



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

As Heteroestruturas Semicondutoras, o Circuito Integrado e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2000.

O PNF de 2000 foi concedido aos físicos, o alemão Herbert Kroemer (n.1928) e o russo Zhores I. Alferov (n.1930), e ao engenheiro eletrônico norte-americano Jack St. Clair Kilby (n.1923) pelo desenvolvimento das **heteroestruturas semicondutoras** (HeS) (independentemente pelos dois primeiros) e pela invenção do **circuito integrado** (*chip*) (o terceiro).

No *Gymnasium* (“High School”), Kroemer ensinava aos seus colegas alguns “truques” de matemáticos que estavam fora do programa oficial. Por outro lado, como ele também se interessava por assuntos de Física e, também, além do programado, seu professor Willibald Wimmer pedia-lhe que o ajudasse na preparação de suas aulas, principalmente, na parte experimental. Concluído o Ensino Médio, Kroemer foi aceito no Curso de Física da *Universidade de Jena*, em 1947, no qual se maravilhou com as aulas do famoso físico alemão Friedrich Hermann Hund (1896-1997). Contudo, no começo de 1948, a perseguição stalinista aos alunos e professores dessa Universidade do leste alemão levou um de seus professores a propor que Kroemer fosse para a *Universidade de Göttingen* (UG), onde foi aceito depois de ser informalmente examinado pelos físicos alemães Richard Becker (1887-1955), Günther Leibfried (1915-1977), Robert Wichard Pohl (1884-1976) e Wolfgang J. Paul (1913-1993; PNF, 1989). Na UG, Kroemer iniciou seu programa de Doutorado com o físico austro-alemão Fritz Edward Joseph Maria Sauter (1906-1983), que fora aluno do físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951). Foi na preparação de sua Tese de Doutorado que Kroemer teve os primeiros contatos com o que, posteriormente, ficou conhecido como HeS. Em verbete desta série, vimos que os **semicondutores** [p.e.: germânio (Ge) e silício (Si)] quando “dopados” com determinados elementos químicos em sua **banda proibida** (região entre a **banda de valência** e a **banda de condução**), podem ser transformados em “portadores de carga” do tipo n (-) (elétrons) e do tipo p (+) (“buracos”).

Numa primeira etapa da preparação da Tese de Doutorado, Kroemer desenvolveu um estudo teórico sobre a natureza dos estados de superfície na interface entre dois diferentes potenciais periódicos. Esses estados, posteriormente conhecidos como **bandas de compensação** (bo – *band offsets*) em **heterojunções de semicondutores**, representavam uma extensão das primeiras ideias apresentadas pelo físico inglês-norte-americano William Bradford Shockley (1910-1989; PNF, 1956), em 1939, sobre aqueles estados em potenciais unidimensionais. Ainda como parte de preparação para sua Tese, Kroemer estudou os famosos trabalhos dos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991; PNF, 1956; 1972), Walter Houser Brattain (1902-1987; PNF, 1956) e do próprio

Shockley, trabalhos esses que levaram à invenção do **transistor de pontas** (1947) e do **transistor de junção** (1948), conforme vimos em verbete desta série.

A Tese de Doutorado, sob a supervisão de Sauter, defendida por Kroemer na UG, em 1952, tratava, basicamente, do que hoje se conhece como **efeito de elétrons quentes**. Ao realizar o estudo teórico da estrutura de banda de energia do Ge, Kroemer percebeu que, se o campo elétrico fosse bastante forte, haveria um movimento de “buracos” da **banda de valência** provocando um efeito de carga espacial bastante forte que iria influenciar na característica corrente-voltagem do ponto de contacto em diodos e transistores. Também percebeu que a velocidade de arraste (*drift*) dos elétrons diminuía com o aumento do campo elétrico, provocando com isso uma **condutividade diferencial negativa**. Registre-se que essa **resistência elétrica negativa** foi observada pelo físico japonês Leo Esaki (n.1925; PNF, 1973), em 1958, ao estudar o tunelamento em um diodo de junção p-n de Ge (vide verbete nesta série).

