrica gerada a partir da luz (cerca de 10 vezes mais do que era conhecido).

Numa única experiência Ohl e os metalurgistas tinham conseguido fazer **quatro coisas diferentes: silício do tipo P (1), silício do tipo N (2) e, na interface dos dois, fizeram a primeira junção PN⁸ (3), que mostrou ser uma excelente célula fotovoltaica (4).**



Mervin Joe Kelly

Partindo as regiões P e N em pequenos pedaços, Ohl conseguiu fazer detetores de cristal para o radar, que eram muito mais estáveis e sem terem uma grande dependência da posição do contacto metálico sobre o semiconductor. Depois, os *Bell Labs* fizeram materiais do tipo P e N a partir de germânio, que se encontrava comercialmente disponível, já mais purificado e que fundia a temperaturas mais baixas.

Os primeiros detetores de contacto metálico foram feitos em germânio, encapsulados em estruturas coaxiais de modo a poderem ser inseridos em guias de onda dos receptores dos radares. Estes detetores foram comercializados por várias empresas, tendo sido muito usados na 2ª guerra mundial. Graças a eles os radares cumpriram eficazmente a sua missão. Os operadores de radar dispunham de uma vasta colecção de detetores para experimentarem nos receptores dos radares, pois uns díodos funcionavam melhor do que outros. O método de controlo das impurezas no semiconductor ainda teria de ser melhorado.



Detetor 1n21 de contacto metálico com germânio

A experiência de Ohl abriu caminho para o primeiro transistor, que Brattain e Bardeen percorreram com sucesso.

⁸ - A experiência pode ser uma grande fonte inspiradora para novas teorias.

Na primavera de 1945, Mervin Kelly, diretor de investigação dos *Bell Labs*, apercebeu-se das potencialidades dos dispositivos de estado sólido e começou os preparativos para criar um novo grupo de física do estado sólido nos *Bell Labs*⁹, atraindo o seu brilhante investigador William Shockley para o chefiar¹⁰.

O grupo de investigação em semicondutores

William Shockley e Stanley Morgan constituíram o grupo de cientistas que iria descobrir novas aplicações dos semicondutores. Este grupo tinha tudo para dar certo, pois era constituído pelo experimentalista de materiais semicondutores Walter Brattain, o físico teórico do estado sólido William Shockley e o físico quântico John Bardeen. Três personalidades muito diferentes que fizeram uma das maiores descobertas do século 20 - o transístor. Estes três cientistas acabaram por receber o prémio Nobel em 1956 "*for research on semiconductors and the discovery of the transistor effect*".

O primeiro trabalho que Shockley deu a Brattain e a Bardeen foi que investigassem porque é que a sua proposta teórica de transístor de efeito de campo, apresentada anteriormente, na prática não funcionava¹¹. Bardeen¹² avançou com a hipótese da existência de cargas superficiais que impediam que o campo penetrasse no semicondutor, mas tanto ele como Brattain não investigaram essa ideia e acabaram por seguir um caminho diferente, à revelia do seu chefe. Mas, o palpite das cargas superficiais levou Bardeen e Brattain a descobrir que o contacto metálico injetava portadores minoritários no semicondutor. Chegaram ao transístor de contactos metálicos com germânio, seguindo um pouco a ideia do detetor de rádio de ponta metálica em contato com o semicondutor, recorrendo aos avanços que as descobertas de Ohl tinham trazido para os *Bell Labs* de Murray Hill.



Bardeen, Shockley e Brattain - Shockley observa o novo transístor.

⁹ - História dos *Bell Labs* - <https://quello.msu.edu/wp-content/uploads/2015/08/Memories-Noll.pdf>.

¹⁰ - Nesta altura Shockley trabalhava como consultor militar no departamento de defesa dos EUA.

¹¹ - A proposta de um dispositivo semelhante ao que seria o transístor de efeito de campo foi feita em 1925 por Julius Edgar Lilienfeld, mas ninguém ainda tinha conseguido realizar um dispositivo que funcionasse.

