

COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE CÉLULAS SOLARES n^+np^+ COM FILMES ANTIRREFLEXO DE TiO_2 DEPOSITADOS POR EVAPORAÇÃO E POR DEPOSIÇÃO QUÍMICA EM FASE VAPOR

José Cristiano Mengue Model – jose.model@acad.pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

Izete Zanesco – izete@pucrs.br

Moussa Ly – moussa.ly@pucrs.br

Sérgio Boscato Garcia – sergio.garcia@pucrs.br

Jéssica de Aquino – jessicaaquino.rs@gmail.com

Thais Crestani – thais.crestani@ig.com.br

Ricardo Augusto Zanotto Razera – ricardo.razera@acad.pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Faculdade de Física,
Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar)

Resumo. A dopagem com boro das lâminas de silício para produção de células solares foi estabelecida como padrão nos anos 60, como resultado do uso inicial destes dispositivos em aplicações espaciais. No entanto, demonstrou-se que a dopagem com boro em todo o substrato pode produzir problemas de degradação das características elétricas das células solares de uso terrestre. Além disto, nas lâminas de silício cristalino tipo n, dopadas com fósforo, observam-se maiores tempo de vida dos portadores de carga minoritários, proporcionando a fabricação de células solares mais eficientes. O objetivo deste trabalho foi comparar as características elétricas de células solares n^+np^+ com filme antirreflexo de óxido de titânio obtido por evaporação em alto vácuo com feixe de elétrons (E-beam) e por deposição química em fase vapor sob pressão atmosférica (APCVD). As células solares com filme AR depositado por APCVD obtiveram eficiência média maior, devido a um maior fator de forma, proporcionado por uma perfuração eficaz deste filme pela pasta metálica de prata. As células solares mais eficientes apresentaram eficiências de 14,7 % para ambos os processos de deposição utilizados.

Palavras-chave: Filmes antirreflexo, Dióxido de titânio, Células solares de silício tipo n

1. INTRODUÇÃO

A maioria das células solares de silício atualmente fabricadas são do tipo n^+pp^+ com um substrato dopado com boro, região frontal com alta dopagem de fósforo e a região posterior dopada com alumínio. Substratos de tipo n permitem a fabricação de células solares mais eficientes do que as do tipo p pelos seguintes motivos: 1) a influência de impurezas como ferro e oxigênio, por exemplo, é menos relevante, fator que possibilita a utilização de silício de menor qualidade como substrato (Macdonald, 2012), 2) as células solares fabricadas em lâminas n apresentam maior estabilidade ao longo do tempo do que as do tipo p, pois não sofrem os efeitos de degradação das características elétricas devido à interação da radiação solar com os pares boro-oxigênio presentes nos substratos dopados com boro (Glunz *et al.*, 2001).

As células solares em substrato n podem ter a estrutura p^+nn^+ e n^+np^+ . Na primeira, a dopagem da região frontal é realizada com boro e esta estrutura apresenta o inconveniente da superfície de uma lâmina de silício tipo p^+ ser mais difícil de passivar que as superfícies de tipo n^+ (Aberle, 2000). A estrutura n^+np^+ baseia-se na formação de um emissor p^+ dopado com alumínio na face posterior e na face frontal é aplicado um campo retrodifusor (FSF – *Front Surface Field*) pela difusão de fósforo. Desta maneira, para obter a região frontal n^+ da célula solar pode-se usar o processo de difusão de fósforo típico da indústria atual de células solares n^+pp^+ . No entanto, estes dispositivos podem apresentar pontos de fugas de corrente na face posterior, e como consequência, uma diminuição da resistência em paralelo se a região dopada com alumínio não for homogênea. Zanesco e Moehlecke (2015) reduziram significativamente estas fugas introduzindo uma região dopada com boro na face posterior, criando um emissor posterior seletivo de boro e alumínio. Outra forma de reduzir as fugas no emissor p^+ é evitando a texturação da face posterior e formando uma camada de SiO_2 sobre a lâmina de silício, depositando a pasta de alumínio posteriormente, como proposto por Wei *et al.* (2015). Estes autores apresentaram resultados de células solares do tipo n^+np^+ e a camada de SiO_2 na face posterior permitiu a obtenção de dispositivos com maior eficiência quântica interna (EQI) na faixa da radiação infravermelha, resultado de uma melhora na passivação de superfícies e refletância posterior quando comparado com os resultados de dispositivos fabricados somente com Al. Além disto, o filme de SiO_2 não produziu aumento de resistência em série. As células solares com passivação da superfície frontal com SiN_x e SiO_2 , superfície posterior polida e passivação desta face com SiO_2 atingiram a eficiência de 18,8 %, sendo esta eficiência 1,6 % maior que células solares sem o filme de SiO_2 e