Depois de concluir seu Doutorado, Kroemer foi trabalhar, em 1953, como físico teórico no pequeno grupo de pesquisas em semicondutores no *Fernmeldetechnisches Zentralamt* – FTZ (“Laboratório Central de Telecomunicações”) do Serviço Postal Alemão. Como trabalho de pesquisa no FTZ, Kroemer atacou o problema das limitações de frequências dos **transistores de junção** (tj), cuja solução o levou ao primeiro contacto com as HeS. Assim, ainda em 1953, Kroemer mostrou que poderia acelerar o fluxo da minoria de *portadores de carga* do emissor do coletor do tj incorporando um campo elétrico em sua base. Esse campo de arraste (*drift field*) era conseguido com uma base formada de diferentes semicondutores com diferentes intervalos de energia (*energy gaps*). Esse **transistor de arraste** (*drift transistor*) foi descrito por Kroemer em dois artigos, um em 1953 (*Naturwissenschaften* **40**, p. 578), e o outro em 1954 (*Archiv der Elektrischen Übertragung* **8**, p. 499). Esse tipo teórico de transistor serviu como base para Kroemer participar na invenção do **transistor HBT** (“Heterostructure Bipolar Transistor”), um dos motivos de seu Nobelato. Vejamos como ocorreu essa invenção.

Em 1954, Kroemer foi trabalhar na RCA (“Radio Corporation of America”), em Princeton, New Jersey, nos Estados Unidos, onde voltou a se envolver com as HeS. Contudo, sua primeira tentativa de construir um HBT/Ge-Si foi frustrada. No entanto, dessa frustração, resultaram dois fundamentais artigos teóricos, publicados em 1957, que foram importantes para a invenção futura do HBT. No primeiro deles (*RCA Review* **18**, p. 332), há a descrição do princípio fundamental das HeS, ou seja, o conceito de **campo quase-estático**. Vejamos seu significado. Em sua pesquisa para o Doutorado, Kroemer mostrou como variar espacial e continuamente a energia na **banda de condução** (BC) e na **banda de valência** (BV) nos semicondutores heterogêneos. No primeiro trabalho de 1957 acima referido, ele mostrou que essa variação espacial produz o aparecimento de campos elétricos que atuam diferentemente nos elétrons da BC e nos “buracos” da BV. Desse modo, a força resultante sobre esses *portadores de carga* pode atuar na mesma direção. Como em uma **homoestrutura semicondutora** (HoS-semicondutor homogêneo) essa força resultante é nula, Kroemer denominou então os campos que atuam nas HeS de **campos quase-elétricos**. No segundo artigo de 1957 (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers* **45**, p. 1535), há um estudo mais detalhado sobre o precursor do HBT: o **transistor WGE** (“wide-gap emitter”). Note-se que o transistor do primeiro artigo de 1957, também precursor do HBT, era conhecido como **transistor GGT** (“graded-gap transistor”).

Em março de 1963, quando estava trabalhando na *Varian Associates*, no *Silicon Valley*, em Palo Alto, Califórnia, Kroemer ouviu uma palestra de seu colega Sol Miller sobre a impossibilidade de realizar, em temperatura ambiente (~ 300 K), uma *ação-laser* na junção do HeS, composta de elementos químicos das colunas III e IV da Tabela Periódica dos Elementos (vide verbete nesta série), pois não havia condições de se conseguir a inversão de população necessária àquela *ação-laser* (sobre essa ação, vide verbete nesta série). Essa impossibilidade havia sido registrada, em 1962, nos trabalhos de Robert H. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys e R. O. Carlson (*Physical Review Letters* **9**, p. 366) a *General Electric* (GE), em Schenectady, usando a junção de gálio e arsênio (GaAs); Marshall I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill Junior e G. I. Lasher (*Applied Physics Letters* **1**, p. 62), do *Thomas J. Watson Research Center* (TJWR) da *International Business Machines Corporation* (IBM), em Yorktown Heights, New York, também usando a mesma junção; e Nick Holonyak Junior (n.1928), Sam F. Bevacqua (*Applied Physics Letters* **1**, p. 82), da GE, em Syracuse, usando a junção envolvendo Ga, As e fósforo (P) ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$). Essas junções ficaram conhecidas como **diódo LED** (“light-emitting diode”) (vide verbete nesta série). Ao ouvir a afirmação de Miller, Kroemer retrucou dizendo que se poderia obter a inversão referida acima usando uma junção HeS. Assim, preparou um artigo no qual desenvolveu essa ideia e o mandou à *Applied Physics Letters* (APL) que, contudo, o rejeitou. Sem tentar discutir essa rejeição com os juízes (*referees*) da APL, Kroemer mandou o artigo para os *Proceedings of the Institute of Electric and Electronic Engineers*, que o aceitou e o publicou no Volume **51**, p. 1782, em 1963. Em 16 de agosto desse mesmo ano, Kroemer preparou um pedido de Patente para esse seu **diódo-laser**, o hoje conhecido **laser DHS** (“double-heterostructure”), Patente essa que lhe foi concedida, em 1967 (US Patent 3.309.553). Registre-se que uma Patente similar havia sido solicitada na então União Soviética, em 30 de março de 1963, sob o número 950.840, pelos físicos russos Alferov e Rudolf F. Kazarinov. Ela recebeu o certificado de número USSR Patent 181.737.

