

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM FILMES DE Bi_2Te_3 DOPADOS COM EURÓPIO

Maria A. C. Melo¹ (IC), Alexsander de S. Pires¹ (IC), Suelen de Castro (PQ)¹, Marcelos L. Peres (PQ)¹, Paulo H. O. Rappl (PQ)², Eduardo Abramof (PQ)²

¹ Universidade Federal de Itajubá, ² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Palavras-chave: Efeito Hall. Fotocondução. Isolante topológico. Semicondutor.

Introdução

Os isolantes topológicos (TI) são materiais que possuem um forte efeito de acoplamento spin-órbita (SOC – *spin orbit coupling*) que dão origem a estados eletrônicos metálicos de gap nulo na superfície do material. [1]. Um material que chamou muita a atenção em ser considerado um material isolante topológico foi o filme de Bismuto (Bi), por apresentar alto acoplamento spin-órbita. [2] No entanto, estudos mostraram que a utilização de calcogênios binários, como por exemplo o Telúrio (Te) adicionado ao filme de Bismuto (Bi) - conhecido como Bi_2Te_3 - apresentou propriedades promissoras como a dispersão linear entre a energia e o momento. Esse material, possui um único cone de Dirac, no qual, em níveis próximos ao de Fermi, as bandas de valência e as bandas de condução assumem formas cônicas nas superfícies superior e inferior. [2] Materiais semicondutores, normalmente apresentam defeitos na sua estrutura cristalina e, em alguns casos, a desordem pode ser positiva e melhorar a condutividade do material. Técnicas como a dopagem e a criação de super – redes, abordadas neste relatório, são exemplos de como essa desordem pode ser explorada de forma vantajosa. [3] O efeito da fotocondução tem como um dos objetivos investigar a presença de estados de defeito dentro da estrutura de banda dos semicondutores. Esse efeito consiste em iluminar a amostra com radiação eletromagnética com um determinado comprimento de onda e medir como sua condutividade varia. [2] Neste projeto foram estudadas as propriedades de transporte elétrico em filmes de Bi_2Te_3 dopados com Európio (Eu) em concentrações que variaram de 0% a 10% e em uma super-rede de Bi_2Te_3 . Os filmes foram crescidos pelo método de epitaxia de feixe molecular (MBE), sob substrato de fluoreto de bário (BaF_2). As super-redes consistem em dois semicondutores com energia de gaps diferentes, o Bi_2Te_3 e o BaF_2 . Verificou-se que quando as amostras foram iluminadas por um led azul, apenas a amostra com 2% de Eu e a super-rede apresentaram fotoresposta e exibiram o efeito de fotocondutividade

negativa (NPC), ou seja, a condutividade diminui quando essa é iluminada por um led azul, e quando o led foi desligado as amostras apresentaram o efeito de fotocondutividade persistente (PPC). A partir de medições de efeito hall, foram obtidas a mobilidade e a concentração de portadores que são essenciais para melhor entender o mecanismo responsável pela fotocondutividade negativa observada.

Metodologia

Para as medições elétricas, contatos ôhmicos foram preparados nas amostras seguindo a geometria de van der Pauw utilizando fio de ouro soldados com índio. Assim, passa uma corrente contínua em dois contatos e mede-se a tensão nos dois pontos como pode ser observado na Figura 1. Nessa geometria, os contatos devem ser localizados na borda da amostra que não precisa apresentar nenhuma geometria específica, os contatos devem ser pequenos e simples e a amostra não deve apresentar nenhum buraco ou furo. Após prepararmos os contatos, colocamos a amostra em uma porta amostra e inserimos um led de modo que a luz incida de maneira perpendicular sobre a superfície da amostra. Após a montagem, o conjunto é inserido em um criostato e submetido a vácuo, com o auxílio de uma bomba mecânica. Uma corrente de 8 mA foi aplicada ao LED e mantida constante durante as medições, assim como a corrente aplicada à amostra que foi de 2 mA. As medições são realizadas a uma temperatura fixa, mas em diferentes valores, abrangendo uma faixa de 100 K a 275 K. O resfriamento da amostra foi feito com um dedo frio (ou *cold finger*, em inglês), onde o dedo está em contato com o nitrogênio líquido. A entrada do nitrogênio líquido no criostato é regulada por um sistema com duas válvulas conectadas ao tubo de transferência. Para o controle de temperatura é utilizado um controlador, que está ligado a um aquecedor e a um par de sensores no criostato.

