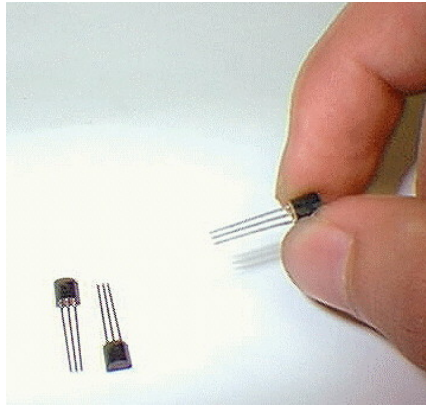


ELETRÔNICA DE JUNÇÃO



Compilado por
© Prof. Eng° Luiz Antonio Vargas Pinto
2008

Antecedentes e ambiente histórico	2
Biografia	2
William Shockley	2
Jonh Bardeen	3
Walter H. Brattain	3
Funcionamento do transistor	3
Estrutura de um semiconductor	4
Condutibilidade Intrínseca	4
O Cristal N	5
O Cristal P	6
Condução em um Cristal N	6
Condução em um Cristal P	6
Junção PN	6
Efeito da Tensão sobre a junção	7
Sentido de Condução	7
Sentido de Bloqueio	7
Transistores	7
O funcionamento	7

Antecedentes e ambiente histórico

Antes de 1950 todo equipamento eletrônico utilizava válvulas, aquelas com bulbo de baixo brilho que numa determinada época dominaram a nossa indústria. O aquecedor de uma válvula típica consumia muitos watts de potência. Por isso, os equipamentos a válvula exigiam uma fonte de alimentação robusta e criavam uma boa quantidade de calor que constituíam um problema a mais para os projetistas. O resultado eram os equipamentos pesados e antiquados tão difundidos naquela época.

Em 1951, William Shockley, juntamente com Jonh Bardeen e Walter H. Brattain, inventou o primeiro transistor de junção. Foi um desses grandes acontecimentos que mudam todas as regras. Todos estavam ansiosos na época e previam que grandes acontecimentos estavam para acontecer. Quando o fato se concretizou, as previsões mais ousadas não estavam nem perto do novo mundo que estava para vir.

O impacto do transistor na eletrônica foi enorme. Além de iniciar a indústria dos bilhões de dólares dos semicondutores, o transistor contribuiu para todas as invenções relacionadas, como os circuitos integrados, componentes optoeletrônicos e μ Ps.

Praticamente todos os equipamentos eletrônicos projetados hoje em dia usam componentes semicondutores.

As mudanças foram mais perceptíveis nos computadores. O transistor não revisou a indústria dos computadores, ele a criou. Antes de 1950 um computador ocupava uma sala inteira e custava milhões de dólares. Hoje, um bom computador cabe numa escrivaninha e custa, às vezes, menos de mil dólares.

Biografia

William Shockley



William Shockley nasceu em Londres, Inglaterra, em 13 de fevereiro de 1910. Filho de Hillman Shockley, um engenheiro de Massachusetts e sua esposa Mary.

A família retornou aos Estados Unidos em 1913 e William Jr. Foi educado na Califórnia, onde obteve seu doutorado em 1932. Estudou no Instituto de Tecnologia de Massachusetts onde obteve seu Ph.D. em 1936 com sua tese sobre a estrutura da banda de energia do cloreto de sódio. No mesmo ano, trabalhou nos laboratórios da Bell Telephone em um grupo liderado pelo Dr. C.J. Davissom, onde permaneceu até 1955.

Demitiu-se do cargo de diretor do departamento de física do transistor para começar como diretor do laboratório de semicondutores Shockley da Beckman Instruments na Califórnia, onde pesquisou o desenvolvimento e a produção de novos transistores e outros dispositivos semicondutores.

