

Revisão sistemática de células solares de silício base n: estruturas e eficiências

Systematic review of n-type silicon solar cells: structures and efficiencies

A. B. Vanzetto¹, A. Moehlecke^{1*}, T. Crestani¹, J. V. Z. Britto¹, I. Zanesco¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Escola Politécnica,

Núcleo de Tecnologia em Energia Solar, Av. Ipiranga 6681, 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo

Células solares com emissor e face posterior passivada (PERC, *passivated emitter and rear cell*) vêm dominando o mercado fotovoltaico em razão de seu processo de fabricação ser compatível com as linhas industriais que vinham sendo utilizadas e pela produção de dispositivos de alta eficiência. Atualmente o silício tipo p é o mais utilizado pela indústria de células solares, mas o silício tipo n deve ganhar mercado nos próximos anos juntamente com o emprego de lâminas de espessura reduzida. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sistemática dos principais estudos na área de células solares base n, sendo elas do tipo PERC, PERT (*passivated emitter-rear totally diffused*) e TOPCon (*tunnel oxide passivated contact*), com ênfase para a abordagem de contatos seletivos, emissores seletivos e nos processos utilizados, bem como na análise de células solares de espessura reduzida em relação ao padrão da indústria atual.

Palavras-chave: células solares, silício tipo n, PERC, PERT, TOPCon.

Abstract

The PERC (*passivated emitter and rear cell*) solar cells have been dominating the competitive photovoltaic market due to their manufacturing process being compatible with the industrial lines that were being used and to produce high efficiency devices. Currently, p-type silicon is the most used by the solar cell industry, but n-type silicon should gain market in the coming years along with the use of thinner wafers. This work is a systematic review that aims to find the main recent studies in the field of n-type solar cells, like PERC, PERT (*passivated emitter-rear totally diffused*), and TOPCon (*tunnel oxide passivated contact*), with emphasis on the selective contacts and selective emitters and the processes to obtain them, as well as the analysis of solar cells of reduced thickness in relation to the current industrial standard.

Keywords: solar cells, n-type silicon, PERC, PERT, TOPCon.

INTRODUÇÃO

A tecnologia fotovoltaica está em constante evolução, almejando a maior eficiência (η) de conversão de energia solar em elétrica com o menor custo de fabricação e com o aprimoramento da estrutura dos dispositivos, emprego de menor quantidade de material e rotas de processamento otimizadas [1]. O silício é o material mais usado pelos fabricantes de células solares e, conforme previsões da ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic) [2], continuará sendo o material dominante nas indústrias em 2031. Neste contexto, as células solares de silício com emissor e face posterior passivada (PERC - *passivated emitter and rear cell*) estão ganhando espaço na produção em massa de dispositivos fotovoltaicos e

devem ser predominantes nos próximos anos. Avanços em processos de fabricação, configuração do emissor e do campo retrodifusor, além de diferentes materiais para passivação das superfícies propiciaram a estas estruturas um melhor custo-benefício na produção em larga escala, tornando-as competitivas frente à estrutura convencional n⁺pp⁺ com BSF (*back surface field* ou campo retrodifusor) de Al [2]. Nas células solares PERC, as superfícies frontal e posterior dos dispositivos são recobertas com filmes finos para reduzir a recombinação de portadores de carga minoritários nestas regiões, aumentando a eficiência das células solares. O mercado mundial tanto para as tecnologias com campo retrodifusor de alumínio (Al-BSF) quanto para as PERC é dominado pelas células solares de silício base p. No entanto, para células solares produzidas em lâmina fina e de alta eficiência, que são tendência para a indústria fotovoltaica no futuro, o substrato tipo n tem maior potencialidade para uso extensivo devido à obtenção de lâminas com maior tempo de vida dos portadores minoritários e a produção de células

*moehleck@pucrs.br

<https://orcid.org/0000-0001-6616-2473>

solares bifaciais de maior eficiência e que podem converter a irradiação solar incidente em ambas as faces [3-5].

Originalmente, o dispositivo PERC não possui regiões altamente dopadas na face posterior. No entanto, Green [6] comenta que há uma ‘família’ de células solares PERC com as mais diversas formas de passivação na superfície posterior. Estas estruturas estão sendo amplamente investigadas em centros de pesquisa de empresas e universidades [7,8]. Existem duas configurações que se mostraram soluções mais viáveis entre as diversas configurações PERC [9], que são a célula solar com emissor passivado e região posterior totalmente difundida (PERT, *passivated emitter-rear totally diffused*) e o dispositivo com emissor passivado e difusão posterior localizada (PERL, *passivated emitter-rear locally doped*). Células solares com contatos posteriores interdigitados (IBC, *interdigitated back contact*) e de heterojunção com camada fina intrínseca (HIT, *heterojunction with intrinsic thin-layer*) são os dispositivos produzidos em Si tipo n e atingem altas eficiências, da ordem de 26% (HIT) a 27% (IBC) [10]. As diferenças na estrutura das células solares e no processo de fabricação destes dispositivos exigem linhas de produção com maior complexidade em comparação às linhas de células PERC do tipo p [11, 12]. Tendo em vista que a maioria das plantas industriais atuais não usa estas estruturas, este artigo de revisão centra-se em estruturas tipo PERC, PERT e TOPCon, com malha metálica em ambas as faces, estruturas que podem ser industrializadas usando as linhas de fabricação existentes.

A configuração PERT tem vantagens sobre a IBC e HIT porque é mais facilmente adaptável às plantas industriais de produção das células PERC base p (p-PERC), como

se compara na Fig. 1. Segundo Yin *et al.* [5], a principal diferença no processo de fabricação é que, enquanto o BSF para a estrutura PERC tipo p pode ser formado pela pasta de alumínio durante a etapa de queima, o BSF para a estrutura PERT base n tem de ser formado na face posterior da lâmina de Si tipo n em uma etapa térmica extra, além da formação do emissor na parte frontal. A célula PERC padrão e a PERT possuem perdas por recombinação nos contatos metálicos frontais e posteriores. Dentre as estratégias mais difundidas para reduzir a resistência de contato e a recombinação nos mesmos está a tecnologia de emissor seletivo (SE). O SE é formado por uma região com junção pn mais profunda e com alta concentração de impurezas (doadoras ou aceitadoras) em superfície sob o contato metálico e uma região na qual a junção pn é formada com menor profundidade e concentração de dopantes e que corresponde à área iluminada. A maior concentração de dopantes sob o contato metálico produz uma menor resistência de contato e a maior profundidade da junção pn proporciona uma redução da recombinação de portadores de carga minoritários nesta região. Nas regiões iluminadas, entre as trilhas metálicas, a menor concentração de dopante reduz a recombinação Auger e na superfície SRH (Shockley-Read-Hall). As tecnologias SE têm sido desenvolvidas nos últimos anos com o propósito de implementação na produção industrial em massa. Os processos aplicados para formar emissores seletivos incluem implantação iônica, ataque químico, máscara de óxido de silício, dopagem com radiação laser, entre outros. A dopagem a laser frequentemente é preferida por apresentar algumas vantagens como: 1) menor custo e maior rapidez; 2) reduzido número de etapas de processo;

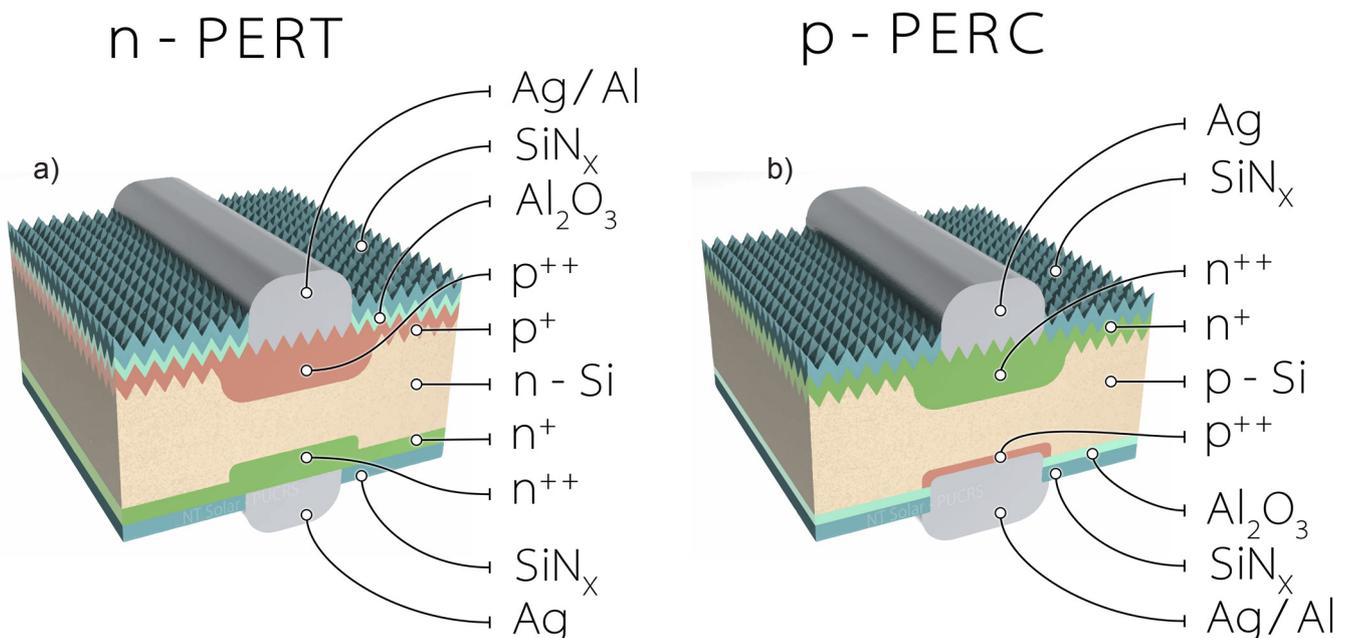


Figura 1: Seção transversal das estruturas PERT base n (a) e PERC base p (b).
[Figure 1: Cross sections of the n-PERT (a) and p-PERC (b) structures.]

e 3) possibilidade de implementação nas plantas industriais atuais. No entanto, o dano induzido pelo laser pode reduzir a eficiência da célula solar e, portanto, a influência do processo com radiação laser é um ponto de investigação [13]. O feixe laser pode induzir a fusão local da lâmina de silício e na sequência ocorrer uma solidificação, podendo gerar defeitos pontuais, discordâncias ou até microfissuras. Wu et al. [14] e Zhang et al. [15] obtiveram eficiências de conversão de energia superiores a 22% para células PERC bifaciais base p com emissor seletivo formado com laser.

Atualmente, o recorde de eficiência para células PERC base p é de 24,06%, reivindicado pela LONGi Solar [16] e de 23,21% para n-PERT [17]. Simulações numéricas indicam que se pode obter eficiência de 24,82% para a célula PERC de silício monocristalino tipo n, com tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 761 mV [18]. A V_{oc} é a tensão elétrica da célula solar para a situação sem carga conectada, isto é, quando não há corrente elétrica circulando e é a máxima tensão elétrica que um dispositivo fotovoltaico pode produzir. As células solares PERC podem ser bifaciais, isto é, converter a radiação solar incidente na face frontal e posterior. Conforme o relatório ITRPV-2021 [2], para 2031, aproximadamente 80% das células solares produzidas serão bifaciais. Estas células solares podem ser utilizadas em módulos fotovoltaicos com duplo vidro (ou vidro frontal e filme posterior transparente), permitindo a conversão da radiação solar refletida pelo entorno ou em sistemas de concentração [16].

A eficiência da célula solar PERT base n (n-PERT) convencional com estrutura p^+nn^+ é limitada pela recombinação nas regiões altamente dopadas no semicondutor e nos contatos metal/silício. Nas regiões

altamente dopadas as recombinações principais são as não radiativas Auger e por defeitos ou SRH. Como nos contatos metálicos se utiliza uma elevada concentração de dopantes na superfície da lâmina de silício para reduzir a resistência de contato, não há barreira de potencial para portadores de carga nesta região, o que implica em uma superfície de alta recombinação de portadores de carga minoritários por mecanismos SRH. Em um dispositivo com junção frontal, essas recombinações estão presentes no emissor de boro p^+ , bem como no campo retrodifusor de fósforo n^+ . A tecnologia de contato passivado atraiu considerável interesse como uma solução para este problema, a fim de atingir eficiências superiores a 24%, mantendo o uso dos equipamentos de produção existentes. A face posterior pode ser aprimorada substituindo a região n^+ por contatos com passivação seletiva de portadores de carga. A combinação de contatos passivados com óxido de efeito túnel (TOPCon - *tunnel oxide passivated contact*) na parte posterior e de um emissor p^+ dopado com boro e otimizado pode aumentar a eficiência de uma célula solar de 0,5% a 1% (absoluto), conforme descrito por Rohatgi et al. [19], resultando na eficiência de 23,8% [20]. A estrutura TOPCon típica é apresentada na Fig. 2. As células solares TOPCon são vistas como a próxima tecnologia de produção na indústria para o atual conceito PERC [21]. O potencial para obtenção de eficiência deste conceito já foi comprovado em células solares em escala de laboratório, atingindo tensões de circuito aberto de 725 mV e eficiências de conversão acima de 26%. Além disso, a implementação desta tecnologia em plantas-piloto também demonstrou resultados promissores [22, 23]. A estrutura TOPCon pode ser obtida por meio de uma camada ultrafina de SiO_2 (1-2 nm) formada com oxidação térmica ou por oxidação da superfície da lâmina de silício em soluções de ácido nítrico, seguido da deposição de uma camada de silício dopado com fósforo de 20 nm formado por deposição química em fase vapor aprimorada por plasma (PECVD, *plasma enhanced chemical vapour deposition*) ou deposição química em fase vapor em baixa pressão (LPCVD, *low pressure chemical vapour deposition*) e recozimento em alta temperatura para transformar a camada de silício em polissilício dopado [24].

