

## 12º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

### ESTUDO DO TRANSPORTE ELETRÔNICO EM NANOFIOS DE GERMÂNIO

NÚBIA BEATRIZ SICCHIERI<sup>1</sup>, RIAMA COELHO GOUVEIA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Licencianda em Química, iniciação científica PIVICT, IFSP Campus Sertãozinho, nubibeatrizsich@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutora em Física, professora do IFSP Campus Sertãozinho, riana@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.05.07.00-0 - Física do Estado sólido.

**RESUMO:** A crescente redução no tamanho dos equipamentos eletrônicos motivou a pesquisa em nanoestruturas. Devido ao reduzido tamanho, essas estruturas apresentam algumas propriedades diferentes dos materiais macroscópicos, dentre elas o transporte de corrente, especialmente quando se trata de materiais semicondutores. O Germânio é um dos semicondutores tracionais, e medidas de resistência em função da temperatura em redes de nanofios de germânio mostram que o transporte de corrente não segue o comportamento típico da ativação térmica, e nem se ajusta adequadamente a processos isolados de *hopping*; além disso, os contatos entre os nanofios e dos nanofios com terminais metálicos externos influenciam no comportamento das medidas. Assim, o objetivo deste projeto de pesquisa é investigar as possibilidades no transporte de corrente em redes de nanofios de Germânio buscando um modelo que permita um ajuste adequado aos dados experimentais. O estudo está sendo desenvolvido com uso de software gráfico para análise de dados e estatística – OriginLab, e diversos gráficos de resistência em função da temperatura e tensão em função da temperatura já foram elaborados, sendo feita uma análise preliminar dos resultados, que confirma a complexidade do problema em estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nanoestruturas; Semicondutores; Transporte de corrente.

### ANALYSIS OF ELECTRONIC TRANSPORTATION PROCESSES IN GERMANIO NANOWIRE

**ABSTRACT:** The reduction in the size of electronic equipment motivated research into nanostructures. Due to their reduced size, these structures have some properties that are different from macroscopic materials, including current transport, especially when dealing with semiconductor materials. Germanium is one of the tractional semiconductors, and resistance measurements as a function of temperature in germanium nanowire networks show that the current transport does not follow thermal activation typical behavior, nor properly fit to hopping processes; in addition, the contacts between the nanowires themselves and between the nanowires with external metallic terminals influence the behavior of measurements. Thus, the objective of this research project is to investigate the possibilities of current transport in Germanium nanowire networks, looking for a model that allows the fitting to experimental data. The study is being developed using a graphical software for data and statistical analysis - OriginLab, and several graphs of resistance as a function of temperature and voltage as a function of temperature have already been prepared, with a preliminary analysis of the results being carried out, which confirms the complexity of the problem under study.

**KEYWORDS:** Nanostructures; Semiconductors; Current transport.

### INTRODUÇÃO

A revolução da indústria eletrônica nos últimos 50 anos inclui a diversificação e a miniaturização dos equipamentos. Esse processo levantou alguns desafios; a busca por soluções motivou, entre outros, a pesquisa sobre materiais nanoestruturados (Orton, 2004). Tais pesquisas mostraram, desde os

primeiros resultados, que além da solução dos problemas, novas propriedades surgiam devido ao tamanho reduzido das nanoestruturas (Cao, 2004). Uma dessas propriedades é o transporte de portadores de corrente, especialmente para os materiais semicondutores.

A condutividade de um semicondutor é fortemente influenciada pela presença de imperfeições (Bube, 1974); as superfícies, pela quebra de periodicidade que representam, podem ser consideradas imperfeições, e tem papel fundamental em nanoestruturas, com grande razão superfície/volume. As imperfeições geram níveis energéticos localizados e complexificam os processos de transporte, envolvendo tanto os portadores excitados das bandas de condução e valência quanto o escape e a captura de portadores dos estados localizados, incluindo três distintos mecanismos: ativação térmica, hopping para vizinhos próximos (NNH) e hopping de alcance variável (Singh, 2005).

Nos dispositivos reais os semicondutores são conectados ao circuito por contatos metálicos. Nos dispositivos de rede de nanofios, também existem os contatos entre os próprios nanofios, que podem ou não estar revestidos por camadas de óxido inerentes ao processo de crescimento. O comportamento desses contatos pode ser ôhmico ou retificador, podendo sofrer influência também das imperfeições e estados localizados, e interferindo em resultados de medidas experimentais (Gouveia, 2016).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é estudar dados experimentais presentes na literatura para ampliar a compreensão sobre o processo de transporte de corrente em redes de nanofios de germânio.

## MATERIAL E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho consistiu em revisão bibliográfica para compreensão sobre o comportamento de elétrons em semicondutores, especialmente sobre as teorias de bandas de energia e sobre as possibilidades condução de corrente e transporte eletrônico nesses materiais, com ênfase para as nanoestruturas. Também foram estudados os tipos de contato entre metal e semicondutor e sua possível influência em medidas experimentais.