Como a *Varian* não acreditou na ideia de Kroemer, negou-lhe a concessão de verbas (*grants*) para realizá-la. Desse modo, ele passou a trabalhar no recente descoberto **efeito Gunn**. Este havia sido descoberto pelo físico inglês J. B. Gunn (1928-2008), em 1963 (*Solid State Communications* **1**, p. 88), e refere-se a oscilações de correntes de micro-ondas em semicondutores do tipo n, em altos campos elétricos. O mecanismo físico básico desse efeito é a progressiva transferência de **elétrons quentes** entre vales de altas e baixas mobilidades na **banda de condução** do semicondutor considerado, quando o campo elétrico aumenta. Como essa transferência produz efeitos de **resistência elétrica negativa**, Kroemer ficou à vontade em trabalhar nessa linha de pesquisa, uma vez que já lidara com efeitos similares em sua Tese de Doutorado, segundo registramos anteriormente.

Durante os 10 anos em que pesquisou o **efeito Gunn**, Kroemer não participou da evolução tecnológica que permitiu ser construído, em 1970, o **laser de onda contínua DHS** (“continuous-wave laser”) na temperatura ambiente, por dois grupos de pesquisadores, o de Alferov, na União Soviética, e o de Izuo Hayashi e Morton B. Panish, nos *Laboratórios Bell*, nos Estados Unidos, segundo veremos mais adiante.

Kroemer deixou a *Varian* em 1966 e, em 1968, foi para a *Universidade de Colorado*, onde permaneceu até 1976, quando então se deslocou para a *Universidade da Califórnia*, em Santa Bárbara, para ser professor no *Departamento de Engenharia Elétrica e Engenharia Computacional*. Na década de 1970, Kroemer voltou a trabalhar com as HeS.

Observe-se que o nome **heterojunção** foi dado pelo físico norte-americano R. L. Anderson, em 1960 (*IBM Journal of Research and Development* **4**, p. 283). Aliás, nesse trabalho, esse físico apresentou uma regra – a **regra de afinidade de elétron** – para estimar teoricamente as **bandas de compensação** (bo) dos semicondutores. Assim, a **bo de condução** seria igual à diferença da afinidade eletrônica nas duas superfícies livres do semicondutor.

Como essa regra não descrevia as relações entre as superfícies e o resto do semicondutor, Kroemer passou a estudar as bo considerando as propriedades de volume (“bulk”) do semicondutor. Desse modo, isoladamente, em 1975 (*Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* **5**, p. 555), e com seu estudante de Doutorado William R. Frensley, em 1976 (*Journal Vacuum Science Technology* **13**, p. 810), e, em 1977 (*Physical Review* **B16**, p. 2642), Kroemer desenvolveu a teoria das bo baseada em pseudopotenciais e que permitia conhecer semiquantitativamente as propriedades volumétricas dos semicondutores. Essa teoria foi melhorada e aprimorada por W. A. Harrison, em 1977 (*Journal Vacuum Science Technology* **14**, p. 1016), e por N. E. Christensen, em 1988 (*Physical Review* **B38**, p. 12687). Note-se que, na década de 1980, Kroemer, isoladamente, e com colaboradores (W. Y. Chien, J. S. Harris e D. D. Edwall), desenvolveu um potente método para determinar experimentalmente as bo, medindo a relação capacitância-voltagem através das HeS. Os resultados desse método poderão ser vistos em sua *Autobiography e Nobel Lecture: Quasi-Electric Fields and Band Offsets: Teaching Electrons new Tricks* (*Nobel e-Museum*, 08 de dezembro de 2000).

