

**FOTOCONDUÇÃO E TRANSPORTE ELÉTRICO EM ISOLANTES TOPOLÓGICOS BASEADOS EM  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$** Maria A. C. Melo<sup>1</sup> (IC), Suelen de Castro (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Efeito Hall. Fotocondução. Semicondutor.**Introdução**

O telureto de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) dopado com manganês (Mn) apresenta propriedades promissoras, como a dispersão linear entre energia e momento, além de possuir um único cone de Dirac, no qual, em níveis próximos ao de Fermi, as bandas de valência e de condução assumem formato cônico nas superfícies superior e inferior [1].

Quando dopado com manganês, ele se organiza como um cristal de van der Waals em camadas, formado por blocos de camada sêtupla (SL), dispostos na sequência Te–Bi–Te–Mn–Te–Bi–Te. Assim, nessa estrutura final os átomos magnéticos de Mn são incorporados diretamente à rede cristalina, o que permite aumentar significativamente a concentração de material magnético sem comprometer a integridade estrutural. Além disso, essa configuração favorece uma interação mais eficiente entre os átomos magnéticos (Mn) e os átomos (Bi, Te) que hospedam os estados de superfície topológicos, otimizando suas propriedades eletrônicas e magnéticas [1, 2].

Este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da interação entre magnetismo e topologia por meio de medidas de fotocondução aplicada à amostra [3,4].

O efeito de fotocondução consiste em iluminar a amostra com radiação eletromagnética de comprimento de onda definido e medir a variação resultante em sua condutividade elétrica. Neste projeto, investigaram-se as propriedades de transporte elétrico em filmes de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dopados com manganês, crescidos por epitaxia de feixe molecular (MBE) sobre substrato de  $\text{BaF}_2$ .

Inicialmente, mediu-se a fotocondução de três amostras do mesmo material com espessuras distintas — 8 nm, 16 nm e 80 nm a 300 K quando iluminados com luz azul. A amostra com 8 nm de espessura apresentou uma Foto resposta bem maior e foi escolhida para ser estudada detalhadamente em função do comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente e em função da temperatura. Além disso, foram realizadas medidas de efeito Hall a fim de compreender melhor o efeito de fotocondução presente nessa amostra.

**Metodologia**

Para a realização das medidas 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 outros 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 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. As medições são realizadas a uma temperatura fixa, mas em diferentes valores, abrangendo uma faixa de 125 K a 300 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.

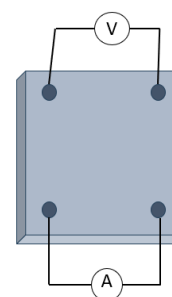


Figura 1 – Diagrama dos contatos elétricos seguindo a geometria de van der Pauw.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

### Resultados e discussão

Na figura 2(a), é possível observar resultados das medidas de fotocondutividade em filmes de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  com diferentes espessuras. O filme de 8 nm apresentou maior foto resposta sob iluminação com LED azul, com aumento expressivo da condutividade. As amostras de 16 nm e 80 nm exibiram menor foto resposta, evidenciando que a redução da espessura aumenta o efeito fotocondutivo. Esse comportamento é reforçado pela Figura 2(b), na qual se observa a relação direta entre a diminuição da espessura e o aumento da foto resposta máxima.

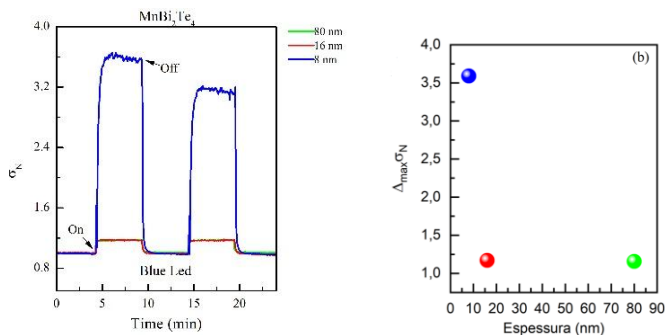


Figura 2 – (a) Fotocondutividade normalizada ( $\sigma_N$ ) em função do tempo da amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  com três diferentes espessuras quando iluminadas pelo LED azul. (b) Condutividade máxima em função da espessura da amostra.

Na Figura 3 são apresentados os resultados da fotocondutividade normalizada em função do tempo para o filme de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  com espessura de aproximadamente 8 nm, quando submetido à iluminação por diferentes comprimentos de onda. Observa-se que a amostra apresenta a maior resposta fotocondutiva sob irradiação com LED azul, indicando um aumento expressivo da condutividade elétrica durante a exposição à luz. Para os comprimentos de onda UV e infravermelho também é registrada uma resposta positiva, porém menos intensa. Já para as iluminações com luz amarela, laranja e vermelha, verifica-se um comportamento distinto, associado à diminuição da condutividade, caracterizando uma resposta fotocondutiva negativa.

