



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Os Dispositivos Eletrônicos Semicondutores.

Neste verbete vamos analisar o desenvolvimento dos **dispositivos eletrônicos** construídos com materiais semicondutores. Em verbete desta série, vimos que o físico alemão Karl Ferdinand Braun (1850-1918; PNF, 1909), em 1874 (*Annalen der Physik* **102**, p. 550), descobriu que os cristais de sulfetos metálicos, como, por exemplo, o sulfeto de chumbo (PbS) – a **galena** – conduziam corrente em uma só direção. No entanto, essa descoberta não teve imediata aplicação prática, até que o engenheiro elétrico norte-americano Greenleaf Whittier Pickard (1877-1956), em 1906, a utilizou como um receptor de rádio, e descobriu que o contato entre um fio metálico e a superfície de certos cristais [notadamente o silício (Si)] retifica e demodula correntes alternadas de alta frequência, tais como as produzidas em uma antena receptora de ondas de rádio. Contudo, como nessa época não se conhecia o processo de condução elétrica nos sólidos, essa aplicação prática não teve outras consequências. Assim, somente com o desenvolvimento da Física do Estado Sólido, principalmente a Teoria de Bandas, foi possível inventar dispositivos eletrônicos baseados nessa Teoria. Vejamos como isso aconteceu.

O artigo pioneiro e fundamental da Teoria de Bandas foi escrito pelo físico suíço-norte-americano Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952), em 1928 (*Zeitschrift für Physik* **52**, p. 555). Neste artigo, Bloch assumiu que os elétrons se movimentavam em um condutor metálico sob a ação de um potencial periódico unidimensional, muito maior que a energia cinética dos movimentos – potencial esse conhecido como de **ligação forte**. Desse modo, ele resolveu a **equação de Schrödinger** (ver verbete nesta série) e, com isso, mostrou que a função de onda do elétron em um auto-estado de energia em uma rede (“lattice”) periódica perfeita tem a forma do produto de uma onda plana por uma função periódica.

Ainda em 1928 (*Annalen der Physik* **87**, p. 55), o físico germano-norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) encontrou a função de onda blochiana considerando que os elétrons, ao incidirem em um metal em certos intervalos de energia, são completamente refletidos. Esse método ficou conhecido como **ligação fraca**. De posse desse método, Bethe demonstrou ainda que para determinadas direções de incidência e para certos intervalos de energia do elétron, não se poderiam construir soluções para a propagação do elétron através do cristal. A presença de descontinuidades no espectro de energia de elétrons sob potenciais periódicos, as chamadas bandas proibidas, foram também encontradas, em 1930, em trabalhos distintos, realizados pelos físicos, o norte-americano Philip McCord Morse (1903-1985), o inglês Rudolf Ernest Peierls (1907-1995) e o francês Leon Nicholas Brillouin (1889-1979).

Novas e importantes contribuições para o desenvolvimento da Teoria de Bandas foram encontradas na década de 1930. Por exemplo, logo em 1931, os físicos, o alemão Ralph de Laer Krönig (1904-1995) e o inglês Sir William George Penney (1909-1991) obtiveram uma relação entre a estrutura de bandas e os espectros de energia dos estados quânticos de elétrons em cristais. Também em 1931, o físico Alan Harris Wilson apresentou a ideia de que elétrons quase-livres, como os da banda de valência em átomos simples, poderiam formar camadas abertas ou fechadas. Registre-se que essa ideia de valência foi apresentada em 1888, com o objetivo de explicar a capacidade de combinação dos elementos químicos, através de regras empíricas. Em 1916, em trabalhos independentes, os físicos-químicos, o norte-americano Gilbert Newton Lewis (1875-1946) e o alemão Walther Kossel (1888-1956), formularam a ideia de que os elétrons externos do modelo atômico bohriano, de 1913, eram os responsáveis pela valência.

Os resultados obtidos por Wilson levaram-no a fazer a distinção clara entre condutores e isolantes, definindo-os, respectivamente, como sólidos que apresentam a banda de energia parcialmente cheia e, completamente cheia de elétrons. Ainda para Wilson, os sólidos situados entre esses dois tipos – os chamados semicondutores -, têm as bandas de energia ou quase cheias, ou quase vazias. Ainda em 1931, A. Schulze observou que o silício metálico, quando recoberto com uma camada de óxido, apresentava aumento de condutividade.