As tecnologias desenvolvidas para a construção do **laser DHS** permitiram o aprimoramento do **transistor HBT**, para o qual Kroemer teve grande participação. Com efeito, no final da década de 1970, ele retornou à pesquisa sobre esse tipo de transistor, que iniciara no FTZ, em 1953, como vimos antes. Logo no começo da década de 1980, ele realizou trabalhos importantes para a sua construção, como os publicados em 1982 (*Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers* **70**, p. 13) e, em 1983 (*Journal Vacuum Science and Technology* **B1**, p. 126), no qual sugeriu o uso do composto ternário (GaInP) em substituição ao composto (AlGaAs) (este, usado pelo grupo de Alferov, conforme veremos mais adiante, apresentava muitos defeitos residuais), para ser combinado ao composto binário (GaAs), na construção dos dispositivos eletrônicos envolvendo as HeS, principalmente o HBT. É oportuno destacar que o uso do índio (In) e do fósforo (P) nesses dispositivos, também considerado, independentemente, por Alferov e colaboradores, foi importante para o desenvolvimento da moderna eletrônica de alta-velocidade e óptico-eletrônica, como ocorre na comunicação de fibra-óptica, e no armazenamento de dados por **laser** como o CD (“compact-disc”). Mais detalhes sobre os trabalhos de Kroemer ver sua *Autobiografia e Leitura Nobel* (op. cit.).

Alferov teve sua atenção voltada para a Física devido às excelentes aulas dadas por seu professor, o físico russo Yakov Borisovich Meltseron (1914-1987), em uma Escola Secundária (“High School”) em Minsk, na então *União das Repúblicas Socialistas Soviéticas* (URSS). Ao concluir seus estudos secundários, Meltseron indicou Alferov para o *Instituto Eletrotécnico Ul’yanov* (LETI), em Leningrado (São Petersburgo, a partir de 1991), onde se graduou em dezembro de 1952, sob a orientação do físico russo N. N. Sozina, com um trabalho sobre a fotocondutividade de compostos de bismuto (Bi) e de telúrio (Te). As aulas de Sozina, que era um especialista em fotodetectores de semicondutores, e a leitura do livro

do físico russo F. F. Volkenshtein sobre a eletrocondutividade dos semicondutores, fizeram Alferov interessar-se pelos semicondutores, no começo da década de 1950.

Embora Sozina o tenha convidado a continuar no LETI, Alferov decidiu pelo *Instituto Físico-Técnico* (IFT), em Leningrado, que havia sido fundado pelo famoso físico russo Abram Fedorovic Ioffe (1880-1960). Essa decisão decorreu do sonho que Alferov nutria em trabalhar com Ioffe, desde que leu seu célebre livro sobre os Fundamentos da Física Moderna. No IFT, que hoje tem o nome de *Instituto Físico-Teórico A. F. Ioffe* e no qual entrou no dia 30 de janeiro de 1953, Alferov iniciou seus estudos pós-graduados sob a supervisão do físico russo V. M. Tuchkevich, que então dirigia uma equipe de físicos que pesquisava sobre a criação de diodos e triodos de Ge. No início de seu trabalho nesse Instituto, dois eventos foram marcantes na vida de Alferov. O primeiro ocorreu quando, em fevereiro de 1953, ouviu o seminário ministrado pelo físico russo E. F. Gross sobre a descoberta que fizera com N. A. Karryev, em 1952 (*Doklady Akademii Nauk SSSR* **84**, p. 471): o **exciton**, que é um par de “buraco”-elétron em um cristal [óxido cuproso (Cu_2O), no caso por eles analisado] cuja ligação é análoga a do par elétron-próton no átomo de hidrogênio (H). O segundo evento ocorreu no dia 05 de março de 1953, quando participou com Tuchkevich e sua equipe (os físicos russos A. A. Lebedev, S. M. Ruvkin, A. I. Uvarov e N. S. Yakovchuk) da criação do tj p-n soviético.

