

# FORMAÇÃO DA LIGA $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ EM CÉLULAS SOLARES DE $\text{CdS}/\text{CdTe}$ SUBMETIDAS A TRATAMENTO TÉRMICO COM $\text{CdCl}_2$

Gisele Duarte Caboclo Antolin<sup>a,\*</sup>, Leila Rosa de Oliveira Cruza, Roberto Ribeiro de Avellez<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais – Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio 80, Urca, 22290-270, Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

<sup>b</sup>Departamento de Engenharia de Materiais – Pontifícia Universidade Católica, Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, 22451-900, Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Defesa, Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio 80, 22290-270, Rio de Janeiro (RJ), Brasil

\* giselecaboclo@yahoo.com.br

## RESUMO

Este trabalho investiga a formação da liga  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  em células solares de  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  em virtude do tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$ . Foram utilizadas na caracterização da interface  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  as técnicas de fotoespectroscopia, espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios x e difração de raios x, onde foi utilizado o software TOPAS, que faz uso do método de Rietveld, para o refinamento microestrutural. Os resultados mostraram a existência de interdifusão entre as camadas de  $\text{CdS}$  e  $\text{CdTe}$  em função das condições do tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$ . A amostra tratada a 415 °C com  $\text{CdCl}_2$  foi a que apresentou a menor quantidade de macrotensoes. Nesta temperatura de tratamento térmico foi constatado que a espessura da liga era superior a 250 nm e sua composição era  $\text{CdS}_{0,1}\text{Te}_{0,9}$ . Estes resultados são discutidos e comparados com os reportados na literatura.

**Palavras-chave:**  $\text{CdTe}$ , interdifusão, células solares

## ABSTRACT

This work characterizes the  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  alloy formed in  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  solar cells due to the heat treatment in the presence of  $\text{CdCl}_2$ . The  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  interface was analyzed by optical spectroscopy, x-ray photoelectron spectroscopy, and x-ray diffraction. Rietveld refinement method was carried out in the x-ray diffractograms, using the software TOPAS. The results showed the presence of a  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  layer as a function of the heat treatment parameters. A 250nm thick  $\text{CdS}_{0,1}\text{Te}_{0,9}$  layer was formed at  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  interface after  $\text{CdCl}_2$  heat treatment at 415 °C. Macro stresses that existed in the  $\text{CdTe}$  layer were also relieved after heat treatment at this temperature. These results are discussed and compared with others found in the literature.

**Keywords:**  $\text{CdTe}$ , interdiffusion, solar cells

## INTRODUÇÃO

O desempenho das células solares de CdS/CdTe é muito dependente dos parâmetros utilizados nas deposições dos filmes e nos procedimentos subsequentes empregados, como tratamentos térmicos e formação dos contatos. A interface entre o sulfeto de cádmio (CdS) e o telureto de cádmio (CdTe) é considerada um dos principais fatores limitantes da eficiência destas células. Isto se deve principalmente ao grande desajuste entre as redes dos dois materiais (~9,7%), o que gera estados interfaciais que atuam como centros de recombinação, aprisionando os portadores de carga (Babkair, 2010; Rogers *et al.*, 1999). Uma das maneiras de reduzir este descasamento entre as redes é provocar uma interdifusão entre as camadas, dando origem a uma liga na região da junção entre os dois materiais. Esta interdifusão é ativada por um tratamento térmico em presença de cloreto de cádmio (CdCl<sub>2</sub>). Como a difusão do enxofre para a camada de CdTe ocorre em quantidade muito superior à difusão de telúrio para a camada de CdS, apenas a liga rica em Te (CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>) costuma ser abordada na literatura (Castro-Rodríguez *et al.*, 1998, Metzger *et al.*, 2006).

Os mecanismos físicos pelos quais esta camada interfacial é formada e as suas consequências para a eficiência dos dispositivos ainda são objeto de grande debate (Duenow *et al.*, 2011). Desta forma, o entendimento e o controle dos processos envolvidos nesta interdifusão são de vital importância para a utilização em larga escala das células de CdS/CdTe. Por isso, este trabalho investigou e mensurou os processos interdifusivos entre as camadas de CdS e CdTe produzidas pela técnica de sublimação em espaço reduzido (CSS) no laboratório de filmes finos do IME (Panetto, 2009; Fernandes, 2009; Vieira *et al.*, 2011).

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras utilizadas possuíam a configuração vidro/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn/CdS/CdTe. Substratos de vidro borossilicato foram recobertos com filmes de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn (ITO), depositados por pulverização catódica, de acordo com o procedimento descrito em Vieira *et al.* (2011). Os filmes de ITO tinham espessura de aproximadamente 300 nm e resistência de folha de 39,7 Ω/□. As deposições das camadas de CdS e CdTe foram realizadas em um equipamento CSS, conforme descrito na literatura (Panetto, 2009). Na Tabela 1 podem ser observados os parâmetros utilizados na deposição das camadas de CdS e CdTe, que são a temperatura da fonte (T<sub>f</sub>), a temperatura do substrato (T<sub>s</sub>), o tempo de deposição (t) e a pressão de argônio (P). A espessura da camada de CdS foi de aproximadamente 450 nm e da camada de CdTe foi de aproximadamente 600 nm.

