

Comparativo da mobilidade eletrônica do arseneto de gálio com outros semicondutores

Comparison of the electronic mobility of gallium arsenide with other semiconductors

DOI: 10.34140/bjbv3n2-037

Recebimento dos originais: 04/01/2021

Aceitação para publicação: 31/03/2021

Maria Cecília Barbosa Pereira

Graduanda em Licenciatura Plena em Física

Instituição: Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC Goiás

Endereço: Av. Universitária, n. 1440, CP 86, Goiânia-GO, 74605-010

E-mail: barbosappereira@gmail.com

Clóves Gonçalves Rodrigues

Doutor em Ciências pelo Instituto de Física Gleb Wataghin, Unicamp, SP, Brasil

Instituição: Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC Goiás

Endereço: Av. Universitária, n. 1440, CP 86, Goiânia-GO, 74605-010

E-mail: cloves@pucgoias.edu.br

RESUMO

Neste trabalho inicialmente foi discutida a importância dos materiais semicondutores e algumas de suas características. Em seguida foi utilizada uma consagrada equação diferencial, obtida por meio de uma teoria cinética quântica não linear, para determinar a mobilidade eletrônica do semicondutor arseneto de gálio e o resultado foi comparado com a mobilidade de outros semicondutores conhecidos. Foi possível concluir que o arseneto de gálio possui uma mobilidade muito maior que os demais semicondutores, o que permite uma operação muito mais rápida em dispositivos eletrônicos.

Palavras-Chave: Indústria de Semicondutores. Mobilidade. Arseneto de Gálio.

ABSTRACT

In this paper, the importance of semiconductor materials and some of their characteristics were discussed. Then, a differential equation (obtained by means of a nonlinear quantum kinetic theory) was used to determine the electronic mobility of the gallium arsenide semiconductor. The result was compared to the mobility of other known semiconductors. It was possible to conclude that gallium arsenide has a much greater mobility than other semiconductors, which allows for a much faster operation in electronic devices.

Keywords: Semiconductor Industry. Mobility. Gallium Arsenide.

1 INTRODUÇÃO

A condição de vida do ser humano pode ser melhorada quando se compreende como transformar os recursos naturais em produtos cada vez mais eficientes, criando novas possibilidades de aplicações. Assim, os materiais passaram a ser classificados conforme as suas principais características, possibilitando observar características comuns e interessantes para as mais diversas aplicações (Swart, 2008).

Entre os diversos grupos de materiais com propriedades elétricas interessantes estão os semicondutores. As suas propriedades foram observadas inicialmente pelo físico e químico italiano Alessandro Volta (1745-1827). Os semicondutores passaram a ser estudados intensamente no início do século XX promovendo uma grande revolução na computação e na indústria eletrônica. Dentre os dispositivos criados com materiais semicondutores podemos citar: diodos, diodos emissores de luz, transistores, detectores e emissores diversos, lasers, etc., os quais são de extrema importância em nossa sociedade moderna.

O texto está assim organizado: na Seção 2 define-se o que são materiais, quais suas características e suas classificações. A definição e características do semicondutor (ou cristal semicondutor) são apresentadas na Seção 3. A nova contribuição deste trabalho está na Seção 4, onde deduzimos a mobilidade eletrônica do semicondutor arseneto de gálio (GaAs) e comparamos com a mobilidade de outros semicondutores. A Seção 5 é dedicada às conclusões e comentários finais.

2 MATERIAIS

Material é tudo aquilo que empregamos na confecção de bens materiais tais como: utensílios, habitações, máquinas, veículos, equipamentos, etc. Já a Ciência dos Materiais é um campo da ciência de caráter interdisciplinar que estuda as propriedades dos materiais e a relação entre a sua estrutura em escalas atômicas ou moleculares com suas características macroscópicas, incorporando elementos da física e da química como as formas de caracterização e processamento (Swart, 2008).