Alferov continuou trabalhando com semicondutores no IFT. Em 1961, defendeu sua Tese de Doutorado que versou sobre os retificadores de Ge e de Si. Foi por essa ocasião que ele teve a ideia de desenvolver o **laser DHS**, cuja Patente Soviética foi por ele solicitada, em 30 de março de 1963, segundo registramos acima. Ideia análoga havia sido desenvolvida por Kroemer, cuja Patente Norte-americana foi por ele solicitada em 16 de agosto de 1963, também acima referida.

Depois de propor o DHS, Kroemer parou as pesquisas com as HeS e se dedicou ao **efeito Gunn**, conforme vimos anteriormente. Contudo, Alferov e sua equipe, no IFT, continuaram a trabalhar com elas. Assim, escreveu uma série de artigos, entre 1966 e 1970, publicados na nova Revista soviética *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* (com sua versão norte-americana *Soviet Physics-Semiconductors*), criada em 1966. Nesses artigos, Alferov desenvolveu trabalhos teóricos e experimentais sobre a **heterojunção** e que levaram à invenção do **laser DHS de onda-contínua** (“continuous-wave”) na temperatura ambiente (~ 300 K), ocorrida em 1970, em trabalho assinado por Alferov, V. M. Andreev, D. Z. Garbuzov, Y. V. Zhilyaev, E. P. Morozov, E. L. Portnoi e V. G. Trofim (*Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **4**, p. 1826). Um mês depois, Hayashi, Panish, P. W. Foy e S. Sumski, nos *Laboratórios Bell*, em Murray Hill, nos Estados Unidos, anunciaram um invento análogo (*Applied Physics Letters* **17**, p. 109). Note-se que Alferov ganhou, em 1971, a *Medalha de Ouro do Instituto Benjamin Franklin*, nos Estados Unidos, e o *Prêmio Lênin*, em 1972, na URSS, por essa invenção.

As pesquisas realizadas por Alferov e sua equipe, relatadas acima e referidas por ele como **heteroestruturas clássicas** (HeSC), continuaram na década de 1970. Vejamos os resultados de algumas dessas pesquisas. Ainda em 1970 (*Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **4**, p. 2378), Alferov, Andreev, M. B. Kagan, I. I. Protasov e Trofim inventaram as **baterias solares** feitas dessas HeSC, com um composto do tipo: GaAs . É interessante destacar que esse composto havia sido obtido, em 1967, usando a técnica LPE (“liquid-phase epitaxy”), em trabalhos independentes, realizados por Alferov, Andreev, V. I. Korol’lov, D. N. Tret’yakov e Tuchkevich (*Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **1**, p. 1579), e por Hans S. Rupperecht, Jerry M.

Wooddall e G. D. Pettit (*Applied Physics Letters* **11**, p. 81), no TJWRC/IBM. Destaque-se, também, que essas **heterobaterias** foram bastante importantes para o desenvolvimento da pesquisa espacial soviética, a partir de 1974. Além de serem usadas nos vários *sputniks*, a famosa **estação espacial MIR**, lançada em 20 de fevereiro de 1986, continha várias dessas baterias.

Em 19 de julho de 1971, Alferov, Andreev, Kazarinov, Portnoi e R. A. Suris solicitaram a Patente Soviética, sob o número 1.677.436, do **gerador quântico óptico**, cujo certificado foi denominado SSSR Patent 392.875. Mais tarde, em 1973 (*Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **7**, p. 1159), Alferov, F. A. Ahmedov, Korol'kov e V. G. Nikitin anunciaram que haviam construído o **transistor HBT**, composto de $GaAs-AlAs$. Ainda na primeira metade da década de 1970, Alferov e sua equipe passaram a realizar pesquisas com compostos quaternários das HeS, do tipo $GaIn-AsP$. Desse modo, em 1975, Alferov, I. N. Arsent'ev, Garbuzov, S. G. Konnikov e V. D. Rumyantsev comunicaram na *Pis'ma Zhurnal Tekhnika Fizika* **1**, p. 305; 406 (*Soviet Physics: Technical Physics Letters* **1**, p. 147; 191) que haviam construído um **heterolaser** (na região vermelha) de um sistema $GaIn-AsP$, para ser usado em **comunicação por fibra óptica**. Note-se que Holonyak Junior e seu grupo (W. R. Hitchens, P. D. Wright e J. J. Coleman), também em 1975 (*Applied Physics Letters* **27**, p. 245), construíram um **heterolaser** similar, porém na região amarela.