Além do exposto anteriormente, a influência da espessura das lâminas de silício na eficiência da célula solar também constitui um campo de investigação para a indústria de células solares, a qual tem por objetivo para os próximos anos a redução da quantidade de material semicondutor empregado por meio da diminuição da espessura da lâmina, uma vez que seu custo tem impacto significativo no preço final do dispositivo. Segundo estudos de Peng et al. [25], com a redução da espessura da lâmina de silício dos atuais 180 para 145 μm , além de manter a eficiência da célula, ainda pode-se reduzir os custos associados à produção do substrato tipo n no valor total do dispositivo. Conforme o relatório ITRPV [2], para 2031 a projeção é de que a espessura das lâminas de Si a ser utilizada como padrão pela indústria seja de 150 μm .

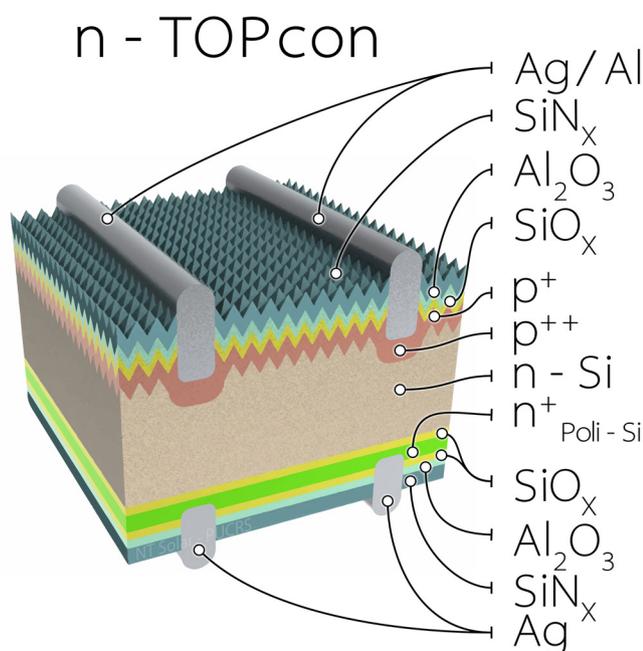


Figura 2: Estrutura da célula solar TOPCon.
[Figure 2: TOPCon solar cell structure.]

Diante disso, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sistemática da literatura relativa às células solares PERC base n, dando foco para as estratégias de emissores seletivos e lâminas de silício de espessura reduzida, visando compreender os rumos dos desenvolvimentos nesta área tanto em nível laboratorial quanto industrial.

METODOLOGIA DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática e a meta-análise têm se tornado cada vez mais pertinentes na ciência de materiais e em outras áreas científicas [26-30], sendo a revisão sistemática uma importante ferramenta para orientar os esforços de pesquisas futuras em um determinado tema. Em uma revisão sistemática, diferentemente de uma revisão simples da literatura, utilizam-se métodos sistemáticos e definidos a priori para identificar, selecionar e extrair dados do estudo, bem como apresentar e analisar seus resultados de forma objetiva e imparcial respondendo a uma pergunta de pesquisa específica [31]. Em 2015, o PRISMA (*preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses*) desenvolveu um procedimento padrão para ‘melhorar a transparência, precisão, integridade e frequência da revisão sistemática documentada e meta-análise’. Este protocolo possui 17 diretrizes que podem ser encontradas no artigo de Shamseer *et al.* [32] e é baseado em uma pesquisa científica rigorosa, permitindo a antecipação de potenciais problemas e indicando lacunas no conhecimento que podem ser exploradas pelos pesquisadores. Uma característica importante do método é documentar explicitamente o que é planejado antes da revisão, permitindo que outros pesquisadores comparem, reproduzam e julguem a validade da revisão, além de prevenir decisões arbitrárias com relação à inclusão e exclusão de dados [26].

Neste contexto, o objetivo desta revisão sistemática foi responder à seguinte pergunta de pesquisa: quais são os avanços em células solares PERC, com ênfase em substratos de silício finos (< 150 µm) tipo n e com emissores seletivos? O período de análise foi de 2018 a 2021. A pesquisa foi realizada seguindo as diretrizes metodológicas delineadas pelo PRISMA [32]. As bases de dados online consultadas foram: Scopus (www.scopus.com), Science Direct (www.sciencedirect.com) e IEEE Xplore (<https://ieeexplore.ieee.org>). Os termos de pesquisa foram: [PERC solar cells] e [n-type] ou [selective emitter] ou [thin wafer]). Foram analisados os artigos dentro do prazo definido e em língua inglesa. Foram removidos artigos de revisão, trabalhos de congressos, artigos duplicados e artigos que se enquadraram nos critérios de exclusão, a saber: trabalhos que não utilizavam silício como material semicondutor, estruturas de células solares com heterojunção e análise técnico-econômica. Considerando as células solares TOPCon como um avanço à tecnologia PERC, foram incluídos também os trabalhos encontrados com esta estrutura produzidos em substratos de Si do tipo n.

RESULTADO DA COLETA DOS DADOS

O resultado da coleta de dados é apresentado no fluxograma da Fig. 3 conforme os requisitos do PRISMA e ilustra o número de estudos identificados, incluídos e excluídos (juntamente com a justificativa). Foi encontrado um total de 250 trabalhos, sendo 66 na base de dados Scopus, 75 na Science Direct e 109 na IEEE Xplore no período de 2018-2021. Foram removidos 24 artigos por estarem em duplicidade, resultando num total de 226 artigos não duplicados encontrados. Estes artigos foram analisados e classificados em elegíveis (94), excluídos por não atenderem aos critérios de busca (18), artigos de revisão (15) e outros artigos que se enquadraram no critério de exclusão (99). Também foram removidos dos artigos elegíveis, após análise, aqueles que não utilizaram substrato de silício tipo n (33) e artigos que realizaram outros tipos de análise ou não apresentaram resultados de células solares completas, realizando apenas análises da passivação ou medidas de outros parâmetros das lâminas de silício durante o processamento, ou ainda que propunham estruturas de células solares não contempladas nesta revisão (13). Assim, um total de 48 artigos foram avaliados e seus resultados incluídos nesta revisão. As principais descobertas são apresentadas e discutidas, e as oportunidades são identificadas, abrindo espaço para novas investigações a serem exploradas.

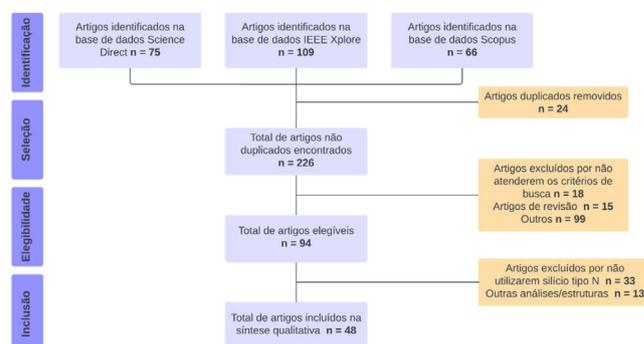


Figura 3: Fluxograma de revisão sistemática, de acordo com o protocolo PRISMA.

[Figure 3: Systematic review flowchart, according to PRISMA protocol.]

Os artigos incluídos na síntese qualitativa têm suas informações apresentadas nas tabelas a seguir, conforme o tipo de estrutura. São relatados o tipo de substrato, espessura da lâmina de silício e área da célula solar, configuração do emissor e do campo retrodifusor, materiais utilizados para passivação e formação dos contatos metálicos e a eficiência. Os itens das tabelas foram escolhidos com o objetivo de caracterizar as estruturas propostas e no que estas se diferenciam do estado da arte em nível laboratorial e industrial. A área do dispositivo foi destacada como relevante, uma vez que se relaciona com a eficiência e com o quanto os resultados obtidos podem

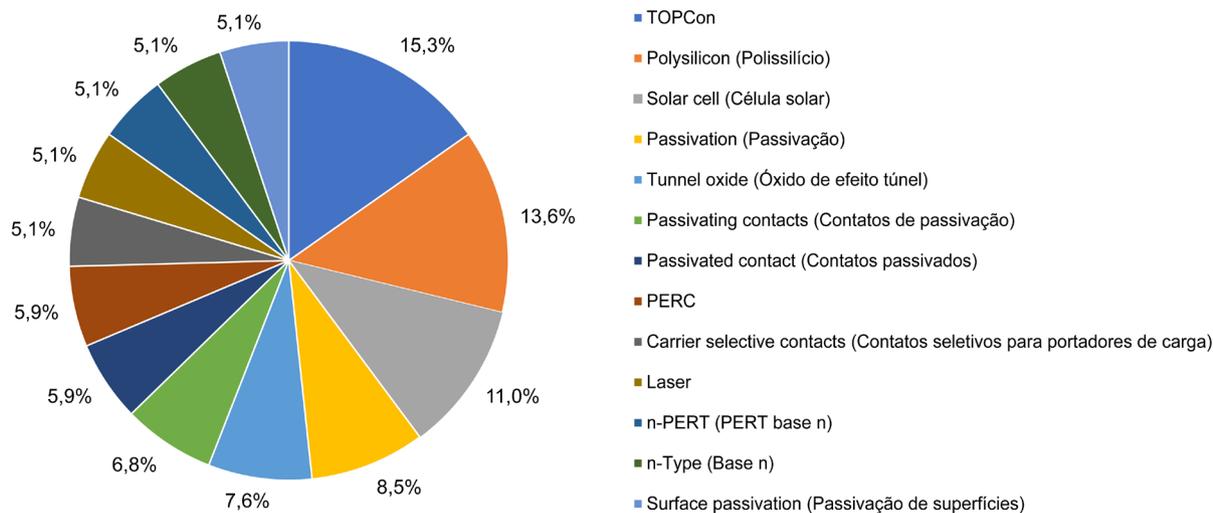


Figura 4: Palavras-chave com maiores ocorrências nos estudos avaliados.
 [Figure 4: Keywords with higher occurrences in the evaluated studies.]

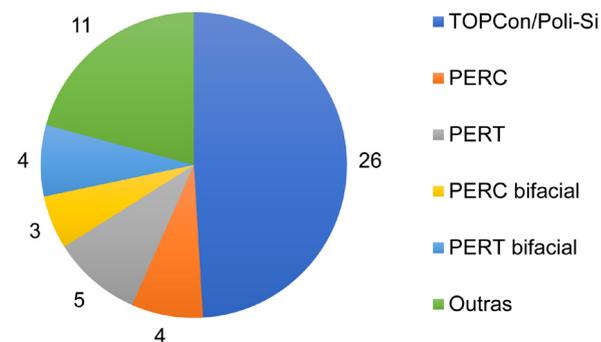


Figura 5: Número de trabalhos encontrados na revisão sistemática por tipo de estrutura de célula solar.
 [Figure 5: Number of studies found in the systematic review by structure type of solar cells.]

ser extrapolados para a escala industrial. O resultado do levantamento das palavras-chave presentes nos artigos avaliados é mostrado na Fig. 4, na qual se observa que, com exceção de ‘solar cell’, as palavras-chave com maior incidência foram: ‘TOPCon’, ‘polysilicon’, ‘passivation’ e ‘tunnel oxide’. A respeito das estruturas, os resultados dos trabalhos são mostrados na Fig. 5. Foram encontrados 29 trabalhos que desenvolveram células solares TOPCon com camada de polissilício (poli-Si), 7 artigos que tratam de dispositivos PERC (3 bifaciais), 9 de células solares PERT (4 bifaciais) e 3 artigos que desenvolveram células solares classificadas aqui na categoria ‘outras’ (POLO, monoPoly e Poly-Ox). Na Fig. 6 estão esquematizadas de forma simplificada as secções transversais típicas destas estruturas de células solares.

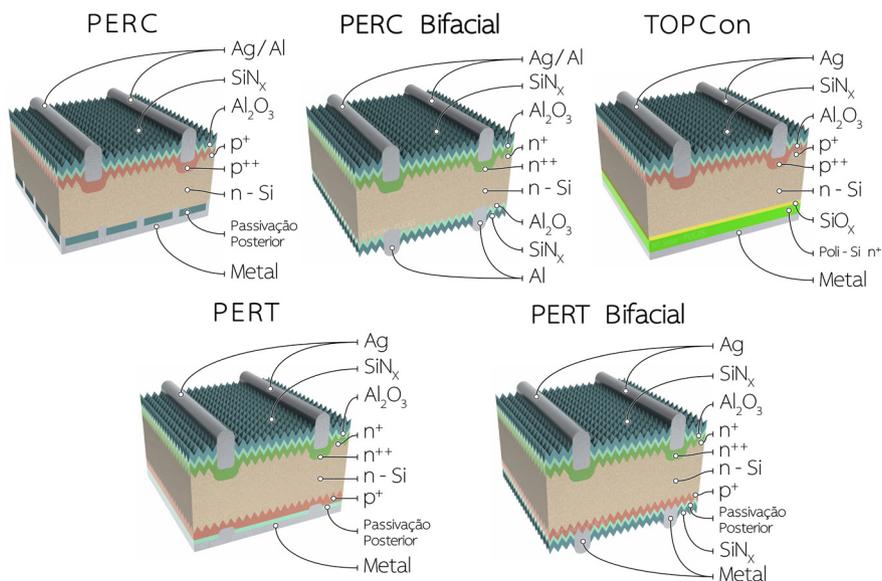


Figura 6: Diagrama da seção transversal de cada estrutura estudada.
 [Figure 6: Cross-sectional diagram of each studied structure.]