As pesquisas de Shockley foram centradas nas bandas de energias dos sólidos, teoria dos tubos de vácuo, alta difusão de copper, experimentos e teoria no domínio ferromagnético, vários tópicos na física do transistor etc.

Seu trabalho rendeu-lhe muitas honras. Recebeu a medalha do mérito em 1946 pelo seu trabalho no Departamento de Guerra; o Morris Leibmann Memorial Prize do Instituto de Engenharia de Radio em 1952; no ano seguinte o prêmio Oliver E. Buckley Solid State Physics da Sociedade Americana de Física, dentre muitos outros. Em adição a numerosos artigos científicos, Shockley escreveu *Electrons and Holes in Semiconductors* (1950) e publicou *Imperfections of Nearly Perfect Crystals* (1952). Também patenteou mais de 50 invenções.

Jonh Bardeen



Jonh Bardeen nasceu em Madison, Winsconsin em 23 de maio de 1908. Filho do Dr. Charles R. Bardeen e Althea Harmer.

Bardeen frequentou a Universidade de Madison por vários anos, mas após graduar-se foi frequentar um curso de engenharia elétrica na Universidade de Winsconsin onde participou de vários trabalhos nas áreas de física e matemática.

Após formado, trabalhou no departamento de engenharia da Western Electric Company em Chicago e ao mesmo tempo em que prosseguiu seus estudos.

Em Winsconsin trabalhou como assistente de pesquisa na área de engenharia elétrica por dois anos, dedicando-se a problemas matemáticos aplicados à geofísica e a radiação de antenas. Foi durante esse período que obteve conhecimento da teoria quântica através do professor J.H. Van Vleck.

Mais tarde trabalhou no Gulf Research Laboratories em Pittsburg, Pensilvânia no desenvolvimento de métodos de interpretação de medidas magnéticas e gravitacional. Este foi um período estimulante no qual os métodos geofísicos foram pela primeira vez aplicados para prospecção de petróleo.

Devido ao seu interesse mas na ciência pura que aplicada, Bardeen deixou seu trabalho no Gulf Laboratories em 1933 para fazer um trabalho de graduação em física matemática na Universidade de Princeton. Sob a liderança do professor E.P. Wigner, interessou-se primeiro pela física do estado sólido. Os próximos três anos ele passou trabalhando como o professores Van Vlerck e Bridgman em problemas de coesão e condutividade elétrica nos metais. Obteve seu Ph.D. em Princeton em 1936.

Os principais campos de pesquisa desde 1945 eram a condução elétrica em semi condutores e metais, teoria da supercondutividade e difusão dos átomos em sólidos. Em 1957, Bardeen e dois colegas, L.N.Cooper e J.R. Schrieffer, propuseram a 1ª explicação bem sucedida da supercondutividade.

Walter H. Brattain



Walter H. Brattain nasceu em Amoy, China em fevereiro de 1902. Filho de Ross R. Brattain e Ottilie Houser, ele passou sua infância no estado de Washington e graduou-se no Whitman College em 1924.

O Dr. Brattain foi membro da equipe técnica do Bell Laboratories desde 1929. O alvo principal das suas pesquisas foram as propriedades superficiais dos sólidos.

Desde cedo seu trabalho foi voltado para emissão termoiônica e absorção de camadas no tungstênio. Continuou no campo da retificação e foto-efeitos na superfície de semi condutores, iniciando com o estudo da retificação na superfície do óxido de cobre. Estudos similares foram feitos com o silício. Após a segunda guerra ele continuou na mesma linha de pesquisa com o silício e o germânio.

O Dr. Brattain recebeu o título honorário de doutor em ciência da Universidade de Portland em 1952, do Whitman College e Union College em 1955 e da Universidade de Minnesota em 1957. Em 1952 foi homenageado com a medalha Stuart Ballantine do Franklin Institute, e em 1955 com a medalha Honh Scott.

Dr. Brattain é um membro da National Academy of Science e do Franklin Institute; um associado da Sociedade de Física Americana e da Associação Americana para o Avanço da Ciência.

