

EFEITO DE FOTOCONDUÇÃO E PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM SEMICONDUTORES DE GAP ESTREITO

Tiago Pizarro Bonanni¹ (IC), Marcelos Lima Peres (PQ)¹
¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Fotocondutividade, MnBi_2Te_3 , Semicondutores.

Introdução

Nas últimas décadas, matérias como os semicondutores isolantes topológicos vem sendo amplamente estudados pela física do estado sólido. O crescimento de amostras pelo método de epitaxia por feixe molecular confirmaram o comportamento dos isolantes topológicos de ter Estados de superfície condutores protegidos devido ao acoplamento spin-órbita e pela simetria de reversão temporal. Essas características fazem desses materiais muito promissores no estudo de aparelhos spintrônicos e computação quântica.

Metodologia

A amostra foi crescida usando um sistema epitaxia por feixe molecular com substrato de $\text{BaF}_2(111)$. Antes do crescimento, o substrato foi aquecido a $580\text{ }^\circ\text{C}$ por 5 minutos para remover a camada de óxido natural. Células de efusão contendo pós de alta pureza de Bi_2Te_3 , Te, Mn e CdTe foram utilizados. A estrutura de MnBi_2Te_3 (taxa de deposição de aproximadamente 0.5 nm/min) foi concluída usando Mn puro, evaporado em uma temperatura de $840\text{ }^\circ\text{C}$. CdTe policristalino de alta pureza foi evaporado por uma única célula de efusão em uma taxa de aproximadamente 3 nm/min . A pressão nunca excedeu 10^{-8} Torr. a fim de evitar a exposição do isolante topológico ao ar, foi crescida uma capa de CdMnTe de 60 nm de espessura sobre o filme de MnBi_2Te_3 .

Para realizar as medições elétricas, contatos ôhmicos foram preparados nas amostras seguindo a geometria de van der Pauw, conforme a Figura 1, utilizando fios de ouro soldados com gotas de índio. Nas medições magnetorresistência, aplicamos campo magnético de 0 a 1 T , além de realizar medidas na faixa de temperatura de 200 K a $2,8\text{ K}$ em um Sistema de Medição de Propriedades Físicas (PPMS), modelo EverCool II, da Quantum Design, equipado com um sistema

supercondutor resfriado a hélio com campo magnético de até 9 T , capaz de alcançar temperaturas até $1,9\text{ K}$.

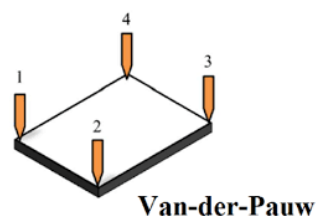


Figura 1 - Geometria de van der Pauw

Resultados e discussão

O Telureto de Bismuto Manganês (MnBi_2Te_3) é um material semiconductor em que uma camada adicional de átomos de Mn é adicionada à estrutura de Bi_2Te_3 . É um isolante topológico, significando que enquanto o seu interior (bulk) se comporta como um isolante, a sua superfície é altamente condutora. Porém o que é mais interessante é que o MnBi_2Te_3 é intrinsecamente magnético devido às interações antiferromagnéticas entre as camadas de Mn na sua estrutura atômica, resultando em um estado de antiferromagnetismo do tipo-A. Nos materiais que exibem antiferromagnetismo os momentos magnéticos dos átomos ou moléculas se alinham com os spins vizinhos, apontando para direções opostas. Contudo, esse fenômeno só é visto a temperaturas suficientemente baixas, e some quando é aquecido acima da "temperatura de Néel", dando lugar ao paramagnetismo. O MnBi_2Te_3 tem uma temperatura de Néel de 24 K . É esperado que haja uma magnetorresistência significativa devido a interação entre os campos magnéticos interno e externo. Os átomos de Bi, Te e Mn estão ligados de modo a formar uma estrutura de sete camadas, com uma interação antiferromagnética entre as camadas de Mn. Na figura 2 as setas indicam os eixos do cristal e as linhas tracejadas indicam a célula unitária. Portanto, o magnetismo e a topologia são estruturalmente separados no MnBi_2Te_3 , com as camadas de Mn induzindo magnetismo e as

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

camadas de Bi-Te gerando os estados topológicos. o que o torna um bom meio de estudar fenômenos topológicos quânticos.

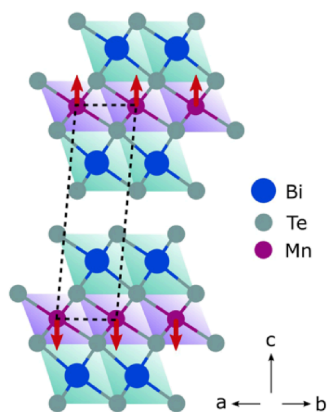


Figura 2 - Visualização da estrutura cristalina de $MnBi_2Te_4$.

