

**MEDIDAS DE RESISTIVIDADE E EFEITO HALL
EM CAMADAS EPITAXIAIS $PB_{1-x}SN_xTE$ / BAF_2**

RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

PIBIC / CNPq

**Celso Ferreira Mastrella
Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, CTA**

**Dr. Eduardo Abramof
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / LAS, CP 515,
CEP 12201-970, S.J.dos Campos, SP**

1 . INTRODUÇÃO

Um sistema para medidas de efeito Hall dependente com a temperatura completamente automatizado foi implementado para a determinação da resistividade, concentração de portadores e mobilidade Hall de camadas epitaxiais. A amostra é montada no criostato de circuito fechado de He que opera até uma temperatura de 13K com 4 contatos na geometria Van der Pauw [1] ou com 6 contatos na geometria Hall. O controlador de temperatura do criostato é interfaceado com o microcomputador (PC 486) através da placa de aquisição de dados (DAS) com resolução de 12 bits. A placa DAS é também utilizada para se fazer o controle e a inversão do campo magnético durante as medidas de efeito Hall. As medidas de resistividade e efeito Hall propriamente ditas são efetuadas em um sistema de efeito Hall Keithley modelo 80A totalmente interfaceado com o microcomputador através da interface IEEE-488. A carta de efeito Hall do sistema é utilizada para chavear a corrente da fonte para a amostra e entregar os sinais de teste da amostra Hall para a instrumentação de medida. Esta carta contém amplificadores sensíveis para se fazer medidas de resistividade e efeito Hall em materiais de alta ou baixa resistividade.

O “software” em linguagem objeto (“Visual Basic” para ambiente “Windows”) para controle do sistema de medidas de efeito Hall e resistividade foi aprimorado e concluído. Também foi implementado um banco de dados “Access” para armazenar e exibir ordenadamente as propriedades elétricas das amostras submetidas ao sistema de medidas.

2 . AS CAMADAS EPITAXIAIS DE PbSnTe

As amostras de $Pb_{1-x}Sn_xTe$ foram crescidas no sistema Riber32P MBE equipado com fontes sólidas de Te, PbTe e SnTe. A pressão na câmara de crescimento foi mantida

abaixo de 1×10^{-10} Torr. Os substratos de BaF2 foram clivados imediatamente antes de serem colocados na câmara de preparação e foram pré-aquecidos a 500°C por 10 minutos antes do crescimento da camada IV-VI. As camadas de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ foram crescidas no substrato a temperaturas entre 200 e 300°C , com taxas de crescimento variando entre 0.6 a $1.0 \mu\text{m/h}$. As espessuras das amostras, determinadas através de franjas de interferência em espectros de transmissão no infravermelho, variaram de 4 a $8 \mu\text{m/h}$.

Assumindo uma dependência linear da constante de rede na composição da liga entre PbTe (6.462 \AA) e SnTe (6.327 \AA), a verdadeira composição das camadas de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ foi determinada medindo a constante de rede por difração de raio X.

As propriedades elétricas das amostras, cobrindo toda a faixa de concentração de Sn (x variando de 0 até 1), foram determinadas pelas medidas efetuadas no sistema de efeito Hall automatizado dependente com a temperatura entre 12 e 350K .

3 . CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Com o intuito de investigar a influência do desvio estequiométrico nas propriedades de camadas de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, duas espécies de fontes de PbTe e SnTe foram usadas no crescimento por MBE [2]: fontes ricas em Te e outras estequiométricas.

