

Nowe generacje ogniw krzemowych – technologia TOPCon

TOPCon technology: The new generation of silicon solar cells

KONRAD WIŚNIEWSKI

Wstęp

Rok 2020 jest kolejnym, w którym całkowita moc w źródłach fotowoltaicznych na świecie przekroczyła 100 GW (dokładnie 107 GW). Wg Międzynarodowej Agencji Energetycznej już w 2022 roku, głównie dzięki przyspieszeniu inwestycji w UE (z niemal 20 do 28 GW/rok) przyrost mocy PV wyniesie 150 GW. Wg danych i prognoz Instytutu Energetyki Odnawialnej w 2020 roku niemal 2,3% światowych i 13% europejskich inwestycji zostało zrealizowanych w Polsce. Wg najnowszej prognozy IEO łączna moc instalacji fotowoltaicznych w Polsce wzrośnie z niemal 4 GW na koniec 2020 roku do ponad 8 GW w 2022 roku i 15 GW w 2025 roku.

Tak duże zapotrzebowanie i konkurencja na rynku wymuszają poszukiwanie nowych technologii krzemowych (w ciągu najbliższej dekady technologie krzemowe będą dalej dominować na rynku), których parametry pozwolą na uzyskanie jeszcze niższych cen energii produkowanej przez moduły fotowoltaiczne. Nowa generacja ogniw krzemowych, która zmieni dotychczasowy obraz rynku pojawi się przed 2025 rokiem. Właśnie teraz producenci ogniw fotowoltaicznych, biorąc pod uwagę postęp technologiczny i możliwości producentów modułów, podejmują decyzje o inwestycjach w tzw. „GigaFabryki” (o zdolnościach produkcyjnych powyżej 1 GW/rok).

Linie produkcyjne wydajności rzędu kilku GW/rok są już od kilku lat standardem w Chinach. Pozwoliło to chińskim producentom ogniw na przekroczenie 80% w rynku światowym, a to spowodowało, że UE straciła rynek ogniw (produkcja ogniw w UE w 2020 roku stanowiła tylko 2,2% mocy zainstalowanej w UE), a wraz nim

rynek modułów PV. Przechodzenie na nową technologię stanowi szansę na odwrócenie niekorzystnego dla Europy trendu.

Przy „gigawatowej” skali inwestycji wybór technologii jest sprawą kluczową. Ostateczny wybór technologii w fotowoltaice jest wypadkową wielu argumentów związanych z dojrzałością technologii, dostępnością dostawców urządzeń, obwarowaniami patentowymi i potencjałem do dalszego rozwoju, możliwościami pozyskania materiałów i zawarcia długoterminowych kontraktów, a także z innymi kwestiami ekonomicznymi, czy nawet politycznymi. Przed takim wyborem stoi pierwszych 5 nowych GigaFabryk rozwijanych obecnie w UE, w tym polska GigaFabryka realizowana przez Giga PV S.A. Nawet jeżeli wybór, co do samego typu ogniw, które trzeba będzie wprowadzać na europejski rynek w latach 2024/2025, nie jest w praktyce aż tak szeroki (z pewnością nie jest oparty na nowinkach medialnych), to warto szerzej przybliżyć dylematy z tym związane.

W perspektywie średnioterminowej w grę wchodzi w zasadzie dwie technologie (TOPCon i HJT) rozwijane od kilku lat w UE i mające za sobą światowe pierwsze wdrożenia. O ile technologia HJT jest szeroko opisana w literaturze branżowej, o tyle wiedza o technologii TOPCon nie jest powszechna.

Od BSF, poprzez PERC, do TOPCon lub HJT – zdecydują koszty produkcji energii

W ostatnich latach odbyła się zmiana technologiczna w produkcji ogniw krzemowych. Dominująca w ostatnim dziesięcioleciu technologia BSF (ang. *Back Surface Field*), została wyparta przez technologię PERC (ang. *Passivated Emitter Rear*

Cell). Szacuje się, że do 2027 roku udział w rynku przestarzałej technologii będzie już pomijalnie mały. Pokazuje to bezwładność rynku, w którym w 2020 roku udziały ogniw wykonanych w technologii BSF stanowiły jedynie 20% (10 lat temu było to ponad 90%). Technologiczna „zmiana warty” nie przebiega jednak zawsze tak samo. Zależy ona m. in. od tego jak daleko posunięte są zmiany nowej technologii względem tej, która ustępuje jej miejsca. Dlatego kolejne skomercjalizowane innowacje będą jeszcze oparte o tradycyjną technologię krzemową, w tym technologie: HJT ang. *Heterojunction Technology* i TOPCon ang. *Tunnel Oxide Passivated Contacts*. Przewiduje się, że dopiero pod koniec tej dekady na rynku zaczną pojawiać się tzw. ogniwa tandemowe o bardziej skomplikowanych strukturach, łączące ze sobą różne technologie.

