ESTUDO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO HOPG

Joaquim Jonkel Magalhães Melo Junior[1], Marcilei Aparecida Guazzelli [2], Sueli Hatsumi Masunaga [1]
[1] Departamento de Física, Centro Universitário FEI
Joaquim.jonkel@gmail.com e smasunaga@fei.edu.br

Resumo:

Este estudo investiga os efeitos da irradiação de nêutrons de alta energia no HOPG, analisando as mudanças na resistividade (ρ) e magnetorresistência (MR) sob diferentes temperaturas (T) e campos magnéticos (H). Os resultados mostram que $\rho(T)$ e $MR(T)$ aumentam com a aplicação de H, especialmente abaixo de 50 K. Sem H aplicado, $\rho(T)$ é menor, exibindo um comportamento metálico onde $\rho(T)$ diminui com a temperatura. A irradiação introduziu defeitos, levando a um comportamento não metálico nas amostras irradiadas.

1. Introdução

Nos últimos anos, o interesse por materiais com melhores propriedades térmicas, elétricas e moleculares tem crescido, especialmente para o desenvolvimento de satélites que devem operar em condições extremas do espaço, como exposição a radiações ionizantes e variações de temperatura.

O Centro Universitário FEI tem desempenhado um papel significativo na colaboração com o projeto NUMEN, que envolve diversos grupos de pesquisa internacionais. Com o objetivo de contribuir para esse projeto, este trabalho estudou os efeitos da radiação ionizante nas propriedades de transporte eletrônico do HOPG, material utilizado como substrato nos alvos experimentais.

No contexto do projeto NUMEN, a escolha de um substrato adequado é crucial para evitar o superaquecimento dos alvos durante os experimentos. O HOPG foi escolhido devido à sua alta condutividade térmica, permitindo seu uso como dissipador de calor eficiente, mitigando o risco de superaquecimento. Assim, o estudo focou na investigação do impacto da radiação ionizante nas propriedades de transporte eletrônico do HOPG [1].

Um dos principais objetivos do uso do HOPG como substrato é avaliar sua eficiência como dissipador de calor. O HOPG apresenta uma estrutura eletrônica composta por camadas de átomos de carbono organizadas em planos bidimensionais de grafeno, periodicamente empilhados ao longo do eixo *c*. Os átomos de carbono estão fortemente ligados dentro de cada camada, enquanto as camadas são fracamente ligadas entre si, o que é fundamental para suas propriedades elétricas.

Essa estrutura laminar (Figura 1) confere ao HOPG propriedades semicondutoras únicas. Devido à organização bidimensional do grafeno em suas camadas, o HOPG possui uma condutividade elétrica excepcionalmente alta. As camadas de grafeno permitem a existência de caminhos de condução eficientes para os elétrons, facilitando seu movimento ao longo desses planos. Essa alta mobilidade dos elétrons π ao longo das camadas de grafeno é responsável pela baixa resistividade e elevada condutividade elétrica do HOPG, particularmente ao longo do plano *ab* do material [2,3].

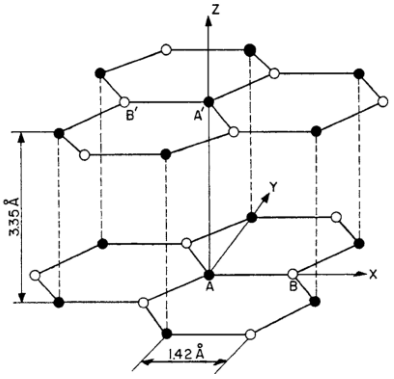

Figura 1 – Estrutura cristalina do grafite [4].

Neste estudo, amostras de HOPG foram submetidas à irradiação com nêutrons de alta energia (15 MeV) por diferentes intervalos de exposição. Os impactos da radiação ionizante foram avaliados por meio de análises de resistividade e magnetorresistência [5,6].

2. Metodologia

As amostras de HOPG foram preparadas através de irradiação com feixe de nêutrons de 15 MeV, com fluência de $1{,}84(4)\cdot10^9$, $5{,}18(13)\cdot10^9$, $1{,}27(2)\cdot10^{10}$ e $1{,}7(3)\cdot10^{10}$ nêutrons/cm^2, sendo as amostras denominadas de irr#1, irr#2, irr#3 e irr#4, respectivamente.

As medições de resistência (R) de todas as amostras, incluindo a não irradiada (virgem) foram realizadas utilizando o Sistema de Medida de Propriedades Físicas (PPMS, "Physical Property Measurement System") da Quantum Design. O PPMS oferece controle preciso de temperatura e permite a aplicação de campos magnéticos controlados, o que é essencial para investigar as propriedades elétricas do HOPG sob diferentes condições experimentais [7].

