

## 19. Conclusão.

Muitas outras experiências se poderiam juntar às que foram descritas. As que apresentámos são aquelas que parece terem maior interesse para os professores de Física do Ensino Liceal, de acordo com o programa dessa disciplina muito embora não esteja nele expresso o uso do osciloscópio.

Fora dos limites das aulas, é de crer que os professores tenham gosto em expe-

rimentar um instrumento tão sugestivo como este e em explorar as suas possibilidades. Sempre que num dado circuito haja variações de tensão eléctrica com o tempo decorrido, ou haja variações de qualquer outra grandeza que possam ser traduzidas em variações de tensão, recomenda-se o uso do osciloscópio para o que basta, em princípio, introduzir-lhe a base de tempo e ligar às placas YY os dois terminais do circuito entre os quais se pretende estudar as referidas variações.

# Técnicas de fabricação de transístores

pelo Eng. PEDRO MARTINS DA SILVA

## 1. Introdução

O interesse pelo estudo das propriedades dos materiais semicondutores vem já do século passado, quando, em 1873, foi observado que a condutância dos cristais de selénio dependia do nível de iluminação.

Nos primeiros anos do nosso século, os semicondutores eram utilizados largamente como detectores de sinais de rádio. O dispositivo mais comum consistia num cristal de sulfureto de chumbo em contacto com um fio flexível, o «pesquisador». Era este o órgão central das tão conhecidas «galenas».

O sucesso destes detectores seria, porém, efémero, dado que os tubos electrónicos trouxeram a possibilidade de uma detecção mais perfeita e, ainda, de amplificar os sinais.

Durante a Segunda Guerra Mundial, a necessidade de aperfeiçoar os sistemas de Radar por forma a tornar possível a localização de alvos de pequenas dimensões, obrigou à utilização de frequências

muito elevadas, domínio em que os misturadores com tubos electrónicos tinham comportamento deficiente. Ensaios realizados com cristais misturadores mostraram ser o silício quem melhor podia desempenhar tais funções.

Investigações detalhadas levadas a cabo sobre os materiais semicondutores vieram demonstrar que o silício e o germânio apresentavam propriedades que podiam ser utilizadas proveitosamente em dispositivos diversos a integrar em circuitos electrónicos. Um dos primeiros frutos desta investigação foi um díodo de germânio do tipo «contacto».

Em 1948 foi construído nos laboratórios da Bell Telephone o primeiro transistor de contacto e, em 1951, um transistor de junção, que, rapidamente, se afirmou como bastante superior ao de contacto.

A aplicação dos transístores generalizou-se. Pode dizer-se que, maravilhosa minúscula, constituiu o símbolo de uma época. E diz-se «constituiu» porque o transistor, unidade individualizada, tór-

na-se progressivamente obsoleto perante o circuito integrado.

O objectivo deste trabalho é descrever as técnicas utilizadas na fabricação dos transístores. Em face do que se disse no parágrafo anterior, a sua oportunidade pode parecer duvidosa, o que, no entanto, não corresponde à verdade, pois algumas das técnicas referidas são também utilizadas na fabricação dos circuitos integrados.

Os processos que se descrevem, referem-se unicamente à fabricação da estrutura cristalina que vai funcionar como transístor. Complementarmente há o estabelecimento dos contactos ao emissor, base e colector e o encapsulamento do cristal realizado numa atmosfera inerte. No processo de fabricação ainda se incluem operações de verificação diversas. Nomeadamente, após terminado o encapsulamento, uma última medição de características permite definir os diversos grupos da família que está em curso de fabricação. É óbvio, dado não só o número elevado de verificações a realizar como o ritmo elevado de fabricação que se torna necessário assegurar, que tais verificações são automatizadas no grau mais elevado possível.

Historicamente, os primeiros transístores de junção foram fabricados à custa da formação de junções PN durante o crescimento de um monocristal a partir de um banho em fusão. O processo iniciava-se mergulhando um núcleo de cristalização em silício fundido do tipo N (por exemplo) e procedendo à extracção lenta deste núcleo. Quando o cristal que assim se ia formando atingia um comprimento conveniente (da ordem de 6 mm), era lançada no material ainda em fusão uma substância do tipo aceitador, com o que se verificava a passagem a semiconductor P que iria constituir a base. A adição subsequente de material dador permitia completar a estrutura NPN do

transístor. O corte do monocristal em diversas pequenas barras permitia obter outros tantos transístores que experimentavam depois as operações de acabamento necessárias para os tornar utilizáveis. Este tipo de fabricação caiu actualmente em desuso, substituído pelas técnicas de liga e de difusão planar, a que se faz referência a seguir.

