

CARACTERIZAÇÃO DE BICAMADAS TRANSPARENTES E CONDUTORAS DE ZnO/ZnO:Al DEPOSITADAS SOBRE POLIIMIDA PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS FLEXÍVEIS

Breno Felipe Matos Lopes – breno.felipe.lopes@outlook.com

Renan de Melo Correia Lima – rmclima@ime.eb.br

Rodrigo Amaral de Medeiros – digfisc@gmail.com

Carlos Luiz Ferreira – cferreira@ime.eb.br

Leila Rosa de Oliveira Cruz – leilacruz@ime.eb.br

Instituto Militar de Engenharia – SE/4, Praça General Tibúrcio, 80 – Urca, 22.290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo. Filmes finos de ZnO e ZnO:Al foram sequencialmente depositados sobre substratos de poliimida, a fim de se alcançar as propriedades elétricas e ópticas necessárias para aplicação em contatos frontais de células solares flexíveis de filmes finos. Os filmes foram crescidos à temperatura ambiente, por pulverização catódica com rádio frequência. Dois tipos de poliimida foram investigados: Kapton®CS e Kapton®HN. Para efeitos de comparação, os filmes também foram crescidos sobre substratos de vidro. Observou-se que o Kapton®CS é melhor que o Kapton®HN para células fotovoltaicas com a configuração superstrato, porque ele é transparente em toda a faixa da região visível do espectro. Foi estudada a influência tanto da potência de deposição quanto da espessura nas propriedades dos filmes. Os resultados mostraram que os filmes de AZO com menor resistência (16-18 Ω/quad) foram obtidos com potência de 95 W e espessura de 750 nm. A transmitância média do conjunto ZnO:Al(750nm)/Kapton®CS foi de 75% e foi limitada pelo substrato Kapton®CS. A transmitância foi reduzida para 68% quando uma camada de ZnO de 100nm foi introduzida: ZnO(100nm)/ZnO:Al(750nm)/Kapton®CS. Apesar desta redução, o baixo valor de resistência alcançado, 13 Ω/quad , torna esta configuração adequada para aplicações como eletrodo frontal em células solares fotovoltaicas.

Palavras-chave: contatos transparentes, filmes finos, ZnO/ZnO:Al, substratos flexíveis, células fotovoltaicas.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mercado global de energia solar fotovoltaica vem se destacando pela elevada taxa de crescimento. Somente em 2015, aproximadamente 57 GWp de módulos fotovoltaicos foram comercializados ao redor do mundo, o que representou um crescimento de 27% em relação ao ano anterior. Ao final deste mesmo ano, a capacidade instalada acumulada alcançou a marca de 242 GWp; China (21%), Alemanha (16%), Japão (14%) e América do Norte (13%) foram os líderes desta marca (Philipps *et al.*, 2016).

A produção de módulos fotovoltaicos se concentra nas tecnologias cristalinas - silício mono e multicristalino. Em 2015, estas tecnologias responderam por 93% do total produzido, enquanto que a de filmes finos representou 7% (Philipps *et al.*, 2016). No entanto, o mercado vem se mostrando receptivo a tecnologias inovadoras, que contribuam para atender novos segmentos e que tenham impactos importantes na redução de custos, tais como as células fotovoltaicas flexíveis. Células de filmes finos orgânicos e inorgânicos podem ser fabricadas sobre substratos flexíveis, tais como folhas poliméricas ou metálicas, para integrar roupas e pequenos itens de consumo. Estes substratos possibilitam um vasto campo de aplicações, devido a menor massa por área, flexibilidade e possibilidade de processamento em rolos (“roll-to-roll”). Como exemplo, pode-se citar as células flexíveis de seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), depositadas sobre folhas de aço inoxidável (Powalla *et al.*, 2014), e telureto de cádmio (CdTe), usando substratos de poliimida (Perrenoud *et al.*, 2009).

