

## MEDIDAS DE EFEITO HALL E FOTOCONDUÇÃO EM FILMES EPITAXIAIS DE ISOLANTES TOPOLÓGICOS DOPADOS

Deriky L. de Queiroz<sup>1</sup> (IC), Suelen de Castro (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Efeito Hall. Isolante Topológico Magnético. Magnetotransporte.  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ .

## Introdução

Nos últimos anos, uma intensa investigação tem sido dedicada ao isolante topológico magnético (ITM) intrínseco  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  devido às suas propriedades únicas [LI, S. et al., 2024]. Este material se caracteriza por possuir estados topológicos de superfície, que são protegidos contra desordem e impurezas não magnéticas, e uma ordem antiferromagnética (AFM - *antiferromagnetic*) intrínseca, que está acoplada aos estados de superfície [SHIKIN, A. M. et al., 2022]. Os momentos magnéticos dentro de cada camada septupla (SL - *septuple layer*) – uma estrutura composta por sete lâminas atômicas (Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te) – estão alinhados perpendicularmente a superfície da amostra, mas de forma antiparalela em relação às camadas adjacentes, dando origem ao estado AFM abaixo da temperatura de Néel ( $T_N$ ) [LI, J. et al., 2019a]. A combinação de magnetismo e topologia no  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  permite o estudo de novos fenômenos quânticos, como o Efeito Hall Anômalo Quântico (QAHE - *Quantum Anomalous Hall Effect*), isolantes de áxion e semimetais de Weyl [LEI, X. et al., 2020].

As propriedades quânticas deste material podem ser manipuladas por um campo magnético externo, que induz transições para diferentes fases magnéticas e topológicas [LI, J. et al., 2019b]. Contudo, a realização experimental desses fenômenos é desafiadora, pois a superfície do  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  é extremamente sensível à degradação por exposição atmosférica [ESTYUNIN, D. et al., 2020]. Este trabalho, portanto, compara as propriedades elétricas de filmes de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  com e sem capa de CdTe crescidos pelo método de epitaxia por feixe molecular (MBE - *Molecular Beam Epitaxy*), sob substrato de arseneto de gálio (GaAs). Verificou-se que a camada de CdTe modifica as propriedades do material, induzindo um comportamento metálico nas curvas de resistência em função da temperatura e alterando a temperatura de transição magnética para uma temperatura menor.

## Metodologia

Para a caracterização elétrica dos filmes de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ , foram preparados contatos ôhmicos seguindo a geometria de van der Pauw, utilizando-se fios de ouro soldados com índio. Conforme esquematizado na Figura 1. Este método pode ser aplicado às amostras planas de formato arbitrário, desde que os contatos sejam suficientemente pequenos e estejam próximos das bordas da superfície [GENG, Y., 2022].

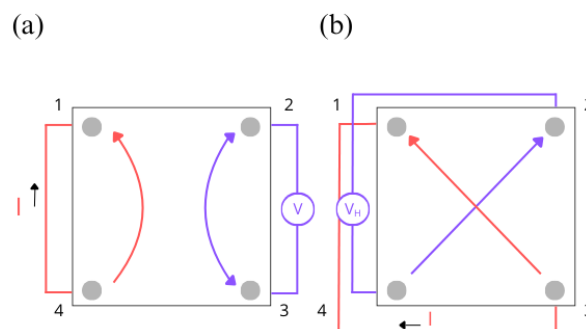


Figura 1 – Geometria de van der Pauw. (a) Configuração dos contatos para as medidas de resistência longitudinal ( $R_{xx}$ ), na qual a corrente elétrica é aplicada através dos contatos adjacentes, medindo-se a tensão nos outros dois contatos opostos. (b) configuração para medidas de resistência elétrica transversal ( $R_{xy}$ ), na qual a corrente e a tensão são medidas a partir de pares de contatos alternados ao longo do perímetro da amostra.

