

Princípios de Funcionamento e Aplicações de Dispositivos Semicondutores

Luis Vicente de Andrade Scalvi⁸

- **Resumo:** O desenvolvimento dos materiais semicondutores tem propiciado o avanço da mais pura física, que tem nesses materiais um exemplo prático de questões que no passado eram puramente acadêmicas, e também da confecção de dispositivos que são a base de toda a indústria da eletrônica lógica e de controle. Neste trabalho é feito um resumo dos principais conceitos envolvidos na física de semicondutores e um breve histórico de seu desenvolvimento. O princípio de funcionamento dos dispositivos mais simples, ou seja diodo e transistor, é tratado de modo sintético, dando enfoque no semicondutor mais empregado - silício, e são também mencionados exemplos de dispositivos e materiais mais complexos.

Unitermos: Física do Estado Sólido, Dispositivos Eletrônicos, Semicondutores, Silício.

Abstract: Semiconductor materials have yield advancement of the purest physics, since they are real examples of formerly academical issues. Besides, semiconductor devices are the background of the whole logical and control electronic industry. In this paper it is done a brief discussion of the main concepts involved in semiconductor physics and a simplified historical review. It is also discussed some examples of semiconductor devices : diode and transistor, which are treated in a simple approach, focusing the most used semiconductor material, silicon. Examples of more complex devices and materials are also presented.

Keywords: Solid State Physics, Eletronic Devices, Semiconductors, Silicon.

O que é um semicondutor

Átomos isolados possuem seus elétrons ocupando níveis discretos de energia. Esses níveis de energia para um átomo isolado de hidrogênio são dados pelo modelo de Bohr [1]. Só é permitido para um elétron ocupar um nível com energia bem definida. Num sólido, porém, onde vários átomos são aproximados, os níveis de

⁸ Professor Assistente Doutor do Departamento de Física da Faculdade de Ciências / UNESP - Campus de Bauru

energia discretos dos átomos individuais se perturbam uns aos outros, criando um contínuo de estados de energia permitidos. Ainda assim serão também criados estados não permitidos, ou proibidos. Estes estados constituem o que se conhece como gap proibido ou bandgap, que é a característica principal que distingue um metal de um isolante ou de um semiconductor. Para se entender melhor como se forma este quadro de estados permitidos e proibidos, pode-se olhar a figura 1a, que representa os níveis de energia do elétron em função do espaçamento entre átomos da rede cristalina. Essa figura pode ser interpretada como a aproximação entre dois átomos adjacentes. Quando eles estão longe um do outro cada átomo tem seus níveis de energia discretos (representados pelas retas paralelas do lado direito). Conforme vão sendo aproximados cada nível de energia vai se abrindo, de modo a formar uma banda, até que as bandas formadas em cada átomo a partir dos níveis discretos originais, perdem sua identidade e se sobrepõem formando uma banda única. Quando a distância entre átomos se aproxima da distância de equilíbrio (por ex. 5,43 Å para Silício), esta banda se abre em duas bandas. Estas duas bandas são separadas pelo gap proibido, que os elétrons advindos dos átomos do sólido não podem ocupar. A região superior é chamada de