Um material que desempenha um papel importante na tecnologia fotovoltaica é o óxido transparente condutor (TCO). Uma série de óxidos metálicos pode atuar como contato, frontal ou de fundo, ou até mesmo como camada intermediária em quase todos os dispositivos fotovoltaicos. Os TCOs são materiais com banda proibida superior a 3,2 eV, e são também utilizados em outros dispositivos, como LEDs orgânicos e inorgânicos e telas. São exemplos os óxidos de índio, zinco e estanho, dopados ou não dopados (Jäger *et al.*, 1998). Estes materiais também atuam como semicondutores ativos em dispositivos, tais como, sensores de gás e dispositivos eletrônicos transparentes. Esta gama de aplicações é oriunda da sua baixa resistência de folha ($R_s < 20 \Omega/\text{quad}$), estabilidade química e propriedades ópticas: eles são altamente transparentes à luz visível, porém absorvem ultravioleta e refletem infravermelho (Jäger *et al.*, 1998). O tipo de condução do TCO, n ou p, é controlado por defeitos intrínsecos e dopantes extrínsecos. Eles são geralmente semicondutores degenerados, com uma densidade de portadores de carga tão alta quanto 10^{21} cm^{-3} (Szyszka *et al.*, 2010).

Neste contexto, filmes finos de óxido de zinco dopados com alumínio (ZnO:Al ou AZO) têm sido largamente estudados como TCO devido ao seu alto valor de transmitância (> 80%), baixa resistividade elétrica (< $10^{-3} \Omega\text{cm}$) e alta

banda proibida (> 3 eV). Quando não dopado, o óxido de zinco (ZnO), apesar de resistivo, também é um semicondutor do tipo n devido às vacâncias de oxigênio provenientes do desvio estequiométrico. Um processo de dopagem pode ser realizado com a inserção de elementos do grupo IIIA, como o alumínio, gálio ou índio, de forma a substituir átomos de Zn tornando-o um semicondutor do tipo n extrínseco, o que confere valores de resistividade mais baixos (Pearton *et al.*, 2005).

Diversos autores vêm utilizando filmes de AZO como contatos frontais em células solares de filmes finos de telureto de cádmio (CdTe) (Tiwari *et al.*, 2001) e seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) (Wuerz *et al.*, 2009). Por exemplo, em células solares flexíveis de CdTe, onde a configuração é vidro/TCO/CdS/CdTe/contato traseiro, estes TCOs têm sido utilizados na forma de bicamadas AZO/ZnO para aumentar a eficiência do dispositivo. Este aumento de eficiência deve-se a menor probabilidade de formação de junções localizadas AZO/CdTe, cujo valor de V_{oc} é inferior ao da junção CdS/CdTe, fenômeno justificável pela ocorrência de defeitos (furos) na camada de CdS devido a sua reduzida espessura. Desta forma, a camada de ZnO age como uma barreira (tampão) formando uma junção ZnO/CdTe, cujo valor de V_{oc} é similar ao apresentado pela junção CdS/CdTe. Para uma camada tampão ideal o ZnO deve possuir uma elevada transmitância na região do visível assim como uma elevada resistividade. Segundo Perrenoud *et al.* (2011), é aconselhável utilizar espessuras de aproximadamente 100nm.

As células solares de CdTe de alta eficiência são normalmente crescidas sobre substratos de vidro em uma configuração chamada “superstrato”, ou seja, luz incidindo através do substrato. Nesta configuração, camadas de CdTe/CdS são depositadas sobre os substratos revestidos com TCO. Por isso, o conjunto substrato/TCO deve possuir alta transmitância no visível e baixa resistência. No caso de substratos flexíveis, os requisitos são os mesmos, acrescentando-se ainda o fato de que o conjunto substrato/TCO deve suportar as condições de processamento das camadas subsequentes do dispositivo (Tiwari *et al.*, 2001), as quais podem envolver altas temperaturas.

Este trabalho investiga as propriedades de bicamadas de ZnO/AZO depositadas à temperatura ambiente sobre substratos de poliimida para aplicação em células solares flexíveis de filmes finos.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

Os filmes de AZO e ZnO foram sequencialmente depositados, sem quebra de vácuo, em um sistema de pulverização catódica não comercial, fabricado no próprio laboratório (Medeiro, 2015). Trata-se de um sistema com rádio frequência assistida por magnetos, composto de 3 catodos independentes.