Por sua vez, Bloch e Wilson, em experiências distintas também em 1931, apresentaram a diferença entre condutores e semicondutores, bem como mostraram que a presença de impurezas num semicondutor faz aparecer níveis de energia na banda proibida, aumentando sua condutividade. Para Wilson, tal condutividade era devido ao elétron associado a impureza, cuja energia situava-se na banda proibida próxima banda de condução, de modo que ele poderia ser excitado termicamente até essa banda. A condutividade de semicondutores pela presença de impurezas intrínsecas (defeitos) em sua rede cristalina [ou mesmo pela ausência (vacâncias) de átomos do próprio cristal em sua estrutura de rede], também foi observada em experiências realizadas por Peierls, em 1932, e por Schottky, em 1933.

Os tipos de experiências realizadas por Wilson, Peierls e Schottky sobre semicondutores, na primeira metade da década de 1930, foram ampliadas e modificadas por toda essa década e na década de 1940, principalmente com o Si e o germânio (Ge). Por outro lado, ao ser desenvolvida a técnica de dopagem, ou seja, a dissolução de traços de materiais quimicamente diferentes nesses dois tipos de semicondutores foi possível torná-los condutores. Contudo, dependendo da “impureza” utilizada, tais semicondutores comportam-se diferentemente com relação à condução. Por exemplo, o Ge e o Si tem valência 4, enquanto o fósforo (P) e o arsênio (As) tem valência 5. Assim, se o Ge (ou Si) for “contaminado” (dopado) com impureza do tipo P (ou As), o elétron extra correspondente será responsável pelas propriedades condutoras do Ge (ou Si) que, neste caso, recebe o nome de semicondutor tipo-n, onde n significa que o portador de carga é negativo.

Por sua vez, se o Ge (ou Si) for dopado com impureza cuja valência seja menor do que a desses elementos químicos [o gálio (Ga), por exemplo, cuja valência vale 3], a ausência do elétron do átomo inserido no cristal semicondutor cria um sítio vazio (buraco, lacuna – “hole”) para o qual se dirige um elétron vizinho daquele cristal, criando um novo buraco, para o qual se dirige um novo elétron e assim sucessivamente. Neste caso, o semicondutor resultante recebe o nome de semicondutor tipo-p, onde p significa que o portador de carga é positivo.

A importância tecnológica dos semicondutores dopados surgiu quando o físico norte-americano William Bradford Shockley (1910-1989; PNF, 1956), trabalhando no *Laboratório Bell*, em 1945, descobriu que um cristal de Ge contendo traços de uma determinada impureza funcionava como retificador. Desse modo, podia controlar os elétrons móveis no interior desse tipo de semicondutor, com um campo elétrico externo. Para explicar esse resultado, o físico norte-americano John Bardeen (1908-1991; PNF, 1957; 1972), que também trabalhava no *Bell*, propôs uma teoria segundo a qual tal resultado era devido a armadilhas (“traps”) superficiais.

Em 1947, Bardeen e o físico norte-americano Walter Houser Brattain (1902-1987; PNF, 1956) [que trabalhava com retificadores de óxido de cobre (CuO) no *Bell*], imergiram uma peça de Ge em um eletrólito e descobriram que poderiam fazer passar uma corrente elétrica através de um material de alta resistência, fenômeno esse que ficou conhecido como **efeito transistor** (transfer-resistor). Em dezembro de 1947, esses dois cientistas usaram esse efeito para construir o transistor de pontas (“bigode de gato”) constituído de uma base de Ge (tipo-n), na qual se apoiavam dos finos fios metálicos. Um dos fios é polarizado para frente em relação à base, compondo o chamado **emissor**. O segundo fio apresenta uma polaridade reversa, e é denominado **coletor**. Com tal dispositivo, verificaram que a variação da corrente no emissor causava uma variação igual ou maior no coletor: isto indicava que ele poderia funcionar como um amplificador.

Em janeiro de 1948, Shockley inventou o transistor de junção constituído por um “sandwich” de semicondutores tipo n-p-n ou p-n-p. Esse novo dispositivo evitava os importunos contatos

metálicos do transistor de pontas de Bardeen-Brattain, bem como demonstrava que a amplificação e a retificação ocorriam também no interior dos semicondutores, e não apenas em sua superfície.

Concluindo este verbete, é oportuno registrar que a Teoria de Bandas de Bloch-Peierls-Morse-Wilson-Heisenberg deu ensejo ao estudo dos **doadores** e **receptores**, base para a construção dos **transistores semicondutores**, em 1947 e 1948 (vide verbete nesta série), e, com eles, a Revolução Tecnológica que aconteceu a partir da segunda metade do Século 20.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)