Ainda na década de 1970, Alferov e seus colaboradores passaram a trabalhar com o que ele denominou de **heteroestruturas quânticas** (HeSQ), tais como: **super-redes**, **poço quântico**, **fio quântico** e **ponto quântico**. Essas HeSQ decorrem do efeito quântico devido ao confinamento do gás de elétrons em suas ultrafinas camadas intermediárias, que foram construídas na medida em que foram inventadas novas técnicas de crescimento das HeSQ. Dentre elas, se destacam: a MOCVD (“metallo-organic chemical vapor deposition”), desenvolvida no trabalho de Harold M. Manasevit, em 1968 (*Applied Physics Letters* **12**, p. 156), e aperfeiçoada por Russell D. Dupuis e Paul D. Dapkus, em 1977 (*Applied Physics Letters* **31**, p. 466); e a MBE (“molecular beam epitaxy”), aperfeiçoada pelo físico sino-norte-americano Alfred Yi Cho (n.1937), em 1971 (*Journal Vacuum Science Technology* **8**, p. 31; *Applied Physics Letters* **19**, p. 467). Observe-se que essa técnica MBE havia sido inventada por Cho e John Arthur, em 1968 (vide verbete nesta série).

As primeiras pesquisas sobre o transporte de elétrons em estruturas periódicas formadas de semicondutores monocristalinos, as famosas **super-redes**, foram realizadas por Esaki e colaboradores do TJWRC/IBM. Assim, Esaki e Raphael Tsu, em 1970 (*IBM Journal of Research and Development* **14**, p. 61), publicaram os resultados de suas experiências com a condução eletrônica na **super-rede** $Ga_{1-x}Al_xAs$. Por sua vez, em 1971 (*Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* **5**, p. 196), Alferov, Zhilyaev e Y. V. Shmartsev também estudaram a condução eletrônica na **super-rede** $GaP_{0.3}Al_{0.7}/GaAs$. Destaque-se que o estudo das **super-redes** realizado pelo grupo de Esaki levou à descoberta do tunelamento nelas e a invenção subsequente do conhecido **diodo túnel ressonante** (DTR), uma variante do **diodo Esaki** (vide verbete nesta série). Nesse estudo, destacamos os seguintes artigos publicados, em 1973, L. L. Chang, Esaki, W. E. Howard e R. Ludeke (*Journal Vacuum Science Technology* **10**, p. 11), Chang, Esaki, Howard, Ludeke e G. Schul (*Journal Vacuum Science Technology* **10**, p. 655) e Tsu e Esaki (*Applied Physics Letters* **22**, p. 562); em 1974, Chang, Esaki e Tsu (*Applied Physics Letters* **24**, p. 593) e Esaki e Chang (*Physical Review Letters* **33**, p. 686). Note-se que o DTR deu início ao desenvolvimento do **laser poço quântico**, cuja primeira ação laser nas HeSQ foi

demonstrada, em 1975 (*Applied Physics Letters* **26**, p. 463), por J. P. van der Ziel, Raymund Dingle, R. C. Miller, William Wiegmann e W. A. Nordland Junior nos *Laboratórios Bell*. Contudo, o nome **poço quântico** só apareceu, em 1978 (*Applied Physics Letters* **32**, p. 295), quando Dupuis, Dapkus, Holonyak Junior, E. A. Rezek e R. Chin construíram o primeiro **laser poço quântico** na temperatura ambiente, usando a técnica MOCVD para fazer crescer a **heteroestrutura** $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$.