As medidas elétricas foram realizadas em um Sistema de Medição de Propriedades Físicas (PPMS - *Physical Properties Measurement System*) da Quantum Design que opera na faixa de temperatura de 1.9 K a 400 K e possibilita aplicação de campo magnético com intensidade de até 9 T. Uma corrente de excitação de  $10 \mu\text{A}$  foi aplicada durante as medidas de resistência, efeito Hall e magnetorresistência. A investigação focou na análise comparativa dos resultados obtidos para as amostras com e sem a camada de CdTe.

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

### Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta as propriedades de transporte elétrico das amostras. O inset na Figura 2 (a) detalha o diagrama estrutural da amostra, consistindo no substrato de GaAs, no filme de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  e na capa de CdTe. As medidas de resistência elétrica normalizadas em função da temperatura são mostradas na Figura 2 (a). Nessa figura é possível observar que as curvas apresentam comportamentos distintos. A amostra sem capa exibe um comportamento semicondutor, com a resistência aumentando à medida que a temperatura diminui. Em contraste, a amostra com capa de CdTe apresenta um comportamento metálico. Ambas as amostras mostram um pico de resistência associado à transição de fase paramagnético (PM - *paramagnetic*) para AFM, em temperaturas de Néel distintas:  $T_N = 24$  K para a amostra sem capa e  $T_N = 19$  K para a amostra com capa (ver seta na Figura 2 (a)). Para compreender melhor os comportamentos distintos das amostras, foram realizadas medidas de efeito Hall. A Figura 2 (b) mostra que a concentração de portadores de carga ( $n$ ) na amostra sem capa é menor comparada à amostra com capa, com a diferença chegando a uma ordem de magnitude para  $T < 100$  K. A redução da concentração na amostra sem capa pode ser atribuída à oxidação [AGUIRRE, C. M. et al., 2009; AKHGAR, G. et al., 2022], que cria níveis de armadilha (*trap levels*) e remove portadores livres da banda de condução. Por outro lado, a amostra com capa de CdTe possui menor mobilidade ( $\mu$ ), indicando que a introdução da camada de CdTe cria processos de espalhamento adicionais na interface.

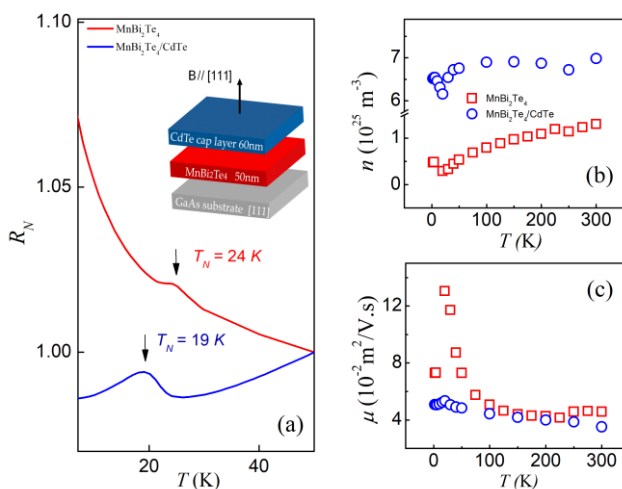


Figura 2 - Propriedades de transporte elétrico. (a) Resistência normalizada em função da temperatura para as amostras sem capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ) e com capa

( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{CdTe}$ ), com as respectivas temperaturas de Néel indicadas. O *inset* mostra um diagrama da estrutura das amostras. (b) Concentração de portadores e (c) mobilidade em função da temperatura para ambas as amostras, obtidas por efeito Hall.