Istotny wkład w dynamiczny rozwój fotowoltaiki w ostatniej dekadzie miał model biznesowy europejskich dostawców technologii, którzy dekadę temu zaczęli proponować rozwiązania typu *turn key*. Polegały one na zagwarantowaniu danego poziomu sprawności ogniw przy wykorzystaniu specjalnie do tego celu dobranych urządzeń. Kontrahent miał więc pewność, że przy określonych kosztach będzie dysponował ogniwem słonecznym o uzgodnionych w umowie parametrach. Ułatwiło to znacząco tworzenie biznesplanów i spowodowało gwałtowny wzrost liczby olbrzymich fabryk ogniw krzemowych w miejscach gdzie produkcja ogniw była najtańsza, czyli w Chinach.

Obecnie Unia Europejska podejmuje działania, aby na jej terytorium odbudować zdolności produkcyjne, ale też kompetencje, które wcześniej łatwo zostały oddane krajom azjatyckim. Największym zainteresowaniem wśród producentów

Konrad Wiśniewski - specjalista ds. technologii fotowoltaicznej, Instytut Energetyki Odnawialnej, konsultant ds. badań i rozwoju w Giga PV S.A.
Adres do korespondencji: kwisniewski@ieo.pl

ogniwi krzemowych cieszą się wymienione już technologie HJT oraz TOPCon. Ogłoszone w latach 2019-2020 medialne zapowiedzi powstania nowych fabryk ogniwi wykonanych w tych technologiach przekroczyły 15 GW (około 12 GW – HJT, 5 GW – TOPCon).

Wprowadzane w tych technologiach innowacje w gruncie rzeczy opierają się na prostych ideach. Dalsze doskonalenie procesów wykorzystywanych w technologiach krzemowych jest praktycznie niemożliwe, dlatego próbuje się na ogniwa krzemowe nakładać dodatkowe warstwy (o bardzo konkretnych właściwościach), licząc na to, że dzięki nim końcowe parametry urządzeń będą jeszcze lepsze.

Ostateczny rachunek ekonomiczny sprowadza się więc do tego, czy korzyści z zastosowania nowych rozwiązań będą większe niż koszty poniesione na zakup nadmiarowych urządzeń, ich obsługę oraz na potrzebne materiały. Na przykład jeśli zwiększymy sprawność ogniwa z 20% do 21%, ostateczna ilość energii otrzymana przez ogniwo wzrośnie o 5% (1/20). Jeśli więc to podwyższenie sprawności nie podnosi kosztów inwestycji o więcej niż 5% (czyli około 25 mln zł dla fabryki 1GW), można się spodziewać, że wdrożone innowacje miały sens ekonomiczny.

Oczywiście nowe procesy produkcyjne nie muszą koniecznie podnieść sprawności ogniwa. Ostatecznie o tym jakie ogniwa trafią na rynek decyduje nie ich sprawność, a ich koszt w przeliczeniu na ilość energii, które są one w stanie dostarczyć. A to będzie zależało np. od grubości płytki krzemowej użytej do produkcji ogniwa (im cieńsza tym mniejszy koszt ogniwa), materiału użytego na elektrody (dzisiaj w większości jest to srebro i wciąż szuka się zamienników), tempa degradacji ogniwa i wielu innych czynników.

Rozwój i kluczowe cechy technologii TOPCon

Koszty wytworzenia energii mogą zdecydować o tym, że technologia TOPCon ma szansę bardzo szybko zastąpić dominującą dzisiaj technologię PERC. Technologia TOPCon po raz pierwszy została opisana w 2013 roku przez Fraunhofer ISE (dla porównania pierwsze pomysły dotyczące technologii HJT powstawały już w latach 80-siątych). Postęp technologiczny spowodował, że dziś sprawności ogniwa otrzymanych komercyjnie przekraczają 24,5%, co przekracza możliwości obecnie dominującej technologii PERC.