Em praticamente todas as atividades humanas existe uma dependência direta ou indireta em relação aos materiais. Esses materiais são utilizados nas residências, nos meios de transporte e de comunicação, no vestuário, no comércio, no lazer, no processamento de dados, na produção de alimentos, nos itens de ensino e saúde, na geração e transporte de energia e em muitas outras áreas, atividades e segmentos. Assim, o conhecimento e a habilidade na produção e manipulação de materiais afetam diretamente o nível de vida de um povo. Nota-se pela História que o nível de desenvolvimento de um povo está diretamente relacionado à sua habilidade em produzir e manipular os materiais, sendo que as culturas passadas foram classificadas de acordo com essa habilidade, como, por exemplo, a idade da pedra, a idade do bronze e a idade do ferro. Portanto, há a necessidade de conhecer as propriedades dos materiais. Um exemplo de materiais com propriedades distintas: metais, cerâmicas, semicondutores, supercondutores, polímeros ou plásticos, vidros, fibras, madeira, areia, pedra e vários conjugados (Vlack, 1984).

A qualidade e as características dos materiais empregados na manufatura de produtos influenciam na qualidade do produto final. Além disso, a forma como esses materiais reagem ao meio ambiente ao qual estarão expostos também determinam a qualidade do produto final.

De forma geral, especialistas em engenharia e ciência de materiais tratam da geração e aplicação do conhecimento que relaciona composição, estrutura e processamento de materiais com suas propriedades e seus usos. Essa ciência e essa engenharia englobam os seguintes aspectos dos materiais:

- a) A ciência e o entendimento básico dos materiais;
- b) A relação entre a estrutura, as propriedades e o desempenho de um material com seu processamento durante a confecção ou durante seu uso;
- c) As necessidades e as experiências sociais do uso dos materiais na confecção de produtos.

Qualquer ação que cause uma modificação da estrutura interna do material afetará suas propriedades. Essas ações podem ocorrer durante o processamento, como parte deste, ou durante o uso do produto, por esforços e/ou condições ambientais.

Na atualidade, os componentes eletrônicos estão presentes na maioria das atividades humanas. É difícil imaginar alguma atividade humana que não dependa, direta ou indiretamente, de algum sistema eletrônico. Pode-se dizer que estamos na era da eletrônica. Entende-se como dependência indireta a produção de utensílios utilizados nas atividades humanas, a análise de seus resultados, o transporte de bens e a comercialização de bens. No entanto, todos os dispositivos eletrônicos são baseados em materiais.

A propriedade física que apresenta a maior variação nos materiais é a resistividade elétrica, justamente a propriedade de maior interesse na eletrônica. Esta propriedade pode variar de $10^{18} \Omega \cdot m$ (quartzo, poliestireno) a $10^{-8} \Omega \cdot m$ (prata, cobre), ou várias ordens de grandeza maiores que isso, no caso de supercondutores. Valores típicos são apresentados na Tabela 1. Valores exatos dependem da temperatura, da estrutura interna e do processo de fabricação.

Tabela 1. Resistividade elétrica à temperatura ambiente.

| Material | Substância | Resistividade ($\Omega \cdot m$) |
|----------------|-----------------|------------------------------------|
| Condutores | Prata | $1,62 \times 10^{-8}$ |
| | Cobre | $1,72 \times 10^{-8}$ |
| | Ouro | $2,44 \times 10^{-8}$ |
| | Alumínio | $2,92 \times 10^{-8}$ |
| | Ferro | $1,00 \times 10^{-7}$ |
| | Mercúrio | $9,80 \times 10^{-7}$ |
| | Nicromo | $1,10 \times 10^{-6}$ |
| Semicondutores | Germânio | $4,61 \times 10^{-1}$ |
| | Silício | $2,5 \times 10^3$ |
| Isolantes | Água pura | $2,5 \times 10^5$ |
| | Madeira | $10^8 - 10^{11}$ |
| | Vidro | $10^{10} - 10^{14}$ |
| | Quartzo fundido | $7,5 \times 10^{17}$ |

Fonte: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97ª edição, Editora CRC Pres, 2016.

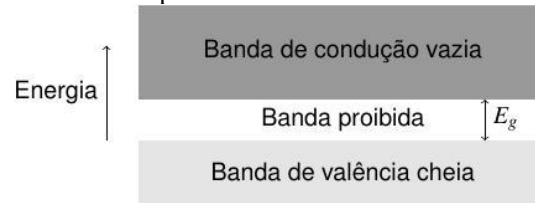
Do ponto de vista da propriedade da resistividade elétrica os materiais podem ser agrupados em:

