

PROPRIEDADES DE FOTOCONDUÇÃO E MAGNETOTRANSORTE EM ISOLANTES TOPOLÓGICOS

Alexsander S. Pires¹ (IC), Wellington. P. do Prado¹ (PG), Bianca. A. Kawata² (PQ), Luis. M. B. Vargas¹ (PQ), Matheus. J. da Silva¹ (PQ), Suelen. de Castro¹ (PQ), Paulo. H. O. Rapp² (PQ), E. Abramof² (PQ), M. L. Peres¹ (PQ).

¹Instituto de Física e Química, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, CEP 37500-903, Brasil

²Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Materiais e Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, CEP 12227-010, Brasil

Palavras-chave: Dopagem com bismuto. Fotocondutividade. Telureto de chumbo e estanho. Transporte elétrico.

Introdução

A fotocondutividade é um fenômeno que pode ser observado em materiais semicondutores e isolantes, responsável pela alteração da condutividade destes quando expostos à luz [1-3]. Na presença de luz, a fotocondutividade positiva surge quando elétrons, liberados pela incidência luminosa, transitam do estado de valência para o estado de condução, elevando a condutividade elétrica do material [1-4]. Por outro lado, em compostos menos comuns, o efeito oposto é observado, ocorre uma diminuição da condutividade em resposta à exposição à luz, sendo este efeito conhecido como fotocondutividade negativa (*Negative Photoconductivity* - NPC).

A fotocondutividade persistente (*Persistent Photoconductivity* - PPC) refere-se à capacidade de um material de manter suas propriedades de condutividade elétrica alteradas por um período prolongado após a remoção da fonte luminosa. Tal característica pode ser controlada por vários fatores, como a estrutura do material, a densidade de portadores de carga, a presença de impurezas e outros parâmetros [4]. Esta propriedade encontra várias aplicações em tecnologias que exploram as propriedades ópticas e elétricas de materiais semicondutores e óxidos. Essas aplicações aproveitam a capacidade dos materiais de manter uma condutividade elétrica aumentada após a exposição à luz, o que é útil em diversos campos de sensores, memória e optoeletrônica.

O $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ é um semicondutor de gap estreito constituído por uma liga pseudo-binária da família IV-VI, que são amplamente aplicados na produção de dispositivos optoeletrônicos que operam na faixa do infravermelho [5-7]. Dentre as muitas características interessantes deste material, destacam-se as propriedades NPC em condições de temperatura ambiente e PPC [8,9].

A adição de bismuto pode impactar significativamente na estrutura eletrônica de materiais semicondutores, provocando alterações na dinâmica de portadores [10]. O bismuto é frequentemente usado para criar estados topológicos de superfície em isolantes topológicos, como $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, através da dopagem [11-13]. Esses estados topológicos são de interesse particular na pesquisa de materiais topológicos e na spintrônica.

No presente trabalho, estudaremos as propriedades elétricas dos filmes epitaxiais de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ não dopados e dopados com bismuto com $x \sim 50\%$. Nosso objetivo é verificar como as diferentes concentrações de bismuto influenciam a resposta fotocondutora do material, além de explorar, através do efeito hall, as origens da fotocondutividade negativa.

Metodologia

Os filmes de $\text{Pb}_{0,5}\text{Sn}_{0,5}\text{Te}$ foram crescidos no Instituto nacional de Pesquisa Espaciais - INPE, utilizando a técnica de epitaxia por feixe molecular (MBE). Para realizar as medições elétricas, foram preparados contatos ôhmicos de fios de ouro soldados com índio nas amostras, seguindo a geometria de van der Pauw.

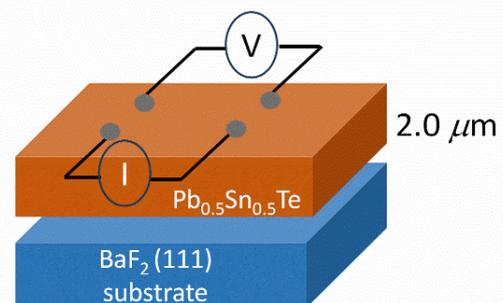


Fig. 1: Diagrama da estrutura da amostra com contatos seguindo a geometria de van der Pauw.

As medições de fotocondutividade foram realizadas em um criostato hermeticamente fechado e protegido de radiação. Um dedo frio foi usado para resfriar a amostra, onde o dedo frio está em contato com nitrogênio líquido que flui através de um circuito aberto. As amostras investigadas foram resfriadas de 300 K a 80 K e iluminadas por diodos emissores de luz (LEDs) com comprimentos de onda de $\lambda = 398, 463, 520, 573, 649$ e 940 nm, alimentados por uma corrente elétrica constante de 8 mA.

