

O Transistor, 50 Anos

(The transistor, fifty years)

Adenilson J. Chiquito* e Francesco Lanciotti Jr.†

Departamento de Física

Universidade Federal de São Carlos

Caixa Postal 676 - CEP 13565 - 905 - São Carlos / SP.

Recebido 5 de fevereiro, 1998

Neste ano, a descoberta do efeito transistor completa cinquenta anos. Marcando este acontecimento, tratamos neste trabalho, de alguns aspectos na pesquisa em semicondutores, que culminaram na descoberta deste efeito.

This year, the transistor completes fifty years. In this work, we show some aspects of the researches on semiconductor physics responsible by the discovery of the transistor effect.

I Introdução

Os materiais semicondutores são largamente responsáveis pelo grande desenvolvimento da indústria eletrônica e pelo surgimento de novas tecnologias. Este caráter acentuou-se principalmente após o desenvolvimento de heteroestruturas semicondutoras, nas quais diferentes materiais são unidos produzindo estruturas com propriedades eletrônicas e ópticas distintas das apresentadas pelos materiais da liga. A importância dessas estruturas não se restringe apenas à tecnologia. Descobertas pertinentes a aspectos básicos da Física puderam ser alcançados somente após o seu desenvolvimento (efeito Hall Quântico [6], entre outros).

Foi no final da década de 40 que os primeiros esforços realmente importantes foram dados nesta área. Anteriormente, a pesquisa em semicondutores baseava-se no estudo de contatos retificadores para aplicação em circuitos de rádio-comunicação, e era comum naquela época duvidar-se da necessidade de tais pesquisas, frente ao avanço das válvulas termoiônicas. Durante a Segunda Guerra Mundial, a pesquisa sobre materiais semicondutores (principalmente silício e germânio) intensificou-se [11]. A descoberta do efeito transistor em 1948 por Bardeen e Brattain [1] marca o início de uma nova era, tanto na pesquisa em semicondu-

tores como no desenvolvimento tecnológico.

Apesar das pesquisas em semicondutores ser inicialmente ridicularizada frente à importância das válvulas, hoje a sua necessidade é indiscutível [5]. Há cinquenta anos teve início um processo de cooperação entre Física de Semicondutores, tecnologia e construção de novos dispositivos, provocando um dos mais importantes e bem sucedidos caminhos de transferência do conhecimento científico puro para a aplicação no desenvolvimento social. A descoberta do efeito transistor e sua posterior utilização como substituto das válvulas tornou clara a alta potencialidade tecnológica dos materiais semicondutores e inegavelmente foram fundamentais para que estes materiais alcançassem a importância que hoje detêm. Mas como se deu o início da pesquisa em semicondutores, particularmente em relação à descoberta do efeito transistor? Neste trabalho tentamos condensar a evolução histórica das pesquisas iniciais nesta área, que culminaram com a invenção do transistor.

II As pesquisas até a descoberta do transistor

Para falar sobre os primórdios da pesquisa em semicondutores que levaram à descoberta do efeito transistor,

*pajc@power.ufscar.br

†pfra@iris.ufscar.br

alguns importantes fatos históricos devem ser lembrados, como as tentativas de transmissão sem fio conduzidas por Marconi (1895), obtendo sucesso em 1901 com a transmissão de sinais elétricos de um lado a outro do Atlântico. Surgia, então, as bases do rádio como o conhecemos atualmente. As transmissões de rádio necessitavam de um estágio de detecção no receptor para as ondas eletromagnéticas produzidas no transmissor uma vez que a codificação de informações é feita com dois sinais elétricos: o sinal a ser transmitido (geralmente de baixa frequência) e um outro chamado de portador (geralmente de alta frequência, conhecida como rádio-frequência), responsável pelo transporte do primeiro. O processo de detecção consiste na separação dos sinais através de um retificador que, a grosso modo, elimina o sinal alternado portador deixando passar somente o sinal de baixa frequência. Um dos primeiros estágios de detecção construídos foi o “coesor de Branly”, que consistia em um tubo contendo limalha de ferro. Em seguida, foi descoberto que o cristal de galena (mineral do qual extrai-se o chumbo) tinha as mesmas “propriedades detectoras” apresentadas pelo “coesor” e poderia ser usada na detecção de ondas de rádio mais facilmente que o tubo de limalha de ferro [3].