2.1 Procedimento experimental:

As 5 amostras de HOPG (virgem, irr#1, irr#2, irr#3 e irr#4) foram preparadas e montadas em um suporte próprio para assegurar um bom contato elétrico e o controle de temperatura. As medições de $R(T,H)$ foram realizadas de 10 K a 300 K, na ausência de campo magnético aplicado e sob H aplicado de 0,5 T. A resistividade, $\rho(T)$, foi calculada através de

$$\rho(T) = R\frac{A}{L} \quad (1)$$

onde A é a área da seção transversal e L o comprimento da amostra. A magnetorresistência, $MR(T)$, foi calculada usando a relação:

$$MR(T) = \frac{\rho(H = 0{,}5\ \mathrm{T})}{\rho(H = 0)} - 1 \qquad (2)$$

3. Resultados

A Figura 2 mostra as curvas de $\rho(T, H = 0{,}5\ \mathrm{T})$ para a amostra virgem e irr#4. A magnitude de $\rho(T, H = 0{,}5\ \mathrm{T})$ é muito maior se comparado com as curvas $\rho(T, H = 0)$ para as duas amostras. Esse mesmo resultado é observado para todas as amostras, ou seja, a resistividade das amostras aumenta consideravelmente com a aplicação de H, especialmente abaixo de 50 K. Em altas T, após o máximo em $\rho(T, H = 0{,}5\ \mathrm{T})$, a resistividade diminui e a condutividade aumenta. Esses efeitos são atribuídos à força de Lorentz, que causa MR, e à dispersão de elétrons.

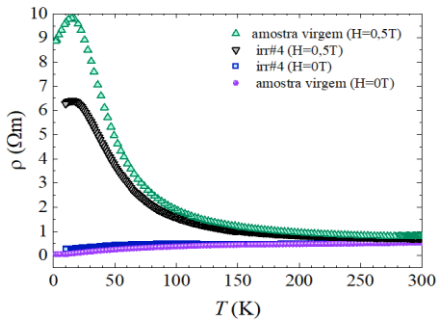

Figura 2 – Resistividade das amostras virgem e irr#4 sob com campo de 0,5 T e sem campo aplicado. Fonte: autor

A Figura 3 mostra as curvas de $MR(T, H = 0{,}5\ \mathrm{T})$ para todas as amostras analisadas. Na região de baixas T, a MR é muito maior para a amostra virgem. Essa é uma indicação de que a irradiação com nêutrons gerou defeitos nas amostras de HOPG. Apesar da menor fluência de nêutrons recebida pela amostra irr#2, MR está um pouco maior que a amostra irr#3. Entretanto, o resultado geral do conjunto de dados é que quanto maior o número de defeito no material, menor é a MR em baixas temperaturas.

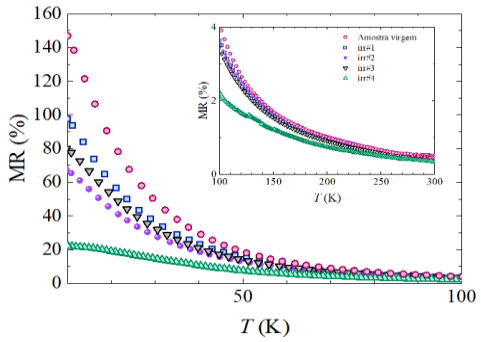

Figura 3 – Magnetorresistência das 5 amostras irradiadas e sobre um campo aplicado de 0,5 T. Fonte: autor

4. Conclusões

As caracterizações de transporte elétrico mostram que a técnica é sensível para avaliar o efeito da radiação ionizante nas propriedades físicas do HOPG. Os experimentos indicaram que a irradiação de HOPG com nêutrons gera defeitos que aumentam a resistividade e induzem um comportamento não metálico. Essas descobertas são significativas para o uso do HOPG em dispositivos eletrônicos e sensores magnéticos, onde a condutividade pode ser ajustada por meio da aplicação de campos magnéticos [5,8]. Entretanto, medidas complementares como o de condutividade térmica seriam necessárias para avaliar a vida útil do HOPG para ser utilizado como alvo no projeto NUMEN.

5. Referências

[1] CAPPUZZELLO, Francesco et al. The NUMEN Technical Design Report. **International Journal of Modern Physics A**, v. 36, n. 30, p. 2130018, 2021.

[2] BANERJEE, S. et al. Conductivity landscape of highly oriented pyrolytic graphite surfaces containing ribbons and edges. **Physical review. B, Condensed matter and materials physics**, v. 72, n. 7, 2005.

[3] CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. Ed, 2012.

[4] CHUNG, D. D. L. Review graphite. **Journal of materials science**, v. 37, p. 1475-1489, 2002

[5] CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2011.

[6] HALLYDAY, David; RESNICK, Jearl Walker; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. 9. Ed, 2012.

[7] Quantum design north America - products - PPMS® DynaCool™ – quantum design. (n.d.). Qdusa.com. Retrieved June 27, 2024, from https://www.qdusa.com/products/ dynacool.html

[8] Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). **Solid State Physics**. Brooks Cole

Agradecimentos

Ao projeto CNPQ e ao projeto NUMEN pela disponibilização de amostras, a minha orientadora pelas sugestões, que foram atendidas e incorporadas ao texto, e ao Centro Universitário FEI pela disponibilização do laboratório e dos materiais.

[1] Aluno de IC do CNPQ (RA: 11.122.236-0). Projeto com vigência de 09/2023 a 08/2024.