superfície posterior texturizada. Schmiga *et al.* (2010), no Instituto Fraunhofer para Sistemas Solares, Alemanha, produziram células solares de 19,8 % de eficiência, usando lâminas de silício crescido pela técnica de fusão zonal flutuante (FZ), com superfície posterior polida e filme de $\text{SiN}_x+\text{SiO}_2$ somente na face frontal. Veschetti *et al.* (2010) também desenvolveram células solares n^+np^+ , atingindo a eficiência de 17,7 %, usando lâmina de silício crescido pela técnica Czochralski (Cz) de média-alta resistividade e regiões n^+ frontais seletivas.

A superfície das lâminas de silício apresenta grandes distúrbios na rede cristalina e devido a ligações não saturadas há uma quantidade significativa de defeitos. Tais defeitos proporcionam mecanismos de recombinação que diminuem o tempo de vida dos portadores de carga minoritários e, conseqüentemente, reduzem a capacidade de conversão de energia das células solares. A passivação de superfície tem como finalidade reduzir esse problema (Aberle, 2000 e Rahman e Khan, 2012). O filme passivador mais usado pela indústria de células solares atual é o nitreto de silício depositado por PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*), tendo a vantagem de também atuar como filme antirreflexo (AR). O óxido de titânio pode ser usado como filme AR e passivador, tendo elevada transparência e estabilidade. Além disso, o índice de refração do filme pode ser ajustado pela variação dos parâmetros do processo de deposição (Richards, 2004). Uma boa passivação pode ser realizada pela oxidação térmica com uma camada de SiO_2 (5 nm – 30 nm de espessura) e posterior deposição de filme AR de TiO_2 (ou de TiO_x se a deposição não seguir a estequiometria). Segundo Richards *et al.* (2002), após receber uma fina camada de TiO_2 e passar por uma breve oxidação, forma-se uma camada de SiO_2 na interface $\text{TiO}_2\text{-Si}$. Thomson e McIntosh (2011) também observaram efeitos de passivação proporcionados pelo óxido de titânio em lâminas tipo p que passaram por processos térmicos de recozimento e foram expostas à radiação solar após a deposição.

A deposição do TiO_2 como filme AR pode ser realizada à pressão atmosférica e à baixas temperaturas utilizando como líquido precursor o titânio tetraisopropílico (TPT) e vapor d'água por deposição química em fase vapor a pressão atmosférica (APCVD, *atmospheric pressure chemical vapor deposition*). Esta técnica apresenta algumas vantagens em relação as deposições por evaporação e *sputtering*, que necessitam alto vácuo. Por exemplo, os custos dos equipamentos necessários são menores, o TPT não é tóxico, os processos de deposição podem ser em equipamentos de produção contínua com esteiras (*in-line*) e as características dos filmes podem ser ajustadas segundo os parâmetros de deposição. Davis *et al.* (2015) realizaram um trabalho experimental para relacionar as propriedades microestruturais e ópticas dos filmes de TiO_x depositados por APCVD em conjunto com filmes de AlO_x e observaram que esta combinação obteve menores refletâncias que a de filmes de SiN_x normalmente usados nas células solares industriais, inclusive após o encapsulamento com vidro e acetato de etil vinila para obtenção dos módulos fotovoltaicos.

O objetivo deste trabalho é analisar as células solares n^+np^+ desenvolvidas com filmes de TiO_2 depositados por evaporação em alto vácuo com feixe de elétrons e deposição química em fase vapor a pressão atmosférica. Foram fabricadas células solares com processos industriais e comparadas suas características elétricas.