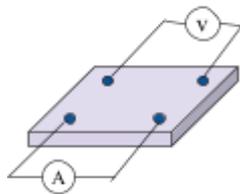


Figura 1 – Diagrama dos contatos elétricos seguindo a geometria de van der Pauw.

Resultados e discussão

A Figura 2 (a) apresenta a fotocondutividade normalizada (σ_N) em função da intensidade da luz aplicada na superfície da amostra de $\text{Bi}_2\text{Te}_3:\text{Eu}$ (2%) quando iluminada por luz azul a 300 K. A intensidade da luz é indicada pela corrente que passa no led, quanto maior a corrente mais intensa é a iluminação. Para todas as intensidades a amostra apresentou uma queda na condutividade sob iluminação, caracterizando o efeito de fotocondutividade negativa. Além disso, ao desligar o led a condutividade não volta imediatamente ao seu valor inicial, o que caracteriza o efeito de fotocondutividade persistente. Através da Figura 2, é evidente que quando o led é percorrido por uma corrente de 8 mA, a amostra exibiu maior amplitude na fotocondução e por isso escolhemos esse valor de corrente no led para as demais medições.

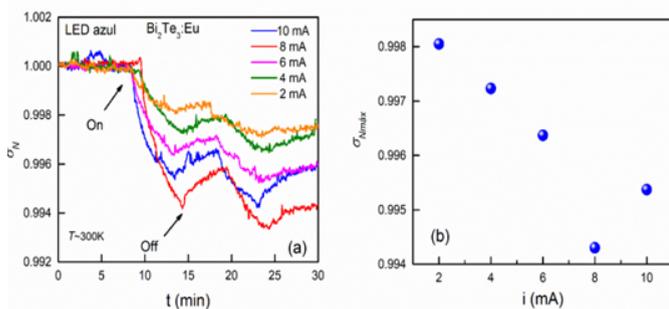


Figura 2 – Fotocondutividade normalizada em função da corrente que passa no led quando o filme de Bi_2Te_3 dopado com Európio ($\text{Bi}_2\text{Te}_3:\text{Eu}$) é iluminado com um led azul a uma temperatura de 300 K.

A Figura 3 (a) mostra a condutividade normalizada para a amostra de $\text{Bi}_2\text{Te}_3:\text{Eu}$ (2%) como função do tempo para iluminação com led azul, com temperatura que variaram de 100K até 300 K. Essa figura mostra que o filme de $\text{Bi}_2\text{Te}_3:\text{Eu}$ (2%) exibe fotocondutividade negativa em toda faixa de temperatura medida, com a amplitude da resposta diminuído à medida que a

temperatura diminui, conforme mostra Figura 3 (b). Também é possível perceber que ao retirar a iluminação da amostra, a condutividade não retorna imediatamente para o valor no escuro, o que caracteriza fotocondutividade persistente. A presença da persistência indica a presença de níveis de defeito na estrutura de bandas do Bi_2Te_3 .