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Células solares PERC base n

Os resultados dos trabalhos encontrados de células solares com estrutura PERC, que foram incluídos nesta revisão conforme os critérios de inclusão e exclusão, são mostrados na Tabela I e os principais resultados são discutidos. Boukourt e Hadri [9] apresentaram uma comparação entre a tecnologia de células n-PERC bifaciais e n-PERC padrão por meio de simulações, usando a ferramenta computacional TCAD da Silvaco. O TCAD permite a simulação dos dispositivos em duas dimensões, o que é relevante para estruturas tipo PERC. Foi investigada a influência da resistência de contato e da temperatura nos parâmetros elétricos dos dispositivos. A dependência dos parâmetros elétricos como J_{SC} (corrente de curto-circuito), V_{OC} (tensão de circuito aberto), FF (fator de forma), $P_{máx}$ (potência máxima) e η (eficiência) investigada na faixa de 25-100 °C, considerando o albedo de 20%. A investigação do uso dos parâmetros e condições de operação sugeridos para o dispositivo levou à obtenção de 26,97% de eficiência para a célula PERC bifacial base n, com V_{OC} de até 763 mV. Lelièvre *et al.* [33], em 2019, demonstraram as excelentes propriedades ópticas e de passivação de filmes finos de $SiN_x:H$ depositados em um reator de deposição química em fase vapor aprimorada por plasma em pressão atmosférica em escala de laboratório (AP-PECVD - *atmospheric pressure plasma enhanced chemical vapour deposition*).

Os filmes apresentaram boa estabilidade térmica e baixo coeficiente de absorção, evidenciando que podem atuar como filme antirreflexo (AR) eficientes. Além disso, excelentes propriedades de passivação superficial foram alcançadas após processos térmicos a alta temperatura, tanto em substratos tipo n com dopagem p^+ homogênea quanto em emissores seletivos altamente dopados. Os filmes finos foram testados em células solares PERC industriais, sendo demonstrado o potencial de aplicação dessas camadas como passivação na parte posterior e filme antirreflexo na parte frontal. As primeiras células solares PERC de 40x40 mm com camadas de $SiN_x:H$ obtidas por AP-PECVD tiveram eficiências de conversão de até 20,6%. Este processo de obtenção de filmes de $SiN_x:H$ poderia ser introduzido em linhas industriais, obtendo-se uma camada de passivação e filme AR de baixo custo e alto rendimento.

Allebé *et al.* [34] apresentaram estudos para compatibilizar o uso de contatos passivados seletivos à base de poli-Si em linhas industriais, como substituição dos filmes passivadores convencionais usados na face posterior de células solares PERC e PERT. Por meio da técnica de PECVD, que possibilita alterar as propriedades elétricas, microestruturais e composicionais das camadas depositadas ajustando o processo de plasma, desenvolveram camadas de filmes finos que são ativados termicamente durante um curto recozimento, como normalmente é feito na queima da pasta metálica ou durante um recozimento mais longo, como para a difusão dos dopantes. Para a implementação de um contato passivado para células solares p-PERC, foram desenvolvidas

Tabela I - Resultados dos trabalhos em células solares com estrutura PERC base n.

[Table I - Results from the papers about n-PERC structure.]

Substrato/espessura (μm)/área (cm^2)	Emissor	BSF	Passivação	Metalização	η (%)	Ref.
Cz tipo n/210/-	p^+ frontal	n^+ (sob passivação); n^{++} seletivo arsênio (sob contatos)	Frontal: Al_2O_3/SiN_x ; posterior: SiO_2/SiN_x	Eletrodeposição de Al	26,97	[9]*
Cz tipo n 6,4 $\Omega\text{.cm}/160/16$	-	-	$SiN_x:H$	Serigrafia	20,2	[33]
Cz tipo n 2 $\Omega\text{.cm}/-/244$	p^+ (B) frontal	-	Superfície: AlO_x/SiN_x ; contatos posteriores: SiO_x/SiC_x (n)	Serigrafia; frontal: Ag/Al; posterior: Ag	22,5	[34]
Cz tipo n 1 $\Omega\text{.cm}/180/244$	p^+ (B) frontal	-	SiN_x/Al_2O_3	Serigrafia Ag/Al	23,1	[37]
Si tipo n/170/244	-	-	$SiN_x MgF_2 TiO_2$	-	22,1	[38]*
Cz tipo n 0,5-2 $\Omega\text{.cm}/180/-$	p^+ bifacial	n^+ bifacial	Al_2O_3/Si_3N_4	Frontal Ag; posterior Al/Cu	20,7 frontal; 16,5 posterior (20,8-16,5 exp.)	[35]*
Cz tipo n 2 $\Omega\text{.cm}/-/-$	P^+ posterior	n^+ frontal	Al_2O_3/SiN_x	Serigrafia	24,1	[36]*

*: simulação; (-) informação não disponível.

camadas seletivas para lacunas e ativadas durante o recozimento. Para o lado posterior da célula n-PERT, foram desenvolvidas camadas seletivas para elétrons, também ativadas durante o recozimento. Em ambas as abordagens, os átomos de carbono são adicionados à rede cristalina de Si para retardar a difusão externa (*out-diffusion*) de hidrogênio a uma temperatura mais alta, formando camadas de carbeto de silício dopado com fósforo [SiC_x (n)] ou boro [SiC_x (p)]. Neste trabalho [34], os autores apresentam tanto a otimização dos contatos passivados na face posterior quanto sua aplicação em células solares. Valores de V_{oc} implícitos (estimados a partir da medida do tempo de vida dos portadores de carga minoritários) de até 730 mV foram obtidos em estruturas apresentando camadas de SiC_x (p) submetidas a recozimento curto, e acima de 750 mV para aquelas apresentando SiC_x (n) submetidas a recozimento longo. Estes contatos foram implementados em células industriais do tipo PERC/PERT. Os primeiros testes de integração de SiC_x (p) em PERC como célula com emissor de fósforo frontal levou a V_{oc} de 686 mV e eficiência de conversão de até 21,7% em substratos de Si Cz (Czochralski) tipo p de 156x156 mm. A integração de SiC_x (n) em dispositivos PERT com um emissor frontal de boro levou a V_{oc} de 691 mV e eficiência de 22,5% em Si Cz tipo n de 156x156 mm. A Fig. 7 ilustra a configuração desta estrutura.

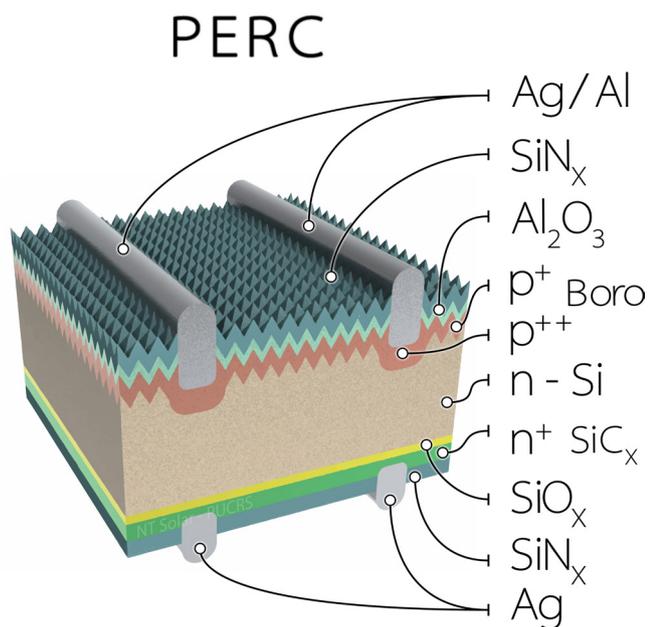


Figura 7: Diagrama da célula solar PERC com contatos passivados na face posterior e baseados em $\text{SiO}_x/\text{SiC}_x$ (n).

[Figure 7: Diagram of PERC solar cell with passivated contact on the rear face and based on $\text{SiO}_x/\text{SiC}_x$ (n).]

Sugiura et al. [35] avaliaram células PERC bifaciais fabricadas com silício Cz tipo p e n. Compararam quatro condições de irradiância solar: somente frontal com a célula solar sobre uma plataforma metálica; frontal com a célula solar sem a plataforma de medida posterior (contato por barras coletoras); posterior com o dispositivo sem a plataforma (contato por barras coletoras); e bifacial. Além disso,

foram avaliados os efeitos da área de contato posterior e da velocidade de recombinação da superfície na face posterior. Os resultados mostraram que a passivação posterior determinou qual a resistividade de base ótima segundo o tipo de dopante. Para o silício tipo n, a resistividade de base ótima seria de $1 \Omega \cdot \text{cm}$. Kruse et al. [36] apresentam um estudo baseado em simulação para identificar estruturas de células solares que integram poli-Si e óxido de efeito túnel em células industriais. As simulações usaram parâmetros de entrada medidos para determinar as eficiências. Também discutiram os principais desafios do processamento industrial dessas estruturas. Relataram que as estruturas baseadas em lâminas de Si tipo p em que a difusão do fósforo é substituída por poli-Si tipo n sobre óxido (POLO - *poly-silicon on oxide*) em combinação com os contatos convencionais de Al produzidos por serigrafia e queimados mostram um potencial de alta eficiência. Os ganhos de eficiência em comparação com a eficiência de 23,7% simulada para o caso da célula de referência PERC são 1,0% (absoluto) para a estrutura POLO BJ (junção posterior) e 1,8% (absoluto) para a estrutura POLO IBC. As células POLO BJ podem ser fabricadas com processo similar ao atualmente utilizado na fabricação de células solares PERC, com contatos de Al produzidos por serigrafia e a passivação de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$. Os conceitos de células com contatos de poli-Si para ambas as polaridades (conceitos POLO^2) mostram um potencial de ganho de eficiência de 1,3% (absoluto) para a célula POLO^2 BJ e 2,2% (absoluto) para a célula POLO^2 IBC em comparação com o dispositivo PERC convencional. Para estas estruturas, pesquisas adicionais sobre estruturação de poli-Si e serigrafia em poli-Si tipo p são necessárias. As células solares POLO^2 BJ base n apresentaram eficiência de até 25,1%, sendo que foi considerado um maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários para este tipo de substrato quando comparado com o tipo p. A estrutura POLO^2 BJ em silício tipo n pode ser visualizada na Fig. 8.

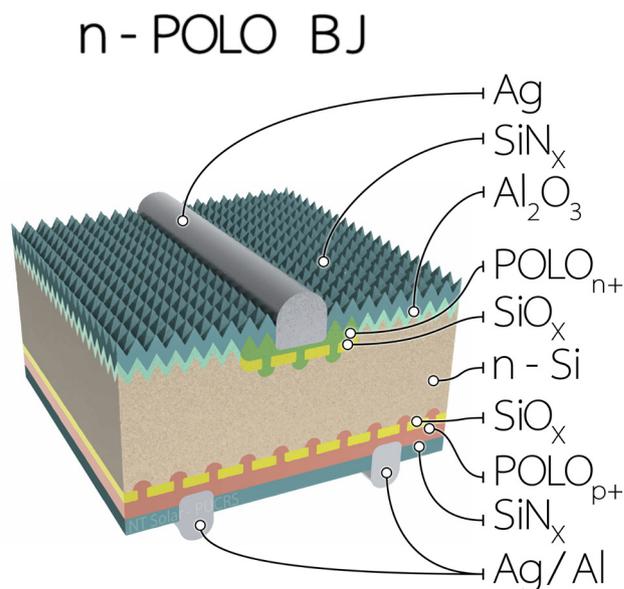


Figura 8: Estrutura POLO^2 BJ em silício tipo n.
[Figure 8: POLO^2 BJ structure in n-type silicon.]

Células solares PERT base n

Dentre as configurações de células solares da família PERC, a configuração PERT é a mais desenvolvida e relatada na literatura utilizando substratos tipo n. Os trabalhos encontrados com estrutura PERT incluídos nesta revisão têm seus resultados expostos na Tabela II e seus principais resultados destacados. Yin et al. [5] demonstraram uma sequência de processamento simples para fabricar células solares de silício bifaciais base n, em que o emissor dopado com boro e o campo retrodifusor dopado com fósforo são formados em uma única etapa em alta temperatura, sendo adicionada apenas uma etapa ao processo principal para a deposição de vidro de borossilicato (BSG - *borosilicate glass*) e SiO_x por deposição química em fase vapor à pressão atmosférica (APCVD - *atmospheric pressure chemical vapour deposition*) em comparação com o fluxo de processos das células PERC tipo p comerciais. A concentração de boro no BSG e a influência do oxigênio na difusão do boro foram investigadas. A densidade de corrente de saturação do emissor p^+ e do BSF n^+ formado por tal processo de codifusão foi estudada em função de diferentes condições de dopagem. A fim de reduzir a alta densidade de corrente de saturação do BSF homogêneo fortemente dopado, o

chamado BSF seletivo, que é semelhante ao conceito de emissor seletivo, foi implementado utilizando o método de dopagem com radiação laser para formar áreas mais dopadas sob os contatos metálicos, enquanto foram mantidas as regiões não contatadas moderadamente dopadas. Eficiências de conversão médias de 21,7% e um valor máximo de 21,9% foram obtidas para células solares de dimensões industriais (156,75x156,75 mm).