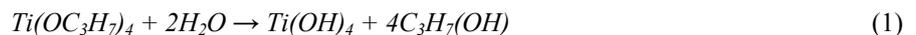
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Técnicas de deposição dos filmes de TiO_2

A deposição de filmes por evaporação em alto vácuo com feixe de elétrons (EBPVD, *electron beam physical vapor deposition* ou *E-Beam*) é uma forma de deposição física no qual um ânodo alvo é bombardeado com um feixe de elétrons de 10 keV emitido por um filamento de tungstênio sob alto vácuo. O feixe de elétrons, direcionado por um campo magnético, faz com que o material bombardeado seja fundido e transforme-se em vapor na câmara, sendo depositado como uma fina camada sobre o substrato (material a receber o filme antirreflexo). O feixe é controlado e focalizado e assim, apenas o material que se encontra no cadinho resfriado, é evaporado, permitindo deposição com alta pureza (Temescal, 2000).

Para depositar o filme AR, foram usados grânulos de TiO_2 de 99,9 % de pureza, colocados em um cadinho de grafite e o material foi fundido por feixe de elétrons em uma câmara mantida sob pressão de $8,5 \times 10^{-5}$ torr. A taxa de deposição do material foi mantida em 1 Å/s. A espessura do filme depositado foi determinada por um medidor de espessura capacitivo. A Fig. 1a apresenta o equipamento de deposição por feixe de elétrons Temescal BJD 2000.

Na deposição química em fase vapor a pressão atmosférica, o líquido precursor de TiO_2 é o titânio tetraisopropílico. O TPT pode reagir via reação de hidrólise em duas etapas (Richards, 2003 e Serrano, 2001), conforme mostram as Eq. (1) e Eq. (2):

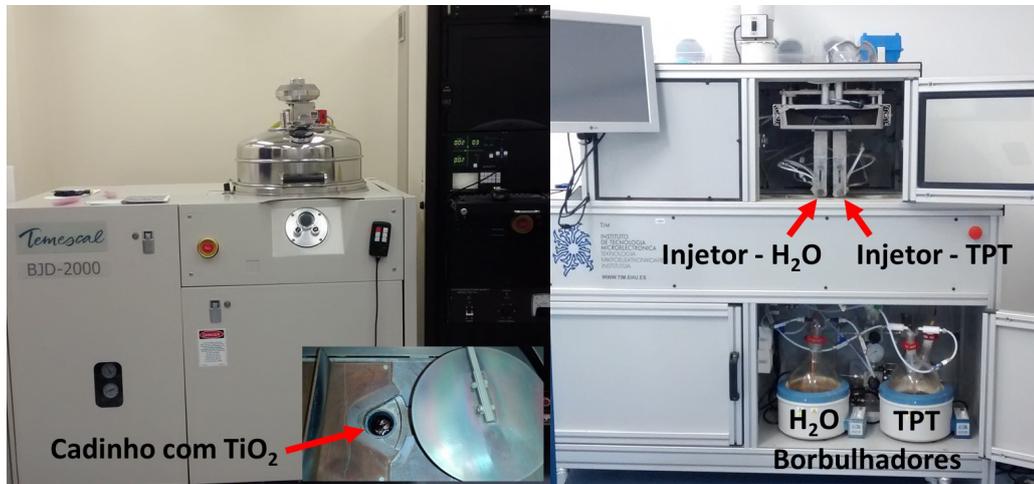


Ou por pirólise (decomposição por aquecimento) para formar TiO_2 , segundo mostra a Eq. (3):



No equipamento para deposição dos filmes de óxido de titânio, o TPT é mantido a temperatura de 80 °C a 90 °C num borbulhador. O vapor de TPT é transportado via linhas aquecidas a um injetor de aço inoxidável situado numa