Tabela 1. Parâmetros de deposição de filmes de CdS e CdTe.

Deposição	T <sub>f</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	t (s)	P (Torr)
CdS	700	540	90	1
CdTe	610	580	90	12

O tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$  foi realizado via vapor no sistema CSS. As amostras foram tratadas por 5 min em uma atmosfera de 50 Torr de Ar. Os parâmetros de tratamento foram escolhidos com base em trabalhos anteriores (Panetto, 2009; Fernandes, 2009). Nestes tratamentos, a temperatura da fonte foi mantida na mesma temperatura do substrato, de modo a evitar a deposição de  $\text{CdCl}_2$  sobre a superfície das amostras. As temperaturas de tratamento utilizadas foram 400 e 415 °C. A amostra não submetida ao tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$  foi denominada NT. Às demais amostras tratadas com  $\text{CdCl}_2$  foram atribuídas a sigla TT seguida da temperatura de tratamento utilizada.

Medidas de fotoespectroscopia foram realizadas em um equipamento modelo Cary 5000, da Varian. Análises de espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios x (XPS) foram realizadas em um equipamento de fotoemissão PHI5600, que utilizava como radiação monocromática o  $\text{Al K}\alpha$ . Para a obtenção de um perfil de concentração foi realizada a erosão das amostras com feixe de íons de argônio. A difração de raios x (DRX) foi realizada no laboratório de difração de raios x do IME, em um equipamento da marca Panalytical. Nestas medidas, utilizou-se a técnica de incidência rasante (GIXRD). A radiação utilizada foi a do Co, com  $k_\alpha = 1,7890 \text{ \AA}$ , sendo os ângulos de incidência utilizados nas análises iguais a  $1^\circ$ ,  $1,5^\circ$  e  $2^\circ$ . O tempo de permanência dos raios x foi de 400 s em cada passo de  $0,01^\circ$ , na faixa de  $26$  a  $29^\circ$ , com o intuito de se avaliar mudanças de posição no pico (111) do CdTe. Os resultados destas medidas foram analisados com a ajuda do software TOPAS (versão acadêmica), que utiliza o método de Rietveld no refinamento dos difratogramas das amostras. Como em um difratograma, a largura à meia altura de um pico é influenciada pelo tamanho dos cristalitos e pelas microdeformações presentes na amostra, além de uma contribuição instrumental, que advém das características do equipamento utilizado na medida (raio do goniômetro, perfil de emissão da fonte, largura das fendas etc), foi necessária a extração desta contribuição instrumental dos difratogramas. Isto foi obtido através da coleta das informações do alinhamento do equipamento durante a medida, que possibilitou a elaboração de uma ficha que continha as informações oriundas deste alinhamento e que foram incluídas no refinamento microestrutural dos difratogramas.

Para as análises de incidência rasante, foi necessário o cálculo do ângulo crítico ( $\alpha_c$ ) do material, que corresponde ao ângulo abaixo do qual a reflexão interna ocorre. Isto foi obtido através da EQ. 1 (Krishna e Dutta, 2004), onde  $r$  é a densidade do CdTe em  $\text{Kg/m}^3$  e  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação utilizada em Angstrom. O valor do ângulo crítico obtido para esta análise foi  $0,227^\circ$ .

$$\alpha_c = (2,6 \times 10^{-6} \rho \lambda^2)^{1/2} \quad (1)$$

A profundidade de penetração ( $e$ ) dos raios x no CdTe foi obtida da EQ. 2 (Cullity, 1978), onde:  $\theta$  é o ângulo de incidência do feixe de raios x e  $\mu$  é o coeficiente de absorção linear do material para a radiação utilizada, no caso, cobalto ( $\mu = 2241 \text{ cm}^{-1}$ , conforme fornecido pelo software do difratômetro da Panalytical).

$$e = 3,45 \text{sen} \theta / \mu \quad (2)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização Óptica

Os espectros de transmitância das amostras são apresentados na Figura 1. A partir destes espectros de transmitância foi possível obter os gráficos da Figura 2 que relacionam o coeficiente de absorção óptica ( $\alpha$ ) com a energia  $h\nu$ , de onde puderam ser obtidos os valores das energias de banda proibida das amostras (Hiie *et al.*, 2006). O valor da energia de banda proibida da amostra NT foi  $(1,113\pm 0,003)$  eV. Este valor está muito distante do valor da banda proibida do material na forma volumétrica (1,5 eV), o que era esperado, visto que o CdTe como depositado é um material com uma alta densidade de defeitos (Rose *et al.*, 1999). O tratamento térmico da amostra TT400 e TT415 melhorou sensivelmente a qualidade das amostras, elevando o valor da banda proibida para  $(1,402\pm 0,004)$  e  $(1,415\pm 0,001)$  eV, respectivamente, valores mais próximos ao da energia de banda proibida do CdTe. Isto se deve à redução de defeitos nos filmes de CdTe, a qual também pode ser observada na forma abrupta da inclinação da energia de banda proibida da amostra TT415.