¹² - Bardeen é um dos dois cientistas que receberam dois prémios Nobel por trabalhos realizados na sua área de investigação.

Shockley não gostou do êxito dos seus dois investigadores. Começou a fazer investigação particular secreta em 1948 e prosseguiu a ideia de conceber um transistor de junção monolítico, apoiando-se, não só, nos trabalhos de Walter Schottky e de Neville Mott sobre as barreiras de potencial entre metais e semicondutores, mas também nos preocupantes avanços experimentais de John Shive¹³. Shockley apresentou em 1950 num artigo do *Bell Labs Journal* a teoria sobre o transistor de junção, dispositivo que só seria realizado em 1951.

Shockley era reconhecido por todos por ser excepcionalmente brilhante, mas as suas convicções sobre as teorias da eugenia acabaram por partir o grupo de investigação, tendo Bardeen e Shockley saído dos *Bell Labs*.

Em 1953, Shockley, descontente com a gestão dos *Bell Labs*, saiu e foi para o instituto privado *California Institute of Technology (Caltech)* como Professor Visitante, onde se tornou amigo de Arnold Orville Beckman (inventor do medidor de pH), da empresa *Beckman Instruments*.

Em 1955, Shockley e Beckman fundaram a primeira empresa *start-up* do chamado *Silicon Valley*, a *Shockley Semiconductor Laboratory* localizada em Mountain View, Califórnia. Contrataram novos investigadores na área dos semicondutores e Shockley reforçou a investigação na sua última invenção - o díodo de quatro camadas NPNP, pois vaticinava que seria tão importante como o transistor e teria uma enorme aplicação, nomeadamente na comutação telefónica.



Assim, Shockley contratou os oito mais brilhantes investigadores em semicondutores: Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Eugene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce e Sheldon Roberts, mas estes rapidamente entraram em conflito com as ideias de Shockley e pediram a Beckman que o tirasse da gestão, o que não aconteceu.

Estes investigadores acabaram por sair da empresa de Shockley e constituíram a empresa *Fairchild*¹⁴, em 1957, que viria a criar a divisão *Fairchild Semiconductor*, onde, pela mão de Gordon Moore, sairia o primeiro

¹³ - Shockley começou a ficar preocupado com os resultados obtidos por John Shive dos Bell Labs, que indicavam a mesma direcção de investigação.

¹⁴ - O investidor Sherman Fairchild foi fundamental ao acreditar nos objetivos do grupo.

transistor fabricado pela *Fairchild*, em 1958, com a tecnologia *Mesa Planar*¹⁵, o transistor de silício NPN, 2N696¹⁶ e também o 2N697, que difere apenas no ganho de corrente.

Mais tarde, estes oito jovens, designados por Shockley como traidores, viriam a formar as empresas *Intel* e *AMD*, que tiveram uma importância crucial no desenvolvimento das tecnologias de microeletrônica, que hoje têm uma importância estratégica mundial.

A empresa *Shockley* seria comprada pela *Clevite Transistor* em 1960 e, em 1968, pela *ITT*¹⁷, mas acabaria por fechar. Ficará para sempre recordada como a primeira empresa do Silicon Valley. Também a memória de Shockley e de Gordon Moore são lembradas pela criativa escultura existente na Rua San Antonio, 391, em Mountain View, Califórnia, que consta de um circuito elétrico com um diodo de Shockley de quatro camadas e o transistor 2N696.



O painel e a escultura no local dos *Shockley Laboratories* que relembram o início de *Silicon Valley*.

¹⁵ - Esta tecnologia obriga a um processo químico de corrosão do silício à volta de cada transistor e o aspeto do transistor é o de uma estrutura vertical tipo planalto. Aqui Gordon Moore e Jean Hoerni usaram a tecnologia que já conheciam dos *Bell Labs*.

¹⁶ - Os primeiros 100 transistores foram comprados pela IBM ao preço de US \$150 cada (cerca de US \$1500 atuais) para serem usados no computador do bombardeiro B-70 dos EUA.

¹⁷ - ITT – *International Telephone & Telegraph*.