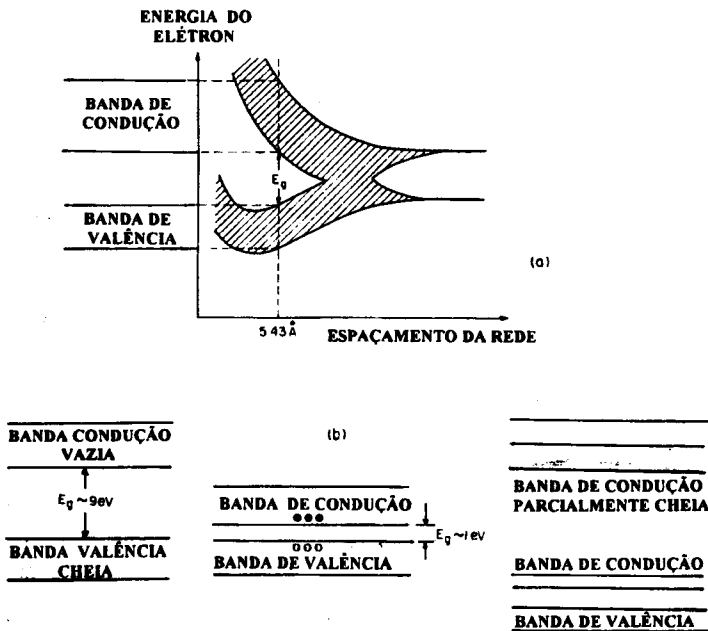


Figura 1 - (a) diagrama esquemático da formação das bandas eletrônicas num cristal. (b) estrutura de bandas em materiais: esquerda - isolante, centro - semiconductor, direita - metal (condutor)

banda de condução e a região inferior é a banda de valência, como mostrado do lado esquerdo da figura 1a.

A separação dos sólidos em isolantes, semicondutores e condutores é feita exatamente pela disposição do .bandgap.. Isto é mostrado na figura 1b. A diferença entre um semicondutor e um isolante está no tamanho do bandgap. Um isolante típico possui gap da ordem de 9 eV e um semicondutor como silício possui bandgap da ordem de 1 eV. Isto faz com que um simples aumento de temperatura seja suficiente para excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, desde que a energia ganha por este elétrons é $k.T$, onde k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. Em temperaturas comuns, a banda de condução de um semicondutor é ocupada por alguns elétrons que podem, portanto, conduzir a corrente elétrica. Em condutores como os metais, a banda de condução ou é parcialmente cheia ou se sobrepõe à banda de valência. Assim sempre teremos uma quantidade razoável de elétrons ocupando a banda de condução e assim os metais podem conduzir facilmente a corrente elétrica.

Os semicondutores utilizados para as aplicações mais usuais, como material básico de dispositivos de eletrônica lógica e de controle, usam um artifício conhecido como dopagem. Dopar um semicondutor significa incorporar átomos de impurezas que uma vez ligadas na rede cristalina do material vão gerar excesso de portadores de carga, aumentando a condutividade elétrica do mesmo. No Silício, por exemplo, cada átomo faz 4 ligações com outros 4 átomos de silício. Se introduzirmos neste material alguns átomos de Arsênio, que é capaz de fazer 5 ligações, cada átomo da impureza vai ocupar o lugar de um átomo de Silício (substituição) e ficará com um elétron de ligação sobrando e assim este elétron será liberado para conduzir a corrente elétrica. Se doparmos o Silício com átomos de Gálio, que faz 3 ligações, teremos a ausência de uma ligação, o que é chamado um buraco ou lacuna, sendo um portador de carga positivo, ou seja : conduz a corrente elétrica em sentido contrário à corrente de elétrons. Um semicondutor com excesso de elétrons é chamado do tipo n e um semicondutor com excesso de buracos é chamado do tipo p.

O Desenvolvimento Inicial da Física de Semicondutores

Nos últimos 50 anos tem havido uma relação estreita entre física de semicondutores, tecnologia e engenharia de dispositivos, que exemplifica as dimensões do empreendimento científico a partir da mais pura física [2]. O desenvolvimento da ciência de semicondutores foi muito mais um esforço de organização do que individual. Ao contrário da Mecânica Quântica, onde haviam muitas figuras dominantes como Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli entre outros, a ciência de semicondutores foi desenvolvida por cientistas trabalhando em conjunto em laboratórios de empresas como .Bell Telephone Laboratories., General Electric, RCA e outras.

Durante a segunda guerra mundial, a tecnologia de semicondutores se baseou nos detectores de microondas para uso em radares, que usavam Silício e Germânio. Um pouco antes do final da guerra a Bell laboratories lançou um documento chamando seus cientistas para se dedicarem ao desenvolvimento de componentes completamente novos para sistemas de comunicação. A invenção do transistor veio dois ou três anos mais tarde. O transistor desenvolvido por J. Bardeen

em 1947 era de difícil reprodução e compreensão devido à natureza dos contatos, e nunca se tornou importante industrialmente. No entanto sua invenção foi a fagulha que iniciou a explosão da tecnologia de se fazer melhores cristais e o estudo científico de semicondutores. Embora o ímpeto inicial para o trabalho fosse tecnológico, o interesse de Bardeen era científico, pois o transistor foi inventado quando este e W. Brattain estudavam estados superficiais. Ao contrário do que se poderia esperar, a primeira aplicação comercial do transistor não foi o rádio portátil, mas um aparelho de surdez [3]. O transistor bipolar de Bardeen foi o início do que hoje é a multimilionária indústria eletrônica e de computadores.