Os filmes foram crescidos sobre substratos de vidro soda-lime e também sobre dois tipos de poliimida da Dupont: Kapton[®]CS e Kapton[®]HN, com espessuras de 25 e 50 μ m, respectivamente. A deposição foi feita à temperatura ambiente, de forma a evitar o aquecimento dos substratos de poliimida. A limpeza dos substratos foi realizada com água deionizada e detergente neutro em banho ultrassônico. Foram utilizados alvos cerâmicos comercializados pela AJA International de ZnO:Al e ZnO com 99,999% de pureza. O alvo de ZnO:Al era composto por 98%p ZnO e 2%p Al. Ambos os alvos possuíam diâmetro de 7,62 cm e espessura de 0,32 cm. Antes de cada deposição, a câmara era evacuada a uma pressão base da ordem de 10^{-6} Torr. Em seguida, argônio era introduzido até uma pressão de 25 mTorr, durante 1 min, para fazer o arraste de possíveis gases contaminantes. Este procedimento foi repetido 3 vezes. A pressão de deposição adotada foi de $1,00 \pm 0,05$ mTorr. Argônio (99,99%) foi usado como gás, caracterizando a deposição como não reativa. Os substratos foram posicionados a 75 mm de distância dos alvos. Os filmes de AZO foram depositados com potências de pulverização na faixa de 45 a 180 W, a fim de variar a taxa de deposição. Esta taxa era monitorada ao longo da deposição por meio de um cristal oscilador de quartzo da Sycon Instruments. A espessura dos filmes também foi variada a partir do tempo de deposição. Para a fabricação das bicamadas, após a deposição do AZO, trocava-se a polarização do catodo de ZnO:Al para o catodo de ZnO, através de uma chave eletrônica, e procedia-se à deposição do filme de ZnO. Os filmes de ZnO com espessuras entre 100-120 nm foram depositados com potência de 120 W.

Para medir a espessura dos filmes foi utilizado um perfilômetro da Veeco, modelo Dektak 150. Para a caracterização elétrica, utilizou-se o método Van der Pauw em um sistema de medidas de efeito Hall, da Bio-Rad, modelo HL 5500. Os espectros de transmitância foram obtidos em um espectrofotômetro modelo Cary 5000, da Varian.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Transmitância dos substratos

Os espectros de transmitância entre 200 e 800 nm dos substratos são apresentados na Fig. 1. O vidro, substrato mais utilizado na literatura, apresenta uma transmitância de 90% na faixa do visível, no entanto, ele absorve em comprimentos de onda abaixo de 320-300 nm. Nota-se que o substrato Kapton[®]CS tem uma transmitância média na faixa do visível de 85%, em contrapartida ele absorve em comprimentos de onda abaixo de 420-400 nm. O Kapton[®]HN tem uma transmitância média de 65%, além de apresentar uma sensível queda de transmitância em comprimentos de onda abaixo de 600-550 nm, mostrando propriedades ópticas inferiores ao Kapton[®]CS para aplicações em células solares flexíveis com a configuração superstrato, na qual a luz incide sobre o substrato.

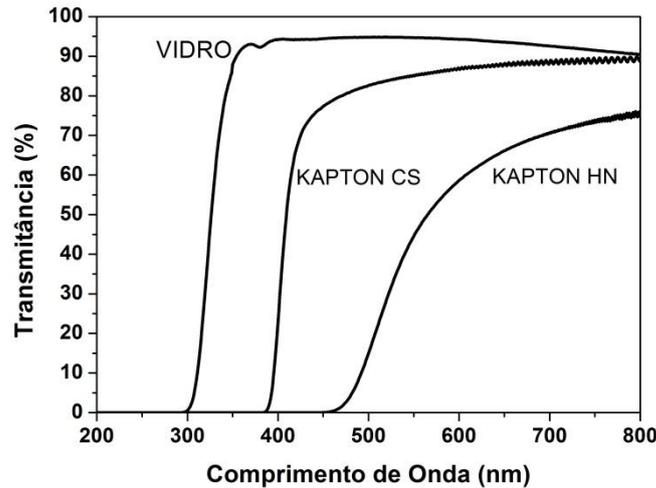


Figura 1 – Espectro de transmissância dos substratos.