As curvas de magnetorresistência (MR - *magnetoresistance*), com o campo magnético aplicado perpendicularmente à superfície da amostra ( $\theta = 0^\circ$ ), são apresentadas na Figura 3. A MR é definida como  $MR (\%) = [(R(B, T) - R(0, T))/R(0, T)] \times 100$ , onde  $R(B, T)$  é a resistência para um dado campo  $B$  e temperatura  $T$ , e  $R(0, T)$  é a resistência com ausência de campo magnético. Para ambas as amostras, em temperaturas abaixo de  $T_N$ , observa-se um comportamento complexo com picos bem definidos. Os picos acentuados em torno de  $\pm 3.1$  T são uma assinatura da transição da fase antiferromagnética para uma fase antiferromagnética inclinada (*cAFM - canted antiferromagnetic*), onde os momentos magnéticos das camadas adjacentes começam a se alinhar com o campo magnético externo aplicado [CAI, J. et al., 2022]. Para campos mais altos, acima de  $\sim 8$  T, a MR muda de inclinação, indicando uma segunda transição para uma fase ferromagnética (*FM - ferromagnetic*). É notável que, embora o comportamento geral seja similar, a amplitude da MR e a largura dos picos são distintas entre as amostras, sugerindo que a interface com o CdTe também influencia a dinâmica de espalhamento dependente do campo magnético.

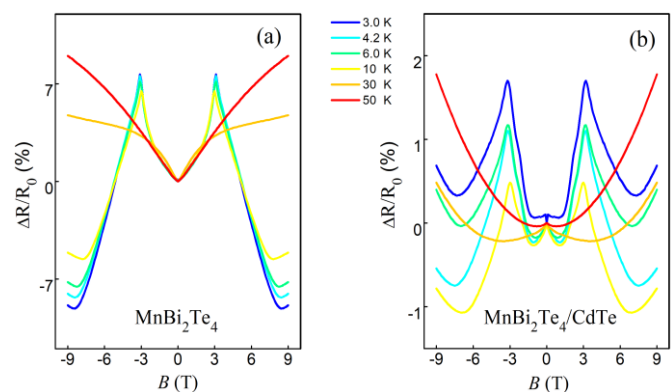


Figura 3 - Magnetorresistência em função do campo magnético. Curvas de MR em diferentes temperaturas para a amostra (a) sem capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ) e (b) com capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{CdTe}$ ). Os picos em campos intermediários ( $\sim 3.1$  T) indicam a transição da fase AFM para *cAFM*.

As medidas de dependência angular da MR, apresentadas na Figura 4, foram realizadas para investigar a anisotropia magnética do sistema. Na amostra sem capa – Figura 4

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

(a), observa-se que as transições de fase (AFM  $\rightarrow$  cAFM e cAFM  $\rightarrow$  FM) são gradualmente suprimidas à medida que o ângulo do campo magnético aumenta em relação à normal do filme. Em 90°, o sistema permanece na fase AFM em toda a faixa de campo, confirmando que o eixo de fácil magnetização é perpendicular ao plano [LI, J. et al., 2019b]. A amostra com capa, Figura 4 (b), exibe um comportamento similar, porém os campos críticos para as transições de fase são deslocados para valores maiores com o aumento do ângulo. Este comportamento demonstra que a estrutura magnética de ambas as amostras é altamente sensível à direção do campo aplicado, uma característica intrínseca do  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  [WANG, F. et al., 2021].

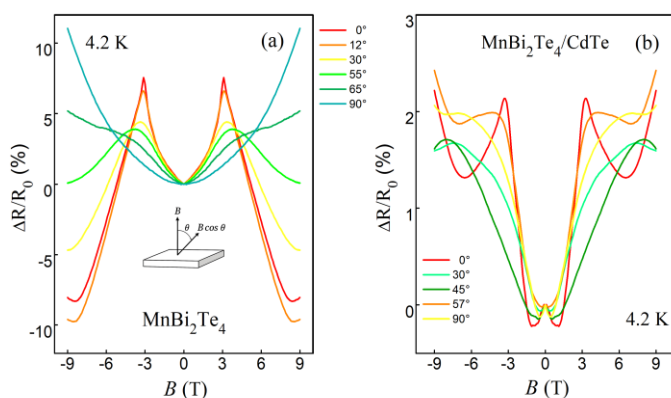


Figura 4 - Dependência angular da magnetorresistência. Medidas de MR a 4.2 K para as amostras (a) sem capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ) e (b) com capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{CdTe}$ ). As curvas mostram a evolução do perfil da MR para diferentes ângulos entre o campo magnético aplicado e a normal à superfície do filme.