A figura 1 mostra a concentração de portadores (p) a 300K e a 12K em função da composição da liga para duas séries de camadas de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ crescidas a partir de fontes ricas em Te e a partir de fontes estequiométricas. Todas as amostras são tipo p. Para ambas as séries, a concentração de buracos aumenta exponencialmente com a composição da liga, mostrando algum desvio da dependência exponencial para $x > 0.7$. Como esperado, a concentração de buracos para camadas de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ crescidas a partir de fontes ricas em Te é sempre maior que a das camadas correspondentes (com o mesmo x) crescidas a partir de fontes estequiométricas. A diferença entre a concentração de buracos de camadas com a mesma composição pertencentes às duas séries aumenta

com o aumento de x , alcançando um valor de uma ordem de magnitude para a faixa com $x > 0.8$.

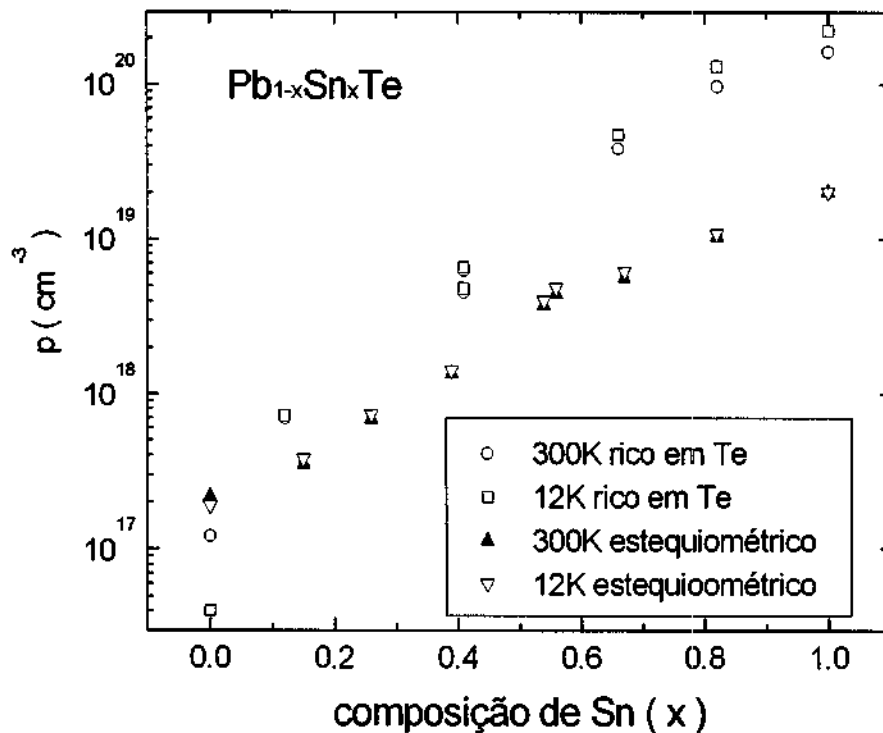


Figura 1

O forte desvio para o lado tipo p do diagrama de fase no sistema $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ já era conhecido para cristais volumétricos de PbSnTe . Entretanto, baixas concentrações de buracos são esperadas para camadas epitaxiais de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ devido às altas temperaturas de crescimento. O gráfico da figura 1 mostra como a concentração de buracos aumenta com o aumento de x para camadas de $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ crescidas por MBE. É também importante notar que camadas de SnTe com tão baixa concentração de portadores ($\sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) obtidas com fontes estequiométricas só foram observadas antes em amostras de MBE dopadas com Bi (que é um dopante tipo n).

A concentração de buracos para cada amostra fica constante para toda a faixa de temperatura investigada (12K a 350K), independente da composição da liga. Isso prova que as características elétricas do PbTe , no qual o modelo de vacâncias [3] não

prevê um congelamento de portadores, continuam válidas para todo o sistema $Pb_{1-x}Sn_xTe$.