As “propriedades detectoras” mencionadas acima, referem-se à propriedade que foi, sem dúvida, o que inicialmente motivou a pesquisa em semicondutores. Um semicondutor é um material que exibe um comportamento muito interessante quando lhe aplicada uma diferença de potencial: sua resistência à passagem de corrente elétrica varia conforme variam a intensidade da d.d.p. aplicada e sua polaridade. Um retificador ideal seria aquele que apresentasse uma resistência infinita para uma dada polarização e resistência nula a polarização inversa como mostrado na figura 2.1 (na prática, obtemos valores de resistência muito elevados, da ordem de megaohms ou desprezivelmente pequenos, da ordem de microohms). Obviamente, este material não obedece a Lei de Ohm neste regime de operação, e esta característica pode ser aproveitada para várias finalidades, como o detector usado em rádio-comunicação. Na figura 2.2, pode-se observar o efeito de um retificador quando submetido a uma diferença de potencial alternada: quando a polaridade da fonte é tal que a corrente fornecida tem a mesma direção da seta do retificador, há a passagem de corrente para

a carga. A d.d.p. alternada apresenta dois semiciclos de polaridade oposta variando no tempo mas, após o retificador (na carga), teremos apenas uma polaridade definida. De forma análoga, é possível separar os sinais elétricos provenientes da antena em um receptor de rádio, usando para isso um retificador.

Durante este período de desenvolvimento do rádio, T. A. Edison trabalhava com o aprimoramento da lâmpada elétrica, que posteriormente baseou a construção das válvulas eletrônicas, as quais tornaram-se componentes natos de todos os equipamentos eletro-eletrônicos, bem como as responsáveis pelo grande crescimento das telecomunicações desde o início deste século até meados dos anos 50. Com as válvulas, a detecção de sinais de rádio pelo cristal de galena tornou-se obsoleta, e assim permaneceu até que estudos sobre outro cristal, o germânio, com propriedades retificadoras (ou semicondutoras, termo que havia surgido em 1911) mostraram que seria possível a construção de um detector de estado sólido. Durante esta época as válvulas dominavam o mercado e a indústria e somente em 1945 foi construído o primeiro retificador comercial, o 1N34 da Sylvania [3].

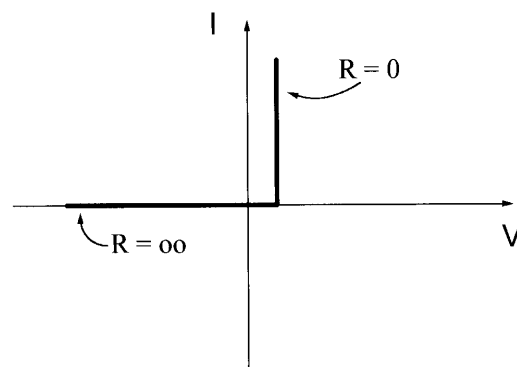


Figura 2.1

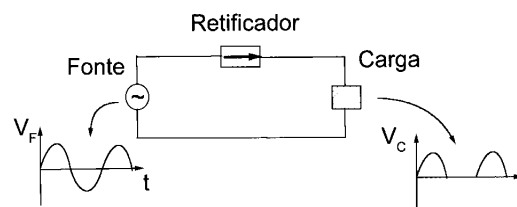


Figura 2.2

Os interesses acadêmicos, entretanto, proporcionaram grandes avanços na área de Física de Estado Sólido com o aprimoramento de alguns conceitos (como o conceito de buracos e elétrons em redes cristalinas). Os pesquisadores A. H. Wilson e W. Schottky foram os primeiros a aplicar conceitos de Física aos semicondutores. Em 1922, Eduard Gruniesen distinguiu os semicondutores como sólidos cuja condutividade é função da temperatura. Com a mecânica quântica pôde-se estruturar a teoria de bandas de energia para sólidos, possibilitando uma visão geral do problema. Nos anos 30, uma série de artigos e livros foram escritos (principalmente, destacam-se os de Wilson), fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento do estudo teórico sobre semicondutores. Wilson [14] esclareceu o conceito de buracos e começou estudos num dos mais importantes tópicos em Física de Semicondutores: as impurezas. Por outro lado, Schottky contribuiu com estudos teórico-experimentais em contatos metal-semicondutor [9], estabelecendo uma teoria baseada numa barreira de potencial que surgia entre estes dois materiais quando colocados em contato, resultado da diferença entre função trabalho do metal e eletroafinidade do semicondutor (conceitos estes, novíssimos naquela época, vindos do desenvolvimento da teoria da Mecânica Quântica). Entre 1939 e 1945 nenhum avanço significativo na área de semicondutores foi realizado, mesmo porque não se considerava que os semicondutores exibissem alguma importância fundamental em tecnologia, mas o aspecto científico estava cada vez mais sendo investigado (segundo A. B. Fowler [4] a primeira vez que o tópico “semicondutor” apareceu no índice da revista *Physical Review* foi em 1946). A única aplicação que realmente alcançou algum mérito nesta época foram os detectores de microondas baseados em contatos metal-germânio ou metal-silício, motivados pela utilização de radares no *front* durante a Segunda Guerra Mundial, dada a sua robustez em comparação com as válvulas.