3.2 Influência da potência de deposição nas propriedades dos filmes de AZO

A potência de deposição é responsável por acelerar os íons de argônio que promovem a pulverização do alvo no catodo. Mantendo-se os demais parâmetros constantes, tal como neste trabalho, a taxa de deposição pode ser controlada através da potência. A elevação da potência aumenta a taxa de deposição porque dá mais energia aos íons de argônio no plasma, aumentando o bombardeamento do alvo e também a energia das moléculas que chegam ao substrato. Este comportamento é claramente observado na Tab. 1, que também apresenta as características elétricas e ópticas de filmes de AZO depositados sobre vidro com diferentes potências. O tempo de deposição foi variado de forma a obter filmes de mesma espessura. Na Tab. 1, P é a potência de pulverização, Δt é o tempo de deposição, t é a espessura dos filmes, Tx é a taxa de deposição, R_{\square} é a resistência de folha, ρ é a resistividade, μ é a mobilidade, N é a concentração de portadores do material e T é a transmissância média do conjunto filme/substrato na região do visível. O valor da taxa de deposição foi calculado a partir da razão entre a espessura e o tempo de deposição. Pode-se observar que os filmes apresentaram uma espessura média de 180 nm. Nota-se que com o aumento da potência ocorre uma redução na resistência de folha até uma potência de 95 W, onde se encontra o ponto ótimo, ou seja, aquela que forneceu filmes com menor resistividade, sendo esse comportamento explicado pelo maior número de portadores e maior mobilidade como demonstrado na Fig. 2. Após esse ponto, a resistência de folha volta a aumentar, como demonstrado na Fig. 3.

A transmissância do conjunto AZO/vidro (Fig. 4) não foi influenciada pela potência de deposição. As pequenas diferenças podem estar relacionadas a variações de espessura e rugosidade, principalmente nos filmes depositados com potências maiores (120 e 180 W). A taxa de deposição mais elevada ocasiona uma adsorção desordenada, ou seja, a grande quantidade de moléculas chegando simultaneamente ao substrato impede que estas tenham tempo de se fixar na condição de menor energia.

Tabela 1. Propriedades óticas e elétricas de filmes de AZO depositados sobre vidro com diferentes potências.

Amostras	P (W)	Δt (min)	t (nm)	Tx (nm/min)	R_{\square} (Ω/quad)	ρ ($\times 10^{-3} \Omega.\text{cm}$)	μ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	N ($\times 10^{20} \text{cm}^{-3}$)	T (%)
AZO-45W	45	137	165	1,2	218	3,5	7,5	2,54	85
AZO-60W	60	75	180	2,4	164	2,9	8,4	3,24	85
AZO-95W	95	32	175	5,4	70	1,2	12,9	3,74	85
AZO-120W	120	25	185	7,4	96	1,7	11,7	2,99	84
AZO-180W	180	15	185	12,3	156	2,8	8,7	2,48	84

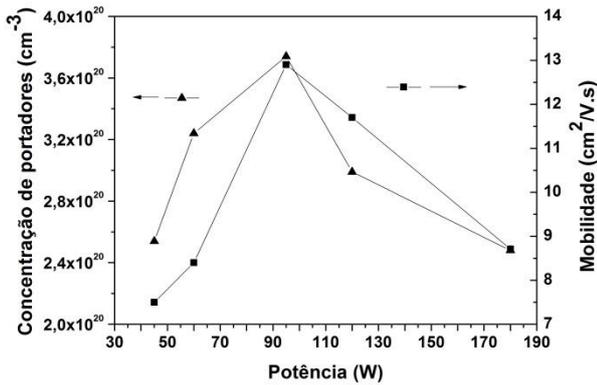


Figura 2 – Concentração e mobilidade de cargas em filmes de AZO depositados sobre vidro em função da potência de deposição.

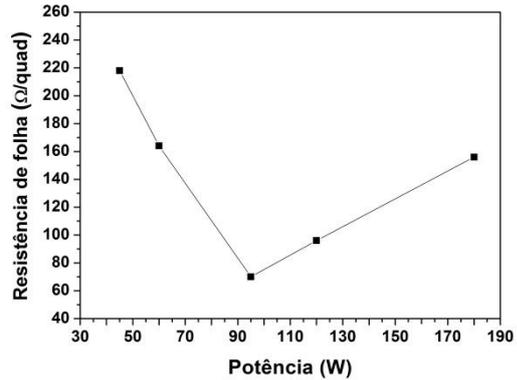


Figura 3 - Resistência de folha de filmes de AZO depositados sobre vidro em função da potência de deposição.

