



## SEARA DA CIÊNCIA

### CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



#### Transistores e Física 2D.

Neste verbete, vamos estudar o desenvolvimento da **Física 2D**, a que trata do movimento bidimensional de um gás de elétrons (**2DEG**: “two-dimensional electron gás”). Segundo o físico germano-norte-americano Hörst Ludwig Störmer (n.1949; PNF, 1998) [**Nobel Lecture: The Fractional Quantum Hall Effect** (08 de Dezembro de 1998: **Nobel e-Museum**)], em um mundo tridimensional, a criação de um sistema bidimensional normalmente requer uma superfície de um objeto ou uma interface entre duas substâncias e uma força para empurrar coisas nelas. Por exemplo, elétrons podem ser confinados na superfície do hélio líquido ou na superfície de algum isolante, por intermédio de um campo elétrico, o qual empurra-os contra uma barreira altamente impenetrável. O método de melhor sucesso para criar um **2DEG** é confinar os elétrons na interface entre um semicondutor e um isolante ou na interface entre dois diferentes semicondutores.

Para o desenvolvimento do **2DEG**, foi importante a construção dos **transistores de efeito de campo** (FET - “Field Effect Transistor”), que são de dois tipos: JFET (“Junction Field Effect Transistor”) e Si-MOSFET (“Silício-Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”). Neles, a corrente flui através de um estreito **canal** (“gate”) entre dois eletrodos e vai de uma região chamada **fonte** (“source”) a uma outra de nome **sorvedouro** (“drain”). No JFET, o “gate” consiste de materiais semicondutores de relativa baixa condutividade, sanduichado entre duas regiões de alta condutividade e de polaridade oposta. Já no Si-MOSFET, o “gate” é sanduichado por duas regiões altamente dopadas e de polaridade oposta, formando a **fonte** e o **sorvedouro**, respectivamente. [**Dictionary of Physics** (Warner Books, 1985); Itzhak Roditi, **Dicionário Houaiss de Física** (Objetiva, 2005).]

É oportuno salientar que os primeiros **transistores** (**transistor** deriva da frase inglesa: “**transfer-resistor**”) construídos foram os seguintes: 1) **transistor de pontas** (TP), em 27 de dezembro de 1947, pelos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991; PNF, 1956; 1972) e Walter Houser Brattain (1902-1987; PNF, 1956), constituído de uma **base** de germânio (Ge) (**tipo-n**), na qual se apóiam dois finos contatos metálicos (daí ele ser conhecido como “bigode de gato”). Um dos contatos é polarizado em relação à **base**, compondo o chamado **emissor**. O segundo contato metálico apresenta uma polarização reversa, e constitui-se no **coletor**. Com tal dispositivo, eles verificaram que a variação da corrente no **emissor** causava uma variação igual no **coletor**; em vista disso, eles perceberam que o dispositivo que acabaram de inventar funcionava como um **amplificador (retificador)**; 2) **transistor de junção** (TJ), em janeiro de 1948, pelo físico norte-americano William Bradford Shockley (1910-1989; PNF, 1956), constituído por um “sandwich” de semicondutores do **tipo n-p-n** (ou **p-n-p**). Esse dispositivo [que é um **transistor bipolar**, pois há fluxo de ‘portadores de carga’, quer negativa (elétrons), quer positiva (“buracos”)], evitava os importunos contatos metálicos do TP, bem como demonstrava que a **amplificação (retificação)** ocorria também no interior dos semicondutores, e não apenas em sua superfície. Registre-se Bardeen e Brattain descreveram o TP, em 1948 (*Physical Review* **74**, p. 230), e Shockley o seu TJ, em 1951 (*Physical Review* **83**, p. 151), em colaboração com M. Sparks e G. K. Teal.

Antes de prosseguirmos neste verbete sobre a **Física 2D**, é interessante fazer um comentário de como ocorre a condução de “portadores de carga” nos semicondutores. Em verbete desta série, vimos que a Teoria de Bandas desenvolvida pelos físicos, o suíço-norte-americano Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952), o inglês Rudolf Ernest Peierls (1907-1995), o norte-americano Philip McCord Morse (1903-1985), o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e Alan Harris Wilson (n.1906), entre 1928 e 1932, permitiu o estudo da condutividade nos semicondutores. Wilson, por exemplo, em seu estudo sobre as propriedades condutiva e óptica do óxido cúprico (CuO), observou que, enquanto esse óxido apresentava uma banda de energia para absorção óptica como sendo em torno de 2 Volts, a sua energia de excitação elétrica era de apenas 0,6 Volts. Em vista disso, concluiu que essa “condutividade elétrica era devida à presença de impurezas”. Assim, para Wilson, tal condutividade era devida ao elétron associado à impureza, cuja energia situava-se na banda proibida próxima à banda de condução, de modo que tal elétron poderia ser excitado termicamente até essa banda. Registre-se que a condutividade de semicondutores pela presença de impurezas intrínsecas (“defeitos”) em sua estrutura cristalina, ou mesmo pela ausência (“vacâncias”) de átomos do próprio cristal em sua estrutura de rede, também foi observada por Peierls, em 1932 (*Ergebnisse der Exacten Naturwissenschaften* **11**, p. 264), e pelos físicos alemães Walther Hermann Schottky (1886-1976) (de origem suíça) e F. Waibel, em 1933 (*Physikalische Zeitschrift* **34**, p. 858).