A segunda etapa foi a construção de gráficos de resistência em função da temperatura e tensão em função da temperatura, com base em dados experimentais de redes de nanofios de germânio presentes na literatura (Gouveia, 2016). Os gráficos construídos foram analisados de forma comparativa, buscando entender os fatores que poderiam estar influenciando nas diferenças de comportamento.

Como terceira etapa estão sendo feitos os ajustes das curvas experimentais aos processos de ativação térmica e hopping de forma independente, ou seja, como se apenas um dos processos ocorresse nos nanofios, e sem levar em consideração influências dos contatos entre semicondutor e metal e entre os nanofios.

Para o ajuste da ativação térmica está sendo utilizada a equação

$$R(T) = R_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right), \quad (1)$$

onde  $R_0$  está relacionado com a mobilidade dos portadores nas bandas de energia do semicondutor e  $T_0$  com o valor da energia de ativação (Singh, 2005).

Para o processo de hopping de alcance variável está sendo usada a equação

$$R(T) = R_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T^{1/4}}\right). \quad (2)$$

onde  $R_0$  está relacionado com o espectro de fônons, com a distância espacial média entre os níveis de energia localizados, com a densidade de estados no nível de Fermi e com o comprimento de localização da função de onda dos estados localizados e o  $T_0$  representando a separação média, em energia, entre dois níveis localizados (Singh, 2005).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do estudo bibliográfico, pode-se compreender sobre os mecanismos de transporte em nanoestruturas e as variáveis que determinam sua ocorrência. Diante disto, vale ressaltar e discutir, que em um semicondutor intrínseco macroscópico quando existem imperfeições na rede cristalina, elas interrompem a periodicidade da rede criando níveis de energia localizados esses níveis de energia encontram-se frequentemente no *gap* do semicondutor, ou seja, entre a banda de valência e de condução.

As imperfeições, fazem com que o transporte de corrente se torne muito mais complexo, envolvendo tanto os portadores excitados das bandas de condução e valência quanto o escape e a captura de portadores nos estados localizados, envolvendo três distintos mecanismos: ativação térmica, *hopping* para vizinhos próximos (NNH) e *hopping* de alcance variável (Singh, 2005). A Figura 1 ilustra tanto os processos de excitação quanto os mecanismos de transporte.

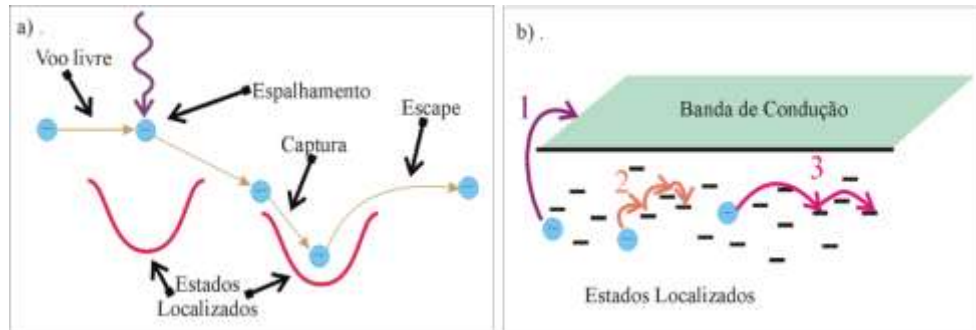


Figura 1. Transporte de carga em sistemas com desordem: (a) diagrama esquemático dos processos que estão envolvidos no transporte; (b) mecanismos de transporte – (1) ativação térmica, (2) hopping para vizinho próximo, (3) hopping de alcance variável.

Em relação aos contatos metal-semicondutor, podem ser de dois tipos básicos, dependendo das funções trabalho dos metais e das eletroafinidades dos semicondutores, sendo estes tipos ôhmico e retificador ou Schottky (Rhoderick; Williams, 1988). A formação da barreira de potencial no contato Schottky ocorre pela redistribuição de cargas entre o metal e o semicondutor para equiparação dos níveis de Fermi na interface. Schottky (1938) e Mott (1938) mostraram, de forma independente, que a corrente em um contato retificador poderia ser explicada supondo que os elétrons passam sobre uma barreira de potencial através de processos de emissão termicamente estimulada, com dependência em relação à temperatura, área de contato e tensão aplicada.

Na segunda etapa, com base em dados experimentais de nanofios de germânio e utilizando um software de gráficos para análise de dados (OriginLab), foi feita a construção de gráficos de resistência em função da temperatura (Figura 2) e tensão em função da temperatura (Figura 3) com base em dados experimentais de diversos dispositivos produzidos por Gouveia (2016).