A banda proibida dos filmes de AZO foi obtida a partir das curvas de transmitância da Fig. 4, assumindo-se transição direta entre as bandas de valência e de condução. A expressão empírica $\alpha = c (h\nu - E_g)^{1/2}$, onde α é o coeficiente de absorção, ν é a frequência do fóton e E_g , a banda proibida, foi utilizada no cálculo (Fahrenbruch, *et al.*, 1983). Valores entre 3,6 e 3,8 eV foram obtidos. Esta variação na banda proibida pode ser atribuída às variações na concentração do dopante e a defeitos no filme. A literatura reporta uma banda proibida direta para o ZnO puro em torno de 3,4 eV (Pearton *et al.*, 2005). Como nossos filmes são dopados com alumínio, é esperado um aumento no valor da banda, tal como previsto por Sim *et al.* (2010).

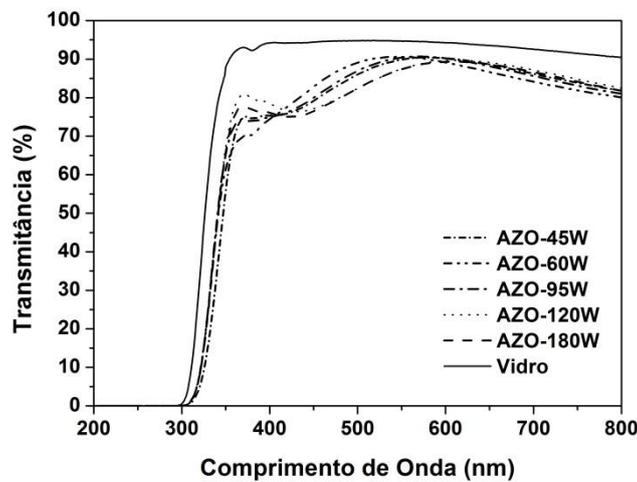


Figura 4 – Espectros de transmitância dos conjuntos AZO/vidro obtidos com diferentes potências.

3.3 Influência da espessura nas propriedades dos filmes de AZO

Para a produção de dispositivos fotovoltaicos na configuração superstrato, um contato frontal de qualidade deve apresentar transmitância superior a 80% e resistência de folha inferior a 10 Ω/quad. Assim, as amostras AZO-95W, as quais, de acordo com a Tab. 1, apresentaram resistência em torno de 70 Ω/quad para uma espessura de 175 nm, foram depositadas sobre as poliimidadas durante tempos maiores de deposição, de forma a aumentar a espessura. Como mostrado na Fig. 5, os conjuntos AZO/Kapton®CS, com espessuras de 290 e 810 nm, apresentaram uma transmitância média de 75% na região do visível. Nota-se também que o aumento significativo da espessura, de 290 para 810 nm, não afetou a transmitância do conjunto AZO/Kapton®CS. Já o conjunto AZO/Kapton®HN, com 750 nm de AZO, apresentou uma transmitância média de 60% no visível, limitada pelo substrato.

A resistência de folha dos conjuntos AZO/Kapton®CS foi medida e verificou-se um expressivo decréscimo, de 53 para 8 Ω/quad, quando a espessura aumentou de 290 para 810 nm. No conjunto AZO/Kapton®HN, a resistência de folha

foi 18 Ω /quad para uma espessura de 750 nm. Assim, pode-se concluir que filmes de AZO com espessuras da ordem de 800 nm podem ser usados como contatos frontais das células solares, visto que possuem as menores resistências de folha, mantendo ainda uma alta transmitância. Espessuras desta ordem foram então adotadas para a fabricação das bicamadas ZnO/AZO.

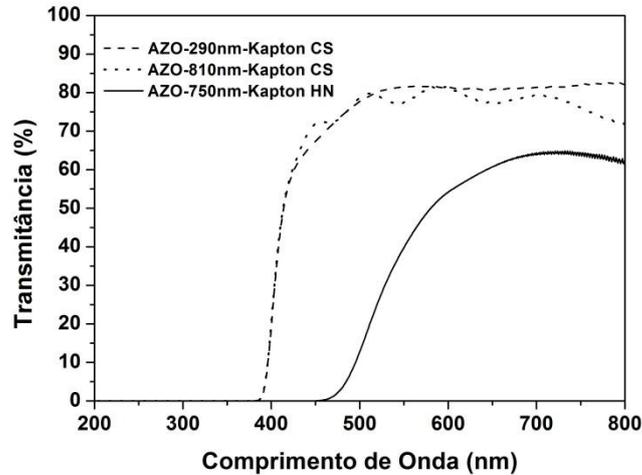


Figura 5 – Espectros de transmitância dos conjuntos AZO/poliimida com diferentes espessuras.