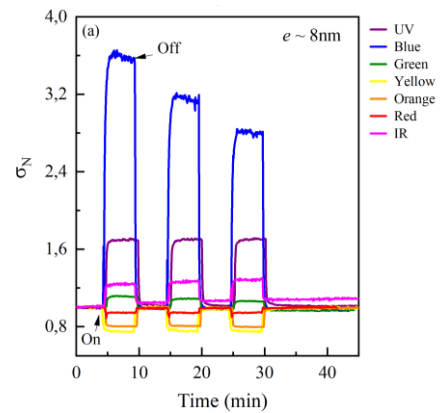


Figura 3 – Fotocondutividade normalizada ( $\sigma_N$ ) em função do tempo para a amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  com 8 nm de espessura quando iluminada por diferentes comprimentos de onda.

A fotocondutividade da amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  (8 nm) também foi analisada em diferentes temperaturas, de 125 K a 300 K quando iluminada com LED azul. Na figura 4(a) observa-se que a foto resposta diminui quando a temperatura diminui e em 200 K ela sofre uma inversão e começa a aumentar (ver Figura 4(b)). Surpreendentemente, indicando que o efeito é favorecido em temperaturas mais altas.

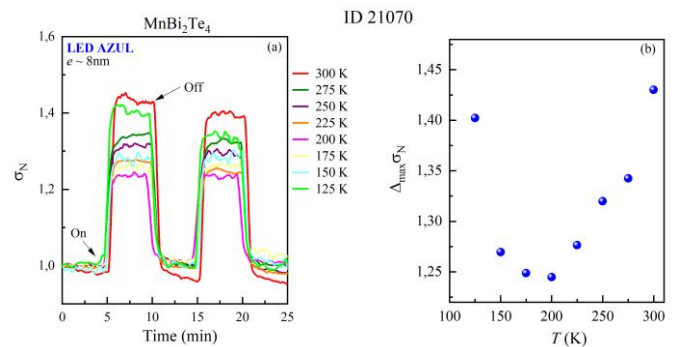


Figura 4 – (a) Fotocondutividade normalizada ( $\sigma_N$ ) em função do tempo em uma amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  de 8 nm de espessura quando iluminada pelo led azul, em temperaturas que variaram de 125 K a 300 K. (b) Condutividade máxima normalizada em função da temperatura.

O efeito de fotocondutividade está geralmente associado a variações na mobilidade e na concentração de portadores entre as condições de escuro e de iluminação [5]. Para investigar a origem da transição observada a 200 K nas curvas de fotocondutividade apresentadas na figura 3, foram realizadas medidas de efeito Hall na amostra de

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

$\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  (8 nm) iluminada por um LED azul. Os resultados mostram que, sob iluminação, a mobilidade dos portadores (Figura 5(a)) diminui significativamente em comparação a mobilidade no escuro. Em contrapartida, a concentração de portadores (Figura 5(b)) aumenta de forma expressiva quando a amostra é iluminada, sugerindo que o efeito de fotocondutividade está diretamente relacionado a uma competição entre o aumento da densidade de portadores e à redução da mobilidade.

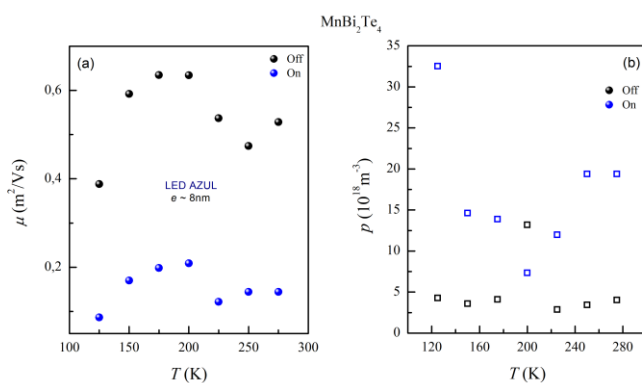


Figura 5 – (a) Mobilidade de portadores e (b) concentração de portadores em função da temperatura para a amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  de 8 nm de espessura no escuro e sob iluminação do led azul.

Para observar o efeito de fotocondutividade negativa (NPC) observado quando a amostra foi iluminada com LED laranja e amarelo, também foram realizadas medidas Hall com esses comprimentos de onda. Com o LED laranja, as medições de efeito Hall mostram que a mobilidade dos portadores (Figura 7a) aumenta durante a iluminação, enquanto a concentração de portadores (Figura 7(b)) diminuiu significativamente.