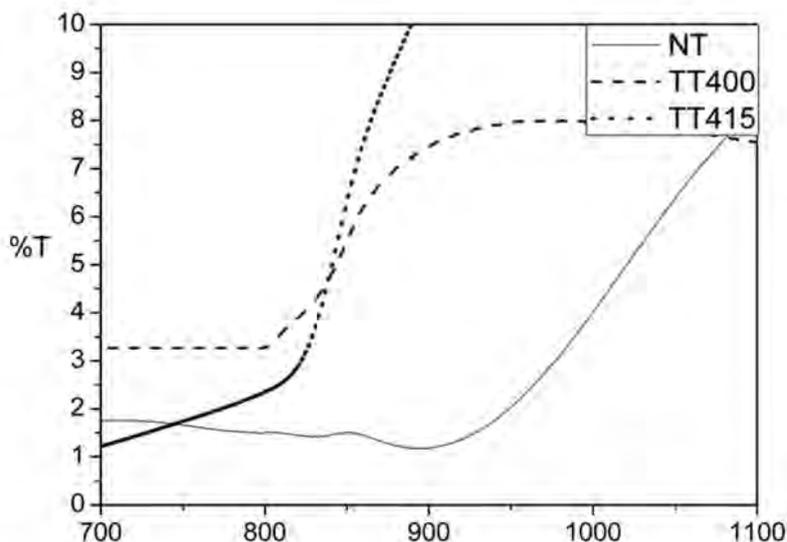
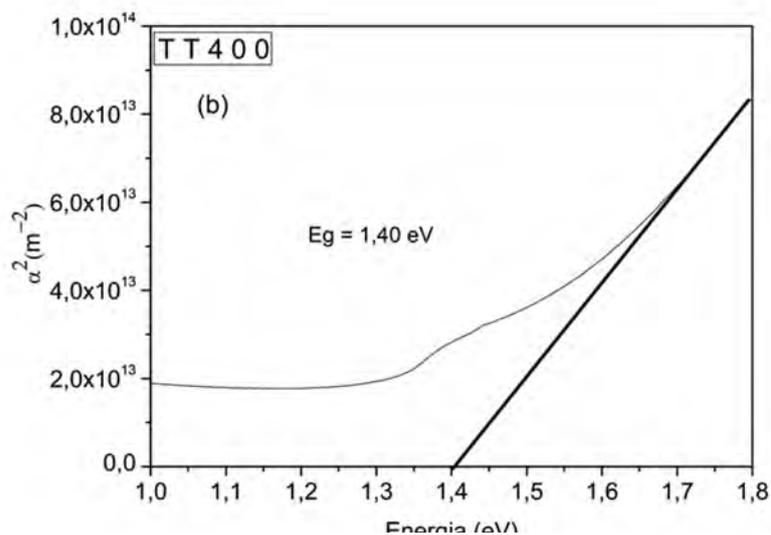


Figura 1. Transmitância dos filmes de CdTe: (a) NT, (b) TT400 e (c) TT415.