Todo o sistema está ligado a um computador onde um programa no Labview registra as medidas. Após a amostra apresentar um sinal estável, um LED é ligado por 5 minutos. Após esse intervalo de tempo, o LED é desligado e a amostra volta ao escuro por outros 5 minutos.

Para as medições de Hall, aplicamos campo magnético de até 2 T em um Sistema de Medição de Propriedades Físicas (PPMS) da Quantum Design, equipado com um sistema supercondutor resfriado a hélio com campo magnético de até 9 T.

Resultados e discussão

Todas as amostras medidas nesse trabalho apresentam uma queda na condutividade sob iluminação, caracterizando o efeito de fotocondutividade negativa ($\sigma_N < 1$). A posição da seta nestas figuras indica quando a luz é ligada e desligada. O efeito NPC já foi observado em $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ com $x = 0,44$ e foi atribuído à presença de níveis de armadilha dentro da banda proibida, que alteram as taxas de geração/recombinação [8].

Em semicondutores, os níveis de armadilha correspondem a estados energéticos localizados dentro da banda proibida. Quando esses níveis de armadilha são profundos (isto é, mais próximos do meio do gap de energia), eles capturam portadores de carga e impedem sua recombinação rápida. Em nosso caso, o bismuto como dopante atua sobre a rede produzindo armadilhas. As armadilhas interferem nos processos de geração e recombinação ao capturar e liberar portadores de carga, agindo como centros de recombinação não radiativa e influenciando a mobilidade e o tempo de vida dos portadores, sendo assim um fator crítico para o fenômeno PPC. As armadilhas profundas aumentam o tempo de vida dos portadores, enquanto armadilhas rasas ou intermediárias facilitam uma recombinação

rápida. Em baixas temperaturas, portadores presos em armadilhas profundas tendem a permanecer aprisionados, prolongando o tempo de vida dos portadores e alterando as características de recombinação. Já em temperaturas mais altas, os portadores presos podem ganhar energia térmica suficiente para escapar, aumentando a recombinação e modificando a condutividade. Como observado no decorrer do trabalho, o efeito persistente é mais evidente a baixas temperaturas em todas as amostras, enquanto que em altas temperaturas o efeito é pouco percebido.

Pela Figura 2, observa-se que a amostra dopada com 0,15% exibiu maior amplitude de fotocondutividade negativa do que as outras amostras. Além disso, todas as amostras apresentaram efeito persistente a 300 K enquanto a condutividade da amostra não dopada recupera rapidamente seu valor inicial após a remoção da luz (indicado pelas setas na figura) a 80 K.

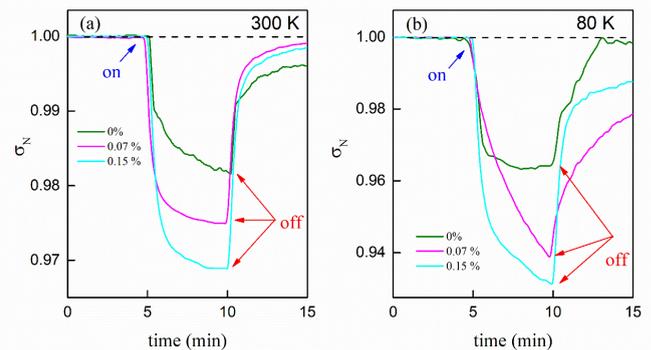


Figura 2 – Dependência temporal da fotocondutividade normalizada sob iluminação de LED azul a 300 K (a) e 80 K (b). A linha tracejada indica a condutividade normalizada no escuro.

A profundidade da armadilha ou a energia de ionização dos níveis de defeito $\Delta\varepsilon$ pode ser obtida a partir da relação de Arrhenius $\tau = \tau_0 \exp(-\Delta\varepsilon/k_b T)$, onde τ é o tempo de recombinação. No nosso caso, extraímos o τ ajustando o decaimento das curvas de fotocondutividade, mostradas nas Figuras 3 (a) e (b), quando o LED é desligado, usando uma combinação de duas exponenciais $\sigma = \sigma_1 \exp(-t/\tau_1) + \sigma_2 \exp(-t/\tau_2)$, como mostrado nas inserções das Figuras 3 (c)-(d) a 300 K. A partir do ajuste, obtivemos dois tempos de recombinação, τ_1 e τ_2 , um mais curto (τ_1 23 s para ambas as amostras) e outro mais longo: 235 s para 0,15% de Bi, e 197 s para 0,07% de Bi a 300 K.