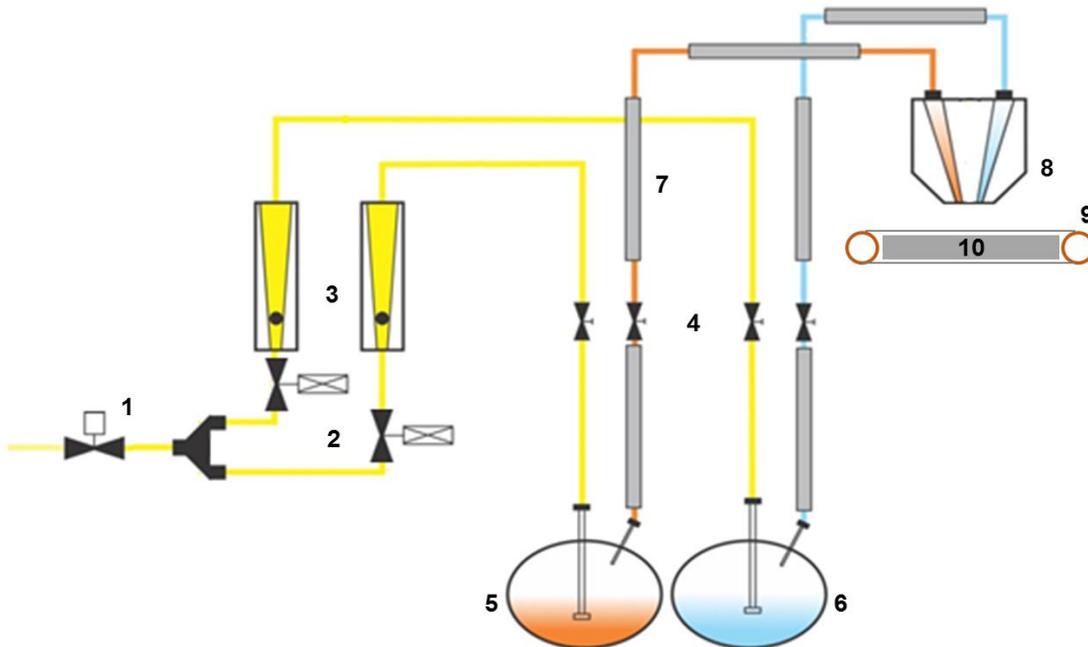
câmara. Um borbulhador contendo água deionizada é mantido a temperaturas no intervalo de 60 ° a 70 °C e assim, é usado como abastecimento de vapor de água que alimenta o outro injetor. O substrato de silício é transportado sob os bocais por meio de uma esteira que é mantida aquecida (200 °C) e com velocidade de 60 - 70 cm/min. A Fig. 1b apresenta o equipamento usado, onde podem ser vistos os borbulhadores com TPT e H₂O e os injetores dos vapores. Na Fig. 2 é apresentado um diagrama do equipamento e de suas principais partes.



(a)

(b)

Figura 1 - Equipamentos de deposição de filme AR: (a) EBPVD, mostrando o cadinho com TiO₂. e (b) APCVD, destacando os borbulhadores e os injetores de vapor.



1- Válvula de abertura da linha de N₂. 2-Válvulas de abertura das linhas de N₂. 3-Controladores digitais de vazão. 4-Válvulas de abertura dos gases de entrada e saída. 5-Borbulhador com TPT com temperatura controlada. 6-Borbulhador com H₂O com temperatura controlada. 7-Mantas aquecedoras para impedir a condensação nos tubos. 8-Injetor de deposição. 9- Esteira com velocidade controlada. 10- Placa aquecedora com temperatura controlada

Figura 2 - Esquema básico do equipamento de deposição de TiO₂ a pressão atmosférica.

2.2 Processo de fabricação das células solares n⁺np⁺

As lâminas utilizadas foram de silício monocristalino, grau solar, do tipo n, dopadas com fósforo, orientação dos planos cristalinos <100>, circulares com 100 mm de diâmetro e crescidas pela técnica Czochralski.

As etapas de fabricação de células solares n^+p^+ são apresentadas na Fig. 3, conforme processo desenvolvido no NT-Solar/PUCRS (Moehlecke e Zanesco, 2015).