Shanmugam et al. [12] investigaram células PERT base n com emissor seletivo posterior de boro e campo retrodifusor frontal (FSF - *frontal surface field*) de fósforo obtido por implantação iônica. A célula n-PERT foi formada com a mesma sequência de passivação de superfície, ablação por laser local na face posterior e metalização por serigrafia da célula PERC base p comercial. Portanto, é interessante do ponto de vista industrial, pois poderia simplificar uma atualização da linha de produção de células base p para base n. Além disso, a implantação iônica possibilita a dopagem em um único lado da lâmina de Si que simplifica ainda mais a sequência de processamento de células solares n-PERT. Também possibilita melhor controle sobre o perfil de dopagem pela variação do tempo de recozimento após a implantação iônica. O efeito do tempo de recozimento na face com fósforo implantado foi avaliado neste estudo em

Tabela II - Resultados dos trabalhos em células solares com estrutura PERT base n.

[Table II - Results from papers about n-PERT structure.]

Substrato/espessura (μm)/área (cm^2)	Emissor	BSF	Passivação	Metalização	η (%)	Ref.
Cz tipo n 3-5 $\Omega\cdot\text{cm}/-/244$	p^+ (B) posterior	n^+ (P) frontal	Frontal: SiN_x ; posterior: $\text{AlO}_y\text{-SiN}_x$	Serigrafia	21,0	[12]
Cz tipo n 0,9 a 5,4 $\Omega\cdot\text{cm}/180/244$	p^+ (B)/ p^{++} (Al) posterior	n^+ (P) frontal	$\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$	Serigrafia; frontal: Ag; posterior: Al	21,6 frontal; 15,8 posterior	[39]
Cz tipo n 4 $\Omega\cdot\text{cm}/180/232$	p^+ (B/Al) posterior	n^+ (P) frontal	SiN_x (LCO-passivação posterior)	Serigrafia; frontal: Ag; posterior: Al	22,2	[25]
Cz tipo n 4-5 $\Omega\cdot\text{cm}/190/244$	p^+ (B) frontal	n^+ (P) posterior	SiN_x	Serigrafia	21,4	[40]
mC-HP tipo n/190-200/16	p^+ (B) bifacial	n^+ (P)	SiN_x	-	21,0	[41]*
Cz tipo n/84/244	p^+ (B)	n^+ (P)	Frontal: $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$; posterior: SiN_x	-	20,1	[42]
Cz tipo n 1-5 $\Omega\cdot\text{cm}/180/244$	p^+ (B) posterior	n^+ (P)/ n^{++} (P) frontal	Frontal: SiN_x ; posterior: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$	Serigrafia; frontal: Ag; posterior: Al	21,5	[4]
Cz tipo n 2 $\Omega\cdot\text{cm}/-/244$	p^+ (B)	n^+ (P)/ n^{++} (P) posterior	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: SiN_x	Serigrafia; frontal: Ag/Al; posterior: Ag	21,0	[5]
Cz tipo n 2 $\Omega\cdot\text{cm}/170/-$	p^+ (B)/ p^{++} (B) frontal	n^+ (P) posterior	$\text{SiN}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$	Serigrafia	21,0	[20]

*: simulação.

Tabela III - Resultados de publicações de células solares com a estrutura n-TOPCon.
[Table III - Results from papers about n-TOPCon structure.]

Substrato/espessura (μm)/área (cm^2)	Emissor	BSF	Passivação	Metalização	η (%)	Ref.
Cz tipo n 0.2-2 $\Omega\text{.cm}/170/4$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: SiO_x	Frontal: Cr/Pd/Ag evaporação com canhão de elétrons; posterior: evaporação térmica Ag	21,1	[23]
Cz tipo n 1-3 $\Omega\text{.cm}/180/103$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: poli-Si	Frontal: Ti/Pd/Ag; posterior: Ag	20,7-21,0	[43]
FZ tipo n/250/4	p ⁺ poli-Si posterior	n ⁺ poli-Si frontal	SiO_x	Evaporação térmica; frontal: Ti/Pd/Ag; posterior: Ag	19,2 sim.; 21,5 exp.	[44]
Cz tipo n 3-6 $\Omega\text{.cm}/170/244$	p ⁺ poli-Si (B)	n ⁺ (P)	ALD $\text{AlO}_x/\text{SiO}_x$ (superfície); $\text{AlO}_x//\text{SiN}_x$ (contatos)	Frontal: serigrafia; posterior: serigrafia e evaporação térmica	23,2 sim.; 20,5 exp.	[45]
Cz tipo n 2 $\Omega\text{.cm}/200/239$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: tunnel oxide/poli-Si/ SiN_x	Serigrafia	21,6	[46]
Tipo n/180/-	-	n ⁺ poli-Si	SiO_2 ultrafino	-	-	[47]
FZ tipo n/280/103	p ⁺ poli-Si posterior	poli/n a-Si: H	Frontal: borossilicato; posterior: SiO_2	Frontal: evaporação por feixe de elétrons Al; posterior: evaporação térmica Ag/Cr/Al	21,0	[48]
FZ tipo n 1 $\Omega\text{.cm}/-/4$	p ⁺ /p ⁺⁺ (B) frontal	n ⁺ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: SiO_2 (~1,5 nm)	Frontal: fotolitografia; posterior: evaporação térmica Ag	22,0	[19]
Cz tipo n ~3 $\Omega\text{.cm}/170/244$	p ⁺ poli-Si	-	SiO_x AlO_x :H	Evaporação térmica Al	-	[49]
Cz tipo n 1-5 $\Omega\text{.cm}/200/-$	-	n ⁺ poli-Si	SiO_x	Serigrafia	24,3	[50]
FZ tipo n 3 $\Omega\text{.cm}/180/-$	p ⁺ (Al)	n ⁺ poli-Si	$\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$	Serigrafia	19,7	[51]
Tipo n/-/-	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	SiO_2 SiN_x :H	Serigrafia	-	[52]
Quase-mono tipo n 1.4 $\Omega\text{.cm}/167/246$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Óxido de túnel interfacial (SiO_2)/ SiN_x	Frontal: Ag/Al; posterior: Ag	23,2	[53]
Cz tipo n 5 $\Omega\text{.cm}/180/244$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Óxido de túnel interfacial (SiO_x)	Serigrafia; frontal: Ag/Al; posterior: Ag	23,5	[54]
Cz tipo n 0.5-2 $\Omega\text{.cm}/180/244$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: SiO_x	Screen-printed Ag	22,4	[55]
Cz tipo n 1-3 $\Omega\text{.cm}/180/4$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	SiO_2	Evaporação por canhão de elétrons e eletrodeposição (frontal)/evaporação térmica (posterior)	23,0	[56]
Cz tipo n 5 $\Omega\text{.cm}/180/9$	p ⁺ (B) posterior	n ⁺ poli-Si/ITO frontal	Frontal: SiO_2 ; posterior: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$	Evaporação térmica Ag	20,2	[57]
Cz tipo n 3 $\Omega\text{.cm}/180/4$	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: SiO_x	Frontal: Ti/Pd/Ag; posterior: Ag	21,0	[58]

FZ tipo n 500 Ω .cm/298/-	-	-	SiN_x	-	-	[59]
FZ tipo n 500 Ω .cm/298/-	-	-	SiN_x	-	-	[60]
Cz tipo n/-/4	Camada a-Si:H dopado com B	SiH_4 , B_3H_6 , H	Interno: SiO_2 ; externo: SiN_x	Evaporação térmica Ti/Ag	-	[61]
Tipo n 3.2 Ω .cm/190/-	-	n^+ poli-Si	Interno: óxido de túnel interfacial; externo: SiN_x	-	-	[62]
Tipo n 2.8 Ω .cm/180/244	p^+ (B)	n^+ poli-Si	Frontal: $\text{SiN}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$; posterior: iO_x/SiN_x	Evaporação Al	-	[63]
Cz tipo n 3.4 Ω .cm/-/228	p^+ poli-Si	n^+ (P)	AlO_x	-	-	[64]
Cz tipo n 1.2 Ω .cm/180/244	p^+ (B)	n^+ poli-Si	Frontal: SiN_x ; posterior: SiO_x	Evaporação térmica Ag	27,9 sim.	[65]
Cz tipo n/-/239	p^+ (B)	n^+ poli-Si	Frontal: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$; posterior: Al_2O_3	Frontal: serigrafia; posterior: evaporação Ag	20,8	[66]
Cz tipo n 3 Ω .cm/180/196	p^+ poli-Si	n^+ poli-Si	Interno: iO_x ; externo: SiN_x ; ITO	Serigrafia: SiN_x /cura ITO	19,6	[67]
Cz tipo n 1.2 Ω .cm/180/244	p^+ (B)	n^+ (P)	Frontal: p^+ poli-Si/ AlO_x ; posterior: n^+ poli-Si/ SiO_x	Serigrafia; frontal: Ag/Al; posterior: Ag	22,0	[68]
Cz tipo n 1-3 Ω .cm/170/-	p^+ poli-Si (B)	n^+/n^{++} frontal	Frontal: $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$; posterior: SiO_2 ultrafino	Evaporação com canhão de elétrons	26,0	[69]

termos do perfil de dopante no campo retrodifusor frontal e seu impacto nas características elétricas das células solares. O perfil de dopagem do FSF mais raso resultou em melhor eficiência quântica em comprimentos de onda curtos, aumentando a J_{sc} em 0,2 mA/cm² quando comparado com o FSF mais profundo. Além disso, o desempenho de duas pastas diferentes de Al (com e sem teor de Si) foi comparado. A pasta de Al-Si apresentou o melhor resultado e gerou uma região Al- p^+ homogênea sob os contatos, que reduziu a recombinação, aumentando o V_{oc} em 15-20 mV em relação às células solares com a pasta somente de Al. Ao adaptar os perfis do campo retrodifusor frontal do fósforo e minimizar a recombinação durante a formação de contato de Al na face posterior, eficiências de até 21% foram alcançadas em lâminas de Si tipo n de área de 244 cm².

Peng *et al.* [25] apresentaram células solares n-PERT-RJ (junção posterior) com malha metálica depositada por serigrafia em ambas as faces, atingindo V_{oc} de 693 mV e eficiência superior a 22%. Para a abertura de contato a laser foi utilizado o conceito de ‘ponto-linha’ que, juntamente com a grade metálica de Al, visa produzir ganho bifacial, preservar o alto V_{oc} e reduzir o consumo de Al. Os autores explicam porque a estrutura com dopagem seletiva para o FSF não traz benefícios, apenas aumentando a complexidade e o custo do processo. Além disso, simularam o impacto de diferentes parâmetros da lâmina de silício na eficiência da célula solar n-PERT-RJ: resistividade, tempo de vida dos portadores

de carga minoritários e espessura. Verificaram que para resistividade de base entre 1-13 Ω .cm obtêm-se eficiências similares com o processo proposto. Além disso, os autores indicam que a redução da espessura da lâmina de Si para cerca de 145 μm não apenas mantém a eficiência da célula, mas também pode compensar o custo mais alto do Si tipo n. Os autores concluem que as células solares n-PERT-RJ têm alta eficiência, baixo custo, processo simples e estabilidade a longo prazo comparável às células solares p-PERC com emissor seletivo. Ainda em células PERT, Comparotto *et al.* [39] apresentaram o desenvolvimento de células solares n-PERT-RJ bifaciais com metalização por serigrafia. Os resultados alcançados foram: eficiência de conversão de 21,6% (iluminação pela face frontal) com V_{oc} acima de 680 mV e bifacialidade de 73%. Ao aumentar a distância entre as trilhas metálicas na face posterior, as simulações mostraram que a bifacialidade pode ser aumentada para 77% sem perda na eficiência na face frontal. As simulações revelaram baixa dependência da eficiência frontal com a resistividade de base para valores superiores a 2 Ω .cm, o que implica que lingotes inteiros com uma faixa de dopagem desta ordem em todo o comprimento podem ser usados na produção em massa de células solares base n.

Células solares TOPCon

A estrutura TOPCon é um avanço em relação

aos dispositivos da família PERC. Na Tabela III são apresentados os principais resultados de células solares com esta estrutura. A aplicação do óxido de efeito túnel SiO_x /poli-Si dopado foi inicialmente investigada na tecnologia de transistores. Sua aplicação em células solares foi introduzida por Green et al. [10] no início dos anos 80 e, em 2009, foi industrializada. Células solares com contatos seletivos para portadores de carga são estruturas que podem coletar seletivamente elétrons e lacunas através de barreiras de potencial. As camadas de contato seletivas de portadores de carga são formadas pela deposição de uma camada de poli-Si altamente dopado sobre um óxido crescido no substrato de silício. A alta concentração de dopantes no poli-Si proporciona uma condutividade assimétrica, o que aumenta o transporte de um tipo de portador de carga para o contato enquanto suprime a movimentação do outro. A camada de óxido atua como uma barreira de difusão para o dopante, reduzindo o transporte de portadores de carga minoritários e a recombinação destes. Cabe comentar que um contato seletivo, para proporcionar um aumento na eficiência da célula solar, requer uma estrutura otimizada considerando a resistência de contato e a recombinação [19, 50]. Tong et al. [43] desenvolveram um método químico para crescer uma camada de óxido de silício (SiO_x) de alta qualidade usando uma combinação de ácidos denominada ácido CNS (nitríco e sulfúrico concentrado). Em comparação com o ácido nítrico, o ácido CNS forma uma camada de SiO_x de alta qualidade a 60 °C, onde a temperatura relativamente baixa evita a volatilização do ácido e mantém sua qualidade durante o processo. Os resultados comprovaram que o SiO_x produzido a partir de CNS beneficia a passivação da superfície da estrutura de contato passivado de polissilício tipo n. Foi obtido um ganho médio de iV_{oc} (tensão de circuito aberto estimada a partir da medida de tempo de vida dos portadores minoritários) de 2-10 mV e uma redução da corrente de saturação (J_0) de 1-7 fA/cm². Além disso, em comparação com o ácido nítrico a 90 °C, o CNS a 60 °C apresentou melhor estabilidade e repetitividade para crescer o SiO_x durante o processo. O SiO_x produzido com CNS em combinação com a camada de polissilício produziu um aumento médio da eficiência da ordem de ~0,15%.