Funcionamento do transistor

Condutores, Semicondutores e Isolantes

Os materiais encontrados na natureza podem ser classificados, segundo o comportamento elétrico, em: isolantes, condutores e semicondutores.

Os condutores são materiais que apresentam grande número de elétrons livres, por exemplo: cobre, alumínio, ouro, etc. Os isolantes são materiais que não apresentam elétrons livres, por exemplo: mica, papel, plástico, etc.

Os semicondutores são materiais que não apresentam comportamento de isolante nem de condutores, isto é,

não são nem bons isolantes nem bons condutores. A resistividade de um condutor, à temperatura ambiente, é da ordem de $10^{-5} \Omega$ e de um isolante é aproximadamente $10^7 \Omega$.

Nos semicondutores a resistividade varia de 10^{-3} a $10^5 \Omega$. O fator que influencia muito a estrutura dos semicondutores é a temperatura. Ao contrário do que se observa nos condutores, a resistividade de um semicondutor diminui com o aumento da temperatura pois com o acréscimo da energia térmica mais elétrons livres são obtidos.

Outra propriedade interessante que os semicondutores apresentam é a fotocondutividade, que é a propriedade que um material possui de produzir maior ou menor quantidade de elétrons livres, e, portanto maior ou menor resistência à corrente elétrica, em função da intensidade luminosa incidente.

Nos semicondutores a fotocondutividade aumenta com o aumento da intensidade da iluminação incidente, pois elétrons são liberados pelas interações fotoelétricas com os átomos da rede cristalina.

Estrutura de um semicondutor

Um átomo se compõe de um núcleo e de uma eletrosfera. Cada elétron possui carga negativa e se move, dentro da eletrosfera, em trajetórias médias denominadas órbitas eletrônicas. Os elétrons da camada externa são os responsáveis pelas ligações entre os átomos do material.

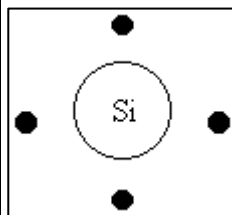
O átomo de silício possui 3 camadas nas quais 14 elétrons estão distribuídos da seguinte forma:

- ☉ 2 elétrons na primeira camada,
- ☉ 8 elétrons na segunda camada e
- ☉ 4 elétrons na terceira camada.

O átomo assim constituído se apresenta neutro e, para simplificarmos a sua representação, utilizaremos o esquema apresentado pela figura 1 que evidencia os quatro elétrons de valência. Essa representação pode ser utilizada também para o átomo de germânio pois apresenta a seguinte distribuição eletrônica: 2, 8, 18, 4.

Os elétrons de valência podem ser afastados do átomo através de acréscimos de energia, por exemplo, térmica, luminosa, elétrica, aumentando o núme-

ro de elétrons livres e variando a condutividade do cristal.



O silício cristaliza-se no sistema cúbico e apresenta quatro elétrons na última camada, cada um dos quais, combinando com um elétron

de 4 átomos adjacentes, constitui por sua vez elétrons de configuração energética muito estável que recebem o nome de ligação covalente, conforme mostra a figura 2.

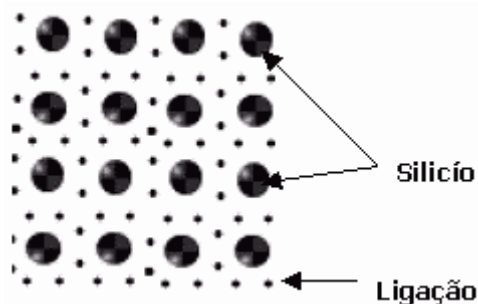


Figura 2

Dessa forma, cada átomo é associado àquele que o circunda. O cristal é um isolante perfeito à temperatura de zero absoluto ($0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$), não apresentando nenhum elétron livre, entretanto tal fato não é verificado à temperatura ambiente.