Technologia TOPCon nie wpływa znacząco na strukturę ogniwa, a stosunkowo

mały CAPEX potrzebny do jej implementacji czyni z niej bardzo interesujący wariant brany pod uwagę przez inwestorów. Główną modyfikacją wprowadzoną do ogniwa w tej technologii jest dodatkowa warstwa selektywna, która niweluje straty wywołane przepływem prądu w okolicach metalowych elektrod. Pozwala to nie tylko zwiększyć sprawność, ale też stosować również tzw. płytki krzemowe typu n (domieszkowane fosforem zamiast borem), które z mniejszym stopniem ulegają degradacji. W dalszej części tego artykułu omówiono budowę ogniwa TOPCon oraz przedstawione zostaną najważniejsze procesy wykorzystywane do ich produkcji.

Budowa ogniwa PV TOPCon

Podstawową częścią typowego ogniwa (rys. 1) słonecznego typu TOPCon, stanowiącą jednocześnie około 50% kosztów całego urządzenia, jest cienka płytka krzemowa o grubości około 180µm. W tej technologii jest ona domieszkowana fosforem, który dostaje się do wnętrza płytki na drodze dyfuzji, poprzez wygrzewanie płytki w piecu w temperaturze 900°C w obecności trichlorku fosforu (POCl_3). Dzięki temu uzyskuje się tzw. płytkę krzemową „typu n”.

Górną część płytki domieszkuje się borem (B), otrzymując w ten sposób warstwę „typu p”, zwaną emiterym. Dzięki temu procesowi tworzy się złącze p-n niezbędne do funkcjonowania ogniwa słonecznego. Na tak przygotowane ogniwo nanoszone są kolejne warstwy pozwalające na zminimalizowanie strat oraz zmniejszenie defektów i niedoskonałości w strukturze ogniwa. Są to warstwy: tlenku aluminium (AlO_x), azotku krzemu (SiN_x) oraz tlenku krzemu (SiO_x), a także warstwa krzemu polikrystalicznego. Dwie pierwsze wymienione warstwy, nanoszone przy pomocy metody PECVD (*Plasma Enhanced*

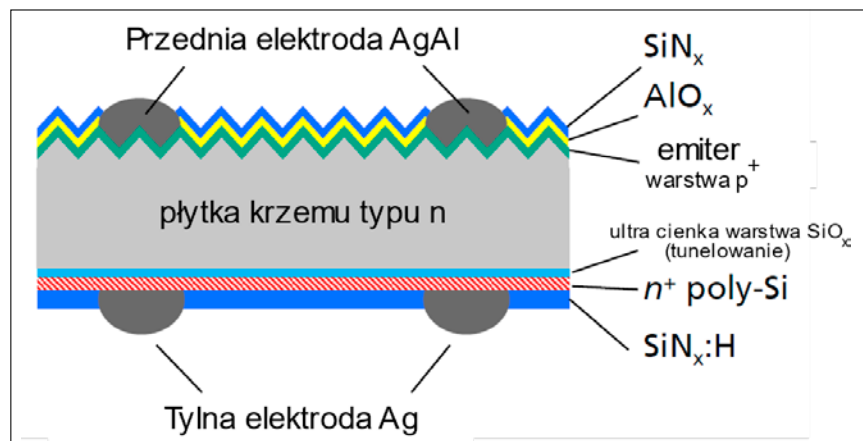
Chemical Vapour Deposition) występują również w technologii PERC i służą do pasywacji powierzchni emitera oraz stanowią powłokę antyrefleksyjną zmniejszającą straty na odbicie promieniowania słonecznego. Ich grubość, to około 100nm, która jednak wystarcza do nadania ogniwom krzemowych ich charakterystycznego niebieskiego koloru.

Główną innowacją w technologii TOPCon jest ultracienka warstwa tlenku krzemu, której grubość wynosi jedynie 1,5 nm. Pozwala to na przepływ elektronów przez tę warstwę przy pomocy zjawiska tunelowania (stąd nazwa technologii). Dzięki temu unika się strat przy elektrodach i na tylnej powierzchni ogniwa związanych z tzw. rekombinacją nośników prądu. Właściwa kontrola grubości nanoszonego tlenku jest kluczowa do uzyskania satysfakcjonujących parametrów ogniwa słonecznego. Tlenek jest nanoszony termicznie w reaktorze w metodzie LPCVD (*Low Pressure Chemical Vapour Deposition*), która następnie służy do naniesienia 250-300nm warstwy krzemu polikrystalicznego silnie domieszkowanego na typ n. Ta warstwa m.in. chroni tlenek, który może zostać w łatwy sposób zniszczony w późniejszym procesie wypalania (ang. *firing*) elektrod, w którym temperatura sięga 760°C.