Os reais avanços somente vieram com o final da guerra: as pesquisas concentraram-se nos laboratórios da companhia telefônica dos Estados Unidos (Bell Telephone Laboratories), dirigidas por William Shockley, e na Universidade de Purdue, sob a direção de Karl Lark-Horovitz. Shockley estava empenhado em descobrir um substituto para as válvulas que pudesse ser construído a partir de materiais

semicondutores, e para tanto, trabalhava com filmes finos de silício. Em Purdue desenvolviam-se estudos básicos com cristais de germânio, procurando estabelecer bases concretas para o desenvolvimento de dispositivos de estado sólido.

Depois da proposta de Schottky para explicar o comportamento elétrico do contato metal-semicondutor [9], algumas observações experimentais começaram a contradizê-la. Observava-se que a altura da barreira Schottky de um contato metal-semicondutor não variava significativamente se o metal da junção era trocado. De acordo com a teoria de Schottky este comportamento era impossível, uma vez que a altura da barreira era governada apenas pela diferença entre função trabalho do metal e eletroafinidade do semicondutor. Em 1947, John Bardeen (laboratórios Bell) sugeriu que isto acontecia devido aos estados de superfície [2] associados com a dimensão finita da amostra e com imperfeições da rede cristalina, o que fisicamente implicava na fixação do nível de Fermi em dado ponto dentro do *gap* de energias proibidas do semicondutor, fixando, portanto, a altura da barreira Schottky. De imediato, passou-se a estudar a hipótese de Bardeen, através de experimentos para a detecção e caracterização dos estados de superfície, experimentos estes, realizados com dois eletrodos metálicos colocados sobre a superfície de um cristal semicondutor como mostrado na figura 2.3. Porém os resultados eram inconclusivos e havia rumores de que o responsável pelas pesquisas (Shockley) iria cancelar o projeto. Em meio às expectativas, Bardeen em colaboração com Walter Brattain (também pesquisador dos laboratórios Bell) começou a trabalhar com materiais puros, e em um de seus experimentos observou o efeito transistor, ou seja, a amplificação de um sinal elétrico aplicado em um dos eletrodos (*emissor*). O sinal apareceu no segundo eletrodo, o *coletor*, com uma potência sensivelmente maior (figura 2.3). Inicialmente chamou-se este dispositivo de “triodo semicondutor” em analogia à válvula triodo que apresentava a mesma característica de amplificação. O nome transistor, surgiu depois, sendo originalmente usado como uma abreviação para “*transfer resistor*”, referindo-se ao fato da operação do transistor envolver a transferência de corrente de um circuito para outro [7]. Ao contrário do que se pensa, esta descoberta se deu em dezembro de 1947 e não em junho de 1948. A divulgação das pesquisas foi retardada durante este período pois os inventores juntamente com o

laboratório estavam empenhados em obter a patente do transistor, a qual foi concedida somente em junho de 1948 [11].

A repercussão desta descoberta não foi grandiosa como se imagina, uma vez que não se discutia naquela época a substituição de válvulas por semicondutores. Mesmo assim sugeriu-se a aplicação deste novo dispositivo em equipamentos ordinariamente baseados em válvulas, como amplificadores e osciladores. Mais uma vez, o transistor estava em desvantagem: o dispositivo construído por Bardeen e Brattain tinha sérios problemas relacionados com a estabilidade e reprodutibilidade dos contatos elétricos, fato que impedia sua aplicação como substituto das válvulas em circuitos comerciais, tornando-o impróprio para aplicações tecnológicas nas quais desejava-se confiabilidade. Apesar disto, vários transistores de contato de ponto foram construídos no início da década de 50. Eles usavam o princípio desenvolvido por Bardeen e Brattain, com a diferença dos contatos metálicos serem fundidos sobre a superfície do cristal, mas mesmo assim, ainda não eram confiáveis.