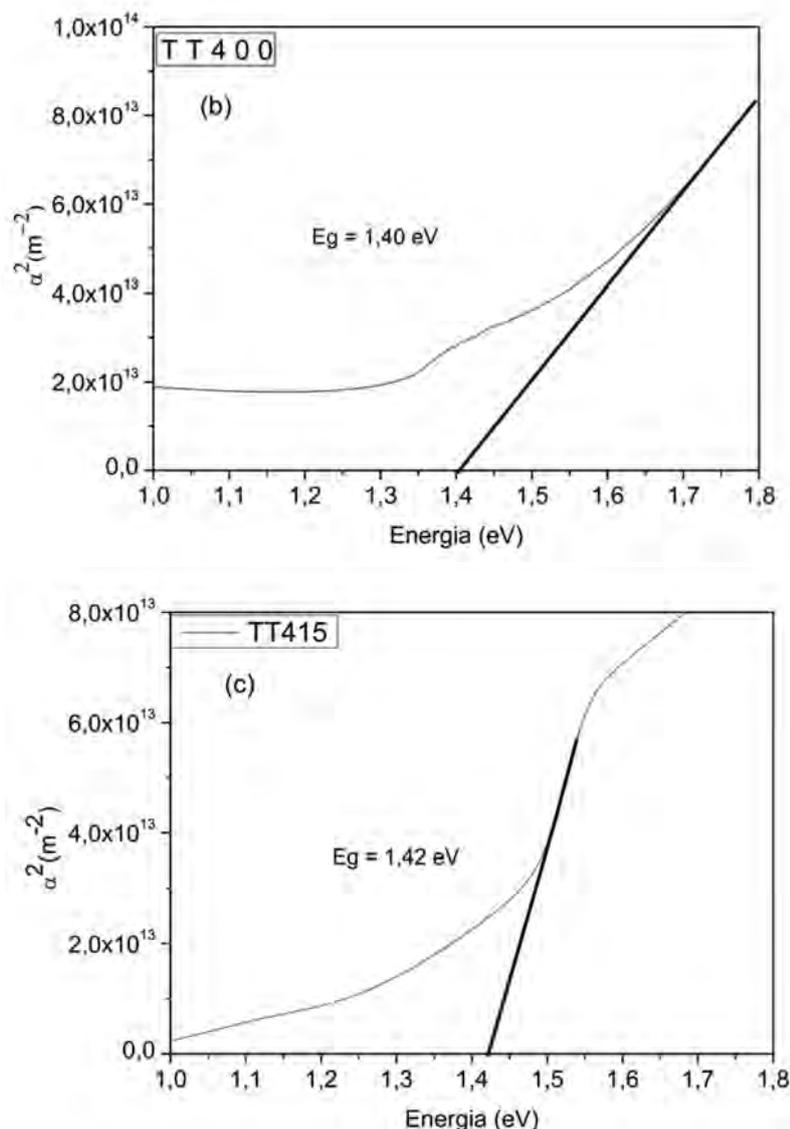


Figura 2. Determinação da energia de banda proibida dos filmes de CdTe: (a) NT, (b) TT400 e (c) TT415.

### Caracterização Microestrutural

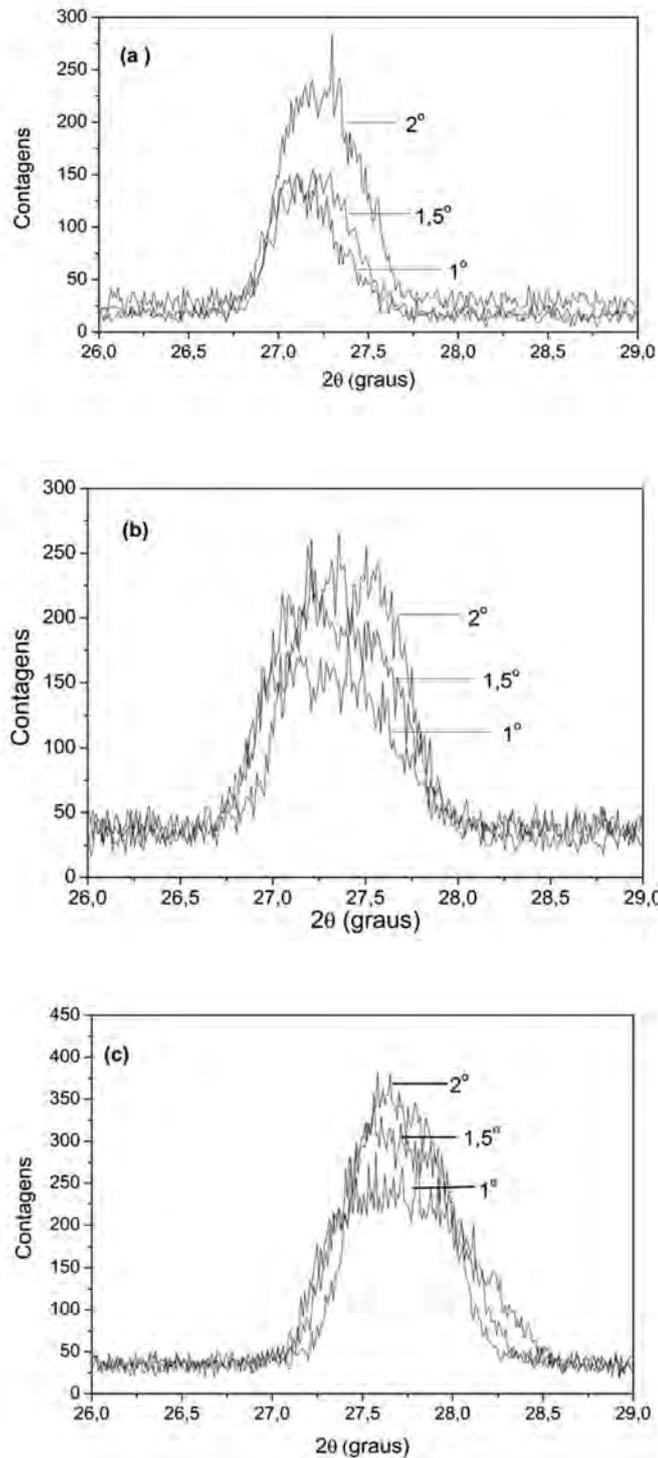
A partir da Equação 2 foi possível calcular a profundidade de penetração do feixe de raios x no interior do filme de CdTe (Tabela 2). Como os filmes de CdTe tinham espessura de aproximadamente 600 nm, a Tabela 2 mostra que a análise foi realizada desde a superfície até uma região próxima à interface.