As células solares TOPCon também têm sido propostas para células solares tandem com estrutura perovskita, atuando como célula inferior, e com isso alcançando elevados valores de eficiência [70]. Rohatgi et al. [19] produziram uma célula n-TOPCon para ser usada como célula inferior em estruturas tandem com células de perovskitas semitransparentes. As células de junção frontal de pequena área (4 cm²) foram fabricadas em lâminas de Si-FZ tipo n com emissor seletivo de boro na frente e contato passivado de poli-Si/ SiO_x na parte posterior. O óxido de efeito túnel ultrafino (~15 Å) foi produzido em solução de ácido nítrico e, em seguida, uma camada de a-Si dopado com fósforo foi depositada na face posterior usando um reator PECVD. As amostras foram recozidas a 875 °C para ativação do fósforo e cristalização da camada de a-Si. Após, uma camada de 100 Å de Al_2O_3 foi formada na face com o emissor de boro por deposição por

camadas atômicas (ALD, *atomic layer deposition*) a 200 °C e recoberta com uma camada de SiN_x de 50 nm de espessura, depositada por PECVD. A malha frontal foi definida por fotolitografia e foi obtida por deposição de Ag em alto vácuo seguida de crescimento eletrolítico. Na face posterior, foi depositada Ag por evaporação em alto vácuo. A eficiência obtida foi de 22,0% com V_{oc} de 702 mV, J_{sc} de 39,2 mA/cm² e FF de 80,1%. Como célula inferior da estrutura tandem, a célula solar TOPCon alcançou eficiência de ~9% sob uma irradiância filtrada pela célula perovskita. Considerando que a célula perovskita semitransparente atingiu a eficiência de 17,8%, a eficiência das duas células solares combinadas foi de 26,7%.

Nicolai et al. [44] realizaram simulações com uso de dados experimentais com o objetivo de compreender as propriedades elétricas de células solares de silício com emissor frontal e contatos seletivos de Si-poli/ SiO_x . As simulações mostraram a possibilidade de obtenção de eficiências de conversão superiores a 23% e que o uso de estruturas com junção pn na face posterior permitem que não seja necessária a deposição de óxidos transparentes condutores na face frontal, reduzindo os custos de produção. A análise experimental e por simulação realizada por Zhang et al. [23] mostra a influência da espessura do SiO_x no transporte de portadores de carga em células solares com contato passivado de óxido de efeito túnel (TOPCon). Para uma camada de SiO_x muito fina (<1,2 nm), o tunelamento favorece a alta eficiência nos dispositivos por melhorar a passivação. Huang et al. [46] desenvolveram células solares em silício tipo n, com emissor frontal p⁺ e com o contato posterior de poli-Si com óxido de efeito túnel seletivo de portadores de carga. Usando um óxido de efeito túnel de 15 Å coberto com 100 nm de poli-Si n⁺ crescido por LPCVD alcançaram excelente passivação no contato posterior, mesmo após a formação dos contatos por serigrafia. A eficiência de conversão obtida foi de 21,6% em dispositivos de grande área (239 cm²) em lâminas de Cz-Si tipo n de grau industrial e para células de 100 cm² a eficiência foi de 22%.

A formação de contatos passivados seletivos foi analisada por Limodio et al. [48]. Os autores analisaram a influência da espessura do filme de a-Si:H, da temperatura e do tempo de recozimento (*annealing*) após a deposição bem como do ambiente do forno durante o recozimento (ar ou H₂). Observaram que na temperatura de recozimento de 190 °C a passivação química entre a interface SiO_2 /c-Si foi melhorada. Este efeito é devido a uma redistribuição de átomos de hidrogênio no filme e na interface c-Si/a-Si:H. Além disso, mostraram que o recozimento em H₂ leva a uma melhor passivação química da mesma superfície. Conforme os autores, o ambiente de recozimento também é importante, sendo que o recozimento em H₂ tem um desempenho melhor na passivação. Os autores analisaram diferentes camadas de filmes transparentes condutores: uma única camada de ITO (In_2O_3 :Sn) ou uma camada dupla de IO:H/ITO (óxido de índio hidrogenado/ In_2O_3 :Sn). A medição de absorção óptica mostrou que o uso de IO:H melhora a transparência na faixa de comprimentos de

onda curtos em relação ao ITO. Um modelo analítico foi desenvolvido por Mitra et al. [47] para analisar as perdas devido a recombinação em dispositivos TOPCon. Os efeitos sobre a V_{oc} dos dispositivos da densidade de corrente de saturação do emissor (J_{oc}), velocidade de recombinação em superfície, espessura da lâmina bem como da concentração de dopantes na camada seletiva foram estudados. A análise indicou que uma V_{oc} de 766 mV pode ser alcançada para $J_{oc}=2$ fA/cm², com uma concentração de dopantes na camada de poli-Si $>10^{21}$ cm⁻³ e um substrato de 50 µm de espessura. Para condições idênticas de J_{oc} e concentração de dopantes, o V_{oc} atinge um valor inferior de 750 mV para um substrato de 180 µm de espessura. Xin et al. [45] analisaram a influência de utilizar camadas ultrafinas de óxido de efeito túnel de AlO_x, depositadas por ALD na passivação, camadas estas que contêm alta concentração de cargas negativas. Estas cargas podem incrementar a seletividade dos contatos para a extração de lacunas. Nas células solares com emissor posterior a eficiência alcançada foi de até 20,5% usando um contato posterior de Ag evaporado termicamente e malha frontal depositada por serigrafia.

Guo et al. [49] avaliaram o contato passivado poli-Si p⁺/SiO_x dopado com B em lâminas de Si monocristalino tipo n, onde a camada de SiO_x foi obtida com três métodos: oxidação com ácido nítrico aquecido, oxidação com óxido nitroso assistido por plasma e oxidação térmica. Os resultados mostraram que a oxidação térmica foi a que proporcionou a melhor passivação do contato. Por outro lado, esta forma de produção do óxido gerou camadas de óxido de maior resistividade de contato, mas com valores relativamente baixos que possibilitam seu uso em células solares de alta eficiência. O método da oxidação com gás óxido nitroso assistida por plasma (PANO - *plasma assisted nitrous oxidation*) foi analisado também por Huang et al. [58]. A excelente passivação de superfície com poli-Si tipo n e SiO_x PANO em lâminas de c-Si tipo n foi alcançada pelo recozimento a 880 °C, estimando-se uma iV_{oc} e J_0 de 747 mV e 2,0 fA/cm², respectivamente, após uma hidrogenação das camadas de AlO_x/SiN_x. Foi realizada por Kaur et al. [64] a comparação entre uma camada de óxido de efeito túnel ultrafina de AlO_x com SiO_x formado quimicamente. A espessura do AlO_x e suas condições de ativação térmica (tempo e temperatura) desempenham um papel importante para aumentar a eficiência da célula solar, bem como a seletividade dos contatos passivados. Assumindo um contato frontal ideal (sem perdas), o potencial máximo de eficiência foi de 26,9%, que é 0,8% maior em comparação ao contato passivado de referência SiO_x/poli-Si p⁺. Verificaram a importância do recozimento em *forming gas* (95% de N₂ e 5% de H₂) após a formação da camada passivadora, pois o tempo de vida dos portadores de carga minoritários, a densidade de carga elétrica fixa e também a espessura da camada de SiO_x aumentaram após o recozimento em temperatura mais alta, de 900 °C. Nesta temperatura há formação de micro-orifícios (*pinholes*) na camada de SiO_x, que reduzem a resistência de contato. Com a melhora na passivação do contato, a eficiência absoluta

pode ser aumentada em até 1,2% [65].

A aplicação da tecnologia TOPCon na indústria (i-TOPCon) em lâminas de silício quase-mono, tipo n, com área de 157,4x157,4 mm, permitiu a obtenção de células solares com eficiência de 23,22% e V_{oc} de 711,9 mV com iluminação na face frontal. Conforme os autores deste estudo [53], esta foi a primeira célula solar baseada em material quase-mono que excedeu a eficiência de 23%. O silício quase-mono utiliza técnicas similares às usadas para produção de silício multicristalino e são de menor custo que o silício monocristalino obtido pela técnica Cz. Os autores relataram detalhes sobre a estrutura e o processamento, onde analisaram o tempo de vida dos portadores de carga minoritários antes e depois da fabricação da célula e apresentaram detalhes sobre a otimização do contato passivado posterior. A análise de perdas de potência confirmou que a recombinação na lâmina de Si quase-mono tem um papel dominante, diferentemente das células de Si-Cz (monocristalino), onde a recombinação no emissor restringe principalmente a eficiência. Isso indica que a eficiência da célula quase-mono i-TOPCon pode ser aumentada no futuro, quando a qualidade do material quase-mono for otimizada. Padhamnath et al. [62, 63] estudaram o comportamento óptico e o desempenho elétrico do óxido interfacial ultrafino (iO_x) e das camadas de poli-Si obtidas por deposição química em fase vapor em baixa pressão. A passivação *in situ* de iO_x e da camada de poli-Si n⁺ foi avaliada para espessuras de poli-Si n⁺ variando de 150 a 250 nm. Os melhores resultados obtidos foram para a espessura de 150 nm após processamento térmico rápido a 745 °C, obtendo o tempo de vida dos portadores minoritários de 17 ms e $iV_{oc}=747$ mV. A maior concentração de dopantes no poli-Si para 150 nm resultou em melhor passivação e menor resistência de contato. A eficiência máxima de 22,1% foi obtida para células solares monoPoly com 150 nm de poli-Si na parte posterior. Os autores concluíram que a V_{oc} das células solares foi limitada pela recombinação na superfície frontal, onde há um emissor p⁺ homogêneo dopado com boro e malha metálica depositada por serigrafia, necessitando esta região ser aprimorada para que eficiências superiores a 24% sejam alcançadas.

Simulações com o programa TCAD foram realizadas para analisar contatos seletivos baseados em óxido de efeito túnel e camada de silício amorfo dopado com fósforo [50]. Foi observado que a qualidade do óxido de efeito túnel varia de acordo com a proporção do estado de Si⁴⁺ para Si²⁺. A eficiência de conversão de células solares simuladas foi de 24,31%. Foi simulado também o comportamento das células solares para diferentes irradiancias solares e temperaturas de operação, concluindo que as características elétricas em função destes parâmetros são muito sensíveis à densidade de estados na interface do contato seletivo. As células solares TOPCon de Si-Cz tipo n apresentam bordas manchadas devido à forma de deposição da camada de polissilício e, por consequência, há possibilidade de corrente elétrica de fuga pela borda, resultando na diminuição da eficiência. Wang et al. [54] apresentaram processos de limpeza para solucionar estes problemas. Este processo combinou um

ataque químico com HF/HNO₃ seguido de um processo em KOH. O processo de limpeza otimizado não destruiu a camada dopada com boro na parte frontal e a camada de poli-Si na parte posterior. Após a otimização da recombinação na superfície posterior e dos processos de difusão de boro, as células solares TOPCon industriais obtidas neste estudo tiveram valores de eficiência, V_{oc}, J_{sc} e FF de 23,53%, 706 mV, 40,65 mA/cm² e 82,02%, respectivamente. Conforme os autores, este processo de limpeza otimizado poderia ser aplicado em linhas industriais sem grandes alterações. Wang et al. [55] analisaram a influência da espessura do filme de SiO_x e da concentração de átomos de fósforo na camada de poli-Si em células solares TOPCon fabricadas em lâminas de 156,75x156,75 mm. Foram usadas lâminas de silício tipo n, crescidas pela técnica Cz, com espessura de 180 µm. A eficiência de 22,43%, V_{oc} de 689,4 mV e fator de forma de 81,35% foram medidos em dispositivos com malha frontal e posterior depositada por serigrafia. A difusão do dopante fósforo na camada de poli-Si, bem como a espessura da camada de SiO_x, foi otimizada a fim de se obter um bom contato elétrico entre a malha de Ag e a lâmina de silício. A espessura da camada de SiO_x deve ser superior a 1,5 nm, o que é benéfico para a obtenção de uma boa passivação nos contatos. A concentração do dopante fósforo na superfície do Si policristalino foi superior a 1x10²⁰ cm⁻³, resultando em uma baixa resistência em série. Os resultados da caracterização e simulação mostraram que tanto a perda por sombreamento do metal quanto a recombinação na superfície posterior foram dominantes entre todas as perdas.