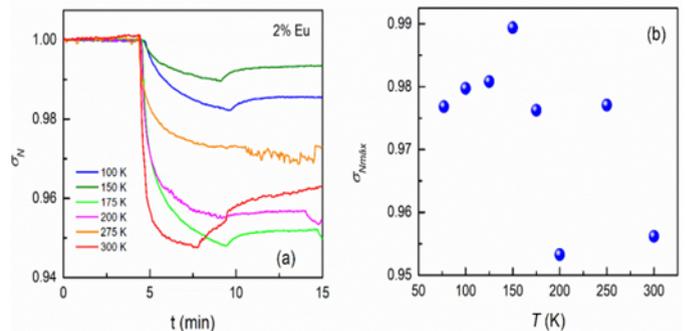


Figura 3 – (a) Fotocondutividade normalizada (σ_N) quando a amostra de Bi_2Te_3 é iluminada por um LED azul entre as temperaturas de 100 e 300 K. (b) Amplitude máxima da fotorespostas (σ_{Nmax}) da amostra sob iluminação em função da temperatura.

A Figura 4 apresenta a fotocondutividade normalizada da super-rede de Bi_2Te_3 para iluminação com led vermelho e azul à 77 K. Nessa figura é possível observar que a amostra exibe o efeito de NPC para ambos os leds, mas que a amplitude da fotoresposta é maior com o led azul. O efeito de PPC ao retirar a luz acontece para as duas iluminações. Os resultados mostram dois ciclos e que o efeito de NPC (fotocondutividade negativa) é reprodutível, o que é essencial para o desenvolvimento de sensores. Além disso, nessa temperatura o sinal elétrico apresentou menos ruído.

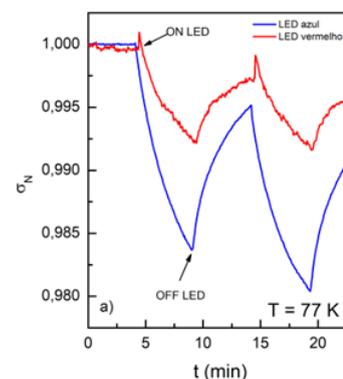


Figura 4 – Fotocondutividade normalizada em função do tempo da super-rede de Bi_2Te_3 a uma temperatura de 77 K. A amostra foi iluminada por um período de cinco

minutos. As setas indicam o momento que os led foi ligado (on) e desligado (off).

Como a amplitude da fotoresposta com o led azul foi maior, as medidas de fotocondução da super-rede em função da temperatura foram feitas com esse led, em temperaturas que variam de 100 K a 300 K. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 5 (a) que exibe a condutividade normalizada em função do tempo. Nesta figura é observado que o filme exibe NPC em toda faixa de temperatura medida e que a amplitude da fotoresposta aumenta com a diminuição da temperatura, ver Figura 5 (b). O efeito de fotocondutividade persistente também está presente em todas as temperaturas medidas e aumenta com a diminuição da temperatura, como esperado. [2, 7] Esse efeito indica a presença de níveis de defeitos dentro da estrutura de banda do material que aprisionam os portadores.

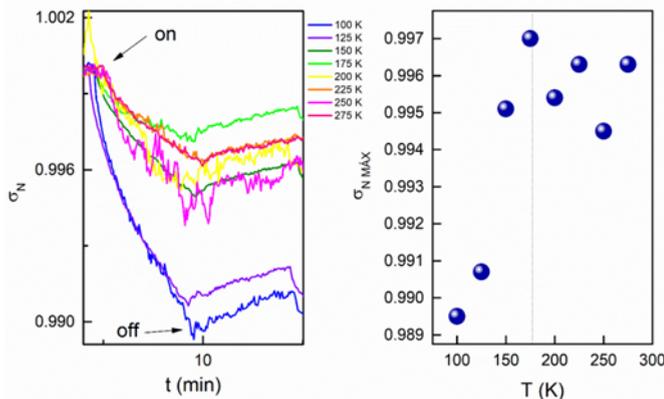


Figura 5 – Condutividade normalizada da amostra de Bi₂Te₃ super rede em função do tempo quando iluminada por um LED azul, com temperaturas que variavam de 100 K a 275 K.