Tabela 2. Profundidade de penetração no CdTe em função do ângulo de incidência dos raios x (fonte de Co)

Ângulo (graus)	e (nm)
1	269
1,5	404
2	539

As análises de incidência rasante para amostra NT e para as duas amostras tratadas com  $\text{CdCl}_2$ , a 400 e 415 °C, são apresentadas na Figura 3. A comparação entre as curvas da amostra NT e da amostra TT415 mostra que o tratamento térmico

co com  $\text{CdCl}_2$  promoveu deslocamentos de até 0,5 graus na posição do pico (111), o que implica em uma grande diminuição do parâmetro de rede das amostras.



**Figura 3.** Difração do plano (111) com diferentes ângulos de incidência rasante em filmes de CdTe: (a) NT, (b) TT400 e (c) TT415.

Os parâmetros de rede das amostras foram obtidos através da utilização do software TOPAS. Apesar de o método de refinamento Rietveld utilizar todos os picos do difratograma, apenas o pico do plano (111) foi utilizado na obtenção dos parâmetros de rede das amostras. Pode-se observar que a amostra NT possui um parâmetro de rede maior do que o CdTe na forma de pó (6,481 Å), o que se deve

a uma grande quantidade de macrotensões neste filme. No entanto, com a realização do tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$  a  $400\text{ }^\circ\text{C}$  este valor diminuiu em direção ao valor do parâmetro de rede do CdTe na forma de pó, o que mostra um alívio destas macrotensões. Com o aumento da temperatura de tratamento térmico para  $415\text{ }^\circ\text{C}$ , são observados, para todos os ângulos de incidência, parâmetros de rede inferiores ao do CdTe na forma de pó. Este comportamento está associado ao processo de interdifusão entre as camadas de CdS e CdTe. A redução do parâmetro de rede pode ser explicada com base na diferença entre o raio atômico dos átomos de Te e S. Por ter um raio atômico menor, o S ao substituir o átomo de Te reduzirá o parâmetro de rede do CdTe em direção ao parâmetro de rede do CdS ( $5,83\text{ \AA}$ ).

A existência de alargamento assimétrico nos picos das amostras tratadas, principalmente próximo à superfície do CdTe, reforça a idéia de o tratamento com  $\text{CdCl}_2$  ter sido o responsável por tal efeito. Este efeito poderia estar associado à ocorrência de maclas nos filmes de CdTe (Scardi *et al.* 1999), que são defeitos planares muito comuns nestes filmes (Al-Jassim *et al.*, 1998). Além disso, a redução do parâmetro de rede com o tratamento térmico é um indício de que o alto descasamento entre as redes dos dois materiais foi reduzido. A partir do parâmetro de rede da amostra TT415 e da lei de Vegard (EQ. 3), foi possível determinar a quantidade de enxofre que difundiu para o interior deste filme. Na EQ. 3,  $a$  é o parâmetro de rede e  $x$  é a fração molar de enxofre presente no filme de CdTe (Adachi, 2009). Estes valores aparecem listados na Tabela 3 e mostram que à medida que a distância da superfície do filme de CdTe aumenta, observa-se um aumento da quantidade de enxofre. Os resultados de incidência rasante mostram valores de fração molar de enxofre condizentes com os reportados na literatura (Gibson, 2002).

$$a = 6,481 - 0,651x \quad (3)$$

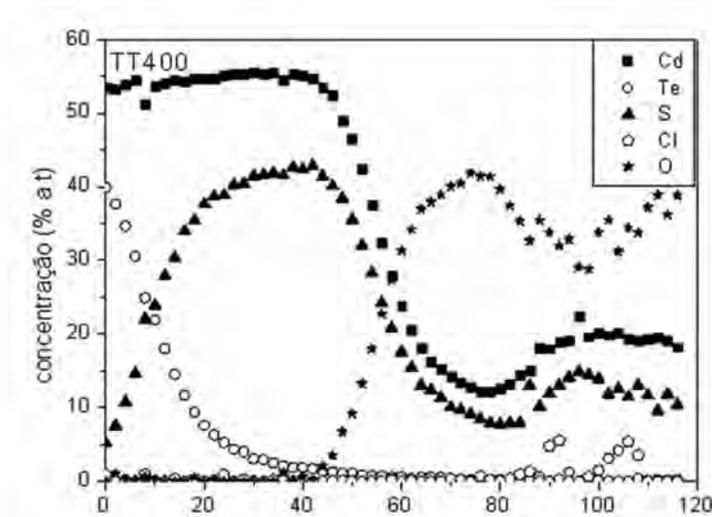
**Tabela 3.** Parâmetro de rede e fração molar de enxofre, em filmes finos de CdTe, obtidos do refinamento dos difratogramas para diferentes ângulos de incidência rasante

Amostra	Ângulo de incidência (graus)	Parâmetro de rede (Å)	Fração molar de enxofre
NT	1	6,602	
	1,5	6,587	
	2	6,578	
TT400	1	6,568	
	1,5	6,556	
	2	6,542	
TT415	1	6,479	0,003
	1,5	6,473	0,012
	2	6,471	0,015

Um exemplo de um dos perfis obtidos nas análises de XPS é apresentado na Figura 4. Pode ser observado que a erosão das amostras ocorreu nas camadas de CdTe, CdS e ITO. Para a análise das camadas de CdS e CdTe foi adotado que a camada de ITO se iniciava no ponto onde a quantidade de oxigênio deixava de ser igual a zero.