Por elevação da temperatura ou por incidência de radiação luminosa aparecem vibrações entre os átomos que podem causar rupturas das ligações covalentes.

Esta ruptura provoca a liberação de um elétron assim como deixa uma falha com o surgimento de uma ligação incompleta. O elétron se transforma em elétron livre e a falha pode simbolizar uma carga positiva (ausência de carga negativa) que é denominada lacuna.

Condutibilidade Intrínseca

Quando uma diferença de potencial é aplicada em um semi-condutor, as lacunas se movem em direção oposta à dos elétrons livres e com a mesma velocidade praticamente. Esse deslocamento é na realidade o deslocamento de elétrons livres no sentido da tensão aplicada; aparentemente as lacunas se deslocam em sentido contrário à da tensão aplicada, conforme mostre a figura 3.

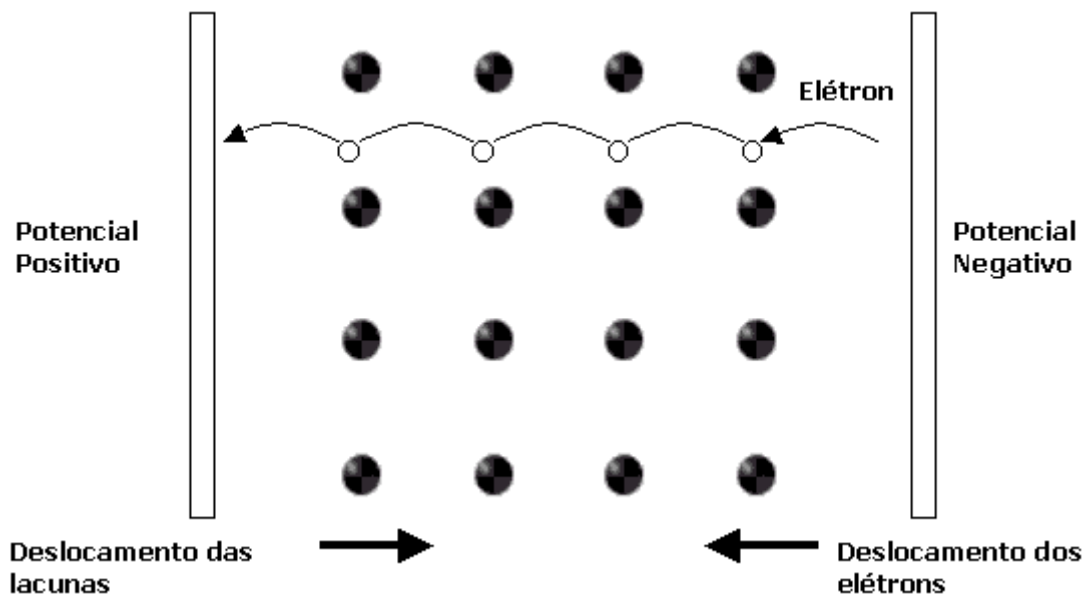


Figura 3

À temperatura ambiente existe um determinado número de elétrons livres e de lacunas móveis. A velocidade de produção de elétrons livres e de lacunas móveis depende da temperatura e a condutividade do cristal depende do número de elétrons e de lacunas.

A condutividade de um cristal de silício à temperatura ambiente é pequena, pois a aparição de um elétron livre implica imediatamente uma lacuna e a taxa de recombinação é extremamente grande.

Com a adição controlada de determinadas impurezas, a condutividade do cristal de silício ou de germânio pode ser bem controlada.

Denomina-se dopagem o processo de adição controlada de impurezas específicas ao cristal puro do semiconductor.

As dopagens podem ser do tipo N ou do tipo P. No cristal do tipo N foram injetadas impurezas que favoreceram o aparecimento de elétrons livres e no cristal de tipo P foram colocadas impurezas que favoreceram o surgimento de lacunas.