## 2. Transístores de liga

A técnica de fabricação que agora se refere é especialmente aplicável à fabricação de transístores de germânio, embora também possível para os de silício. A desvantagem principal do processo resulta de não ser possível reduzir a espessura da base a valores inferiores a  $0,7 \mu\text{m}$ , o que se traduz numa limitação de funcionamento em frequências elevadas.

Na Figura 1 representam-se esquematicamente as fases principais da constituição de uma junção PN. Depositada a substância do tipo aceitador (índio relativamente ao germânio) sobre a base de material semiconductor N, o aquecimento provoca a dissolução desta substância, com o que se vai formar a região N da junção.

A fabricação de um transístor processa-se analogamente, agora com a adição da substância do tipo dador de ambos os lados da lâmina de partida (tipo N). o aquecimento é controlado por forma a que, no final, as duas junções fiquem distanciadas de  $0,6 \mu\text{m}$ . Torna-se ainda necessário escolher uma disposição tal que as dimensões do colector sejam superiores às do emissor por forma que a grande maioria dos portadores de carga provenientes daqui venham a ser colectados, com vista a conseguir-se um ganho de corrente elevado.

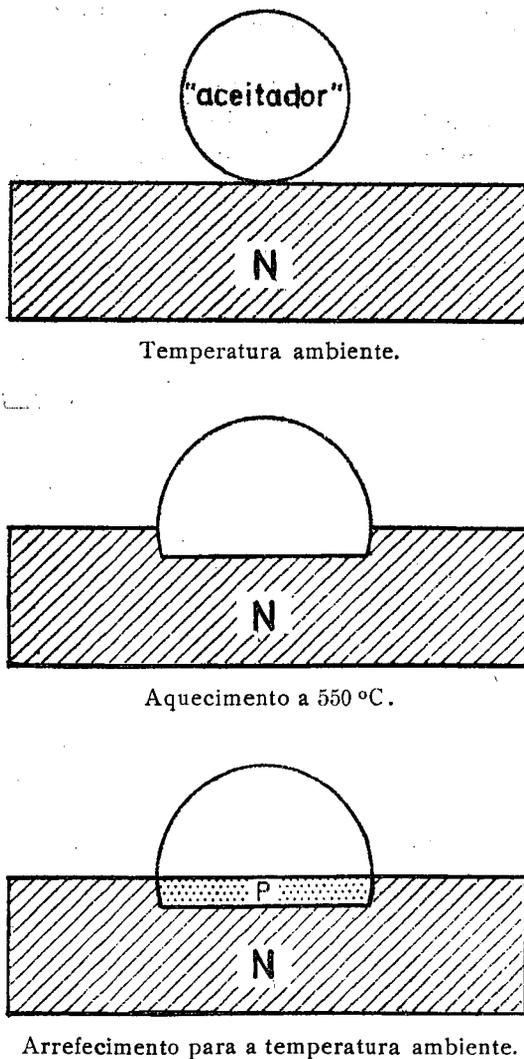


Fig. 1

### 3. Transístores de difusão

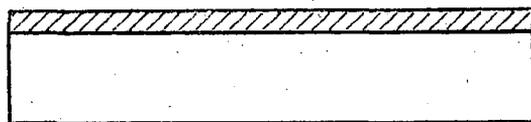
Diferentemente da técnica referida anteriormente em que estava em causa uma fase líquida, no processo de difusão, verifica-se o movimento de átomos da «impureza» (dos tipos dador ou aceitador) no interior de um material semiconductor no estado sólido. Na verdade, o aquecimento de uma placa de material semiconductor do tipo N (por exemplo) numa atmosfera de vapor de um elemento acei-