Como pode ser observado na Figura 4, a camada de CdTe possui uma quantidade maior de Cd que de Te. Isto ocorre porque a espessura da camada de CdTe nestas amostras representa uma região muito próxima à interface. Este comportamento é observado na literatura em perfis de concentração que utilizam uma pequena espessura da camada de CdTe (Gómez-Barojas *et al.*, 2006; Enríquez *et al.*, 2007). Caso a espessura do CdTe fosse maior, uma quantidade maior de Te que de Cd teria sido observada, como ocorre em um filme de CdTe do tipo p.

A Figura 5 mostra os perfis de concentração em função da profundidade. Para a conversão do tempo em profundidade, no eixo das ordenadas, utilizou-se a espessura das amostras, visto que a taxa de pulverização catódica variou de uma amostra para outra. Além disso, assumiu-se que as taxas de erosão nas camadas de CdS e CdTe eram iguais. Pode-se observar que em todas as amostras, inclusive na amostra NT, ocorreu interdifusão entre as camadas de CdS e CdTe. Isto se deve às altas temperaturas envolvidas no processo de deposição destas camadas.

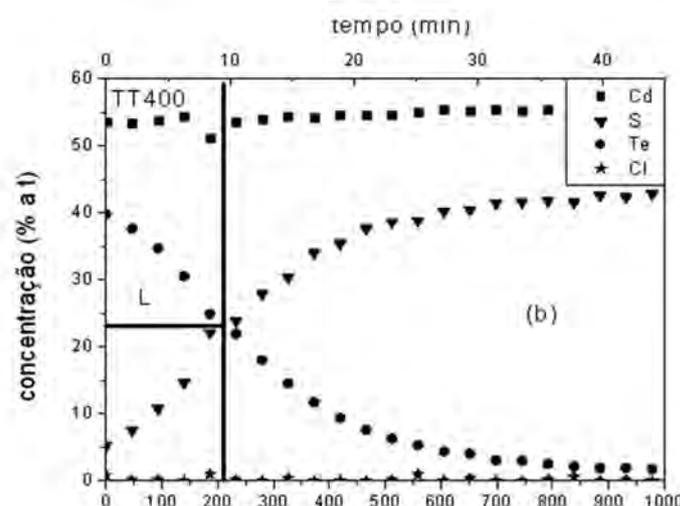
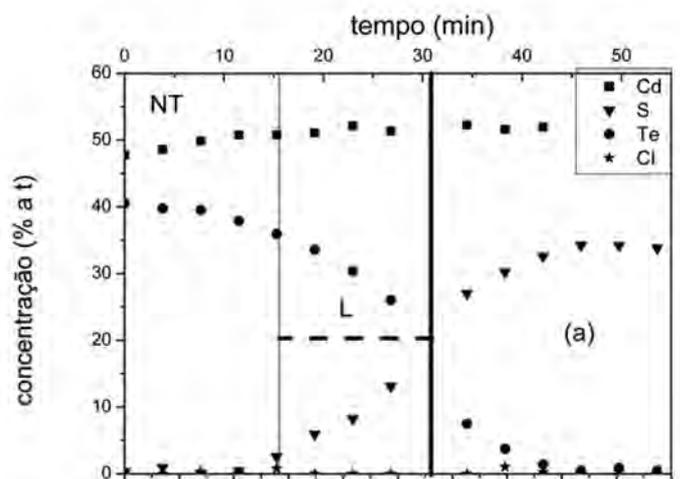


**Figura 4.** Perfil de concentração, obtido por XPS, em filmes de CdTe tratados a 400 oC.

A posição da junção entre as camadas de CdS e CdTe foi definida para cada amostra da Figura 5 como sendo a região onde ocorre o encontro entre os perfis de concentração de Te e de S. Os resultados mostram que a realização do tratamento térmico com CdCl<sub>2</sub> modificou a posição da junção entre os dois materiais, fazendo com que a mesma fosse deslocada para o interior da camada de CdTe com o aumento da temperatura de tratamento térmico. Isto ocorreu em virtude da maior difusividade do S no CdTe em relação à difusividade do Te no CdS. A posição da junção pode ser observada na Figura 5 marcada com uma linha vertical.