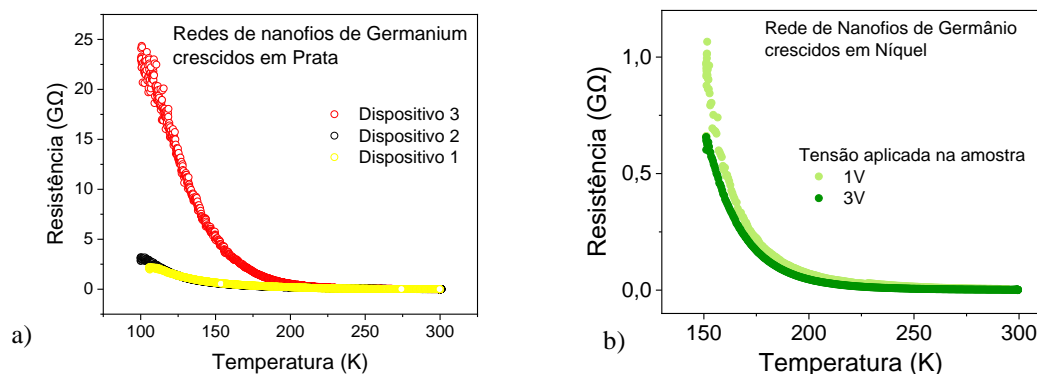


FIGURA 2. Resistência em função da temperatura para redes de nanofios de Germanio crescidos em nanopartículas de: a) prata, apresentando medidas em três diferentes dispositivos, com a mesma tensão aplicada; b) níquel, mostrando duas medidas realizadas em um mesmo dispositivo, com diferentes valores de tensão aplicados à amostra. Fonte: Próprio autor.

Medidas de resistência em função da temperatura para três diferentes dispositivos de rede de nanofios de germânio crescidos em nanopartículas de prata (Figura 2a) mostram que dois dos dispositivos (1 e 2) possuem resistência bastante semelhante, para toda a faixa de temperatura, mas que no terceiro dispositivo a resistência é muito mais elevada para baixas temperaturas, e só se aproxima dos outros dois dispositivos para temperaturas superiores a 200K. A similaridade de resistência nos

dispositivos 1 e 2 é bastante compreensível, tendo em vista que os dispositivos possuem configurações geométricas (distância entre contatos e forma dos contatos) semelhante; a diferença para o dispositivo 3, acentuada em baixas temperaturas, aponta para o fato de que esse dispositivo possui características distintas, seja no tipo de transporte de corrente principal ou no comportamento dos contatos, em relação aos outros dois dispositivos de nanofios crescidos a partir das mesmas sementes.

Em relação às amostras de nanofios de germânio crescidos em nanopartículas de níquel (Figura 2b), observa-se que a alteração da tensão colocada na amostra produz apenas uma pequena modificação no comportamento das curvas experimentais, especialmente para baixas temperaturas. Em baixas temperaturas os elétrons possuem menos energia para excitação térmica, seja para a mudança de banda seja para atravessar barreiras, e a tensão externa aplicada pode afetar esse processo.

Existe uma diferença em relação aos valores da resistência nos dispositivos das amostras crescidas em prata em relação às crescidas em níquel, de uma ordem de grandeza. Essa diferença está provavelmente relacionada às características particulares das redes crescidas a partir de sementes distintas: diâmetro dos nanofios, densidade das redes, morfologia dos nanofios, etc.

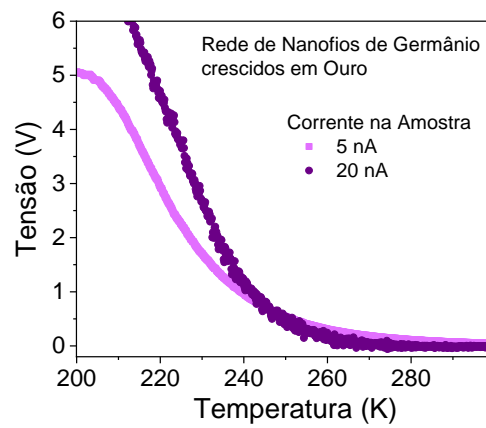


FIGURA 3. Rede de Nanofios de Germânio crescidos em nanopartículas de Ouro. Fonte: Próprio autor

As medidas de tensão em função da temperatura apresentadas na Figura 3, de dispositivo de rede de nanofios de germânio crescidos em nanopartículas de ouro, submetido a diferentes correntes de alimentação, mostram que para baixas temperaturas a corrente mais alta gera uma tensão significativamente mais elevada do que a corrente menor. consequência de uma resistência também mais elevada. Essa diferença pode estar relacionada com uma reduzida quantidade de portares disponível em níveis de energia discretos, ativados em baixas temperatura.