### Conclusões

Neste trabalho, investigamos as propriedades de magnetotransporte de filmes finos de  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ , comparando sistematicamente uma amostra sem capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ) e com capa ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{CdTe}$ ). As medidas de transporte elétrico revelaram que a camada de CdTe induz uma transição de um comportamento semicondutor para metálico. Os resultados do efeito Hall explicam essa transição, mostrando que a amostra com capa possui uma concentração de portadores uma ordem de magnitude maior, enquanto a amostra sem capa tem sua concentração reduzida por efeitos de oxidação superficial. A caracterização magnética também mostrou uma forte influência da interface, com  $T_N$  sendo reduzida de 24 K para 19 K. As medidas de magnetorresistência mapearam as transições de fase induzidas por campo de

uma fase AFM para uma fase cAFM e, finalmente, para uma fase FM, confirmando a forte anisotropia magnética do sistema. Em resumo, nossos resultados demonstram que a capa de CdTe não é um componente passivo, mas um elemento ativo que ajusta fundamentalmente as propriedades eletrônicas e magnéticas do  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ . Notavelmente, a fase ferromagnética, que pode hospedar férmions de Weyl, é atingida em campos magnéticos mais baixos na amostra com capa de CdTe, representando uma vantagem significativa para o desenvolvimento de dispositivos de spintrônica. Esta descoberta abre, portanto, novas direções para a pesquisa, onde o estudo e a manipulação controlada da interface podem ser utilizados como uma nova ferramenta para investigar e induzir fases quânticas exóticas.

### Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Suelen de Castro, pela confiança e por toda a orientação. Estendo meus agradecimentos ao grupo de pesquisa dos Professores Sukarno e Leonarde, da Universidade Federal de Viçosa, pelo crescimento das amostras de alta qualidade que foram a base deste estudo. Por fim, agradeço à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), órgão responsável pelo fomento à minha pesquisa.

### Referências

- AGUIRRE, C. M. et al. Ambient Doping of Graphene. *Advanced Materials*, v. 21, n. 30, p. 3087-3091, 2009.
- AKHGAR, G. et al. Formation of a Stable Surface Oxide in  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  Thin Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 14, n. 4, p. 6102–6109, 2022.
- CAI, J. et al. Electric control of a canted-antiferromagnetic Chern insulator. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 1668, 2022.
- CASTRO, S. de. **Medidas de transporte elétrico em semicondutores de gap estreito**. 2015. Tese (Doutorado em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- ESTYUNIN, D. et al. Signature of temperature driven antiferromagnetic transition in the electronic structure of topological insulator  $\text{MnBiTe}$ . *APL Materials*, v. 8, n. 2, 2020.
- GENG, Y. Mathematical analysis of van der Pauw's method for measuring resistivity. *In: JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES*. IOP Publishing, 2022. v. 2321, p. 012027.

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

KAWATA, B. A. **Propriedades dos filmes epitaxiais do isolante topológico cristalino PbSnTe dopado com bismuto e do poço quântico de SnTe**. 2022. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022.

LEI, X. et al. Surface-induced linear magnetoresistance in the antiferromagnetic topological insulator MnBiTe. **Physical Review B**, v. 102, n. 23, p. 235431, 2020.

LI, J. et al. Intrinsic magnetic topological insulators in van der Waals layered MnBiTe-family materials. **Science Advances**, v. 5, n. 6, eaaw5685, 2019a.

LI, J. et al. Magnetically controllable topological quantum phase transitions in the antiferromagnetic topological insulator MnBiTe. **Physical Review B**, v. 100, n. 12, p. 121103, 2019b.

LI, S. et al. Progress on the antiferromagnetic topological insulator MnBiTe. **National Science Review**, v. 11, n. 2, nwac296, 2024.

SHIKIN, A. M. et al. Electronic and spin structures of intrinsic antiferromagnetic topological insulators of the MnBiTe (BiTe) m family and their magnetic properties. **JETP Letters**, v. 115, n. 4, p. 213-225, 2022.

WANG, F. et al. Interface-induced sign reversal of the anomalous Hall effect in magnetic topological insulator heterostructures. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 79, 2021.