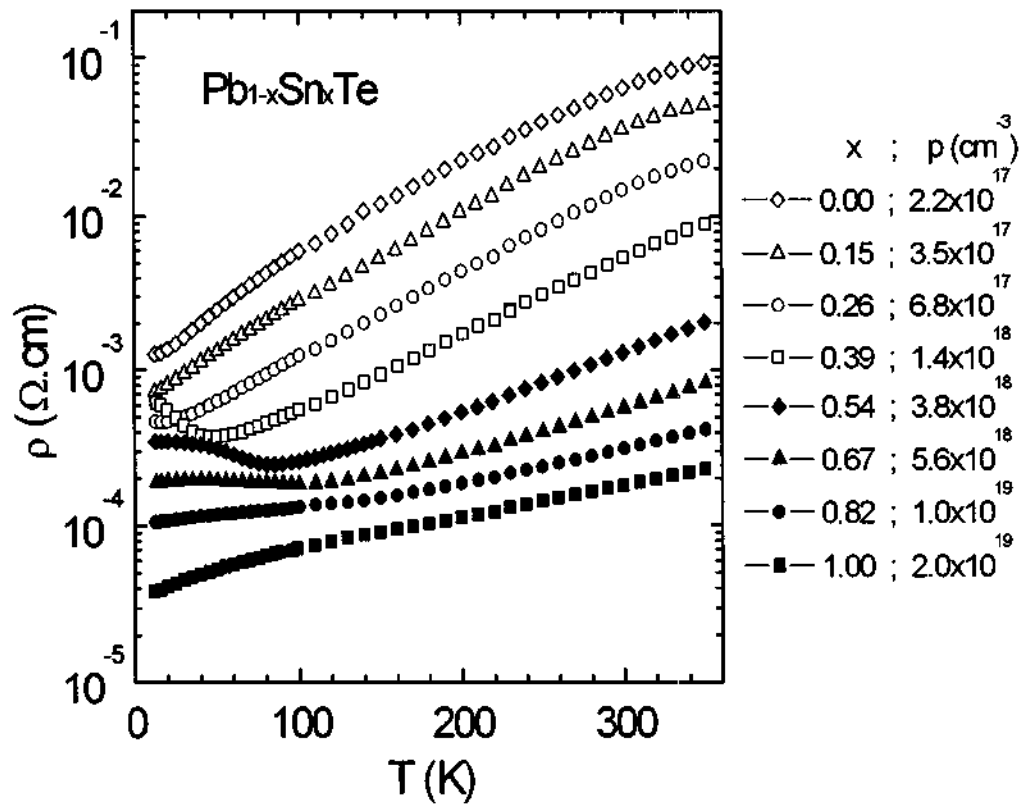


Figura 2

A figura 2 mostra a resistividade em função da temperatura para camadas epitaxiais de $Pb_{1-x}Sn_xTe$ com x variando de 0 até 1. As curvas de resistividade das amostras de $Pb_{1-x}Sn_xTe$ revelam quase a mesma dependência da temperatura, exceto para as amostras com x no intervalo de 0.35 a 0.70. Para tais amostras, um mínimo muito bem definido na curva de resistividade é observado em temperaturas entre 20K e 120K, dependendo do valor de x . Esse comportamento anômalo será discutido no final deste item. A resistividade das amostras, cujo valor depende principalmente das suas concentrações de buracos, mostra uma dependência exponencial da temperatura com uma derivada decrescendo à medida que a composição da liga vai de PbTe a SnTe.