O Telureto de Cádmio Manganês ($CdMnTe$) é um material semiconductor com banda proibida ajustável (*tunable band gap*), em que o valor do gap de energia pode ser ajustado conforme a concentração de manganês muda. Tem alta resistividade, proporcional à concentração de manganês, e pode ser tanto do tipo-p como do tipo-n, dependendo da dopagem e das condições de crescimento. Essas características o fazem ser ótimo para a fabricação de detectores de radiação e células solares.

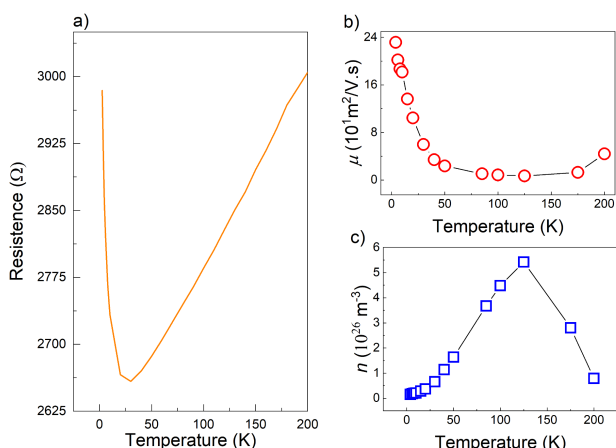


Figura 3 - Diferentes curvas em relação a temperatura para a) resistência; b) mobilidade elétrica; c) concentração de portadores.

Inicialmente a amostra exibe um comportamento metálico, conforme a resistência decai com a diminuição

da temperatura. A partir de aproximadamente 30 K há uma inversão e o comportamento isolante começa a ser dominante. A mobilidade elétrica também mostrou uma mudança ao chegar aos 30 K, aumentado de maneira considerável. É sabido que a temperatura de Néel do $MnBi_2Te_4$ é por volta de 24 K, o que, levando em conta que a presença da capa pode ter alterado a temperatura de Néel, coincide com a temperatura onde a inversão ocorre. A concentração de portadores apresenta um pico por volta de 125 K, provavelmente devido a níveis de defeito na capa de $CdMnTe$, que atuam como armadilhas para os portadores de carga.

O efeito de fotocondutividade é de grande importância para a caracterização das propriedades de transporte eletrônico em materiais semicondutores. Ele é observado quando um feixe de luz incide em um material de má condução, como um semiconductor, e a energia do fóton é suficiente para excitar um elétron de um estado ocupado da banda de valência para um estado vazio da banda de condução, ou seja, a energia incidente é maior que o gap do semiconductor. Se o material for um semiconductor do tipo-n, o efeito é se dá na promoção dos portadores de cargas (elétrons) da banda de valência para a banda de condução. Para um semiconductor do tipo-p, os elétrons promovidos à banda de condução deixam lacunas (buracos) na banda de valência e através dos estados vazios se dá a fotocondução.

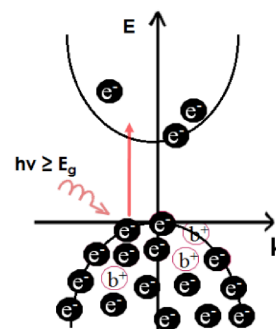


Figura 4 - Representação do fenômeno de fotocondução num material semiconductor, onde e- são elétrons e b+ são buracos.

A fotoresposta pode ser de três tipos: positiva, negativa e persistente. A fotocondutividade é positiva quando o material apresenta um aumento na condução sob estímulo luminoso. De forma intuitiva, a resposta negativa é quando o estímulo luminoso diminui a condução do material. Já a fotocondutividade persistente surge quando a luz é removida e o tempo de retorno ao

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

estado de condutividade original é muito maior do que seria para um semiconductor cristalino sem desordem.

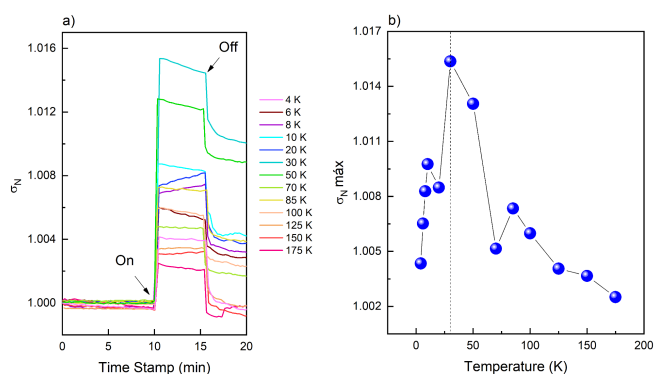


Figura 5 - a) Curvas para a condutividade elétrica normalizada observado na amostra de $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{CdMnTe}$ em diferentes temperaturas. b) Valores máximos de condução para cada temperatura, em que o ápice está em 30 K.