No final dos anos 50, laboratórios de indústrias, de universidades e do governo americano tinham crescido semicondutores elementares (Si e Ge) e muitos semicondutores compostos na forma de cristais de alta pureza, e a maioria das propriedades destes materiais já eram conhecidas. Teorias para descrever a estrutura de banda começaram a aparecer na literatura. Além disso, houve desenvolvimento de várias técnicas para fazer, proteger e encapsular transistores para usos comerciais e militares. No final dos anos 50 as atenções do ponto de vista tecnológico se voltaram para Silício. As propriedades físicas deste material não são superiores à Ge ou compostos III-V, no entanto toda a tecnologia desenvolvida para a fabricação de circuitos integrados, se ajustaram perfeitamente para Silício. Esta tecnologia se baseava na difusão de dopantes para dentro do semicondutor através de fotolitografia sobre uma superfície de dióxido de silício, o qual podia ser crescido com perfeita aderência sobre o silício. SiO_2 é uma boa barreira para a difusão de impurezas nas temperaturas de fabricação assim como de operação. A densidade de estados interfaciais na interface Si- SiO_2 é baixa, de tal forma que a captura de elétrons pelas armadilhas é desprezível. Além disso SiO_2 é um ótimo isolante elétrico e uma barreira alta para a injeção de elétrons tanto de Silício como de metais [2]. Desta forma no começo dos anos 60 toda a tecnologia básica que levou aos circuitos eletrônicos altamente complexos e altamente integrados dos dias de hoje, já era conhecida.

Dispositivos Básicos : Diodo e Transistor

Acoplando-se um semicondutor dopado com excesso de elétrons (tipo n) e um semicondutor com excesso de buracos (tipo p) forma-se a chamada junção p-n. Esta junção tem um papel fundamental em aplicações na eletrônica moderna e na compreensão do funcionamento de outros dispositivos semicondutores. É usada extensivamente na retificação, chaveamento e outras operações em circuitos eletrônicos, sendo o bloco básico de construção de transistores.

Uma junção p-n é formada da seguinte forma [4]: o gradiente de concentração de portadores próximo da interface causa a difusão de portadores. Buracos do lado p difundem-se para o lado n e elétrons do lado n difundem-se para o lado p. Ocorre então a recombinação de pares elétrons-buracos dos 2 lados, ou seja, teremos aceitadores negativamente carregados do lado p (N_A^-) e doadores positivamente carregados do lado n (N_D^+). A região assim formada é chamada região de depleção ou região do espaço de carga. Isto é visto na figura 2a. Como consequência desta região de depleção existe um campo elétrico intrínseco que aponta

do material n para o material p. Isso faz com que o comportamento corrente-voltagem desta junção seja assimétrico, conforme mostrado na figura 2b, que pode ser entendido como segue: polarizando-se a junção diretamente, aplica-se

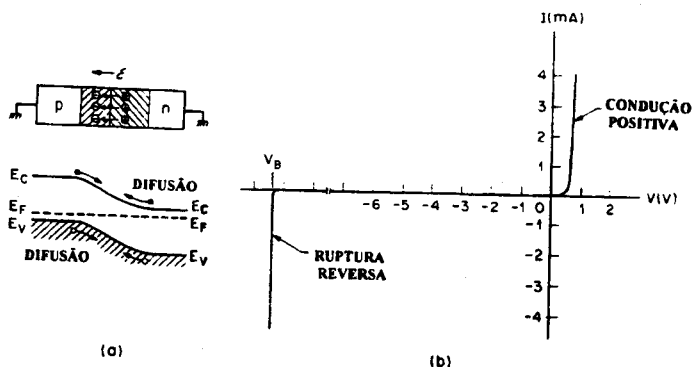


Figura 2 - (a) diagrama esquemático da junção p-n (b) curva corrente-voltagem para a junção p-n