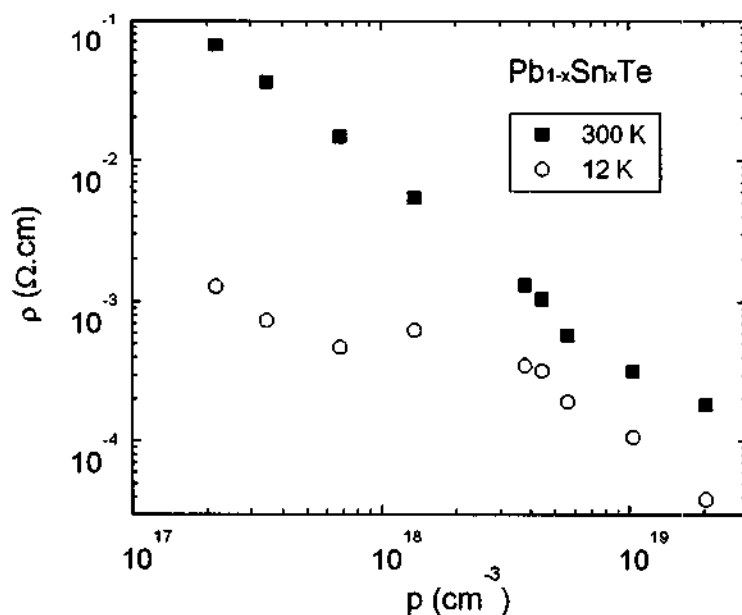


Figura 3

A figura 3 mostra os valores de resistividade a 12 e 300K em função da concentração de buracos a 300K. A resistividade a 300K decresce de 10^{-1} até 10^{-4} Ω.cm como uma potência da concentração de buracos que aumenta de 10^{17} a 10^{19} cm⁻³ ($\rho = \rho_0 \cdot p^{-1,3}$), enquanto a resistividade a 12K desvia desta dependência devido ao comportamento anômalo observado em baixas temperaturas.

A dependência de temperatura da mobilidade Hall para amostras com diferentes percentagens de Sn é mostrada na figura 4. Para maior clareza, nem todas as amostras foram plotadas no gráfico. O comportamento da mobilidade Hall em função da temperatura depende da composição da liga, a qual pode ser dividida em três regiões :

- 1- Para amostras com $0 \leq x \leq 0.35$, a mobilidade Hall é limitada por fonos acústicos ($\mu \sim T^{-5/2}$) e desvios da curva de fonos saturam em um valor residual a baixas temperaturas devido a espalhamento por impurezas. As mobilidades residuais em torno de 2×10^4 cm²/V.s obtidas por essas amostras são relativamente baixas quando comparadas com os altos valores referentes a PbTe [4]. Mas deve-se lembrar que essas amostras são tipo p e foram crescidas em condições não otimizadas para maximizar a mobilidade residual. Se fossem otimizados a temperatura dos dois substratos e o fluxo adicional de

Te, seriam obtidas camadas de PbTe tipo n com mobilidades de $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ a 12K, comparáveis aos altos valores do PbTe ;

- 2- Para amostras com $0.35 \leq x \leq 0.70$, a mobilidade a altas temperaturas ainda é limitada por fonos, mais a faixa de baixas temperaturas da curva mostra um máximo na mesma temperatura na qual ocorre um mínimo na curva de resistividade ;
- 3- Para amostras com $0.70 \leq x \leq 1$, a alta concentração de buracos limita a mobilidade até altas temperaturas, levando a um aumento muito menos pronunciado na mobilidade com a redução da temperatura.