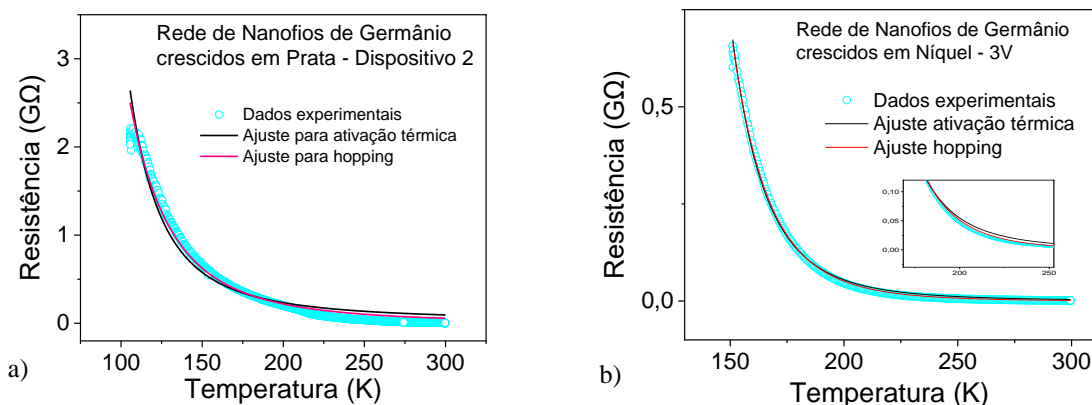


FIGURA 4. Ajustes dos dados experimentais obtidos em dispositivos de rede de nanofios de Germânio com ajuste para processos de ativação térmica e hopping.

Passando à fase do ajuste dos dados, foram feitos ajustes dos gráficos aos processos de ativação térmica e hopping, de forma independente, como se observa na Figura 4 para dois diferentes dispositivos. O dispositivo da Figura 4a evidencia o desvio dos dados experimentais em relação às

curvas teóricas de cada mecanismo em toda a faixa de temperatura, com uma aproximação melhor para o mecanismo de *hopping*. Na Figura 4b percebe-se que ambos os ajustes ficam mais próximos dos dados experimentais do que na Figura 4a, mas uma ampliação da curva mostra que o ajuste também não é totalmente adequado, com uma melhor aproximação também para o mecanismo de *hopping*.

## CONCLUSÕES

O processo de transporte em nanoestruturas semicondutoras é bastante complexo, envolvendo os conceitos de bandas de energia, estados discretos, impurezas, densidade de portadores e diferentes mecanismos que podem ser acionados em diferentes temperaturas. Além disso, o comportamento dos contatos necessários à inserção dos dispositivos em circuitos pode influenciar no resultado de medidas e dificultar a análise dos dados.

A construção de gráficos de resistência/ tensão por temperatura permite estudar diferentes aspectos da condução de corrente, apontando para algumas características dos dispositivos de rede, além da resistência propriamente dita: densidade da rede, tipos de contato estabelecido, entre outros. Os ajustes dos gráficos à modelos para os mecanismos de transporte revela ainda mais informações, e direciona possibilidades para o avanço das análises.

Uma associação dos diferentes mecanismos de transporte, bem como a consideração dos efeitos dos comportamentos de contato nas curvas de resistência por temperatura podem permitir uma melhor compreensão dos processos que ocorrem nos dispositivos de rede e no interior das nanoestruturas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao IFSP Câmpus Sertãozinho que me proporciona recursos para expandir meus conhecimentos, como também à minha orientadora e ao CNPQ.

## REFERÊNCIAS

- Bube, Richard M., **Electronic Properties of Crystalline Solids: an introduction to fundamentals**. New York, USA: Academic Press, 1974.
- Cao, Guozhong, **Nanostructures and Nanomaterials: synthesis, properties and applications**. London, UK: Imperial College Press, 2004.
- Gouveia, R. C. **Nanofios de Germânio: síntese, caracterização estrutural, propriedades elétricas e aplicações**. 2016. 144 f. (Doutorado em Física) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- Mott, N., Note on the contact between a metal and an insulator or semi-conductor, **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, v. 34, n. 4, p. 568-572, 1938.
- Mott, N.; Davis, E. A., **Electronic Process In Non-Crystalline Materials**, 2.ed., Oxford: Clarendon Press, 1979.
- Orton, John, **The Story of Semiconductors**. Oxford: University Press, 2004.
- Rhoderick, E.H.; Williams, R. H. **Metal-Semiconductor Contacts**. Oxford: Clarendon Press, 1988.
- Schottky, W., W. Halbleitertheorie der sperrschicht, *Die Naturwissenschaften*, v. 26, n. 52, p. 843-843, 1938.
- Singh, Jasprit, **Smart Electronic Materials: Fundamentals and Applications**, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.