um campo elétrico na direção contrária ao campo intrínseco. Mais portadores atravessarão a junção, quanto maior for o campo externo aplicado, conforme mostrado do lado positivo da curva corrente-voltagem (fig. 2b). Já a polarização reversa (lado negativo da curva I-V) implica num aumento da barreira para os portadores e praticamente nenhuma corrente flui através da barreira. Esta situação se mantém até que o campo seja suficientemente alto, quando outros fenômenos devem ocorrer devido aos elétrons ganharem energia cinética para sofrerem choques com os átomos, quebrarem as ligações químicas, dando origem à pares elétron-buraco, que por sua vez darão origem a outros pares pelo mesmo mecanismo, constituindo assim o chamado efeito Avalanche. Um outro fenômeno também torna-se importante em altas voltagens, o chamado Tunelamento, que é um efeito quântico que permite aos elétrons atravessarem a barreira. Neste fenômeno existe uma probabilidade não nula dos elétrons estarem localizados do lado externo de uma barreira de potencial. Quanto maior a energia destes elétrons, maior esta probabilidade.

A figura 3 mostra um transistor, que nada mais é do que duas junções p-n colocadas de costas uma para a outra. A região p^+ (altamente dopada) é chamada emissor e a região p é chamada coletor (levemente dopada). Na figura está indicada a direção do fluxo de corrente sob operação do chamado modo ativo, isto é, a junção emissor-base tem polarização direta e a junção base-coletor tem polarização reversa. Buracos são injetados do emissor p^+ na base e elétrons são injetados da base no emissor. A junção coletor-base é polarizada reversamente e uma pequena corrente fluirá através da junção. Se a base for suficientemente estreita os buracos injetados pelo emissor podem se difundir através dessa base estreita e atingir a região de

depleção base-coletor. Normalmente ocorre recombinação elétron-buraco na base, porém se a maioria puder atingir o coletor sem se recombinar, isso dará

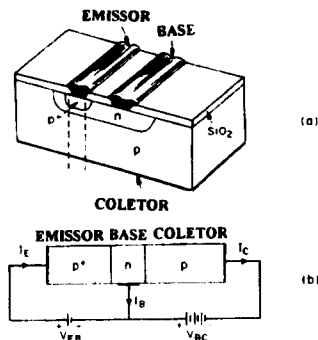


Figura 3 - (a) Transistor p-n-p de silício (b) transistor de uma dimensão idealizado, polarizado para operação

origem a uma corrente alta na junção do coletor, que é polarizada reversamente. O transistor ligado desta forma é um amplificador de tensão e de potência. Existem outros tipos de ligação onde o transistor pode atuar como um amplificador de corrente.

Novos Dispositivos e Tendências Atuais

O grande desenvolvimento das técnicas de crescimento de materiais sintéticos, tem levado à produção de dispositivos cada vez mais sofisticados. Técnicas tais como Epitaxia por Feixe Molecular ou Deposição de Vapor Químico, por exemplo, têm possibilitado o crescimento de camadas cada vez mais finas de diferentes materiais semicondutores, propiciando a elaboração de dispositivos complexos. Um exemplo destes dispositivos é o transistor de alta possibilidade onde camadas de materiais diferentes são alternadas e apenas aqueles que possuem banda de condução de mais alta energia são dopados. Como os elétrons tendem a ocupar as regiões de energia mais baixa, existe uma separação entre a região dopada e a região de transporte e portanto os elétrons não são espalhados pelos íons carregados, resultando numa mobilidade no transporte perpendicular à direção de crescimento da amostra. GaAs (Arseneto de Gálio) tem sido um dos materiais mais usados para a produção deste tipo de transistor, pois possui alta mobilidade se comparada com Si. Além disso apresenta bandgap direto [1], o que é particularmente interessante para a confecção de dispositivos eletro-óticos, que interagem luz e eletricidade.