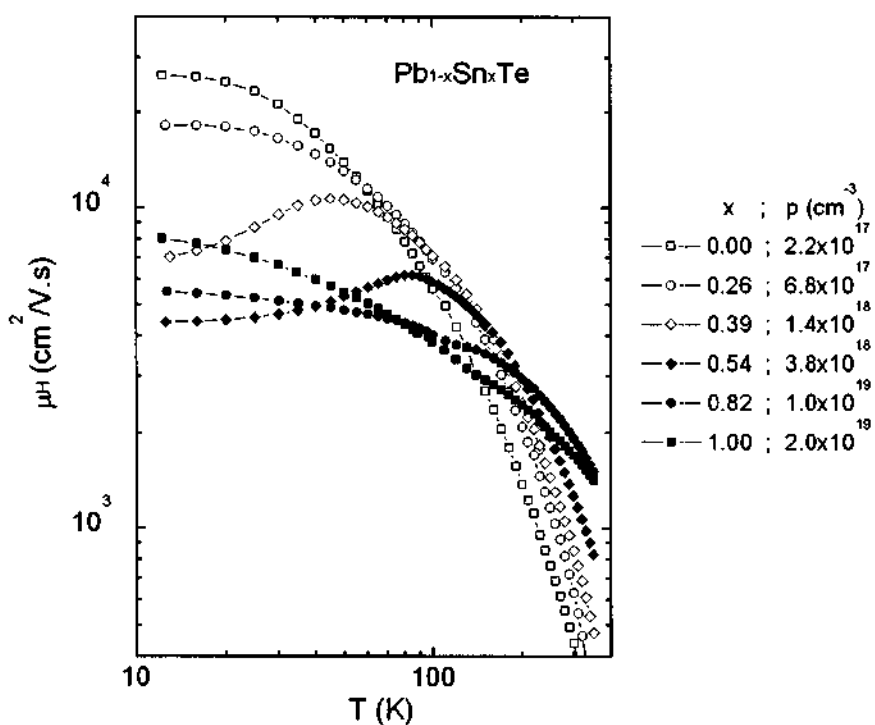


Figura 4

Para as amostras de Pb_{1-x}Sn_xTe com percentagem de Sn entre 0.35 e 0.70, um comportamento diferente na resistividade foi observado em baixas temperaturas. A figura 5 mostra a resistividade para duas amostras (Pb_{0.44}Sn_{0.56}Te e Pb_{0.61}Sn_{0.39}Te) entre 10 e 200K. Uma significativa mudança na curva de resistividade é observada neste intervalo de temperatura, com mínimos muito bem definidos. A temperatura, na qual o mínimo da

curva de resistividade ocorre, é plotada na figura 6 em função da concentração de Sn (x) para amostras com $0.35 \leq x \leq 0.70$. Esta temperatura cresce de 48 a 100K enquanto x varia de 0.39 a 0.67. A reta (linha sólida) da figura 6 mostra a temperatura de cruzamento de bandas prevista no modelo de inversão de bandas em função de x . Existe uma concordância entre o modelo e os dados experimentais somente para $x \sim 0.4$. Para amostras com composição de Sn maiores, existe um grande desvio para baixas temperaturas.