O efeito de fotocondutividade normalmente está relacionado às variações de mobilidade e concentração de portadores da amostra quando esta se encontra no escuro e sob iluminação [5]. Assim, para investigar a origem do efeito NPC observado foram realizadas medidas elétricas de efeito Hall na amostra. As Figuras 6 (a) e (b) apresentam a concentração de portadores e a mobilidade como função da temperatura, respectivamente, quando a amostra está no escuro e sob iluminação. A concentração de portadores e a mobilidade variam em função da temperatura e da iluminação, o que indica que a competição dessas grandezas é a causa da queda na condutividade observada quando o led é ligado.

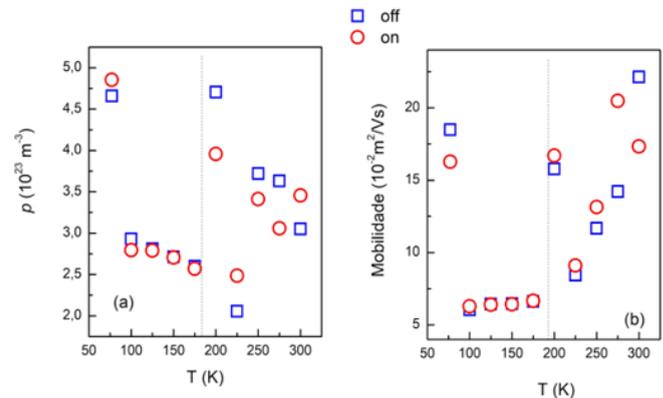


Figura 6 – (a) Concentração de portadores e (b) mobilidade dos portadores de carga em função da temperatura no escuro e sob iluminação para super-rede de Bi₂Te₃.

Conclusões

Os resultados obtidos mostraram que as amostras exibem efeito de fotocondutividade persistente e fotocondutividade negativa nas temperaturas entre 100 e 300 K quando iluminadas por um led azul. A amplitude da NPC observada nos filmes de Bi₂Te₃ dopados com Eu diminui com a diminuição da temperatura. Além disso, foi observado o efeito fotocondutividade persistente ao retirar a luz. Esses efeitos, sugerem a presença níveis de defeito (armadilhas) que aprisionam os portadores. A super-rede também exibiu efeito de NPC, mas nesse caso a amplitude aumentou com a diminuição da temperatura. Medidas elétricas de efeito Hall com e sem luz mostraram que o efeito de NPC acontece devido a uma competição entre a variação de portadores da amostra e da mobilidade elétrica quando a amostra é iluminada.

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Suelen de Castro, ao professor Marcelos Lima Peres e aos colegas de laboratório que apoiaram e me ajudaram na conclusão dessa pesquisa. Obrigada Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

[1] ACOSTA, Carlos Augusto Mera. O acoplamento spin-órbita no estudo de fases topológicas em uma rede hexagonal de baricentros. 2013. Tese de mestrado. Universidade de São Paulo.

- [2] PIRRALHO, Marília de Jesus Pascoa. Propriedades de Fotocondutividade e Transporte Elétrico em Filmes de $Pb_{1-x}Eu_xTe$ e Bi_2Te_3 . 2017. Tese de doutorado. Universidade Federal de Itajubá.
- [3] Adenilson J. Chiquito e Francesco Lanciotti Jr. Semiconductor superlattices: A Quantum Mechanics laboratory, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 4, p. 315- 322, (2004).
- [4] Yoshinori Tokura , Kenji Yasuda , Atsushi Tsukazaki. Magnetic topological insulators. *Nature Reviews Physics*, IF 44.8, Pub Date: 2019-01-18.
- [5] LOPES, Gabriel Ribeiro Ferreira. Investigação do efeito de fotocondutividade em poços quânticos de $SnTe/PbEuTe$. 2021. Tese de mestrado. Universidade Federal de Itajubá.
- [6] René Robert e Sergio M. Berleze. van der Pauw theorem. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 15-18, (2007).
- [7] PIRRALHO, Marília de Jesus Pascoa. Investigation of photoconductive effect on Bi_2Te_3 epitaxial. 2019. Tese de mestrado. Universidade Federal de Itajubá.