Um novo passo para o desenvolvimento da Física do Laser nas HeSQ foi dado por Dingle, Horst L. Störmer (n.1949; PNF, 1998), Arthur Charles Gossard (n.1935) e Wiegmann, ainda em 1978 (*Applied Physics Letters* **33**, p. 665), ao inventarem a técnica do MD (“modulation-dopping”) para o crescimento das **super-redes** formadas das HeSQ. Desse modo, o sucesso com as **heteroestruturas bidimensionais (poço quântico)** estimulou os físicos a estudarem a possibilidade de desenvolver **heteroestruturas** de dimensões mais baixas. Assim, surgiram as **heteroestruturas unidimensionais (fio quântico)** e **zerodimensionais (poço quântico)**, ocorridas nas décadas de 1980 e 1990. Essa possibilidade decorreu do trabalho teórico realizado pelos físicos japoneses Y. Arakawa e H. Sakaki, em 1982 (*Applied Physics Letters* **40**, p. 939). Destaque-se que o primeiro **laser ponto quântico** (“quantum dot laser” - QDL) foi construído em 1994 (*Electronics Letters* **30**, p. 1416), por N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, P. S. Kop’ev, U. Richter, P. Werner, U. Gosele e J. Heydenreich.

Registre-se que Alferov e novos colaboradores, no *Instituto Físico-Teórico A. F. Ioffe*, trabalhou bastante com as HeSQ naquelas duas décadas. É ainda interessante registrar que, com o fim da URSS em 1991, houve uma ameaça de acabar com esse Instituto que era dirigido por Alferov, desde 1987. Para evitar essa ameaça, em 1995, ele aceitou ser Membro do *Parlamento (Duma) Russo*, como Deputado. Ver maiores detalhes da vida e da obra científica de Alferov em sua *Autobiography e Nobel Lecture: The Double Heterostructure: Concept and its Applications in Physics, Electronics and Technology* (*Nobel e-Museum*, 08 de dezembro de 2000).

Desde criança, Kilby interessou-se por eletrônica, influenciado por seu pai, engenheiro elétrico, que trabalhava em uma pequena Companhia Elétrica, em Great Bend, Kansas, cidade natal de Kilby. Foi esse interesse que o motivou a entrar no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Contudo, não sendo aceito no MIT e por ser época da *Segunda Guerra Mundial* (1939-1945), foi convocado para realizar o Serviço Militar, no Exército norte-americano. Durante esse período de convocação, tentou reduzir os tamanhos dos rádios usados na comunicação em selvas. Ao ser desmobilizado, iniciou o *Curso de Engenharia Elétrica* na *Universidade de Illinois*, onde teve oportunidade de estudar a física dos tubos de vácuo (vide verbete nesta série). Graduou-se na mesma, em 1947.

Depois de sua graduação, Kilby foi trabalhar na *Centralab*, em Milwaukee, Wisconsin, que era uma indústria que produzia componentes para rádio, televisão e aparelho auditivo. De noite, frequentava o *Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica* na *Universidade de Wisconsin*. Em 1952, a *Centralab* decidiu produzir transistores e diodos que haviam sido inventados em 1947 e 1948, conforme registramos anteriormente. Assim, Kilby foi designado para os *Laboratórios Bell*, em Murray Hill, onde ocorreram esses inventos. Note-se que, na *Centralab*, Kilby e R. R. Roup inventaram um circuito híbrido. Uma pinta de prata (Ag) foi depositada em um substrato de cerâmica, para servir como condutor, enquanto pintas de carbono (C) formavam os resistores. Pequenos capacitores foram incorporados a esse

substrato. Este era então soldado ou ligado, por tomadas, aos tubos de vácuo. Esse invento recebeu a US Patent 2.841.508, em julho de 1958.

Em maio de 1958, Kilby foi trabalhar na *Texas Instruments* (TI), em Dallas, no Texas. Ao lidar com transistores e diodos na *Centralab* e na *Bell*, Kilby percebeu que havia uma grande dificuldade de ajustá-los com os demais componentes (resistores e capacitores) e demais conexões de um equipamento eletrônico. Como no verão os engenheiros da TI estavam de férias, ele então pôde trabalhar em tempo integral em sua ideia de **miniaturização**, para contornar a dificuldade apontada acima. Registre-se que a **miniaturização eletrônica** já havia sido sugerida, no começo da década de 1950, pelo engenheiro eletrônico inglês Geoff William Arnold Dummer (1909-2002) da *Royal Radar Establishment*. Assim, no dia 24 de julho de 1958, Kilby escreveu em seu caderno de Notas ("Notebook") o que ficou conhecido como **A Ideia Monolítica**, ou seja, que os componentes de um circuito elétrico (resistores, capacitores, diodos e transistores) poderiam ser feitos de um mesmo material semicondutor e reunidos em uma pastilha (**chip**). Imediatamente imaginou construir um circuito *flip-flop* no qual o silício (Si), sem ser dopado, funcionaria como resistor, e, dopado como **junção p-n**, funcionaria como capacitor. Logo que seu supervisor, o engenheiro e físico-químico canadense Willis Alfred Adcock (1922-2003), retornou de férias, Kilby apresentou-lhe essa ideia, recebida com entusiasmo, porém, com ceticismo.