- Isolantes ou dielétricos: são os materiais que praticamente não apresentam elétrons livres em sua estrutura cristalina, ou seja, todos os elétrons estão fortemente ligados aos seus átomos ou as suas moléculas, não tendo liberdade de sair desta estrutura quando um campo elétrico externo é aplicado ao material;
- Semicondutores: os materiais que têm suas características elétricas situadas entre as características dos dielétricos e as características dos condutores. Os semicondutores possuem resistividade elétrica no intervalo entre 10^{-4} a $10^7 \Omega\text{m}$, que são valores intermediários entre os bons condutores ($10^{-8} \Omega\text{m}$) e bons isolantes (entre 10^{12} e $10^{20} \Omega\text{m}$);
- Condutores: materiais que apresentam uma grande quantidade de elétrons livres. Quando um campo elétrico externo é aplicado ao material surge uma corrente elétrica que é o fluxo de elétrons (ou de portadores de carga) em função do tempo que atravessa certa área de referência no material;
- Supercondutores: materiais que apresentam quase nenhuma resistência ao movimento dos elétrons. O fenômeno da supercondutividade ocorre quando certos materiais são resfriados a temperaturas muito baixas. Há um grande esforço para encontrar materiais que apresentam essa propriedade em temperatura ambiente.

3 MATERIAIS SEMICONDUTORES

Um semicondutor puro perfeito torna-se isolante no zero absoluto (0 K), pois todos os elétrons estão na banda de valência e estão ligados aos átomos e moléculas que constituem o cristal semicondutor. Logo, não há condutividade e a resistividade é máxima. A Figura 1 mostra que existe uma lacuna de energia, que é a diferença de energia entre o ponto superior da banda de valência e o ponto inferior da banda de condução. Esta é uma característica fundamental nos semicondutores. As propriedades de um semicondutor dependem das impurezas, das excitações térmicas, dos defeitos da rede ou dos desvios de suas composições químicas. À medida que a temperatura do cristal aumenta, os elétrons que estão nos estados da banda de valência de maior energia adquirem energia suficiente para saltar a lacuna de energia e ocupar os estados menos energéticos da banda de condução, deixando espaços vazios na banda de valência. Esses espaços vazios são denominados de buracos (Ashcroft, 2011).

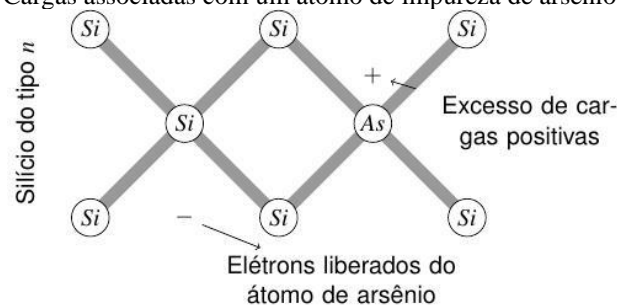
Figura 1. Esquema de banda para a condutividade intrínseca num semiconductor.



Além da energia térmica, podemos controlar a densidade de portadores de carga mediante a adição de impurezas na rede cristalina. Essas impurezas são átomos com valência maior ou menor do que o átomo que forma a rede cristalina do cristal semiconductor. Como exemplo, a adição de boro (B) ao silício (Si), na proporção de um átomo de boro para átomos de silício, provoca um aumento de um fator de 1000 na condutividade do silício puro para a temperatura ambiente. O processo de adição de impureza é denominado dopagem.

Para compreendermos o efeito da dopagem nos cristais semicondutores, consideraremos o silício (Si) e o germânio (Ge) que se cristalizam com a estrutura do diamante, ou seja, cada átomo forma quatro ligações covalentes com seus vizinhos mais próximos, que corresponde à valência química quatro. Se colocarmos um átomo de valência química igual a cinco como, por exemplo, o fósforo (P), o arsênio (As) ou o antimônio (Sb), no lugar de um átomo de silício ou germânio, existirá um elétron de valência libertado após as quatro ligações covalentes serem feitas, como indicado na Figura 2.

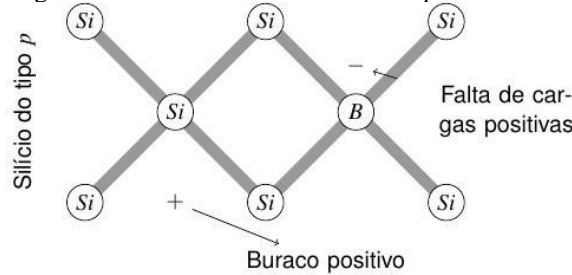
Figura 2. Cargas associadas com um átomo de impureza de arsênio no silício.