As impurezas que produzem o cristal de tipo N são impurezas pentavalentes, por exemplo: arsênico, antimônio ou fósforo.

Para a produção do cristal do tipo P são utilizadas as impurezas trivalentes, por exemplo: boro, alumínio ou índio. Nos cristais do tipo N a condução é feita, essencialmente, por elétrons livres e nos cristais de tipo P a condução é feita por lacunas móveis.

O Cristal N

Considerando um cristal de Ge puro onde injetamos átomos de As no cristal. Sendo o As um elemento pentavalente, ao se fixar na estrutura do cristal, por meio de 4 ligações covalente, aparecerá um 5º elétron fracamente ligado ao seu núcleo, conforme mostra a fig 4.

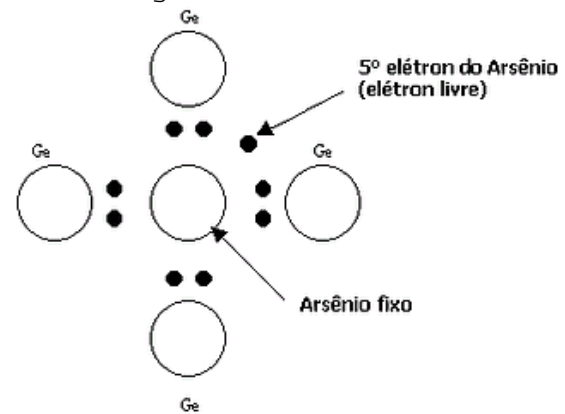


Figura 4

O arsênio recebe a denominação de doador. Uma vez fixo na estrutura, o quinto elétron fracamente ligado será deslocado e a região ficará ionizada positivamente.

Assim o cristal N apresentará regiões positivas fixas e elétrons livres. Em um típico cristal semiconductor de tipo N, os portadores majoritários são elétrons livres.

O Cristal P

Consideremos um cristal de germânio puro e injetemos átomos de índio nesse cristal. Sendo um elemento trivalente, o índio só poderá oferecer três elétrons para as ligações covalentes da estrutura, originando portanto uma lacuna. O índio recebe o nome de aceitador. A temperatura ambiente são produzidos elétrons intrínsecos e estes são presos nas lacunas produzidas pelas impurezas, fechando a última camada em oito elétrons e fazendo com que a região fique ionizada negativamente, conforme figura 5.

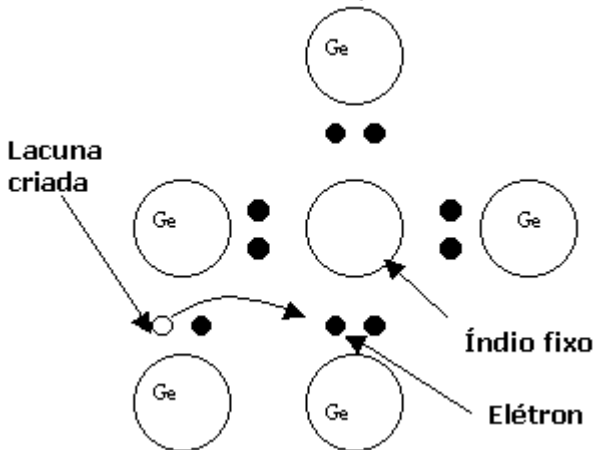


Figura 5

As lacunas aparecem na captura do elétron intrínseco, pois este ao ser liberado produz uma lacuna. Em um típico cristal P, cujos portadores majoritários são lacunas móveis e apresenta regiões negativas fixas na estrutura.

Condução em um Cristal N

Consideremos o cristal de germânio de tipo N nas condições da figura 6.