Wilkes et al. [59] propuseram uma nova forma para cristalização e ativação de dopantes em camadas altamente dopadas de silício amorfo tipo n hidrogenado (a-Si:H) para serem usadas como contatos seletivos em células solares TOPCon. Em vez de usar recozimentos em alta temperatura, um novo processamento com laser ultravioleta foi proposto. Segundo os autores, o processamento com laser pode aumentar a condutividade no contato e manter a elevada qualidade de passivação do filme (menor densidade de corrente de saturação) porque, devido à baixa profundidade de absorção do laser, o impacto do processo térmico no óxido interfacial é mínimo. Realizando um recozimento em *forming gas* após o processamento com laser, foi medido o tempo de vida efetivo dos portadores minoritários de 2,1 ms em estruturas de teste com as camadas de 200 nm de a-Si:H e 1,5 nm de óxido de feito túnel (SiO_x). Em publicação posterior [60], otimizaram o comprimento de onda e a fluência do laser bem como a espessura do filme de a-Si:H a ser depositado e processado. Além disso, examinaram o efeito da deposição subsequente de SiN_x na melhora da passivação de camadas TOPCon processadas a laser. As caracterizações por efeito Raman e Hall demonstraram que, pelo grau de cristalinidade e de ativação dos dopantes, o processo com laser é equivalente a um processo térmico de recozimento realizado a 875 °C, com maior cristalinidade e ativação do dopante, enquanto que o decaimento fotocondutivo comprovou melhor qualidade de passivação de superfície e interface. Yang et al. [56] propuseram o recozimento térmico

rápido (RTA) para a preparação de contatos passivados pela transformação de filme de a-Si:H dopado com fósforo em poli-Si. Os efeitos da temperatura do processo, tempo, rampas de decaimento da temperatura e de hidrogenação subsequente foram estudados. As células solares base n com área de 4 cm² e empregando o contato passivado de poli-Si processado por RTA alcançaram a eficiência de 23,04%. Estas células têm um filme de poli-Si de 40 nm e o RTA foi realizado a 820 °C. Os autores comentam que o processamento térmico rápido tem potencial para substituir os recozimentos em fornos de tubo de quartzo devido ao menor tempo de processo.

Os dispositivos de contato frontal/posterior de poli-Si/SiO₂ usualmente apresentam baixa densidade de corrente de curto-circuito devido à absorção na camada frontal de poli-Si. Um filme de poli-Si ultrafino (~20 nm) permite uma alta J_{sc}, mas não é compatível com a malha metálica depositada por serigrafia, que necessita de processos de queima das pastas metálicas (*firing*). Young et al. [61] estudaram os efeitos de um ataque iônico reativo (RIE, *reactive ion etching*) após a deposição da camada frontal espessa de poli-Si (200 nm), utilizando as trilhas metálicas como uma máscara. Demonstraram que a malha metálica suporta o ataque químico RIE com plasma de SF₆, mas que o processo de ataque não é uniforme nas regiões de poli-Si, produzindo regiões com menor espessura de poli-Si e até um ataque completo, reduzindo a qualidade do filme de passivação. Por outro lado, observaram um crescimento da eficiência quântica em menores comprimentos de onda, o que demonstra a menor absorção na camada de poli-Si. Otimizando o processo de ataque, concluíram que os ganhos em J_{sc} podem aumentar a eficiência das células solares TOPCon. Liu et al. [69] realizaram uma análise sistemática de células solares com junção pn em toda a face posterior e baseada em camada de poli-Si dopado com boro e a face frontal com contatos seletivos de poli-Si somente sob as trilhas metálicas. Mediante simulação com o programa Quokka 2, foram analisados os seguintes parâmetros: espaçamento entre as trilhas na face frontal, resistividade de contato e resistividade do substrato. Verificaram que a eficiência das células solares com junção posterior é sensível à resistividade do contato frontal e à qualidade da passivação frontal, mas insensível à resistência da folha do campo retrodifusor frontal e à resistividade de base. Mediante simulação, observaram que células solares base n com junção na face posterior e camada de poli-Si dopado com boro podem atingir uma eficiência de ~26% e podem ter uma adaptação relativamente rápida às atuais linhas de produção.

Os filmes de poli-Si/SiO_x usados para passivar contatos metálicos são sensíveis a processos térmicos como os realizados após a deposição da malha metálica por serigrafia. Madani et al. [66] mostraram que processos de queima de pastas a 750 °C podem reduzir a iV_{oc} de 728 para 708 mV em estruturas de teste e propuseram o uso de camadas de proteção baseadas em Al₂O₃ e SiN_x. Observaram que uma camada de 7 nm de Al₂O₃ depositada por ALD pode proporcionar

uma excelente proteção durante o processo de queima de pastas de metalização e pode ser facilmente removida após este processo. Os filmes de SiN_x de 20 nm depositados por PECVD também foram testados e demonstraram capacidade de proteção do poli-Si. A velocidade e facilidade com que o Al_2O_3 pode ser removido o torna mais desejável para estruturas de células solares avançadas como poli-Si e tandem. O uso de Al_2O_3 sobre a camada de poli-Si dopado com fósforo na face posterior permitiu a fabricação de células solares com eficiência de 20,8%, sendo 0,3% mais eficientes que as células sem o filme de Al_2O_3 . A análise do impacto da temperatura de queima nas propriedades de contatos depositados por serigrafia sobre n^+ e p^+ poli-Si foram analisadas por Padhamnath *et al.* [68]. Os contatos foram queimados em diferentes temperaturas e foram avaliadas a resistividade de contato e a densidade de corrente de saturação das regiões metalizadas. Constataram que para os contatos de prata, os melhores resultados foram obtidos para uma cobertura de 50% da área, com formação de cristalitos de Ag e temperatura ótima de 750 °C. Para contatos de Ag-Al, os cristalitos devem cobrir 30% da superfície para se atingir o melhor compromisso entre resistividade de contato e densidade de corrente de saturação, mas a recombinação é maior que a observada no contato de Ag.

Yan *et al.* [67] apresentaram o desenvolvimento de células solares TOPCon com camadas de poli-Si n^+ e p^+ depositadas na face frontal e posterior, respectivamente, por LPCVD e difusão em forno com tubo de quartzo. Com a integração adequada do processo, as células solares têm um filme de 20 nm de poli-Si n^+ na superfície texturada frontal e de ~150 nm de poli-Si p^+ na superfície posterior polida. A tensão implícita de circuito aberto (iV_{oc}) de 725 mV e o valor J_0 total de 16,3 fA/cm² foram obtidos em estruturas de teste recobertas com SiN_x hidrogenado. Também demonstraram a possibilidade de metalização de células solares por meio

de serigrafia, viável para a indústria, eliminando o uso de óxido condutor transparente (TCO). A célula solar n^+np^+ , isto é, com junção na face posterior, tendo uma área de 196 cm², e usando SiN_x como filme passivador e antirreflexo, atingiu a eficiência de 19,6%, similar aos dispositivos com uma camada de óxido de índio dopado com estanho (ITO) nas duas faces. Xu *et al.* [51] apresentaram uma forma de obter contatos passivados usando uma camada ultrafina de SiO_x sob uma de silício amorfo depositado por LPCVD. Este conjunto foi introduzido em forno para dopagem com fósforo e cristalização do silício amorfo para obtenção de uma camada de polissilício. Os autores otimizaram o perfil de fósforo e a temperatura e tempo da difusão com o objetivo de obter a menor densidade de corrente de saturação. Em estruturas de teste em silício tipo n, obtiveram J_{0E} de 10 fA/cm² e tempo de vida dos portadores minoritários de 3000 μ s para a temperatura de difusão de fósforo de 820 °C por 90 min. Células solares PERC foram fabricadas sobre silício tipo p e atingiram 19,73%. Fong *et al.* [71] apresentam uma tecnologia de contato passivado baseada em polissilício depositado por deposição de vapor químico de baixa pressão (LPCVD) sobre uma camada ultrafina de dióxido de silício, que atinge uma excelente passivação de superfície com tensão de circuito aberto implícita de 735 mV. Foi realizada a deposição do dióxido de silício ultrafino como camada intermédia sob alta temperatura e baixa pressão, *in situ* dentro de um único processo. Além disso, a estrutura do contato passivado mantém suas propriedades eletrônicas em temperaturas de até 900 °C sendo compatível com os processos industriais existentes.

Células solares com emissor seletivo

A tecnologia de emissores seletivos é um ponto importante desta revisão sistemática. Os artigos referentes

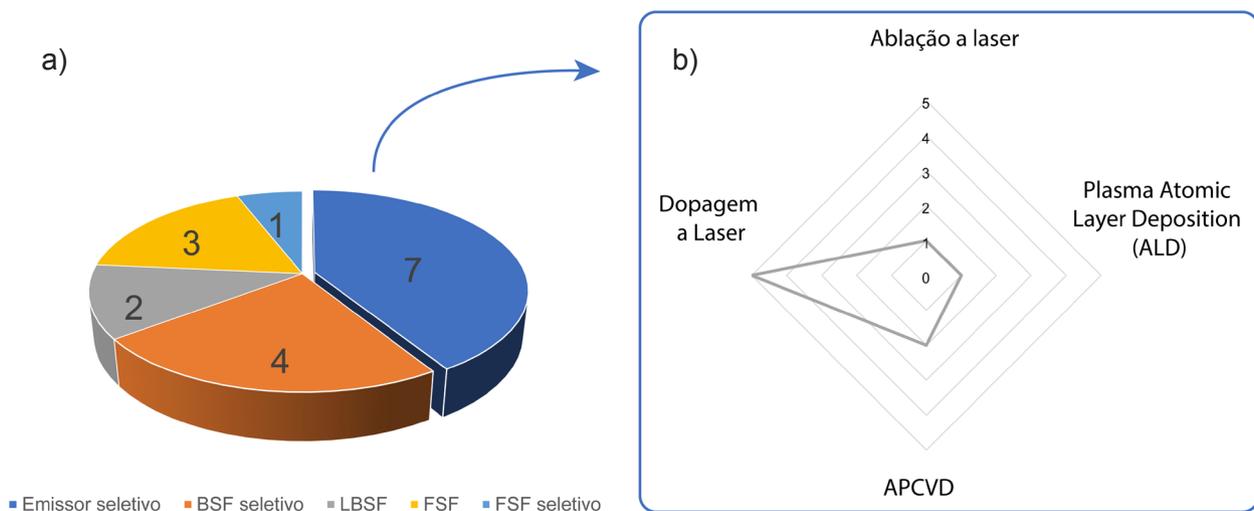


Figura 9: Número de trabalhos encontrados por tipo de emissor e campo retrodifusor do dispositivo (a) e processos para obtenção de emissores seletivos (b).

[Figure 9: Number of articles found by emitter and back surface field type of the device (a) and processes for obtaining selective emitters (b).]

a emissores seletivos são discutidos. A Fig. 9 apresenta o número de trabalhos encontrados conforme a região do dispositivo em que se usa o emissor seletivo. Verificou-se que a maior ocorrência é da utilização de dopagem por radiação laser. Isso porque tal processo apresenta vantagens, principalmente no que se refere à produtividade em linhas industriais. Para células solares em lâminas de silício tipo n e com emissor p⁺, o emissor seletivo de boro dopado por laser pode reduzir a recombinação de portadores de carga minoritários no emissor, produzir uma menor resistência de contato e maior eficiência quântica em menores comprimentos de onda da irradiância solar. No entanto, a baixa concentração de boro na camada de borossilicato formada durante os processos de difusão tem dificultado o uso de emissores seletivos de boro dopados com laser em linhas de fabricação. No trabalho de Wang et al. [38], a difusão de boro a partir da fonte de BBr₃ em dois processos separados para formar o emissor seletivo dopado com laser verde (comprimento de onda de 532 nm) foi demonstrada. Os processos de dopagem a laser foram realizados entre a deposição do borossilicato e difusão de boro e após a oxidação, produzindo o emissor seletivo dopado a laser otimizado com resistência de folha das regiões p⁺ e p⁺⁺ de 95,0 e 54,3 Ω/□, respectivamente. Na região p⁺, a concentração de boro máxima foi da ordem de 10¹⁹ cm⁻³ e na região p⁺⁺ da ordem de 10²⁰ cm⁻³. O uso do emissor seletivo reduziu a densidade de corrente de saturação de 45,3 para 31,1 fA/cm² e a resistividade de contato entre metal e silício de 2,9 para 1,0 mΩ/cm². Usando estes dados, simularam células solares com o programa Quokka e observaram um aumento de 5 mV em V_{OC} e de 0,24% (absoluto) na eficiência dos dispositivos com o uso do processo desenvolvido.

Um modelo de análise da região dopada com laser foi desenvolvido por Yu et al. [72]. Neste trabalho, a corrente induzida por feixe de elétrons (EBIC, *electron beam induced current*) foi usada para estudar a eficiência de coleta de portadores de carga em emissores seletivos em células solares industriais. Emissores localizados dopados com laser estão sendo implantados industrialmente, mas a largura do emissor é maior que a das trilhas de prata depositadas por serigrafia para facilitar o alinhamento. O EBIC permitiu obter imagens e quantificar os danos induzidos por laser que ocorrem nessas regiões do emissor. Um modelo foi desenvolvido para contabilizar tais danos, de forma que as perdas na eficiência quântica externa (EQE) pudessem ser quantificadas a partir das características das informações da EBIC observadas. As regiões danificadas apresentam EQE ~12% menor para comprimentos de onda curtos (300-500 nm) quando comparadas com emissores homogêneos sem o uso do laser. As simulações do Sentaurus TCAD revelaram que a eliminação de tais danos melhoraria a eficiência das células solares em ~0,12% (absoluto).