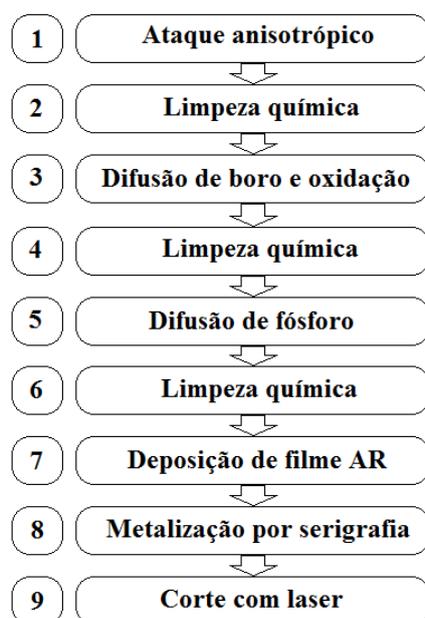


Figura 3 - Etapas do processo de fabricação de células solares do tipo n^+p^+ .

A texturação (ataque anisotrópico) da superfície de uma lâmina de silício com planos (100) foi obtida pela imersão da célula solar de silício em solução de hidróxido de potássio. Esse ataque químico tem como objetivo eliminar alguns micrômetros da superfície do material, danificado pelo processo de corte das lâminas, e também formar, na superfície, micro-pirâmides de altura em torno de 5 a 7 μm , com superfícies definidas pelos planos (111), com ângulos de $54,7^\circ$ em relação aos planos (100). A solução é composta de água deionizada ($\text{H}_2\text{O}_{\text{di}}$), hidróxido de potássio e álcool isopropílico. A temperatura da solução deve estar entre 80 e 85°C .

A limpeza foi realizada com a solução química RCA, baseada em $\text{H}_2\text{O}_{\text{di}}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$, com proporção de 5:1:1, na temperatura de aproximadamente $70^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}$. Mergulharam-se as lâminas de silício na solução por um período e depois se lavaram as mesmas com água deionizada para garantir que nenhum resíduo ficasse depositado sobre a superfície. Depois, a lâmina foi imersa em solução de ácido fluorídrico (HF), até que a mesma se apresentasse completamente hidrófoba.

Uma solução contendo boro foi depositada por *spin-on*, isto é, uma pequena quantidade de solução líquida com dopante foi colocada no centro do substrato e após este foi submetido à alta rotação fazendo com que o líquido se espalhasse uniformemente na superfície. Depois, as lâminas foram levadas a uma estufa para evaporação do solvente. Na etapa seguinte, foram introduzidas em um forno de tubo de quartzo, com temperatura e vazões de gases controladas, para difundir o boro.

Na etapa seguinte, realizou-se o ataque de óxidos pela imersão das lâminas numa solução de HF e em seguida a limpeza química RCA.

Para produzir a região n^+ (dopada com fósforo), as lâminas foram colocadas num forno de difusão com temperatura, vazões de gases e do dopante (POCl_3) controladas. Depois do processo de difusão, os silicatos de fósforo e boro foram extraídos mediante a imersão das lâminas em solução de HF e realizou-se uma limpeza química RCA.

Em um conjunto de lâminas depositou-se o filme AR por APCVD e em outro por evaporação com feixe de elétrons.

As lâminas foram metalizadas por serigrafia e após foram processadas em forno de esteira para secagem e queima das pastas metálicas depositadas. Para finalizar o processo de fabricação, realizou-se o corte a laser, deixando a célula solar num formato pseudo-quadrado de 80 mm x 80 mm, com área de $61,58\text{ cm}^2$.

2.3 Caracterização elétrica das células solares

Para caracterizar as células solares foi medida a curva de corrente elétrica em função da tensão elétrica (curva I-V) em um simulador solar. Quando uma tensão elétrica é aplicada, a corrente elétrica é medida por meio de um sistema automatizado de medição. A célula é exposta às condições padrão de irradiância de 1000 W/m^2 com espectro solar AM1,5G e mantida na temperatura de 25°C . A partir da curva I-V foram determinadas a densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}), a tensão de circuito aberto (V_{OC}), o fator de forma (FF) e a eficiência (η) com o propósito de comparar os resultados obtidos pelas duas técnicas diferentes de deposição de filme AR.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Nas Tab.1 e Tab. 2 são apresentadas as características elétricas das 22 células solares processadas, 11 com filme depositado por APCVD e 11 por *E-Beam*, respectivamente.