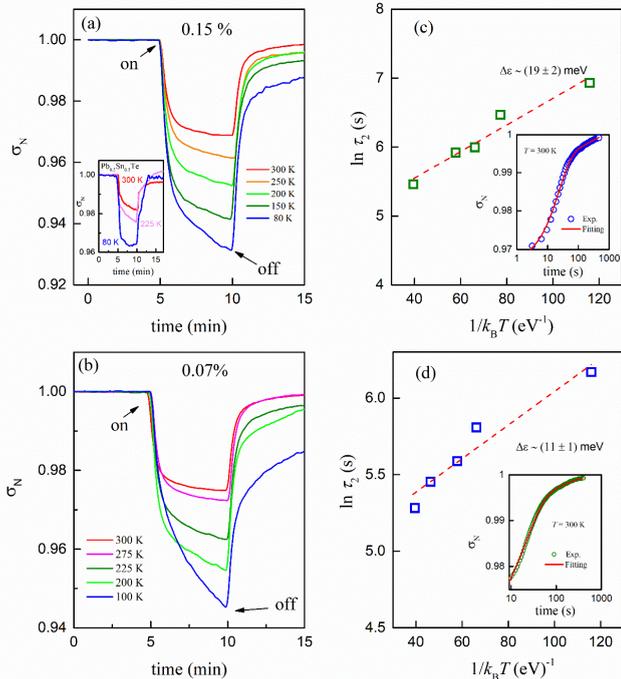


Figura 3 – Dependência temporal da fotocondutividade normalizada para a amostra com (a) 0,15% e (b) 0,07% de Bi na faixa de temperatura de 80–300 K. O gráfico interno em (a) mostra a condutividade normalizada, em função do tempo, a 300, 225 e 80 K para a amostra não dopada. Os gráficos internos em (c) e (d) representam as curvas de decaimento em função de $1/k_b T$ e os ajustes realizados para 0,15% e 0,07% de Bi, respectivamente.

Nas Figuras 3 (c) e (d) é apresentado o logaritmo natural dos tempos de recombinação, τ_2 , em função de $1/k_b T$, para as amostras com 0,15% e 0,07% de Bi, respectivamente. Realizando um ajuste linear, com o modelo de Arrhenius, encontramos apenas uma energia de ativação, com valor de $\Delta\epsilon = (19 \pm 2)$ meV para a amostra com 0,15% de Bi e $\Delta\epsilon = (11 \pm 1)$ meV com 0,07% de Bi.

Para estudar como a dopagem influencia a dinâmica dos portadores na amostra, foram realizadas medidas de efeito Hall para todas as amostras. A fim de compreender a origem do efeito NPC, escolhemos estudar a amostra de maior concentração, 0.15%, haja vista, que esta apresentou maior foto-resposta.

A figura 4 apresenta os valores das concentrações de portadores e mobilidade em função da temperatura em condições de escuridão (LED off) e iluminação (LED on) em diferentes temperaturas no intervalo de 300 a 80 K na amostra de maior

concentração.

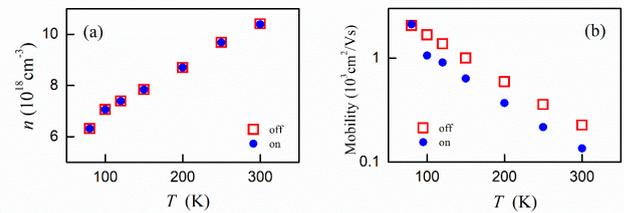


Figura 4 – Medições do efeito Hall sob iluminação com LED azul (on) e em condições de escuridão (off) para $Pb_{0,5}Sn_{0,5}Te$ com 0,15% de Bi em diferentes temperaturas (80 a 300 K). Em (a) está a concentração de elétrons n e em (b) a mobilidade elétrica.

Além disso, realizamos medidas de fotocondutividade, porém agora iluminando a amostra com diferentes comprimentos de onda. Foi possível observar que a amostra responde a uma ampla faixa do espectro eletromagnético, indo do ultravioleta (398 nm) ao infravermelho (940 nm).

A fotocondutividade negativa foi observada em todas as medidas envolvendo os diferentes espectros conforme apresentado na figura 5.