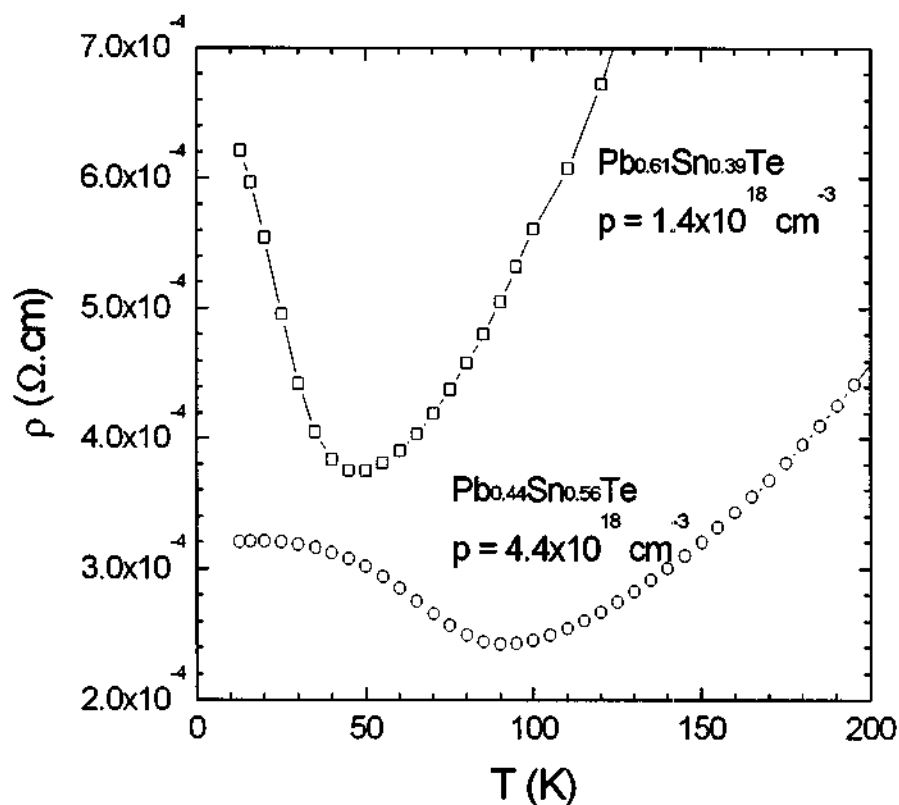


Figura 5

Apesar desta discordância, acredita-se que o fenômeno é relacionado à inversão de bandas no material, desde que a anomalia não foi observada fora da faixa de cruzamento das bandas ($0.35 \leq x \leq 0.70$).

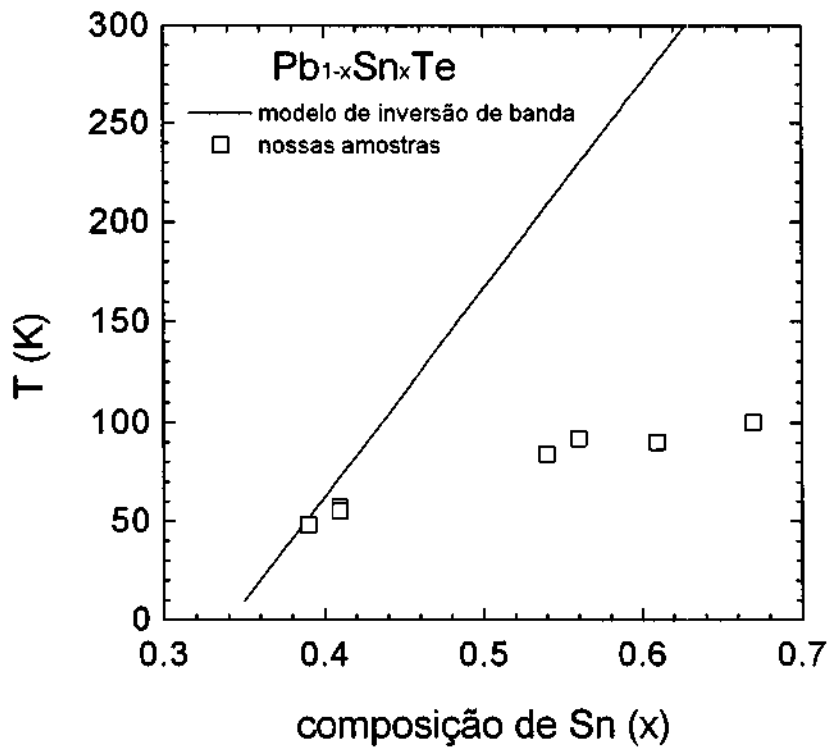


Figura 6

Acredita-se que o ponto crítico observado na curva de resistividade resulta da inversão de banda neste material. Na temperatura em que ocorre o cruzamento de banda, a variação do gap (E_g) com a temperatura (T) muda de sinal. Esta mudança de sinal do coeficiente de energia de gap com T (dE_g/dT) pode ser influenciada pela dependência da curva de resistividade com a temperatura.

4 . REFERÊNCIAS

- [1] L.J. van der Pauw, Phillips Research Reports, 13, 1 (1958).

[2] C. Mastrella, E. Abramof, Sistema de Medidas de Efeito Hall Dependente com a Temperatura (Rel. Parcial, 1997).

[3] N.J. Parada, Phys. Rev. B 3, 2042 (1971).

[4] G. Springholltz, G. Bauer and G. Ihninger, J. Crystal Growth 127,302 (1993).