Upadhyaya et al. [20] demonstraram uma nova estratégia para a formação de um emissor seletivo de boro por uma combinação de implantação iônica e deposição

de borossilicato por APCVD. Este processo fornece uma melhor forma de controlar a concentração de átomos na superfície e a profundidade da junção pn em cada região do emissor seletivo. Fabricaram células solares em Si-Cz base n com junção frontal e contatos metálicos formados por serigrafia tanto na face frontal, dopada com boro, como na face posterior dopada com fósforo. Obtiveram um J_{OE} de 6 fA/cm² para as regiões levemente dopadas, isto é, para as regiões p⁺ e com 150 Ω/□, e J_{OE} de 93 fA/cm² para regiões p⁺⁺ com 30 Ω/□ e formadas por APCVD e difusão em alta temperatura. Este emissor seletivo em combinação com um BSF de fósforo fortemente dopado resultou em um aumento de 6 mV na V_{OC}, 0,4 mA/cm² de aumento na J_{SC} e 0,4% (absoluto) na eficiência quando comparado com dispositivos com o emissor homogêneo de 150 Ω/□. Conforme os autores, uma modelagem mostra que a integração deste emissor seletivo às células TOPCon combinado com o uso de lâminas de Si com maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários, perdas de borda reduzidas e metalização com trilhas mais finas e com barras coletoras múltiplas permitiria a obtenção de eficiências superiores a 24% em células solares industriais. Mohammed et al. [73] demonstraram um protótipo de emissor seletivo de hidrogênio (HSE). Trata-se de um processo no qual o hidrogênio atômico é usado para desativar eletricamente dopantes de boro no emissor de células solares base n. Formaram uma região p⁺⁺ de dopagem homogênea em uma das faces e, pelo processo com hidrogênio atômico, diminuíram a concentração de boro nas regiões entre as trilhas metálicas. Os autores mostraram que dispositivos de 4 cm² têm sua eficiência aumentada de 19,77% para 20,55% pelo uso da técnica desenvolvida.

Outras configurações de células solares

Além das configurações PERC, PERT e TOPCon, foram identificados trabalhos com outras estruturas de células solares com malha frontal as quais foram classificadas como ‘outras configurações’ e os resultados foram resumidos na Tabela IV e discutidos. A fim de alcançar uma boa passivação da superfície é crucial focar em camadas de óxido de efeito túnel ultrafinas e de alta qualidade que sejam passíveis de serem processadas com equipamentos de produção de alto rendimento, estáveis e confiáveis. König et al. [74] relataram que camadas de poli-Si de baixa absorção podem ser depositadas por PECVD em linha como camadas amorfas hidrogenadas dopadas (seletivas para elétrons ou seletivas para lacunas), seguidas pela cristalização subsequente em alta temperatura. Apresentaram os resultados das instalações de pesquisa da Meyer Burger na Alemanha com eficiência >22,5% em uma célula solar de contato passivada com poli-Si/óxido interfacial na parte posterior depositada usando um equipamento de produção industrial. As células solares analisadas foram denominadas de monoPoly, originalmente desenvolvidas no SERI (Solar Energy Research Institute) de Cingapura. A integração de contatos seletivos de portadores

de carga em células solares de silício para o contato frontal e posterior tipo p e tipo n pode elevar a eficiência para mais de 24% em dispositivos industriais, segundo Duttagupta *et al.* [75]. Os autores apresentaram uma das estruturas monoPoly com aplicação em uma face de uma camada de polissilício. Usando processos industriais, o poli-Si dopado e um óxido interfacial ultrafino foram usados para produzir a J_{OE} a valores baixos, de 4 fA/cm², e iV_{OC} de cerca de 745 mV. A camada de poli-Si/óxido de efeito túnel é capaz de suportar o processo de queima de pastas serigráficas em alta temperatura. Em uma planta-piloto, produziram dispositivos de 244,3 cm² que alcançaram a eficiência de 21,4%, usando silício monocristalino tipo n e contatos frontal e posterior depositados por serigrafia. Usando os contatos seletivos em ambas as faces, os autores analisaram as possíveis melhorias nos dispositivos e previram que os dispositivos industriais podem atingir eficiências de 24%.

Ling *et al.* [76] demonstraram a possibilidade da combinação de uma camada de óxido de efeito túnel de óxido de alumínio (ALD-AIO_x) com uma camada de cobertura orgânica dopada, de baixo custo e comercialmente disponível com alta função de trabalho (PEDOT:PSS), para formar um excelente contato passivado seletivo com orifícios para aplicações em células solares. Apresentaram uma metodologia sistemática de medição dos parâmetros mais importantes, determinando a qualidade de passivação (a densidade de corrente de saturação) e a resistência de contato para os contatos passivados seletivos investigados, e aplicaram em um modelo para prever a eficiência da célula solar desenvolvida. Em particular, estudaram em detalhes o impacto da escolha de uma camada de efeito túnel adequada (ALD-AIO_x, em comparação com uma camada de SiO_x de efeito túnel formada por processo químico), o impacto da espessura da camada de efeito túnel e as condições de recozimento da camada, bem como a influência de diferentes camadas de passivação (PEDOT:PSS, em comparação com uma camada de poli-Si p⁺ ‘padrão’) nos parâmetros extraídos. Devido às cargas elétricas negativas na interface, é vantajoso usar o óxido ALD-AIO_x de efeito túnel ultrafino em vez de um óxido de SiO_x comumente relatado para a extração de lacunas. Combinando isso com uma camada de poli-Si tipo p altamente dopado ou com uma camada de cobertura orgânica dopada de baixo custo com alta função de trabalho e dopada, comercialmente conhecida como PEDOT:PSS, é possível atingir a eficiência superior a 21%.

Células solares em lâminas finas de silício

A redução da espessura da lâmina de Si tem sido proposta para diminuir o custo das células solares de silício cristalino. Se sistemas de aprisionamento da radiação solar são implementados, pode-se inclusive ter relativamente pequenas perdas de eficiência dos dispositivos. A empresa Komatsu NTC desenvolveu o processo de corte por fio diamantado ultrafino para lâminas de Si com baixa perda de material. Modificando as condições de corte e especificações do fio diamantado para manter o fio esticado para o corte. A espessura da lâmina *as-cut* foi de 90 μm e a perda de corte foi de 60 μm. Como resultado, lâminas ultrafinas altamente flexíveis podem ser obtidas. O teste de fabricação de células PERT mostrou que a diferença de eficiência entre células solares de 166 e 84 μm de espessura foi de apenas 1,2%. Segundo os autores, essas células solares ultrafinas de c-Si são tão flexíveis e leves que podem ser adequadas para novos mercados fotovoltaicos, como uso em mobilidade e integração em edifícios [42].

A absorção insuficiente da radiação no infravermelho tornou-se um obstáculo para o desempenho das células solares com malha metálica em ambas as faces. No trabalho de Wang *et al.* [38], o refletor de Bragg distribuído (DBR) foi aplicado na parte posterior de células solares bifaciais para melhorar a absorção de luz em comprimentos de onda longos (950-1100 nm). Por meio da aplicação do DBR de MgF₂/TiO₂ na parte posterior das células solares bifaciais, a absorção no infravermelho foi estudada na célula solar para diferentes ângulos das micropirâmides na face posterior e espessuras da lâmina de Si (40, 70, 100, 130 e 160 μm). Os resultados experimentais sugeriram que 20° é o ângulo das micropirâmides na face posterior mais eficaz para o aumento da absorção da radiação no infravermelho na célula solar. Com este refletor DBR, a perda de radiação no infravermelho também é reduzida para lâminas de Si mais finas. O aumento da corrente de curto-circuito para duas células bifaciais solares típicas (PERC e HIT) indica ainda mais o aumento da absorção por meio do uso do DBR. Este trabalho demonstrou que a tecnologia DBR é uma candidata promissora para a obtenção de células solares bifaciais e finas com aumento da eficiência. Células solares n-PERT foram desenvolvidas em lâminas de silício com 100 μm de espessura. Dispositivos de 16% de eficiência foram apresentados, atingindo um consumo de

Tabela IV - Resultados dos trabalhos com outras configurações de células solares diferentes da PERC, PERT e TOPCon. [Table IV - Results from solar cells structures different from PERC, PERT and TOPCon.]

Estrutura	Substrato/espessura (μm)/área (cm ²)	Emissor	BSF	Passivação	η (%)	Ref.
MonoPoly	Tipo n/-/-	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Óxido de túnel interfacial	22,6	[74]
MonoPoly	Cz tipo n 2 Ω.cm/170/244	p ⁺ (B)	n ⁺ poli-Si	Frontal: SiN _x /AlO _x ; posterior: óxido de túnel/poli-Si/SiN _x	21,4	[75]
Contatos seletivos	Cz tipo n/-/-	-	n ⁺ (P) frontal	Frontal: SiN _x ; posterior: AlO _x /PEDOT:PSS	21,0	[76]



Figura 10: Imagem de lâmina de silício com 100 μm de espessura utilizada na fabricação de células solares n-PERT no Brasil.

[Figure 10: Image of silicon wafer with thickness of 100 μm used to fabricate n-PERT solar cells in Brazil.]

1,6 g/W produzido, sendo da ordem de 40% menor que o de células solares tipo p com espessura convencional de 180 μm . Os autores comentaram que as lâminas de Si têm certa flexibilidade, conforme mostra a Fig. 10, mas são frágeis e no processamento requerem cuidados específicos para manter a eficiência (*yield*) de produção [77].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a revisão sistemática da literatura atual sobre células solares do tipo PERC (emissor e face posterior passivada), PERT (emissor passivado e região posterior totalmente difundida) e TOPCon (contatos passivados com óxido de efeito túnel) produzidas em substratos de Si tipo n, com ênfase nos processos de obtenção de contatos e emissores seletivos e no uso de lâminas de Si finas, a fim de entender as direções de desenvolvimentos na pesquisa e na indústria de células solares. Para aumentar a eficiência de conversão das células solares de c-Si, é cada vez mais importante reduzir a recombinação de portadores de carga nos contatos metálicos. Para tanto, os contatos passivados tornaram-se foco de pesquisa. Idealmente, um contato passivado é condutivamente seletivo para elétrons ou lacunas, enquanto passiva simultaneamente a superfície do silício. Os materiais que foram e estão sendo considerados para aplicações de contato de passivação incluem a-Si:H, poli-Si, óxidos de metais de transição, materiais orgânicos, metais alcalinos, óxidos e sais. O poli-Si é particularmente interessante devido à combinação de excelente passivação e seletividade de portadores de carga com boa estabilidade térmica, além de manter o potencial de fabricação em escala

industrial de células solares e proporcionar eficiências de conversão elevadas (>25%). Apesar do desenvolvimento alcançado no conceito dos contatos passivados, ainda existem alguns desafios para a integração bem-sucedida de novos materiais para estes contatos de passivação na fabricação das células. Mais especificamente, esses materiais emergentes devem ser preparados de maneira viável sob o ponto de vista de custo-benefício, devem ser escaláveis para fabricação em plantas industriais e devem apresentar estabilidade a longo prazo e serem resistentes a processos térmicos subsequentes, tais como os usados na queima das pastas de metalização. Portanto, de forma geral, ainda há grande espaço para explorar diferentes materiais para contatos passivados em pesquisas futuras. Observou-se que um número limitado de estudos investigou o uso de lâminas de Si finas, o que é um ponto de pesquisa a ser explorado para trabalhos futuros uma vez que a tendência é o emprego de menores quantidades de material semiconductor para a mesma produção de potência elétrica (peso/potência). Além disso, mercados fotovoltaicos emergentes como a integração em edificações e relacionadas com a mobilidade urbana irão requerer cada vez mais baixa espessura e flexibilidade dos dispositivos. Também foi possível concluir que uma rota aparente a ser seguida é a otimização de processos no que se refere ao uso de substâncias químicas como solventes, ácidos e reagentes em geral, além do emprego de menos etapas térmicas ou etapas térmicas com temperaturas menores sempre que possível, para com isso potencializar os ganhos relativos ao meio ambiente com a tecnologia fotovoltaica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio referente aos projetos de pesquisa e desenvolvimento n° 440044/2019-7, n° 306916/2017-7 e n° 305554/2021-2.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Kashyap, J. Madan, R. Pandey, R. Sharma, in 47th Photovolt. Special. Conf., IEEE (2020) 2542.
- [2] ITRPV, "Int. Technol. Roadmap for Photovoltaic", SEMI PV Group Europe (2021).
- [3] B. Singha, C.S. Solanki, Mater. Res. Express **4** (2017) 72001.
- [4] H.P. Yin, K. Tang, J.B. Zhang, W. Shan, X.M. Huang, X.D. Shen, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **208** (2020) 110345.
- [5] H.P. Yin, W.S. Tang, J.B. Zhang, W. Shan, X.M. Huang, X.D. Shen, Sol. Energy **220** (2021) 211.
- [6] M.A. Green, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **143** (2015) 190.
- [7] B. Min, M. Müller, H. Wagner, G. Fischer, R. Brendel, P.P. Altermatt, H. Neuhaus, IEEE J. Photovolt. **7** (2017) 1541.
- [8] H. Huang, J. Lv, Y. Bao, R. Xuan, S. Sun, S. Sneek, S. Li, C. Modanese, H. Savin, A. Wang, J. Zhao, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **161** (2017) 14.