3.4 Bicamadas ZnO/AZO/poliimida

A Tab. 2 mostra as características elétricas e a transmitância de filmes de ZnO, AZO e bicamadas ZnO/AZO depositados sobre os diferentes substratos. Observa-se que os filmes de ZnO com 100 nm de espessura são resistivos, conforme desejado para formar a camada tampão da bicamada ZnO/AZO. A alta resistência decorre do fato de o TCO não ser dopado e também da baixa concentração de vacâncias de oxigênio. Isto significa que os parâmetros de deposição contribuíram para a formação de filmes aproximadamente estequiométricos.

Nota-se também que tanto as bicamadas ZnO/AZO quanto os filmes crescidos sobre vidro apresentaram resistência de folha e resistividade menores do que quando crescidos sobre as poliimidadas. Além disso, o tipo de poliimida, Kapton®CS ou Kapton®HN, não influenciou a resistência dos filmes. Este comportamento está provavelmente relacionado à topografia do substrato de vidro, que é menos rugoso que a poliimida. Uma constatação interessante é que os valores de resistência de folha das bicamadas são menores que os apresentados pela monocamada de AZO. Isso se deve ao fato de o ZnO, mesmo sendo isolante, contribuir com uma pequena fração da condução de corrente, ainda que a corrente flua majoritariamente pela camada de AZO. Portanto, a resistência total destas duas camadas, que se comportam como dois resistores em paralelo, é menor que a menor resistência (ou seja, a do AZO).

Os valores de transmitância das bicamadas apresentados na Tab. 2 mostram que uma camada tampão de ZnO com 1/7 da espessura da camada condutora não ocasiona uma queda significativa de transmitância na região do visível. Conclui-se, então, que bicamadas com estas espessuras possuem resistência de folha e transmitância adequadas para aplicações em contatos frontais de dispositivos fotovoltaicos com iluminação frontal.

Tabela 2. Propriedades elétricas e óticas de filmes de ZnO, AZO e bicamadas ZnO/AZO sobre diferentes substratos.

Amostras	R_{\square} (Ω /quad)	ρ ($\times 10^{-3} \Omega.cm$)	μ ($cm^2/V.s$)	N ($\times 10^{20} cm^{-3}$)	T (%)
ZnO(100nm)/Vidro	>10000	–	–	–	83
AZO(900nm)/Vidro	7,3	0,6	19,4	4,2	78
AZO(750nm)/Kapton®CS	16,3	1,1	13,5	3,3	74
AZO(750nm)/Kapton®HN	17,8	1,3	13	3	58
ZnO(100nm)/AZO(900nm)/Vidro	5,7	0,6	19,7	3,9	76
ZnO(100nm)/AZO(750nm)/Kapton®CS	12,9	1,1	14,9	3,7	68
ZnO(100nm)/AZO(750nm)/Kapton®HN	13,4	1,1	14,9	3,6	57

CONCLUSÕES

A resistência de folha dos filmes de AZO foi a mesma nos dois substratos de poliimida utilizados, Kapton®CS e Kapton®HN. No entanto, os substratos Kapton®CS são mais adequados para serem utilizados em células de filmes finos com configuração superstrato, pois são transparentes em toda a faixa do visível. A potência de 95 W foi a que forneceu filmes de AZO com menor resistência de folha. A transmitância média destes filmes ficou em torno de 75%, mesmo quando a espessura aumentou de 290 para 810 nm. Isto permitiu introduzir uma fina camada (100 nm) de ZnO sobre o AZO sem comprometer significativamente a transmitância do conjunto ZnO/AZO/substrato. Apesar de a configuração ZnO(100nm)/AZO(750nm)/Kapton®CS possuir transmitância de 68%, ela pode ser utilizada como contato frontal de células de filmes finos na configuração superstrato, devido ao baixo valor de resistência alcançado, 13 Ω /quad.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Exército Brasileiro, pela CAPES e pelo CNPq (Projeto MCT/CNPq no. 555710-2010-6). Os autores agradecem a Dupont por ceder os substratos.