Observando a Figura 2 percebemos que o cristal semiconductor dopado com um átomo doador de elétrons passa a ficar com excesso de elétrons. Esses elétrons são elétrons livres, melhorando a condutividade do cristal semiconductor. Esse cristal é denominado tipo *n*. Notemos que, eletricamente falando, o cristal continua neutro, pois ele conta com a mesma quantidade de elétrons e de prótons.

Como um elétron pode estar ligado a uma impureza pentavalente, um buraco também pode. Para isso, basta colocar um átomo trivalente como, por exemplo, o boro (B), o alumínio (Al), o gálio (Ga) ou o índio (In), no lugar do átomo de germânio ou de silício. Essas impurezas são denominadas de impurezas aceitadoras ou receptoras, porque elas podem receber um elétron da camada de valência, deixando um buraco nessa banda (veja Figura 3). O cristal semiconductor dopado com átomos receptores é denominado tipo *p* por conter buracos com carga positiva na camada de valência.

Figura 3. Cargas associadas com um átomo de impureza de boro no silício.



4 RESULTADOS

A equação que caracteriza, em um regime ôhmico, a velocidade dos portadores de carga, $v_e(t)$, em um material semiconductor dopado tipo n é dada por (Luzzi, 2018)

$$v_e(t) = \frac{e\mathcal{E}}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t/m_e^*})$$

onde e é a carga elementar, \mathcal{E} é o módulo do campo elétrico aplicado, t é o tempo transcorrido desde a aplicação inicial do campo elétrico em $t = 0$, m_e^* é a massa efetiva dos elétrons, sendo α dado por

$$\alpha = \frac{(e\omega)^2}{3} \sqrt{\frac{2(m_e^*)^3}{\pi(k_B T)^3} \frac{2\gamma e^z K_1(z)}{(e^{2z} - 1)}}$$

onde ω é a frequência dos fônons longitudinais ópticos, k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura da rede, $K_1(z)$ é a função modificada de segunda espécie de Bessel, γ é uma constante de acoplamento dada por

$$\gamma = \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0}$$

sendo ϵ_0 a constante eletrostática estática e ϵ_∞ a constante eletrostática de alta frequência, e o parâmetro z é definido como

$$z = \frac{\hbar\omega}{2k_B T}$$

onde \hbar é a constante de Planck dividida por 2π . A mobilidade eletrônica, μ , no estado estacionário, é definida como a velocidade dos portadores (aqui elétrons) dividida pelo módulo do campo elétrico aplicado, ou seja (Kittel, 2006)

$$\mu = \frac{v_e}{|\mathcal{E}|}$$

Assim utilizando esta última equação e a equação da velocidade, v_e , podemos determinar o valor da mobilidade para baixos valores de campo elétrico (regime ôhmico) sendo, evidentemente, necessário utilizar os parâmetros característicos do semiconductor a ser considerado. Apresenta-se na Tabela 2 o resultado para a mobilidade eletrônica do semiconductor Arseneto de Gálio (GaAs) obtido neste trabalho em comparação com outros semicondutores. Todos os resultados são para os semicondutores dopados tipo n . Verifica-se que o semiconductor GaAs possui a maior mobilidade entre todos os semicondutores

apresentados. A terceira coluna da Tabela 2 apresenta a razão entre a mobilidade eletrônica do GaAs e a mobilidade do respectivo semicondutor em comparação.

Tabela 2. Resultado e comparação com outros semicondutores.

| Semicondutor | Mobilidade (cm ² /V.s) | Referência | Razão |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------|
| GaAs | 8600 | Este trabalho | |
| ZnS (WZ) | 202 | (Rodrigues, 2017) | 42,6 |
| ZnS (ZB) | 148 | (Rodrigues, 2017) | 58,1 |
| 6H-SiC (ϵ_{\parallel}) | 678 | (Ferracioli, 2020) | 12,7 |
| 6H-SiC (ϵ_{\perp}) | 32 | (Ferracioli, 2020) | 268,7 |
| 3C-SiC | 693 | (Correa, 2019) | 12,4 |
| 4H-SiC (ϵ_{\perp}) | 3476 | (Vasconcelos, 2019) | 2,5 |
| 4H-SiC (ϵ_{\parallel}) | 2566 | (Vasconcelos, 2019) | 3,3 |
| Si | 1400 | IOFFE(a) | 6,0 |
| Ge | 3900 | IOFFE(b) | 2,2 |
| InN | 3130 | (Rodrigues, 2012) | 2,7 |
| AlN | 168 | (Rodrigues, 2007) | 51,2 |
| GaN | 229 | (Rodrigues, 2007) | 37,5 |