- [9] N. Boukortt, B. Hadri, *Indian J. Phys.* **93** (2019) 33.
- [10] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, D. Hinken, M. Hauer, X. Hao, *Prog. Photovolt.* **30** (2022) 687.
- [11] D.D. Smith, P. Cousins, S. Westerberg, R. De Jesus-Tabajonda, G. Aniero, Y.C. Shen, *IEEE J. Photovolt.* **4** (2014) 1465.
- [12] V. Shanmugam, A. Khanna, D.J. Perez, R.V. Tabajonda, J.M.Y. Ali, A.L.M. Ortega, I.J. Garcia, B. Lim, T. Mueller, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **186** (2018) 124.
- [13] C.W. Kuo, T.M. Kuan, W.L. Chueh, L.G. Wu, C.C. Huang, C.Y. Yu, in 7th World Conf. Photovolt. Energy Convers., IEEE (2018) 1029.
- [14] W. Wu, Z. Zhang, F. Zheng, W. Lin, Z. Liang, H. Shen, *Prog. Photovolt.* **26** (2018) 752.
- [15] C. Zhang, H. Shen, L. Sun, J. Yang, S. Wu, Z. Lu, *Energies* **13** (2020) 1388.
- [16] A.K. Sharma, S. Mitra, S. Behera, P.K. Basu, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **232** (2021) 111338.
- [17] B. Yu, J. Shi, F. Li, H. Wang, L. Pang, K. Liu, D. Zhang, C. Wu, Y. Liu, J. Chen, W. Lu, R. Cong, W. Yu, W. Yu, *J. Alloys Compd.* **870** (2021) 159679.
- [18] N.E.I. Boukortt, B. Hadri, *J. Electron. Mater.* **47** (2018) 5825.
- [19] A. Rohatgi, K. Zhu, J. Tong, D.H. Kim, E. Reichmanis, B. Rounsaville, V. Prakash, Y.W. Ok, *IEEE J. Photovolt.* **10** (2020) 417.
- [20] A.D. Upadhyaya, K. Madani, V. Upadhyaya, B. Rounsaville, Y.Y. Huang, A. Rohatgi, in 47th Photovolt. Special. Conf., IEEE (2020) 1626.
- [21] M. König, T. Kluge, T. Grosse, H.P. Sperlich, L.F. Makoudjou, N. Nandakumar, J.W. Rodriguez, S. Duttgupta, in 7th World Conf. Photovolt. Energy Convers., IEEE (2018) 1000.
- [22] B. Kafle, B.S. Goraya, S. Mack, F. Feldmann, S. Nold, J. Rentsch, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **227** (2021) 111100.
- [23] Z. Zhang, Y. Zeng, C.S. Jiang, Y. Huang, M. Liao, H. Tong, M. Al-Jassim, P. Gao, C. Shou, X. Zhou, B. Yan, J. Ye, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **187** (2018) 113.
- [24] A.S. Kale, W. Nemeth, S.P. Harvey, M. Page, D.L. Young, S. Agarwal, P. Stradins, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **185** (2018) 270.
- [25] Z.W. Peng, T. Buck, L.J. Koduvelikulathu, J. Libal, V.D. Mihailtchi, R. Kopecek, in AIP Conf. Proc., AIP Publ. (2019) 100001.
- [26] R.M. Neves, H.L. Ornaghi Jr, A.J. Zattera, S.C. Amico, *Carbohyd. Polym.* **255** (2020) 117366.
- [27] F.M. Monticeli, R.M. Neves, H.L. Ornaghi Jr, J.H.S. Almeida Jr, *Polym. Compos.* **42** (2021) 3702.
- [28] L.D. Agnol, F.T.G. Dias, H.L. Ornaghi Jr, M. Sangermano, O. Bianchi, *Prog. Org. Coat.* **154** (2021) 106156.
- [29] R.M. Neves, F.M. Monticeli, J.H.S. Almeida, H.L. Ornaghi, in “Vegetable fiber composites and their technological applications: composites science and technology”, M. Jawaid, A. Khan (Eds.), Springer, Singapore (2021) 1.
- [30] K.S. Ahmad, S.N. Naqvi, S.B. Jaffri, *Rev. Inorg. Chem.* **41** (2021) 21.
- [31] E. Aromataris, A. Pearson, *Am. J. Nurs.* **114** (2014) 53.
- [32] L. Shamseer, D. Moher, M. Clarke, D. Gherzi, A. Liberati, M. Petticrew, P. Shekelle, L.A. Stewart, *BMJ-Brit. Med. J.* **349** (2015) g7647.
- [33] J.F. Lelièvre, B. Kafle, P. Saint Cast, P. Brunet, R. Magnan, E. Hernandez, S. Pouliquen, F. Massines, *Prog. Photovolt.* **27** (2019) 1007.
- [34] C. Allebé, J.J.D. Leon, A. Ingenito, A. Descoedres, G. Nogay, P. Wyss, F.J. Huang, M. Despeisse, S. Nicolay, C. Ballif, in 46th Photovolt. Special. Conf., IEEE (2019) 2196.
- [35] T. Sugiura, S. Matsumoto, N. Nakano, *IEEE J. Photovolt.* **10** (2020) 1538.
- [36] C.N. Kruse, S. Schäfer, F. Haase, V. Mertens, H. Schulte-Huxel, B. Lim, B. Min, T. Dullweber, R. Peist, R. Brendel, *Sci. Rep.* **11** (2021) 1.
- [37] W. Lin, C. Liu, Y. Wang, Y. He, Y. Zou, L. Yuan, J. Gong, Y. Yang, Z. Feng, Z. Liu, Z. Chen, Q. Xie, Z. Liang, Y. Chen, H. Shen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **210** (2020) 110462.
- [38] J. Wang, Y. Xuan, Y. Da, Y. Xu, L. Zheng, *Opt. Commun.* **462** (2020) 125358.
- [39] C. Comparotto, J. Lossen, V.D. Mihailtchi, in AIP Conf. Proc., AIP Publ. (2018) 100001.
- [40] X. Yan, E.C. Wang, N. Chen, L. Zhang, X. Gong, X. Zhang, S. Duttgupta, *Sol. Energy* **179** (2019) 335.
- [41] H.C. Sio, S.P. Phang, A. Fell, H. Wang, P. Zheng, D.K. Chen, X. Zhang, T. Zhang, Q. Wang, H. Jin, D. Macdonald, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **201** (2019) 110059.
- [42] Y. Ohshita, K. Onishi, R. Yokogawa, T. Nishihara, T. Kamioka, K. Nakamura, T. Kawatsu, T. Nagai, N. Yamada, Y. Miyashita, A. Ogura, in 46th Photovolt. Special. Conf., IEEE (2019) 1131.
- [43] H. Tong, M. Liao, Z. Zhang, Y. Wan, D. Wang, C. Quan, L. Cai, P. Gao, W. Guo, H. Lin, C. Shou, Y. Zeng, B. Yan, J. Ye, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **188** (2018) 149.
- [44] M. Nicolai, M. Zanucoli, F. Feldmann, M. Hermle, C. Fiegna, *IEEE J. Photovolt.* **8** (2017) 103.
- [45] Z. Xin, Z.P. Ling, P. Wang, J. Ge, C. Ke, K.B. Choi, A.G. Aberle, R. Stangl, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **191** (2019) 164.
- [46] Y.Y. Huang, Y.W. Ok, A.D. Upadhyaya, V.D. Upadhyaya, K. Madani, A. Rohatgi, in 46th Photovolt. Special. Conf., IEEE (2019) 1120.
- [47] S. Mitra, H. Ghosh, H. Saha, K. Ghosh, *IEEE T. Electron Dev.* **66** (2019) 1368.
- [48] G. Limodio, G. Yang, H. Ge, P. Procel, Y. De Groot, L. Mazzarella, O. Isabella, M. Zeman, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **194** (2019) 28.
- [49] X. Guo, M. Liao, Z. Rui, Q. Yang, Z. Wang, C. Shou, W. Ding, X. Luo, Y. Cao, J. Xu, L. Fu, Y. Zheng, B. Yan, J. Ye, *J. Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **210** (2020) 110487.
- [50] C. Park, N. Balaji, S. Ahn, J. Park, E.C. Cho, J. Yi, *Sol. Energy* **211** (2020) 62.
- [51] Y. Xu, H. Shen, Z. Yang, Q. Wei, Z. Ni, S. Li, Z. Wang, B. Zhao, *Sol. Energy* **207** (2020) 436.

- [52] M. Yu, R. Zhou, P. Hamer, D. Chen, X. Zhang, P.P. Altermatt, P.R. Wilshaw, R.S. Bonilla, *Sol. Energy* **211** (2020) 1214.
- [53] C. Liu, D. Chen, Y. Chen, Y. Ling, Y. Zou, Y. Wang, J. Gong, Z. Feng, P. Altermatt, P.J. Verlinden, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **215** (2020) 110690.
- [54] Q. Wang, W. Wu, D. Chen, L. Yuan, S. Yang, Y. Sun, S. Yang, Q. Zhang, Y. Cao, H. Qu, N. Yuan, J. Ding, *Sol. Energy* **211** (2020) 324.
- [55] Q. Wang, W. Wu, N. Yuan, Y. Li, Y. Zhang, J. Ding, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **208** (2020) 110423.
- [56] Q. Yang, M. Liao, Z. Wang, J. Zheng, X. Guo, Z. Rui, D. Huang, L. Lu, M. Feng, P. Cheng, C. Shou, Y. Zeng, B. Yan, J. Ye, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **210** (2020) 110518.
- [57] W. Yoon, D. Scheiman, Y.W. Ok, Z. Song, C. Chen, G. Jernigan, A. Rohatgi, Y. Yan, P. Jenkins, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **210** (2020) 110482.
- [58] Y. Huang, M. Liao, Z. Wang, X. Guo, C. Jiang, Q. Yang, Z. Yuan, D. Huang, J. Yang, X. Zhang, Q. Wang, H. Jin, M. Al-Jassim, C. Shou, Y. Zeng, B. Yan, J. Ye, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **208** (2020) 110389.
- [59] G.C. Wilkes, A.D. Upadhyaya, A. Rohatgi, M.C. Gupta, in 46th Photovolt. Special. Conf., IEEE (2019) 2709.
- [60] G.C. Wilkes, A.D. Upadhyaya, A. Rohatgi, M. Gupta, *IEEE J. Photovolt.* **10** (2020) 1283.
- [61] D.L. Young, K. Chen, S. Theingi, V. LaSalvia, D. Diercks, H. Guthrey, W. Nemeth, M. Page, P. Stradins, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **217** (2020) 110621.
- [62] P. Padhamnath, N. Nampalli, N. Nandakumar, J.K. Buatis, M.J. Naval, A.G. Aberle, S. Dutttagupta, *Thin Solid Films* **699** (2020) 137886.
- [63] P. Padhamnath, A. Khanna, N. Nandakumar, N. Nampalli, V. Shanmugam, A.G. Aberle, S. Dutttagupta, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **207** (2020) 110358.
- [64] G. Kaur, Z. Xin, T. Dutta, R. Sridharan, R. Stangl, A. Danner, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **217** (2020) 110720.
- [65] G. Kaur, Z. Xin, R. Sridharan, A. Danner, R. Stangl, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **218** (2020) 110758.
- [66] K. Madani, A. Rohatgi, B. Rounsaville, M.G. Kang, H.E. Song, Y.W. Ok, *IEEE J. Photovolt.* **11** (2021) 268.
- [67] X. Yan, F.B. Suhaimi, M. Xu, J. Yang, X. Zhang, Q. Wang, H. Jin, S. Dutttagupta, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **230** (2021) 111249.
- [68] P. Padhamnath, A. Khanna, N. Nandakumar, A.G. Aberle, S. Dutttagupta, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **230** (2021) 111217.
- [69] Z. Liu, Z. Yang, W. Wang, Q. Yang, Q. Han, D. Ma, H. Cheng, Y. Lin, J. Zheng, W. Liu, M. Liao, H. Chen, Y. Wang, Y. Zeng, B. Yan, J. Ye, *Sol. Energy* **221** (2021) 1.
- [70] C. Shou, J. Zheng, Q. Han, Y. Zeng, W. Ding, H. He, M. Liao, X. Yang, J. Sheng, B. Yan, J. Ye, *Phys. Status Solidi A* **218** (2021) 2100562.
- [71] K.C. Fong, T.C. Kho, W. Liang, T.K. Chong, M. Ernst, D. Walter, M. Stocks, E. Franklin, K. McIntosh, A. Blakers, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **186** (2018) 236.
- [72] M. Yu, R. Zhou, P. Hamer, D. Chen, X. Zhang, P.P. Altermatt, P.R. Wilshaw, R.S. Bonilla, *Sol. Energy* **211** (2020) 1214.
- [73] K.H. Mohammed, L. Cousar, S.C. Pop, D. Hutchings, in 7th World Conf. Photovolt. Energy Convers., IEEE (2018) 3133.
- [74] M. König, T. Kluge, T. Grosse, H.P. Sperlich, L.F. Makoudjou, N. Nandakumar, J.W. Rodriguez, S. Dutttagupta, in 7th World Conf. Photovolt. Energy Convers., IEEE (2018) 1000.
- [75] S. Dutttagupta, N. Nandakumar, P. Padhamnath, J.K. Buatis, R. Stangl, A.G. Aberle, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **187** (2018) 76.
- [76] Z.P. Ling, Z. Xin, G. Kaur, C. Ke, R. Stangl, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **185** (2018) 477.
- [77] A. Moehlecke, T.L. Marcondes, J. Aquino, I. Zanesco, M. Ly, *Mater. Res.* **23** (2020) e20190536-6.
(*Rec. 12/07/2022, Rev. 16/08/2022, Ac. 20/08/2022*)