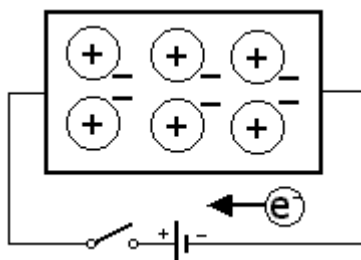


Figura 6

Ao ligarmos o interruptor, verificaremos a passagem de uma corrente de elétrons livres em direção ao pólo positivo da bateria, não importando se houve ou não inversão de polaridade.

Não ocorre nenhum fenômeno de retificação em cristal de germânio de tipo N.

Condução em um Cristal P

Consideremos a situação apresentada pela figura 7.

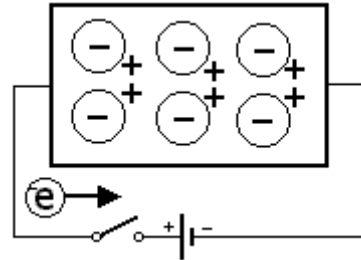


Figura 7

Ao ligarmos o interruptor S, verificaremos a passagem de uma corrente de lacunas móveis em direção ao pólo negativo da bateria, não levando em conta se houve ou não inversão da polaridade da bateria.

Não ocorre nenhum fenômeno de retificação em um cristal de germânio de tipo P.

Junção PN

Junção PN é uma região muito fina de um monocristal na qual a condutividade passa da condutibilidade de tipo P à condutibilidade de tipo N.

Consideremos um monocristal de germânio que contenha as dopagens de tipo P e tipo N, como mostra a figura 8.

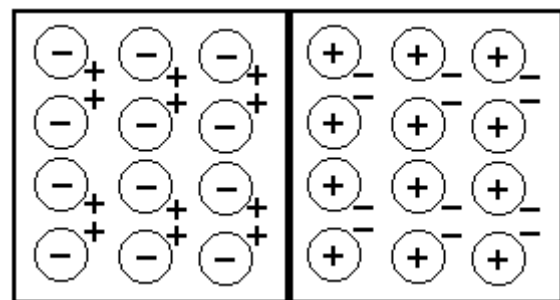


Figura 8

Ao serem colocados em contato os cristais P e N, ocorrerá uma difusão de lacunas móveis e de elétrons livres.

Os elétrons livres da região N, ao se encontrarem com as lacunas móveis da região P, farão a recombinação dos pares elétron-lacuna e farão também com que surja uma região essencialmen-

te positiva fixa no cristal n e uma região essencialmente negativa fixa no cristal P. A tensão existente entre essas duas regiões recebe o nome de barreira de potencial.

Efeito da Tensão sobre a junção

Sentido de Condução

Ao ser estabelecido um circuito onde a região N é submetido a um potencial positivo de uma bateria e a região P ao negativo, observa-se que a tensão externa e se opõe à barreira de potencial da junção PN. Esta oposição enfraquece a barreira e faz com que elétrons passem da região N à região P, estabelecendo-se uma corrente no circuito.

Podemos portanto concluir que, quando a região P estiver em potencial mais alto do que a região N, a junção é dita polarizada diretamente e o cristal permite a passagem da corrente, isto é, ele conduz.

Sentido de Bloqueio

Se as regiões N e P forem ligadas a uma bateria com a polaridade inversa ao descrito acima, a tensão externa estará reforçando a barreira de potencial.

Desse modo os elétrons não atingirão a região P se esta estiver em potencial mais baixo que a região N. A junção estará polarizada inversamente e o cristal não conduzirá.

Na prática, porém, aparece uma corrente muito pequena proveniente de lacunas e elétrons livres produzidos por agitação térmica próximos da junção PN. Essa corrente é da ordem de $10\mu\text{A}$ no silício, porém será tanto maior quanto maior for a temperatura. Essa corrente recebe o nome de corrente de saturação inversa ou corrente de fuga.

Transistores

Todo o funcionamento dos transistores é regido pela física dos semicondutores.