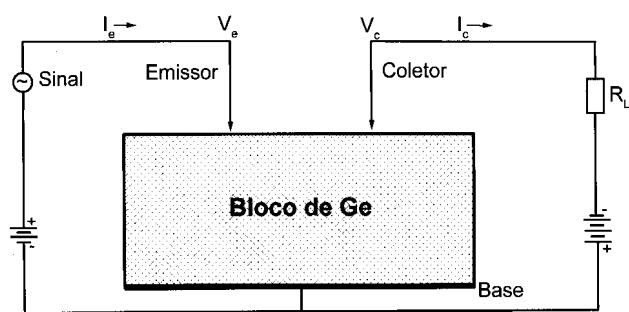


Figura 2.3

Somente em 1949, William Shockley, responsável pelo grupo de pesquisa em semicondutores nos Laboratórios Bell, aperfeiçoou o transistor de contato de ponto (criado por Bardeen e Brattain) desenvolvendo o transistor de junção bipolar, baseado no conceito de dopagem em semicondutores, o qual ele próprio ajudou a esclarecer e desenvolver [10]. Em poucas palavras, dopagem significa a inclusão de um átomo estranho em uma rede cristalina homogênea. Tomemos como exemplo a dopagem de um cristal de silício, cujos átomos possuem quatro elétrons em suas camadas mais externas. Microscopicamente, se não houver elétrons livres na rede cristalina, o silício comporta-se como um isolante. Se um átomo com um número maior (ou menor)

de elétrons é introduzido no cristal de silício, estará apto a ceder (ou receber) elétrons. Se houver doação (aceitação) de elétrons, o material é dito tipo n (p). Nesta nova situação, o cristal semiconductor pode conduzir eletricidade.

O transistor bipolar criado por Shockley [10] era ainda teórico, mas com este novo formato, os transistores poderiam vir a ser utilizados comercialmente - como ocorreu na década de 50, quando começaram a ser utilizados em pequena escala para a construção dos mais diversos equipamentos. A operação do transistor bipolar é basicamente a mesma do seu precursor, o transistor de contato de ponto. O dispositivo bipolar constitui-se da sobreposição de três camadas semicondutoras: uma tipo n (p) denominada *base* e outras duas, tipo p (n) denominadas *coletor* e *emissor* (figura 2.4). Neste dispositivo uma corrente de controle é aplicada entre o emissor e a base. Os elétrons são injetados na base através da junção com o emissor (devido à diferença de potencial V_{be}) e fluem através da junção com o coletor para o circuito externo (devido à d.d.p. V_{ce}). Quando a voltagem na base varia, a corrente no circuito externo varia proporcionalmente [8,12].

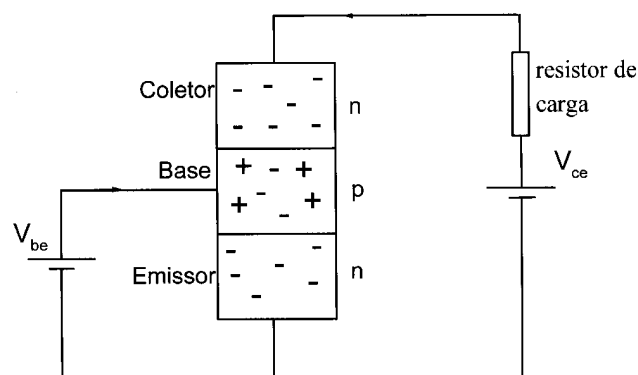


Figura 2.4

Em 1956, Bardeen, Brattain e Shockley receberam o Prêmio Nobel de Física pela descoberta e aperfeiçoamento do transistor. Bardeen e Brattain seguiram na pesquisa básica de Física de Estado Sólido, enquanto que Shockley voltou-se para a indústria criando a empresa *Shockley Semiconductor Co.* que posteriormente deu origem à *Intel* [8].

Dadas as possibilidades de aplicação dos transistores (ou mais fundamentalmente, dos semicondutores em geral) e o ainda reduzido conhecimento acerca destes materiais,

tornava-se imperativo que os esforços fossem voltados para a pesquisa básica em Física de Estado Sólido. Houve, então, uma grande explosão de interesse por parte de cientistas e empresários do mundo todo, estabelecendo-se uma forte relação entre indústria e pesquisa científica e os subsídios para o progresso nas aplicações do transistor impulsionaram não somente o desenvolvimento deste, como também o surgimento de novos dispositivos baseados em materiais semicondutores.

Não houve ainda uma revolução na ciência e tecnologia que superasse a que foi criada pela descoberta do transistor. A maioria dos equipamentos eletro-eletrônicos de que hoje dispomos são baseados em transistores ou em seus derivados diretos como os circuitos integrados. É importante lembrar que um circuito integrado nada mais é que um aglomerado de transistores, resistores e capacitores, construídos sobre uma única pastilha de semicondutor [13]. Efetivamente, os primeiros transistores foram construídos com silício e germânio somente, mas com as pesquisas, outros materiais e ligas (como o GaAs) tornaram-se importantes sobretudo em dispositivos que exigem alta velocidade de resposta. Atualmente não mais se discute a importância do transistor e das pesquisas subseqüentes em Física de Semicondutores, haja visto o papel que estes materiais desempenham em nossa sociedade.