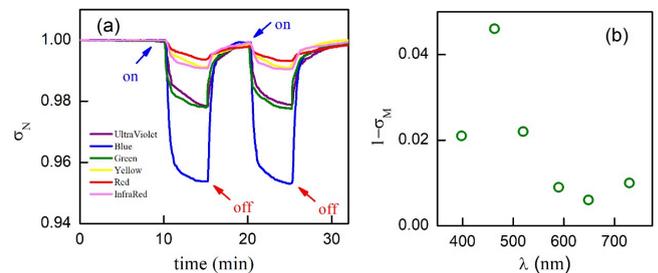


Figura 5 – Cinética da fotocondutividade normalizada para a amostra com 0,15% de Bi, sob diferentes comprimentos de onda da luz incidente, a 300 K. (b) Valores da amplitude da fotocondutividade $(1 - \sigma_M)$ para cada comprimento de onda.

Conclusões

Neste trabalho foi investigado o efeito de fotocondutividade em filmes epitaxiais de $Pb_{0,5}Sn_{0,5}Te$ não dopados e dopados com Bi. Os resultados mostraram que todas as amostras apresentaram resposta fotocondutora negativa de 300 a 80 K quando expostas ao comprimento de onda azul. Um estudo detalhado realizado na amostra dopada com 0,15% de bismuto revelou que a amostra apresenta efeito fotocondutor persistente após exposição à luz, com variação de

temperatura de 300 K até 80 K. Esse efeito está relacionado à presença de níveis de armadilha com energia de ativação de (19 ± 2) meV, que influencia as taxas de geração/recombinação. Nós também observamos que a amostra dopada com 0,07% Bi apresenta uma menor energia de ativação (11 meV). Os resultados obtidos das medições de Hall indicam que a origem do efeito de fotocondutividade negativa está relacionada à diminuição da mobilidade dos portadores quando a amostra é exposta à luz. Além disso, a amostra, quando iluminada por diferentes comprimentos de onda de luz, exibe efeitos NPC e PPC reproduzíveis, revelando seu potencial para aplicação em dispositivos eletro-ópticos cujas propriedades, como tempo de recombinação, e amplitude da resposta condutora podem ser controladas conforme a necessidade, através da concentração do dopante.

Agradecimentos

Agradecimentos à Unifei e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] MOSS, Trevor Simpson. Photoconductivity. **Reports on progress in physics**, v. 28, n. 1, p. 15, 1965.
- [2] DE CASTRO, S. et al. Room temperature persistent photoconductivity in p-PbTe and p-PbTe: BaF₂. **Applied Physics Letters**, v. 105, n. 16, 2014.
- [3] SREEKUMAR, R. et al. Anomalous photoconductivity in gamma In₂Se₃. **Journal of applied physics**, v. 100, n. 3, 2006.
- [4] LOPES, G. R. F. et al. Photoconductivity effect in SnTe quantum well. **Applied Physics Letters**, v. 119, n. 3, 2021.
- [5] KOVALENKO, Maksym V. et al. SnTe nanocrystals: a new example of narrow-gap semiconductor quantum dots. **Journal of the American Chemical Society**, v. 129, n. 37, p. 11354-11355, 2007.
- [6] CHU, Junhao; SHER, Arden. **Physics and properties of narrow gap semiconductors**. New York: Springer, 2008.
- [7] NIMTZ, Günter. Recombination in narrow-gap semiconductors. **Physics reports**, v. 63, n. 5, p. 265-300, 1980.
- [8] TAVARES, M. A. B. et al. Investigation of negative photoconductivity in p-type Pb_{1-x}Sn_xTe film. **Applied Physics Letters**, v. 110, n. 4, 2017.
- [9] KAWATA, B. A. et al. Properties of topological crystalline insulator Pb_{0.5}Sn_{0.5}Te epitaxial films doped with bismuth. **Journal of Applied Physics**, v. 131, n. 8, 2022.
- [10] BIENIEK, Maciej; WOŹNIAK, Tomasz; POTASZ, Paweł. Stability of topological properties of bismuth (1 1 1) bilayer. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 29, n. 15, p. 155501, 2017.
- [11] HSU, Chuang-Han et al. Topology on a new facet of bismuth. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 27, p. 13255-13259, 2019.
- [12] NAYAK, Abhay Kumar et al. Resolving the topological classification of bismuth with topological defects. **Science advances**, v. 5, n. 11, p. eaax6996, 2019.
- [13] DZIAWA, P. et al. Topological crystalline insulator states in Pb_{1-x}Sn_xSe. **Nature materials**, v. 11, n. 12, p. 1023-1027, 2012.