Elektrody, obecnie głównie wykonane ze srebra, nakłada się metodą sitodruku (ang. *screen printing*). Uzyskanie właściwych past potrzebnych do wytwarzania elektrod (z mniejszą zawartością srebra), wykorzystanie niskotemperaturowych sposobów ich nakładania oraz kontrola wzrostu warstwy tlenku są kluczowe w kontekście dalszego rozwoju technologii TOPCon.

Zastawienie typowych cech i parametrów ogniwa TOPCon

Rozwój technologii TOPCon postępuje, a parametry techniczne (a w szczególności



Rys.1. Schemat budowy ogniwa TOPCon

ści ekonomiczne), wykonanych przy jej pomocy ogniw, ulegają systematycznie poprawie. Tym niemniej warto zestawić typowe ich parametry wyjściowe, które mogą zdecydować o tym, że TOPCon-y staną się wiodącą, komercyjną technologią w latach 2025-2030.

Moduły oparte na technologii n-TOP-Con mają szereg korzystnych parametrów i dają szereg przewag konkurencyjnych:

- Posiadają sprawność wynoszącą ponad 20%;
- Mają wyższą wydajność i żywotność niż moduły p-type;
- Mogą być produkowane na tych samych liniach produkcyjnych co moduły PERC, co oznacza, że producenci modułów nie muszą ponosić kosztów przezbrajania swoich linii;
- Opierają się w większości na znanych i przetestowanych rozwiązaniach – technologia ogniw PERC;
- Koszt procesu ich wytwarzania jest porównywalny z modułami opartymi na ogniwach typu PERC;
- Mogą być łatwo dostosowane do pojawiających się technologii tandemowych;
- Mają bardzo niski współczynnik degradacji, wynoszący jedynie około 1% w pierwszym roku i 0,4% w kolejnych latach:

- eliminacja tzw. defektu bor-tlen;
 - odporność na LID (Light Induced Degradation);
 - Mają tą samą efektywność pracy przy słabym świetle, jak również w warunkach nasłonecznienia pod różnymi kątami;
 - Charakteryzują się szeroką odpowiedzią spektralną umożliwiającą pozyskiwanie wyższej mocy w pochmurne dni;
 - Mają niski współczynnik temperaturowy rzędu 0,32%/°C;
 - Można je produkować w wariantach zarówno jednostronnych jak też dwustronnych (szkło-szkło);
 - Mają mniejszą podatność na zanieczyszczenia metaliczne krzemu;
 - Mogą być również produkowane przy ułożeniu ogniw „na zakładkę” (ang. shingled);
 - Wykorzystują wieloprzewodowe (ang. multiwire) połączenia ogniw, ograniczając dzięki temu efekt samo-zacieniania ogniwa.
- Atrakcyjne parametry technologii TOPCon łączą w sobie dorobek w zakresie rozwoju znajdującej się obecnie w szczycie swojego rozwoju technologii PERC i najbardziej dojrzałych rozwiązań technologii nowej generacji.

Podsumowanie

Ogniwa TOPCon, z uwagi na ich korzystne dla odbiorcy parametry techniczne (trwałość, stabilność) i ekonomiczne (niski koszt produkcji energii) są najpoważniejszymi kandydatami do zastąpienia ogniw PERC w najbliższych kilku latach. Sposób ich produkcji jest efektywny, a przeszkody technologiczne, które ograniczają dzisiaj ich udział w światowym rynku, wydają się być możliwe do pokonania. Ze względu na niższe od konkurencyjnych ogniw HJT koszty produkcji oraz łatwość ich wykorzystania w ogniwach tandemowych, mają one szansę zdominować rynek fotowoltaiczny nawet po 2030 roku.

Podziękowania

Autor dziękuje bardzo prof. Ryszardowi Tytko, prezesowi firmy Eco Investment sp. z.o.o za interesujące materiały, rozmowy i zaangażowanie, które były inspiracją do powstania tego artykułu.

W artykule wykorzystano dane pochodzące m.in. z analiz udostępnionych przez Giga PV S.A.