A fotoresposta é sempre positiva e é condizente com o gráfico de resistência por temperatura da figura 1, visto que há um crescimento da condutividade até o pico em 30 K, seguido de um decaimento, exatamente como visto no gráfico anterior, e confirmando a existência de um efeito que causa a inversão para um comportamento isolante para temperaturas abaixo de 30 K.

À altas temperaturas o efeito de fotocondução é regular e sem persistência ao desligar o led, indicando que o material pode ser uma boa alternativa para fabricação de sensores. A persistência aumenta com a diminuição da temperatura, mas volta a cair para temperaturas abaixo de 30 K. O efeito de persistência tem haver com a existência de possíveis níveis de defeito na estrutura de bandas do semiconductor e são mais efetivos dependendo da temperatura onde o transporte elétrico ocorre. Os níveis de defeitos funcionam como armadilhas para os portadores de carga, fazendo com que os portadores fiquem aprisionados nesses níveis durante o processo de recombinação. Para temperaturas mais altas, a influência desses níveis é inexpressiva e o efeito de persistência se extingue.

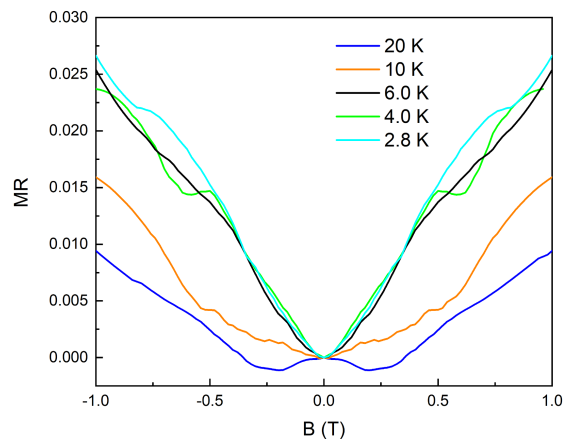


Figura 6 - Gráfico da magnetorresistência com um campo magnético de 0 a 1 T.

Percebe-se pela amplitude das curvas que a magnetorresistência, assim como a resistência na figura 1, também aumenta conforme a temperatura cai, havendo um salto considerável de 10 para 6 K.

Conclusões

Portanto, ao estudar a amostra de $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{CdMnTe}$ notamos que a altas temperaturas o material se comporta como um metal, com boas respostas de fotocondução nessas faixas de temperatura. Porém a partir de 30 K há uma inversão para um comportamento isolante, com alta persistência na resposta à luz. É de se notar que essa inversão acontece próximo à temperatura de Néel, e que é provável que a capa de CdMnTe tenha mudado essa temperatura, assim como aumentado o nível de defeitos da amostra.

Agradecimentos

Aos professores Marcelos e Suelen, pelo acolhimento e pelos conhecimentos passados. À UNIFEI, especialmente ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da UNIFEI, pelo apoio.

Referências

- Li, Hao & Liu, Shengsheng & Liu, Chang & Zhang, Jinsong & Xu, Yong & Yu, Rong & Chun, Ouyang & Zhang, Yuegang & Fan, Shoushan. (2019). Antiferromagnetic Topological Insulator MnBi_2Te_4 : Synthesis and Magnetic properties. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 22.

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

10.1039/C9CP05634C.

2. OLUSOLA, O. I., MADUGU, M. L., OJO, A. A. and DHARMADASA, I. (2020). Development of CdMnTe thin films using electroplating technique for opto-electronic device applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.

3. ALVES, Daniel da Cruz. Investigação do efeito de fotocondução em poços quânticos de PbTe do tipo p. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

4. Tomarchio, L., Mosesso, L., Macis, S. et al. Electrodynamics of MnBi₂Te₄ intrinsic magnetic topological insulators. *NPG Asia Mater* 14, 82 (2022).

5. Wesley F. Inoch, Gilberto Rodrigues-Junior, S. L. A. Mello, S. de Castro, M. L. Peres, Sukarno O. Ferreira, Ângelo Malachias, Maybi F. Sampaio, Olavo Teixeira Neto, Bráulio S. Archanjod and Leonarde N. Rodrigues. Epitaxial growth of antiferromagnetic MnBi₂Te₄/CdTe heterostructures on GaAs(001) using molecular beam epitaxy: structure and electronic properties. *Nanoscale*, 2025, 17, 10013.