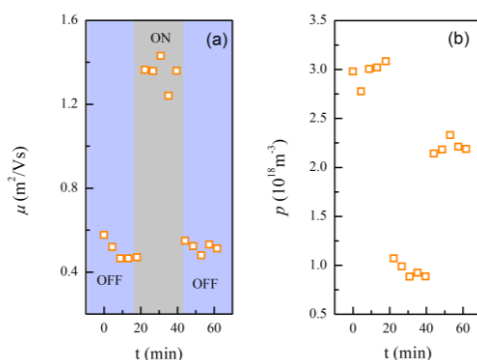


Figura 7 – (a) Mobilidade de portadores no escuro e sob iluminação do led laranja e (b) concentração de

portadores, ambos em função do tempo para a amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  de 8 nm de espessura.

Sob iluminação com o LED amarelo. As medidas de efeito Hall revelaram um aumento na mobilidade dos portadores (Figura 8a) acompanhado por uma redução expressiva em sua concentração de portadores (Figura 8b). Similar ao observado na figura 7. Esses resultados sugerem que a Foto resposta negativa está associada à redução na densidade de portadores quando a amostra é iluminada pelos LEDs amarelo e laranja.

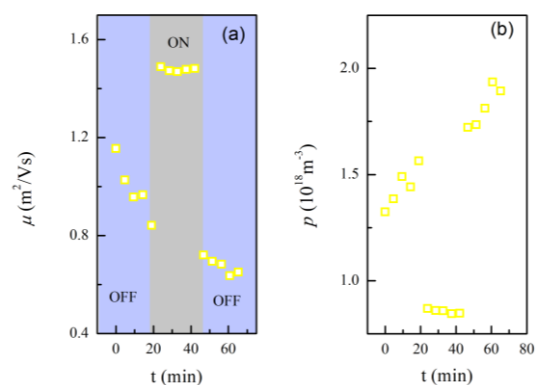


Figura 8 – (a) Mobilidade de portadores no escuro e sob iluminação do led amarelo e (b) concentração de portadores, ambos em função do tempo para a amostra de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  de 8 nm de espessura.

## Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que a espessura do filme exerce influência significativa na Foto resposta, sendo que a amostra mais fina apresentou maior resposta a luz azul. Observou-se também que sob iluminação com LEDs amarelo e laranja a amostra exibiu uma fotocondutividade negativa, comportamento associado à redução da concentração de portadores e ao aumento da mobilidade. Além disso, verificou-se que o aumento da temperatura, no intervalo de 225 K a 300 K, aumenta a Foto resposta do material quando iluminado com luz azul. Quanto à dependência espectral, constatou-se que comprimentos de onda maiores tendem a aumentar a Foto resposta, enquanto comprimentos de onda menores promovem sua redução.

## Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Suelen de Castro e aos colegas de laboratório que apoiaram e me ajudaram na

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

conclusão dessa pesquisa. Obrigada Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e ao CNPq pelo apoio financeiro

**Referências**

- [1] ESTYUNIN, Dmitry A.; RYBKINA, Anna A.; KOKH, Konstantin A.; TERESHCHENKO, Oleg E.; LIKHOLETOVA, Marina V.; KLIMOVSKIKH, Ilya I.; SHIKIN, Alexandre M. Estudo comparativo das propriedades magnéticas de  $(\text{Mn}_{1-x}\text{A}_x)\text{Bi}_2\text{Te}_4$  (AIV = Ge, Pb, Sn). *Magnetochemistry*, v. 9, n. 9, p. 210, 2023.
- [2] ALIEV, Ziya S.; AMIRASLANOV, Imamaddin R.; NASONOVA, Daria I.; SHEVELKOV, Andrei V.; ABDULLAYEV, Nadir A.; JAHANGIRLI, Zakir A.; ORUJLU, Elnur N.; OTROKOV, Mikhail M.; MAMEDOV, Nazim T.; BABANLY, Mahammad B.; CHULKOV, Evgueni V. Novos teluretos de manganês e bismuto em camadas ternários do sistema  $\text{MnTe}-\text{Bi}_2\text{Te}_3$ : síntese e estrutura cristalina. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 789, p. 443–450, 2019.
- [3] Deng, Y.; Yu, Y.; Shi, MZ; Guo, Z.; Xu, Z.; Wang, J.; Chen, XH; Zhang, Y. Efeito Hall anômalo quântico em isolante topológico magnético intrínseco  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ . *Science* **2020**, 367, 895.
- [4] Hu, C.; Gordon, KN; Liu, P.; Liu, J.; Zhou, X.; Hao, P.; Narayan, D.; Emmanouilidou, E.; Sol, H.; Liu, Y.; e outros. Um isolante topológico antiferromagnético de van der Waals com fraco acoplamento magnético entre camadas. *Nat. Commun.* **2020**, 11, 97
- [5] LOPES, Gabriel Ribeiro Ferreira. Investigação do efeito de fotocondutividade em poços quânticos de  $\text{SnTe}/\text{PbEuTe}$ . 2021. Tese de mestrado. Universidade Federal de Itajubá.