tador provoca a difusão de átomos deste elemento no material sólido, constituindo-se uma junção PN a pouca distância da superfície. Para o germânio, a difusão processa-se a cerca de 850°C e, para o silício, a temperaturas da ordem de 1000°C. Deve dizer-se, numa análise mais pormenorizada, que a difusão se processa em duas fases sucessivas. Primeiro o aquecimento na atmosfera de elemento dador origina uma deposição de átomos à superfície do semiconductor. Em seguida, novo aquecimento numa atmosfera de oxigénio ou azoto, provoca então propriamente a difusão dos átomos depositados. Como a velocidade de difusão é muito reduzida, o processo presta-se bem à constituição de camadas de espessura muito reduzida, necessárias para os transístores funcionando em frequências muito elevadas. Para a difusão no silício, utiliza-se normalmente o boro como elemento aceitador e o fósforo como dador. No germânio, os elementos dador e aceitador utilizados mais frequentemente são, respectivamente, o antimónio e o gálio.

É possível constituir, por difusão, uma estrutura dupla, partindo de um material do tipo N onde se difunde, em primeiro lugar, a substância aceitadora (formação da região P) e, em seguida, a substância dadora para constituir a nova região N.

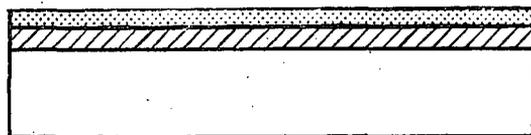
O processo de difusão mais utilizado é o planar, designação que traduz o facto de as três zonas—emissor, base e colector—se constituírem sobre a mesma superfície da placa de material semiconductor tomada como elemento de partida. Esta técnica de difusão planar, que vai descrita sinteticamente a seguir, utiliza a propriedade que as camadas de óxido de silício possuem de impedir a difusão de elementos estranhos.

Na figura 2 estão representadas esquematicamente as diversas etapas da fabricação de um transistor NPN planar. Oxidando a superfície da lâmina de silício N,



(a)

Formação da camada de óxido de silício.



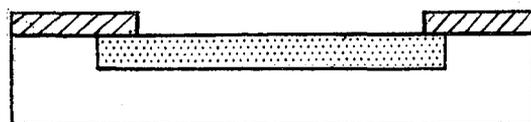
(b)

Deposição da camada fotossensível.



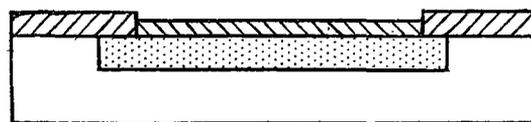
(c)

Remoção do óxido de silício na região da base.



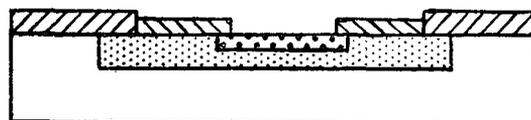
(d)

Difusão da base de tipo P.



(e)

Segunda oxidação superficial.



(f)

Difusão do emissor de tipo N.

Fig. 2

constitui-se uma camada protectora de óxido (espessura da ordem de  $0,01 \mu\text{m}$ ). Esta camada é revestida por um material fotossensível que, iluminado através de uma máscara, deixa descoberta, após a manipulação necessária à revelação, apenas uma certa zona do óxido de silício, que é removido por lavagem ácida apropriada. Por difusão de elemento aceitador, constitui-se a região P da base do transistor. Repetindo o processo de oxidação do silício e remoção do óxido na zona conveniente, consegue-se, por difusão de um elemento dador, constituir a região N do emissor, por forma a concluir a estrutura do transistor. Este processo de fabricação apresenta a vantagem de garantir uma protecção muito eficaz da junção colectora-base à custa do óxido de silício, o que torna a corrente de fugas do colectador muito reduzida.

Os transistores fabricados segundo a técnica que acabou de referir-se apresentam o inconveniente resultante de existir, entre a junção colectora e a região onde é possível estabelecer o contacto do colectador, uma camada de silício de espessura apreciável, constituindo uma resistência elevada. Para obviar a este inconveniente recorre-se à técnica de deposição epitaxial de uma camada fina de silício sobre um substrato de material de resistividade baixa (onde irá ligar o contacto do colectador); relativamente a esta camada de silício procede-se à difusão planar, como se referiu anteriormente.

A técnica de difusão planar também pode aplicar-se para a fabricação de transistores de germânio, embora com um grau de dificuldade maior, dado que o óxido de germânio não se presta a servir como isolador no processo de difusão, tendo por isso que utilizar-se para tal fim o óxido de silício.