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho inicialmente foi discutida a importância dos materiais semicondutores e algumas de suas características. Em seguida foi utilizada uma consagrada equação diferencial, obtida por meio de uma teoria cinética quântica não linear (Luzzi, 2018), para determinar a mobilidade eletrônica do semicondutor Arseneto de Gálio (GaAs) e o resultado foi comparado com a mobilidade de outros semicondutores conhecidos.

Pelos resultados aqui obtidos e sintetizados na Tabela 2, conclui-se que o arseneto de gálio (GaAs) possui uma mobilidade muito maior que os demais semicondutores, o que permite uma operação muito mais rápida em dispositivos eletrônicos. Em comparação ao semicondutor mais utilizado comercialmente, o silício, a mobilidade do GaAs é 6 vezes maior. Outra vantagem do GaAs em relação ao Silício é que o seu gap de banda de energia é mais amplo, o que permite a operação de dispositivos de energia em temperaturas mais altas e proporciona menor ruído térmico em dispositivos de baixa potência em temperatura ambiente. Outra vantagem em relação ao silício é que seu gap de banda direto lhe confere propriedades optoeletrônicas mais favoráveis que o gap de bandas indireto de silício. Por outro lado, o silício é robusto, barato e de fácil processamento, enquanto o GaAs é mais frágil e muito caro. O GaAs é, portanto, usado somente quando o silício não é suficiente e em projetos específicos em que o alto custo seja recompensado pelos benefícios ganhos.

REFERÊNCIAS

- ASHCROFT, N. W., MERMIN, N. D. (2011). Física do estado sólido. Ed. Cengage Learning. São Paulo, Brasil.
- CORREA, A. M. D., RODRIGUES, C. G., LUZZI, R. (2019). Electron transport in bulk n-doped 3C-SiC by using a non-equilibrium quantum kinetic theory. *European Physical Journal B*, 92, 261.
- FERRACIOLI, R. T., RODRIGUES, C. G., LUZZI, R. 2020. Anisotropic Carrier Transport in n-Doped 6H-SiC. *Physics of the Solid State*, 62, 110-115.
- IOFFE(a). Si – Silicon Electrical properties. Disponível em:
<<http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/electric.html>>. Acesso em maio de 2021.
- IOFFE(b). Ge – Germanium Electrical properties. Disponível em:
<<http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/electric.html>>. Acesso em maio de 2021.
- KITTEL, C. (2006). Introdução à física do estado sólido. Ed. LTC. 8ª edição. Rio de Janeiro, Brasil.
- LUZZI, R., VACONCELLOS, A. R., J. G. Ramos, RODRIGUES, C. G. (2018). Statistical Irreversible Thermodynamics in the Framework of Zubarev's Nonequilibrium Statistical Operator Method. *Theoretical and Mathematical Physics*, 194, 4-29.
- RODRIGUES, C. G. (2007). Electron Transport in GaN(ZB) and AlN(WZ). *Journal of Materials Science*, 42, 396-400.
- RODRIGUES, C. G. (2012). Nonlinear electronic transport behavior in Indium Nitride. *Materials Chemistry and Physics*, 137, 317-322.
- RODRIGUES, C. G. (2017). Ultrafast transport transient in n-doped ZnS in wurtzite and zinblende phases. *Condensed Matter*, 2, 12.
- SWART, J. W. (2008). Semicondutores: Fundamentos, técnicas e aplicações. Ed. Unicamp. Campinas, Brasil.
- VASCONCELOS, J. L., RODRIGUES, C. G., LUZZI, R. (2019). Study of Electron Transport in 4H-SiC by Using Nonequilibrium Statistical Ensemble Formalism. *Brazilian Journal of Physics*, 49, 494-501.
- VLACK, L. H. V. (1984). Princípios de ciência e tecnologia dos materiais. Ed. Elsevier. 4ª edição. Rio de Janeiro, Brasil.