Apesar desse ceticismo, Adcock permitiu que Kilby materializasse sua ideia. Desse modo, em 28 de agosto de 1958, ele mostrou a Adcock um dispositivo eletrônico em que todos os seus elementos eram feitos de Si. Porém, esse dispositivo ainda não era um **circuito integrado** (CI), pois nele havia componentes discretos. Como o dispositivo funcionou, Kilby partiu para inventar o verdadeiro CI. Assim, com auxílio dos técnicos Patrick Harbrecht e Thomas Yeargan, Kilby trabalhou na preparação de **osciladores de deslocamento de fase** ("phase-shift oscillators"), cujos três primeiros exemplares foram apresentados no dia 12 de setembro de 1958. O primeiro deles oscilou em torno de 1.3 MHz. No dia 19 desse mesmo mês, ele mostrou um *flip-flop*. Note-se que todos esses circuitos digitais foram construídos de germânio (Ge). Em março de 1959, a invenção do CI, do **tipo mesa**, foi anunciada publicamente por intermédio da solicitação feita por Kilby de uma Patente Norte-Americana para o CI. Este foi por ele apresentado na 14th *Annual Meeting* da *American Rocket Society*, em novembro de 1959, com o título **Semiconductor Solid Circuit**. Um tipo desse CI, construído de Si, foi descrito em artigo escrito por Kilby e publicado somente em julho de 1976 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Electron Devices* **ED-23**, p. 648).

A Patente Norte-Americana do CI só foi concedida a Kilby, em 1967, depois de uma disputa judicial de paternidade com o físico norte-americano Robert Norton Noyce (1927-1990), um dos fundadores da *Fairchild Semiconductor Corporation*, localizado em Santa Clara Valley (o hoje famoso *Silicon Valley*), ao sul de São Francisco, na Califórnia. Vejamos a razão dessa disputa. Em abril de 1959, Noyce solicitou uma Patente Norte-Americana para seu CI. Diferentemente do inventado por Kilby, o de Noyce era **planar** (segundo a ideia de Jean Hoerni) e, portanto, não possuía os componentes expostos como o de Kilby, pois eram protegidos por uma camada de dióxido de silício (SiO₂). Além do mais, suas conexões eram feitas por intermédio da evaporação de fios de alumínio (Al) sobre a

superfície isolante. Em 1968, a Corte Suprema dos Estados Unidos concedeu a Noyce a paternidade da invenção do CI. Registre-se que, nesse mesmo ano de 1968, Noyce e Gordon Moore, ambos da *Fairchild*, fundaram a INTEL (“Integrated Electronics”). Esta Empresa tem, como grandes méritos, os seguintes inventos: **chip RAM 4K**, em 1973; **chip 486**, em 1989; e **chip Pentium 60** (60 MHz), em 1993. Tais inventos seguem, de algum modo, a famosa **regra exponencial de Moore** sobre o crescimento dos dispositivos eletrônicos de semicondutores. Observe-se que o desenvolvimento acelerado do CI de Kilby-Noyce deveu-se ao fato de ele ser empregado nos dois famosos programas militares norte-americanos da década de 1960: a **Missão Lunar Apollo** e o **Míssel Balístico Intercontinental Minuteman**.

Ainda no TI, Kilby participou da construção da primeira calculadora de bolso, a **Pocketronic**, lançada comercialmente no dia 14 de abril de 1971. Nesse dia, Kilby não mais se encontrava na TI, pois a deixara em 1970 para se tornar inventor independente. Entre 1978 e 1984 foi um *Distinguished Professor* de Engenharia Elétrica na *Texas A and M University*. Para maiores detalhes da vida e da obra científica de Kilby ver sua *Autobiography e Nobel Lecture: Turning Potential into Realities: The Invention of the Integrated Circuit* (*Nobel e-Museum*, 08 de dezembro de 2000).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)