REFERÊNCIAS

- Fahrenbruch, A. L. and Bube, R. H., 1983, *Fundamentals of Solar Cells*, Academic Press, New York.
- Jäger, S., Szyszka, B., Szczyrbowski, J., Bräuer, G. 1998. Comparison of transparent conductive oxide thin films prepared by a.c. and d.c. reactive magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology*, v. 98, n. 1-3, p. 1304–1314.
- Medeiro, R. A., 2015. Produção de multicamadas de filmes finos de VOx por pulverização catódica sem quebra de vácuo, Tese de Doutorado, IME, Rio de Janeiro.
- Pearton, S. J., Norton, D. P., Ip, K., Heo, Y. W., Steiner, T. 2005. Recent progress in processing and properties of ZnO, *Progress in Materials Science*, v. 50, n. 3, p. 293–340.
- Perrenoud, J., Buecheler, S., Tiwari, A. N. 2009. Flexible CdTe solar cells and modules: challenges and prospects, *Proc. SPIE*, v. 7409, p. 74090L.
- Perrenoud, J., Kranz, L., Buecheler, S., Pianezzi, F., Tiwari, A. N. 2011. The use of aluminium doped ZnO as transparent conductive oxide for CdS/CdTe solar cells, *Thin Solid Films*, v. 519, n. 21, p. 7444–7448.
- Philipps, S., Warmuth, W. 2016. Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 20 October 2016. Disponível em <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>, acessado em 14/11/2016.
- Powalla, M., Witte, W., Jackson P. et al. 2014. CIGS cells and modules with high efficiency on glass and flexible substrates, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, n. 1, p. 440-446.
- Sim, K. U., Shin, S. W., Moholkar, A. V., Yun, J. H., Moon, J. H., Kim, J. H. 2010. Effects of dopant (Al, Ga, and In) on the characteristics of ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering system, *Current Applied Physics*, v. 10, n. 3, p. S463–S467.
- Szyszka, B., Loebmann, P., Georg, A., May, C., Elsaesser, C. 2010. Development of new transparent conductors and device applications utilizing a multidisciplinary approach, *Thin Solid Films*, v. 518, n. 11, p. 3109–3114.
- Tiwari, A. N., Romeo, A., Baetzner, D., Zogg, H. 2001. Flexible CdTe solar cells on polymer films. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 9, n. 3, p. 211–215.
- Wuerz, R., Eicke, A., Frankenfeld, M., Kessler, F., Powalla, M., Rogin, P., Yazdani-Assl, O. 2009. CIGS thin-film solar cells on steel substrates, *Thin Solid Films*, v. 517, n. 7, p. 2415–2418.

CHARACTERIZATION OF ZnO/ZnO:Al TRANSPARENT CONDUCTING BILAYERS DEPOSITED ON POLYIMIDE FOR FLEXIBLE PHOTOVOLTAIC CELLS APPLICATION

Abstract. *ZnO and ZnO:Al thin films were sequentially deposited on polyimide substrates, in order to achieve the electrical and optical properties needed for its use as front contacts in flexible thin film photovoltaic cells. The films were grown at room temperature by RF magnetron sputtering. Two polyimide substrates were investigated: Kapton®CS and Kapton®HN. For comparison, films were also grown on glass substrates. It was shown that the Kapton®CS is better than the Kapton®HN for photovoltaic cells that use the superstrate configuration, because it is transparent in the whole range of the visible spectrum. The influence of both deposition power and thickness on the film properties was investigated. The lowest resistance of the ZnO:Al thin films (16-18 Ω /sq) was achieved when the 750nm thick films were deposited at 95W. The average transmittance of the ZnO:Al(750nm)/Kapton®CS configuration was 75%, and was limited by the Kapton®CS substrate. The transmittance was reduced to 68% when a 100nm thick ZnO layer was added: ZnO(100nm)/ZnO:Al(750nm)/Kapton®CS. However, the low resistance value of this bilayer configuration, 13 Ω /sq, makes it suitable for use as front electrode in flexible thin film solar cells.*

Key words: *transparent contacts, thin films, ZnO/ZnO:Al, flexible substrates, photovoltaic cells.*