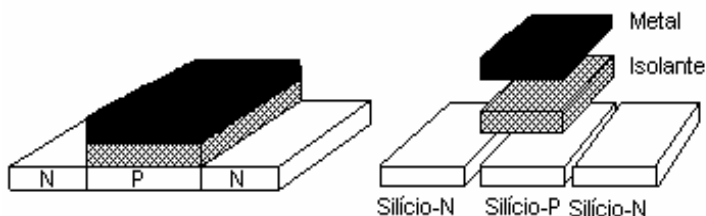
O transistor pode ser considerado como um conjunto de bipolos não ôhmicos cujas características variam com as tensões aplicadas, com as potências dissipadas e com a temperatura ambiente. Seu estado é aparentemente mais complicado que o da válvula, porém com noções fundamentais dos parâmetros, como resistência de saída, fator de amplificação e resistência de entrada, amplificação de corrente e percentagem de reação interna, esse estudo será acessível.

Outra informação importante é o conjunto de características dadas pelo fabricante que permitem analisar o funcionamento do transistor como elemento ativo ou elemento passivo.

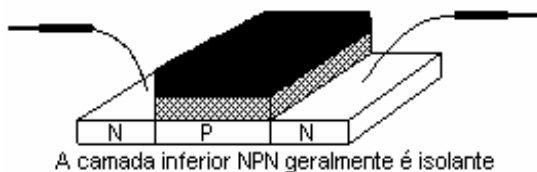
O funcionamento

Partimos do princípio de que o menor e mais simples componente semicondutor de um computador é o transistor. A figura seguinte mostra um transistor PNP planar (planar significa plano). Como você pode ver, o transistor é composto de finas camadas planas, como um sanduíche. Isso justifica por que ele se chama planar.

A camada de baixo do transistor é feita de dois tipos de silício: silício N e silício P. O silício do tipo N e o do tipo P são feitos adicionando-se elementos químicos diferentes ao silício puro. Como já sabemos, o silício puro é um semicondutor; no entanto, depois que os outros elementos químicos são adicionados, a camada de baixo do transistor se torna isolante. Ambos os silício P e N, são necessários para fazer o transistor funcionar. Uma faixa de silício do tipo P fica entre duas faixas de silício do tipo N, e por isso ele é chamado de transistor PNP.



A camada do meio do transistor é um isolante bem fino. Na verdade não importa que tipo de isolante é usado, contanto que os elétrons não consigam atravessá-lo. A camada de cima do transistor é feita de um condutor. Algumas vezes é usado algum metal; outras, algum outro tipo de condutor. Observe a ilustração que se segue. Dois fios foram conectados às faixas de silício do tipo N do transistor. Esses fios fornecem um caminho para os elétrons entrarem ou saírem da camada de baixo. A camada inferior de silício N e P, porém, geralmente funciona como um isolante. Dessa forma os elétrons não conseguem passar de um fio para o outro.



Para entender como um transistor funciona, você precisa ter em mente alguma coisa sobre a discussão de baterias e diferença de potencial (ddp). Lembre-se de que em corrente contínua, tendo como exemplo simples uma pilha de rádio, teremos acúmulo de elétrons (Cargas negativas) de um lado e portanto um pólo negativo -. Do outro lado da pilha existe falta de elétrons e conseqüentemente a formação de um pólo positivo (+). Se a extremidade de um fio toca o terminal negativo de uma bateria, como este é condutor, o seu terminal fica (-) tal como o terminal da bateria. Por quê ?

Porquê o fio, sendo condutor, permite o deslocamento das cargas negativas para a extremidade do condutor. Da mesma forma, se uma extremidade do fio toca o terminal positivo da bateria o terminal do fio fica com potencial positivo.

Agora vamos colocar a camada de cima do transistor em transistor no pólo positivo da bateria. Fazemos isso ligando uma extremidade do fio a ela e a outra extremidade ao terminal posi-

tivo de uma bateria, como mostrado na ilustração. A bateria tenta puxar elétrons pela camada superior do transistor.