Na Figura 5, também pode ser observada uma linha horizontal de comprimen-

to L, que marca a camada intermediária formada entre o CdS e o CdTe. Esta camada foi definida como sendo a distância entre a posição da junção e o ponto onde foi medida a última concentração de S na camada de CdTe diferente de zero. Pode-se observar que a espessura da liga  $CdS_xTe_{1-x}$  formada entre os dois materiais foi de aproximadamente 250 nm para a amostra NT. Já para as amostras tratadas com  $CdCl_2$ , a espessura da liga seria superior a este valor, caso a espessura da camada de CdTe tivesse sido maior, conforme observado anteriormente por Enríquez *et al.* (2007), onde foi verificado que a espessura da liga aumentou de 240 nm na amostra não tratada para 480 nm em amostras de 8  $\mu m$  de CdTe depositadas por CSS e tratadas com  $CdCl_2$  com parâmetros similares a este trabalho. Isto mostra que ocorreu um crescimento da camada interfacial com a realização do tratamento térmico com  $CdCl_2$ , conduzindo a uma redução entre o descasamento entre as redes do material e conseqüentemente a um melhor desempenho para os dispositivos (Enríquez *et al.*, 2007).



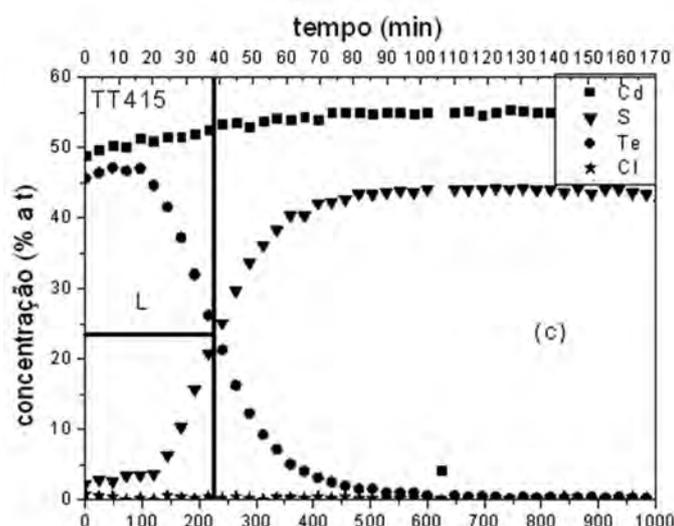


Figura 5. Perfis de concentração, obtidos por XPS, em filmes de CdTe: (a) NT, (b) TT400 e (c) TT415.

A partir dos resultados obtidos na Figura 5 foi possível a construção da Tabela 4, que mostra o coeficiente de difusão do enxofre na camada de CdTe obtido para cada amostra. Para a obtenção destes valores foi empregado um ajuste que utiliza uma função gaussiana, tal como a EQ. 4, onde foi considerado o CdTe como um meio infinito e o CdS como um meio finito (fonte finita), composto por uma quantidade de  $\alpha$  de soluto. Na EQ. 4,  $D$  é o coeficiente de difusão e  $c$  é a concentração em um certo ponto. O valor de  $t$  foi adotado como sendo o tempo de deposição da camada de CdTe, em virtude de existir interdifusão na amostra NT. Os resultados mostram que o coeficiente de difusão do enxofre aumentou com a temperatura do tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$ .

$$c(x,t) = \frac{\alpha}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4Dt}\right) \quad (4)$$

Tabela 4. Coeficiente de difusão e fração molar de enxofre em função da distância da interface CdS/CdTe

Amostra	Coeficiente de difusão do enxofre ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	Distância da interface à superfície (nm)	Fração molar de enxofre
NT	$5,39 \times 10^{-12}$	550	0,04
TT400	$7,6 \times 10^{-12}$	210	0,14
TT415	$9,6 \times 10^{-12}$	228	0,10

Na Tabela 4 também pode ser observado o valor médio da composição de cada amostra, medida da superfície até a região da junção. Os valores indicam que a maior parte da difusão do enxofre na rede do CdTe de fato ocorreu durante o tratamento térmico com  $\text{CdCl}_2$ . Os valores encontrados concordam com os reportados por Gibson *et al.* (2002) para amostras tratadas a  $400^\circ\text{C}$  com  $\text{CdCl}_2$  em

tempos de tratamento que chegaram a 60 min. Contudo, estes autores utilizaram uma atmosfera de oxigênio, que é um conhecido inibidor deste processo difusional (Mathew *et al.*, 2012).