Embora o Arseneto de Gálio apresente vantagens sobre o Silício com relação à mobilidade, os circuitos integrados baseados neste material deverão ser complementares aos de Silício [5]. Não é possível se pensar em dispositivos de baixo custo para serem empregados em larga escala nos computadores de utilização diária, pois o Silício ainda é mais barato de se produzir. No entanto, muitas aplicações especiais necessitam de componentes que tem que operar à velocidades mais altas possíveis. Os circuitos integrados de Arseneto de Gálio deverão ser incorporados nestes sistemas, assim como nos supercomputadores sendo desenvolvidos. Alguns sistemas também necessitam operar à altas temperaturas ou na presença de altos níveis de radiação. Os circuitos de Arseneto de Gálio trabalham melhor que os de Silício sob tais condições. Dispositivos de Arseneto de Gálio também contribuirão para uma redução do custo dos sistemas de comunicação via microondas, pois os transmissores de GaAs operam com comprimentos de onda menores. Tais comprimentos de onda mais curtos permitirão o uso de antenas bastante baratas e mais fáceis para instalar [5].

Os lasers de semicondutores são também outro exemplo do avanço da tecnologia nesta área. Num exemplo de laser .simples., uma camada de GaAs é .sanduichada. entre duas camadas altamente dopadas de $Al_xGa_{1-x}As$, uma do tipo p e outra n. Quando se aplica o potencial adequado, pares elétron-buraco se recombinam na região de GaAs e emitem luz monocromática (laser). Numa geometria mais avançada, os lasers se constituem de várias camadas intercaladas de semicondutores com diferentes bandgaps, que além de permitir a recombinação dos pares de portadores, gerando luz monocromática, permitem também que a luz seja dirigida para uma direção específica e bem definida, funcionando portanto como um guia de onda.

Existe uma infinidade de possibilidades de novos dispositivos [5,6] geradas pelas técnicas de produção de materiais e seria impossível descrever todas. É importante citar que além de dispositivos avançados, as novas técnicas de processamento permitiram também a elaboração de dispositivos cada vez menores, o que resultou nos computadores mais poderosos, pois é possível introduzir-se milhares de dispositivos numa pequena chapa de semicondutor. A produção destes dispositivos, os .microchips. requer vários passos tais como deposição ou fotolitografia, que são repetidos muitas vezes antes que a chapa seja dividida entre os diversos .microchips.. Por exemplo a produção dos chips mais modernos de Silício requer em torno de 200 passos de processamento [7]. Isto parece ser um limite na indústria de computadores, pois a medida que mais passos de processamento tornam-se necessários, o custo de produção aumenta exponencialmente, pois exige cada vez mais sofisticação nas técnicas.

Assim como diversas barreiras foram sendo quebradas ao longo do desenvolvimento da física e tecnologia de dispositivos semicondutores, os empecilhos atualmente existentes serão derrubados, com o surgimento de novas técnicas e/ou novos materiais semicondutores de propriedades superiores aos atualmente existentes. Ainda existem muitos problemas interessantes na ciência de semicondutores e muitos desafios tecnológicos. Espera-se que a medida que questões tecnológicas forem sendo resolvidas, uma nova física se desenvolva, dando resposta para problemas ainda sem solução.

Referências

- S.M. Sze, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, John Wiley & Sons, N. York 1985
- A.B. Fowler, *A Semicentury of Semiconductors*, Physics Today, Outubro 1993, pag 59-62
- H. Ehrenreich, *Strategic Curiosity : Semiconductor Physics in the 1950s*, Physics Today, Janeiro 1995, pag. 28-34
- R. Dalven, *Introduction to Applied Solid State Physics*, Plenum Press, N. York, 1978
- W.R. Frensley, *Gallium Arsenide Transistors*, Scientific American, agosto 1987, pag. 68-75
- M. Heiblum e L.F. Eastman, *Ballistic Electrons in Semiconductors*, Scientific American, fevereiro 1987, pag. 65-73
- G. Stix, *The Wall*, Scientific American, julho 1994, pag. 96