Nenhum elétron entra na bateria, é claro, porque esta camada está rodeada por isolantes: existe ar em torno dela e uma camada fina de isolante abaixo dela. Mas a bateria continua tentando puxar elétrons através da camada superior, e dessa forma a camada superior assume potencial (+). Como a camada superior do transistor esta positivo (+), a camada inferior torna-se condutora!

Resumidamente isto tem a ver com os dois tipos de silício da camada inferior. Essa camada se altera quando a camada superior fica (+). Agora, os elétrons podem passar de um fio da camada inferior para outro fio.

A coisa mais importante para lembrar a respeito transistores PNP é isso: geralmente, a camada inferior do transistor é isolante. Mas se a camada superior fica (+), então a camada inferior torna-se condutora e dizemos que o transistor esta conduzindo.

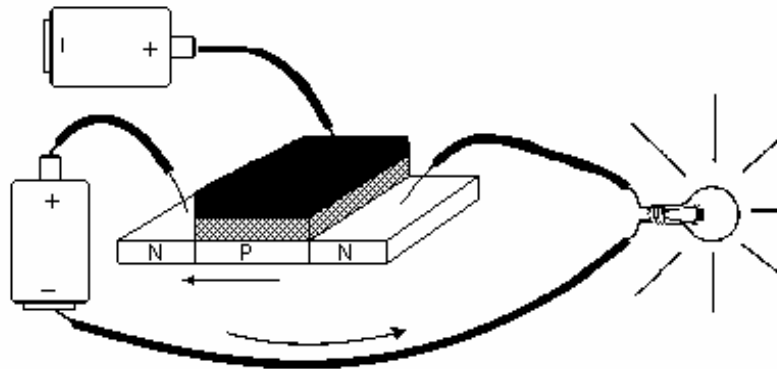
O circuito elétrico mostrado na ilustração a seguir é similar ao que você já viu antes, exceto que havia um fio indo direto da lâmpada para o terminal (+) da bateria e aqui o fio vai da lâmpada para a camada inferior do transistor, e ainda o outro fio sai da camada inferior e volta para a bateria.

Vamos ver o que está acontecendo: um fio esta conectado ao terminal (+) da bateria. Logo a bateria está tentando puxar elétrons por ele, mas a outra extremidade está conectada à camada inferior do transistor e como essa camada é isolante, nenhum elétron entra na bateria. A bateria consegue empurrar alguns elétrons por seu terminal (-). Esses elétrons passam por um fio, pelo filamento da lâmpada e então pelo outro fio. Mas a ponta desse fio também está na camada inferior do transistor. Esses elétrons não têm

para onde ir. Eles param de se mover e a lâmpada não acende.

Agora, suponha que a camada superior do transistor seja colocada no (+) como mostra a próxima ilustração. De repente, a camada inferior torna-se condutora e os elétrons conseguem passar por ela. Agora existe um circuito para os elétrons entrarem e saírem da bateria, e a lâmpada então acende.

Neste circuito, o transistor funciona como um interruptor. Quando o terminal (+) da bateria não está conectado à camada de cima, a camada inferior permanece isolante, e a lâmpada fica apagada. Mas se o terminal (+) é conectado à camada superior, a camada de baixo torna-se condutora, e a lâmpada acende.



Existe outro tipo de transistor planar: PNP (a camada de baixo possui uma faixa do tipo N entre duas faixas do tipo P). Esse arranjo faz esse transistor comportar-se de forma diferente.

Geralmente a camada inferior do transistor PNP é isolante; entretanto quando a camada superior fica (+), a camada inferior torna-se condutora.

Assim, quando a camada superior do transistor NPN está (+), a camada inferior torna-se condutora. Quando a camada superior do transistor PNP está (-), a camada inferior torna-se condutora. Como os dois fazem a mesma coisa com potenciais opostos, esses dois tipos de transistores são chamados de transistores complementares.