Apesar dos muitos resultados em Física “pura” que puderam ser observados com o advento dos semicondutores, a pesquisa realizada com estes materiais continua a depender de sua importância tecnológica. Existem ainda muitos problemas em semicondutores que podem se tornar importantes e responsáveis por mudanças como a provocada pelo transistor.

III A pesquisa em semicondutores no Brasil, à época do transistor

No Brasil, o desenvolvimento da Física de Semicondutores, e portanto do estudo de dispositivos eletrônicos como o transistor é relativamente recente: aproximadamente 20 anos (1963) após da descoberta do efeito transistor nos Estados Unidos, é que a comunidade científica brasileira começou a ver a importância desta nova área. Data de 1963 os primeiros trabalhos experimentais em semicondutores, re-

alizados no Instituto de Física da USP-SP sobre efeitos magneto-oscilatórios. Em 1970-71 a Física de Semicondutores tomou um grande impulso com a criação de um grande grupo de pesquisa na recém criada UNICAMP. Somente a partir de 1978 (nesse ano havia sido realizado o primeiro Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada) é que a Física de Semicondutores foi realmente impulsionada, tornando-se hoje a área da matéria condensada com o maior número de pesquisadores [15].

A pesquisa em semicondutores teve este grande impulso também por começar a ser considerada pelo governo como uma área estratégica dos pontos de vista econômico e militar, tanto que por volta de 1980, foi elaborado o “Plano Diretor de Semicondutores” pelo GEICOM (Grupo Executivo Interministerial de Componentes e Materiais), com vistas à regulamentação das atividades comerciais e industriais relacionadas com semicondutores no Brasil. Cabia, portanto, às universidades a parte de pesquisa e desenvolvimento e ainda, a formação de recursos humanos. Foram estabelecidas normas e regulamentações para a fabricação de componentes, para a criação de laboratórios e centros de pesquisa em todo o país. Em função deste plano, surgiram grupos de pesquisa em várias universidades, como por exemplo: UFS-Car, USP-São Carlos, PUC/RJ, UFF, UnB, COPPE, UFRN, UFRJ, UFMJ, entre outras [15].

Devido ao grande desenvolvimento internacional alcançado na pesquisa em semicondutores, o Brasil também teve essa área bastante estimulada nesta última década, principalmente com o estudo (teórico e experimental) de propriedades ópticas e elétricas de estruturas heterogêneas, como as superredes.

IV Conclusão

Abordamos de forma sucinta a história da descoberta do efeito transistor seguindo a ordem cronológica dos estudos que a possibilitaram. Obviamente, este trabalho não pretende conter um estudo detalhado acerca da evolução do transistor, mas apresentar o mais didaticamente possível as circunstâncias que motivaram o início das pesquisas. Este trabalho não foi o primeiro e nem será o último a tratar deste assunto, dada a sua importância, mas esperamos que possa dar uma visão geral sobre este fato histórico revolucionário.

Referências

- [1] J. Bardeen and W.H. Brattain, Physical Review **74**, 230 (1948).
- [2] J. Bardeen, Physical Review **71**, 717 (1947).
- [3] A. Fanzeres, “*Consertos de Aparelhos Transistorizados*”, Editora Tecnoprint, Rio de Janeiro, 1985.
- [4] A. B. Fowler, Physics Today , **outubro**, pag. 59 (1993).
- [5] N. Holonyak Jr., Physics Today, **abril**, pag. 36 (1992).
- [6] K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, Physical Review **45**, 494 (1980).
- [7] M. Ali Omar, “*Elementary Solid State Physics - Principles and Applications*”, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1974.
- [8] C. T. Sah, “*Fundamentals of Solid-State Electronics* ” World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991
- [9] W. Schottky, *Naturwissenschaften* **26**, 843 (1938).
- [10] W. Shockley, Bell Syst. Tech. J. **28**, 435 (1949).
- [11] F. Seitz, Physics Today, **janeiro**, pag. 22 (1995).
- [12] S. M. Sze, “*Physics of Semiconductor Devices*”, John Wiley and Sons, 1985.
- [13] S. M. Sze, “*VLSI Technology* ”, editado por S.M. Sze, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [14] Veja por exemplo: A. H. Wilson, Proc. Roy. Soc. **A134**, 279 (1931).
- [15] Veja por exemplo: “*A Física no Brasil na Próxima Década - Física da Matéria Condensada*”, SBF, 1990.