Tabela 1 - Características elétricas de células solares n^+np^+ com filme AR de óxido de titânio depositado por APCVD .

Célula	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
1	31,5	588,2	0,778	14,4
2	31,3	588,7	0,778	14,3
3	31,3	588,3	0,778	14,3
4	31,4	589,0	0,774	14,3
5	31,7	590,4	0,771	14,4
6	31,7	590,3	0,775	14,5
7	31,6	590,8	0,778	14,5
8	31,7	590,8	0,784	14,7
9	31,2	582,7	0,775	14,1
10	31,2	582,9	0,776	14,1
11	31,1	582,6	0,780	14,1
Média	31,4 ± 0,2	587,7 ± 3,3	0,777 ± 0,003	14,3 ± 0,2

Tabela 2 - Características elétricas de células solares com filme AR de óxido de titânio depositado por *E-Beam*.

Célula	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
1	31,4	582,5	0,749	13,7
2	31,7	585,8	0,757	14,1
3	31,7	586,4	0,759	14,1
4	31,9	586,3	0,743	13,9
5	32,4	588,2	0,760	14,5
6	32,2	588,6	0,761	14,4
7	32,3	588,6	0,763	14,5
8	32,0	587,8	0,738	13,9
9	32,1	589,1	0,747	14,1
10	32,6	590,6	0,763	14,7
11	32,8	590,8	0,758	14,7
Média	32,1 ± 0,4	587,7 ± 2,4	0,754 ± 0,009	14,3 ± 0,3

A tensão de circuito aberto média das células solares foi idêntica, demonstrando que ambas as técnicas produziram a mesma taxa de recombinação em superfície. A maior J_{SC} média apresentada pelos dispositivos com filme AR depositado por evaporação com feixe de elétrons era esperada tendo em vista o maior controle da espessura do filme depositado. Por outro lado, as células solares com TiO_2 depositado por APCVD apresentaram maior FF, resultado atribuído a uma perfuração mais eficiente deste filme pela pasta de prata usada para formar a malha metálica frontal. Esta malha, depositada sobre o filme AR, deve perfurar o filme no processo de queima das pastas metálicas a temperaturas de 840 °C a 900 °C para estabelecer o contato elétrico entre metal e semicondutor (silício).

A Fig. 4 apresenta as características elétricas das células solares mais eficientes com filme antirreflexo depositado pelas duas técnicas analisadas. Da mesma forma que o observado com valores médios dos parâmetros elétricos, as células solares com filme AR depositado por APCVD apresentaram menor J_{SC} , mas maior FF. Este comportamento é similar ao observado por Fagundes *et al.* (2014) quando foram comparadas células solares p^+nn^+ com filmes AR de TiO_2 depositados por APCVD e por *E-Beam*. Neste trabalho, os filmes AR depositados pela técnica *E-Beam* foram processados no NT-Solar/PUCRS e os depositados por APCVD foram realizados no Instituto de Microeletrônica da

Universidade do País Basco, Espanha (TiM-UPV) segundo processos próprios de deposição. O equipamento CVD para deposição de dióxido de titânio foi desenvolvido pelo TiM-UPV e também foi baseado em TPT como fonte de TiO_2 , mas em vez de usar uma esteira para movimentar a lâmina, o cabeçote com os injetores deslocava-se sobre a mesma. Desta forma, a espessura do filme é determinada pelo tempo de exposição ao composto TPT + H_2O .

A eficiência de 14,7 % foi a mesma para ambos os dispositivos n^+np^+ mais eficientes. Este valor ficou acima do obtido por Fagundes *et al.* (2014) para células solares p^+nn^+ , quando foi atingida a eficiência de 13,2 % para dispositivos com filme AR depositado por *E-Beam*. Embora a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito tenham sido maiores nas estruturas p^+nn^+ , as células solares n^+np^+ apresentadas neste trabalho atingiram FF mais alto, o que proporcionou uma eficiência 1,5 % absolutos maior.