Os tipos de experiências que analisamos acima sobre semicondutores, nos três primeiros anos da década de 1930, foram ampliadas e modificadas por toda essa década e na década de 1940, principalmente com o silício (Si) e o germânio (Ge). 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. Porém, dependendo da “impureza” utilizada, tais semicondutores comportavam-se diferentemente com relação à condução. Por exemplo, o Ge e o Si são elementos químicos de valência 4 (vide verbete nesta série). Por sua vez, o fósforo (P) e o arsênio (As), têm valência 5. Assim, se o Ge (ou Si) for **dopado** com impureza do tipo P (ou As), o elétron extra correspondente será responsável pelas propriedades condutoras do Ge (ou do 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 uma impureza cuja valência é menor do que 4, a ausência do elétron do átomo inserido no cristal semicondutor cria um sítio vazio [**lacuna** ou **buraco** (“hole”)] para o qual se dirige um elétron vizinho daquele cristal. Por outro lado, para esse novo **buraco**, se dirige um novo elétron e, assim sucessivamente. Portanto, tudo se passa como se o **buraco** caminhasse no semicondutor, semelhante a uma carga positiva. Por exemplo, isso acontece se o Ge (ou Si) for **dopado** com átomos de valência 3, tais como o gálio (Ga). Neste caso, o semicondutor recebe o nome de **semicondutor tipo-p**, onde p significa que o “portador de carga” é positivo. Para mais detalhes sobre “portadores”, ver: Charles Kittel, **Introduction to Solid State Physics** (John Wiley and Sons, 1971); John Michael Ziman, **Principles of the Theory of Solids** (Cambridge University Press, 1972); e Rogério César de Cerqueira Leite e Antônio Rubens Britto de Castro, **Física do Estado Sólido** (Editora Edgard Blücher Ltda., 1978).

Agora, vejamos como se desenvolveu a **Física 2D**. Em 1966 (*Physical Review Letters* **16**, p. 901), Alan B. Fowler, F. F. Fang, Webster E. Howard e P. J. Stiles, pesquisadores da *International Business Machines* (IBM) estudaram o movimento de um gás de elétrons no transistor Si-MOSFET. Nesse estudo, perceberam que, em baixas temperaturas, esse movimento é limitado a um plano, com os elétrons vagueando livremente, e que essa mobilidade é limitada pela desordem das camadas de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) daquele transistor. Logo em 1967 (*Physical Review* **163**, p. 816), Frank Stern e Howard investigaram a distribuição de elétrons no Si-MOSFET e na heteroestrutura do tipo gálio/arsênio-alumínio/gálio/arsênio (GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As). [Destaque-se que o estudo dessa distribuição foi retomado pelo físico japonês Tsuneya Ando, em 1984 (*Journal of the Physical Society of Japan* **51**, p. 3893).] A dificuldade apontada acima foi contornada pelos físicos

norte-americanos Alfred Yi Cho (n.1937) (de origem chinesa) e John Arthur, no *Bell Laboratory*, ao inventarem, em 1968, a técnica conhecida como MBE (“Molecular Beam Epitaxy”) que é, basicamente, uma técnica de evaporação de alto-vácuo e que permite evaporar finas camadas atômicas de semicondutores e depositá-las em uma superfície. É oportuno salientar que essa técnica é considerada como o início da **nanotecnologia**.

Na década de 1970, outros trabalhos foram desenvolvidos para o aperfeiçoamento da **Física 2D**. Com efeito, em 1974 (*Journal of the Physical Society of Japan* **36**, p. 959), Ando e Y. Uemura apresentaram um estudo teórico do alargamento, por espalhamento, dos **níveis de Landau** (NL) (vide verbete nesta série), estudo esse conhecido como a teoria 2DM-T (“2D magneto-transport”) e, em 1976 (*Surface Science* **58**, p. 238), S. Kawajii e S. Wakabayashi observaram a existência de estados ligados entre dois NL.

Concluindo este verbete, devemos destacar que, conforme vimos em verbete desta série, o entendimento da **Física 2D** foi importante na descoberta do **Efeito Hall Quântico Inteiro**, em 1980, pelos físicos, os alemães Klaus von Klitzing (n.1943; PNF, 1985) e Gerhard Dorda (n.1932), e o inglês Sir Michael Pepper (n.1942), e do **Efeito Hall Quântico Fracionário**, em 1982, pelos físicos norte-americanos Horst Ludwig Störmer (n.1949; PNF, 1998) (de origem alemã), Daniel Chee Tsui (n.1939; PNF, 1998) (de origem chinesa) e Arthur Charles Gossard (n.1935).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)