## CONCLUSÕES

A interdifusão em células solares de CdS/CdTe foi quantificada e investigada ao longo da junção. Os resultados obtidos pela técnica XPS indicam que a interdifusão ocorre em duas etapas do processamento destas células: durante a deposição do filme de CdTe, devido à elevada temperatura utilizada na deposição deste filme, e durante o tratamento térmico com CdCl<sub>2</sub>. O tratamento térmico com CdCl<sub>2</sub> aumentou a quantidade de enxofre presente no CdTe e conseqüentemente a espessura da liga CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>. Os resultados de XPS mostraram que nas amostras tratadas com CdCl<sub>2</sub> a liga tem espessura superior a 250 nm, o que concorda com os resultados da literatura. Contudo, a concentração do enxofre no CdTe foi muito superior à reportada na literatura e também àquela que foi obtida através da técnica de DRX. Isto provavelmente foi devido ao fato de que foi utilizado apenas um pico para se obter a concentração da liga CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>, tal como tem sido feito na literatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adachi, S.; *Properties of semiconductor alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*, 1<sup>st</sup> ed., John Wiley & Sons Ltd: UK, 2009.
- Al-Jassim, M. M., Dhere, R. G., Jones, K.M., Hasoon, F. S., Sheldon, P. *The Morphology, Microstructure, and Luminescent Properties of CdS/CdTe Films. Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria, Vol. I, p. 1063-1066, 1998.*
- Babkair, S. S. *Charge Transport Mechanisms and Device Parameters of CdS/CdTe Solar Cells Fabricated by Thermal Evaporation. JKAU: Sci., 21, p. 21-33, 2010.*
- Castro-Rodríguez, R., Bartolo Perez, P., Perez-Delgado, D., Caballero-Briones, F., Penã, J. L. *S diffusion at the CdTe/CdS interface grown by rf magnetron sputtering. Materials Letters, 37, p. 281-284, 1998.*
- Cullity, B. D.; *Elements of x-ray diffraction*, 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc: USA, 1978.
- Duenow, J. N., Dhere, R. G., Moutinho, H. R., To, B., Pankow, J. W., Kuciauskas, D., and Gessert, T. A. *CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub> Alloying in CdS/CdTe Solar Cells. Proceedings of the Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco, California, USA, Vol. 1324, mrss11-1324-d14-03, 2011.*
- Enríquez, J. P., Gómez Barojas, E., Silva González, R., Pal, U. *S and Te inter-diffusion in CdTe/CdS heterojunction. Solar Energy Materials & Solar Cells, 91, p. 1392-1397, 2007.*
- Fernandes, J. A. S.; *Análise comparativa dos processos CBD e CSS de crescimento de filmes finos de CdS para fabricação de células solares de CdS/CdTe; Tese de doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2009.*
- Gibson, P. N., Baker, M. A., Özsan, M. E. *Investigation of sulphur diffusion at the CdS/CdTe interface of thin-film solar cells. Surface and interface analysis, 33, p. 825-829, 2002.*

- Gómez-Barojas, E., Silva-González, R., Pantoja-Enríquez, J. Determination of the interdiffusion coefficient for the CdS/CdTe heterostructure by AES sputter depth profiling. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, p. 2235-2240, **2006**.
- Hiie, J., Dedov, T., Valdana, V., Muska, K. Comparative study of nano-structured CdS thin films prepared by CBD and spray pyrolysis: annealing effect. *Thin Solid Films*, 443, p. 511-512, **2006**.
- Krishna, K. V., Dutta, V. Effect of in-situ CdCl<sub>2</sub> treatment on spray deposited CdTe/CdS heterostructure. *Journal of Applied Physics*, 96, p. 3962-3971, **2004**.
- Metzger, W. K., Albin, D., Romero, M. J., Dippo, P., Young, M. CdCl<sub>2</sub> treatment, S diffusion, and recombination in polycrystalline CdTe. *Journal of Applied Physics*, 99, p. 103703-1 – 103703-6, **2006**.
- Mathew, X., Cruz, J. S., Coronado, D. R., Millán, A. R., Segura, G. C., Morales, E. R., Martínez, O. S., Garcia, C. C., Landa, E. P. CdS thin film post-annealing and Te–S interdiffusion in a CdTe/CdS solar cell; *Solar Energy*, 86, p. 1023-1028, **2012**.
- Panetto, L. P; Efeito do tratamento térmico em presença de vapor de cloreto de cádmio em células solares de CdS/CdTe; *Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2009*.
- Rogers, K. D., Painter, J. D., Lane, D. W., Healy, M. The Structural Changes in CdS-CdTe Thin Films Due to Annealing. *Journal of Electronic Materials*, 28, p. 112-117, **1999**.
- Rose, D. H., Hasoon, F. S., Albin, D. S., Ribelin, R. M., Li, X. S., Mahathongdy, Y., Gessert, T. A., Sheldon, P. Fabrication procedures and process sensitivities for CdS/CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 7, p. 331-340, **1999**.
- Scardi, P., Leoni, M. Fourier modelling of the anisotropic line broadening of X-ray diffraction profiles due to line and plane lattice defects. *J. Appl. Cryst.*, 32, p. 671-682, **1999**.
- Vieira, A. R., Martins, Y. C., Santos, I. P. P., Cantini, D. F. V., Meliande, N. M., Souza, G. K. S., Lima, L. L., Medeiro, R. A., Cruz, L. R. O. Fabricação de contatos transparentes para células solares. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, XXVIII, p. 50-54, **2011**.