Em virtude de as características elétricas das células solares serem similares para ambos os processos de deposição de filmes AR, a deposição de filme por APCVD seria a preferível para um processo industrial, pois o equipamento utilizado é de menor custo, não necessita operar em alto vácuo como o *E-Beam*, usa um líquido precursor (TPT) não tóxico e além disto pode ser implementado em um processo contínuo de produção, pois as lâminas são movimentadas por esteira.

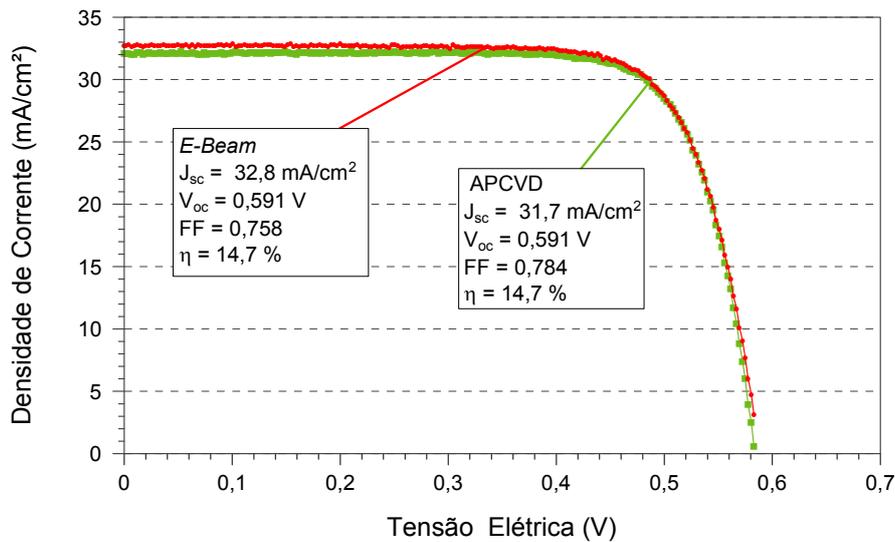


Figura 4 - Curvas J-V de células n^+np^+ com filmes AR de TiO_2 .

4. CONCLUSÕES

Foram desenvolvidas células solares em lâminas de silício tipo n com a estrutura n^+np^+ , dopadas com fósforo na face frontal e boro e alumínio na face posterior. Os dispositivos foram metalizados por serigrafia e sobre a face frontal foram depositados filmes de óxido de titânio obtidos pela técnica de deposição química sob pressão atmosférica e pela técnica de evaporação em alto vácuo com feixe de elétrons.

As melhores células solares fabricadas seguindo ambas as técnicas de produção de filmes antirreflexo apresentaram as mesmas eficiências, mas aquelas com filme obtido por APCVD demonstraram uma eficiência média mais alta, principalmente devido ao maior fator de forma obtido nestes dispositivos. A densidade de corrente de curto-circuito das células solares com TiO_2 - APCVD foi menor que daquelas com TiO_2 - *E-Beam*, o que se atribuiu a um melhor ajuste da espessura do filme com a segunda técnica, problema que poderá ser resolvido com um ajuste fino dos parâmetros do processo de deposição a pressão atmosférica. Considerando que o processo de deposição de filme AR por APCVD é um processo que pode ser contínuo e colocado em linha de produção, é o mais adequado para a produção industrial de células solares n^+np^+ .

Agradecimentos

Os autores agradecem a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), convênio nº 01.10.0020.00, Ref. 2102/09 e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

Aberle, A., 2000. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 8, pp. 473-487.

- Davis, K.O., Jiang, K., Habermann, D., Schoenfeld, W.V., 2015. Tailoring the optical properties of APCVD titanium oxide films for all-oxide multilayer antireflection coatings. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, n. 5, pp. 1265-1270.
- Fagundes, R. S., Moehlecke, A., Zanesco, I., Ly, M., Jimeno, J. C., Serrano, J.R.G., 2014. Comparação de filmes antirreflexo de TiO₂ depositados por diferentes técnicas para células solares de silício. V CBENS - V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife. 10p.
- Glunz, S. W., Rein, S., Lee, J. Y., Warta, W., 2001. Minority carrier lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, vol. 90, n. 5, pp. 2397-2404.
- Macdonald, D., 2012. The emergence of n-type silicon for solar cell manufacture. 50th Annual Conference, Australian Solar Energy Society, Melbourne, Australia, pp. 1-6.
- Moehlecke, A., Zanesco, I., 2015. Desenvolvimento de células solares eficientes em lâminas de silício tipo n. Relatório Técnico. Projeto FINEP 2102/09.
- Rahman, Z.R., Khan, S.I., 2012. Advances in surface passivation of c-Si solar cells. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, DOI 10.1007/s40243-012-0001-y, 11p.
- Richards, B.S., 2003. Single-material TiO₂ double-layer antireflection coatings. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 79, pp. 369-390.
- Richards, B.S., 2004. Comparison of TiO₂ and other dielectric coatings for buried-contact solar cells: a review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 12, pp. 253-281.
- Richards, B. S., Cotter, J. E., Honsberg, C. B., 2002. Enhancing the surface passivation of TiO₂ coated silicon wafers. *Applied Physics Letters*, vol. 80, n. 7, pp. 1123-1125.
- Schmiga, C., Rauer, M., Rüdiger, M., Meyer, K., Lossen, J., Krokoszinski, H.-J., Hermle, M., Glunz, S.W., 2010. Aluminium-doped p⁺ silicon for rear emitters and back surface fields: results and potentials of industrial n-and p-type solar cells. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Espanha, pp. 1163–1168.
- Serrano, J.R.G., 2001. Contribución al Estudio de las Características Eléctricas de Metalizaciones de Células Solares Realizadas por Técnicas Serigráficas, Tese de Doutorado, Escuela Superior de Ingenieros de Bilbao, Universidad del País Vasco, Bilbao. 301p.
- Temescal, 2000. Manual: System Evaporation Electron Beam and Filament. 10 kV, BJD2000. 150p.
- Thomson, A.F., McIntosh, K.R., 2011. Light-enhanced surface passivation of TiO₂ – coated silicon. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 20, n. 3, pp. 343-349.
- Veschetti, Y., Schutz-Kuchly, T., Manuel, S., Gall, S., Heslinga, D., 2010. High efficiency solar cells by optimization of front surface passivation on n-type rear Al alloyed emitter structure. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Espanha, pp. 2265-2267.
- Wei, Y., Li, P., Wang, Y., Tan, X., Song, C., Lu, C., Zhao, Z., Liu, A., 2015. Quality improvement of screen-printed Al emitter by using SiO₂ interfacial layer for industrial n-type silicon solar cells. *Solar Energy*, vol. 118, pp. 384-389

COMPARISON OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF N⁺NP⁺ SOLAR CELLS WITH TiO₂ ANTI-REFLECTION COATING DEPOSITED BY EVAPORATION AND CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

Abstract. *The boron doping of silicon wafers for solar cell production was established as standard in 1960 years, as a result of the initial use of these devices in space applications. However, it was demonstrated that doping with boron throughout the substrate can produce problems of degradation of electrical characteristics of the solar cells used in terrestrial applications. In addition, in the crystalline silicon n-type wafers, doped with phosphorus, higher minority carrier lifetime was observed, providing the fabrication of high efficiency solar cells. The aim of this work was to compare the electrical characteristics of n⁺np⁺ solar cells with TiO₂ anti-reflection coating (ARC) obtained by evaporation in high vacuum with electron beam (E-beam) and by chemical vapor deposition under atmospheric pressure (APCVD). The solar cells with ARC deposited by APCVD obtained higher average efficiency, due to a larger fill factor, provided by an effective etch-trough of this film by Ag metallic paste. The most efficient solar cells presented efficiencies of 14.7% for both deposition processes used.*

Key words: *Anti-reflection coating, Titanium dioxide, n-type silicon solar cells.*