

Techniki drukowania w produkcji ogniw fotowoltaicznych

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie technologią elektroniki drukowanej. Stosuje ona przewodzące materiały organiczne i nieorganiczne, a także funkcjonalne nanomateriały do wytwarzania elementów i obwodów elektronicznych, jak tranzystory, wyświetlacze czy baterie i ogniwa [1–4]. Znaczącą rolę w dziedzinie elektroniki drukowanej odgrywa produkcja ogniw fotowoltaicznych, ze względu na rosnące zapotrzebowanie na odnawialne źródła energii. Ogniwa fotowoltaiczne są obecnie wytwarzane różnymi metodami, pośród których najbardziej rozpowszechniony jest sitodruk [5, 6], ale stosuje się również druk ink-jet [7, 8]. Przy tym wymierne korzyści przynosi stosowanie metody druku ze zwoju na zwój [9, 10]. Zastosowanie w produkcji ogniw fotowoltaicznych technik druku pozwala zmniejszyć koszty wytwarzania, a także zwiększa ilość aplikacji w których można wykorzystać tego rodzaju źródła zasilania, np. na dachach i elewacjach budynków, jako rolety, na ubraniach czy w dokumentach. Produkcja ogniw fotowoltaicznych technikami zwojowymi pozwala na łatwy dobór rozmiaru ogniwa poprzez zwykłe cięcie zadrukowanej wstęgi. Popularnie stosowane podłoża w technikach drukarskich, takie jak folie polimerowe czy papier znajdują zastosowanie jako tanie podłoża dla układów elektroniki drukowanej. W przypadku gdy koszt podłoża w produkcji ogniw fotowoltaicznych stanowi kilkadziesiąt procent całkowitej ceny wyrobu [11] kluczowe jest poszukiwanie nowych rozwiązań, a stosowanie podłoży papierowych czy folii polimerowych, kilkadziesiąt lub nawet kilkaset razy tańszych od podłoży szklanych, staje się doskonałym rozwiązaniem alternatywnym. W obecnych zastosowaniach najpopularniejszym podłożem pozostają folie z politereftalanu etylenu (PET) [12, 13], ze względu na duże problemy z zastosowaniem chropowatych i mocno nasiąkliwych podłoży papierowych [14, 15].

Mimo iż rozwiązania obejmujące produkcję drukowanych ogniw fotowoltaicznych mają charakter nowatorski, samo zastosowanie druku w produkcji ogniw nie jest nową koncepcją dla fotowoltaiki. W tej branży od dawna stosuje się sitodruk do tworzenia elektrod srebrowych nanoszonych na podłoża krzemowe [16], a także próbowano stosować do tego celu druk ink-jet [17]. Od kilkadziesiątu lat znane są również techniki wytwarzania ogniw z tellurku i siarczku kadmu z zastosowaniem sitodruku [18]. Przemysł i rynek ogniw fotowoltaicznych są zatem dobrze zaznajomione z technikami drukowania, co oznacza że stosowanie tego rodzaju technik produkcyjnych nie stanowi dla nich bariery, a wręcz może być okazją



Rysunek 1.1. Instalacja cienko-warstwowych ogniw polimerowych wykonanych techniką nakładania szczelnego metodą ze zwoju na zwój, wyprodukowanych w Krajowym Laboratorium OakRidge (ORNL) w Stanach Zjednoczonych. Zdjęcie: Ken Fields

na wzmocnienie konkurencyjności. W branży ogniw techniki drukarskie są postrzegane jako metody produkcji niezawodne i tanie, w porównaniu z metodami napyłania czy osadzania chemicznego. Zastosowanie technik druku pozwala również ograniczyć zużycie energii i materiałów, co jest nie bez znaczenia w produkcji układów, które powinny na etapie użytkowania umożliwiać uzyskiwanie większej ilości energii niż ta, która została wykorzystana na etapie ich wytwarzania. Pozwala to na zachowanie miana „ekologicznego źródła energii”, co jest tak samo ważne w procesie sprzedaży jak niska cena urządzeń.

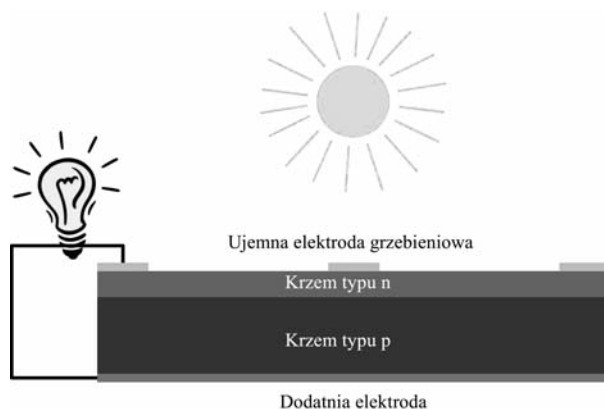
Wśród europejskich i światowych firm z branży ogniw fotowoltaicznych rośnie zainteresowanie wykorzystaniem w ich produkcji technik drukarskich. Z grona producentów zajmujących się tą dziedziną warto wymienić firmy NanoSolar i Konarka ze Stanów Zjednoczonych oraz G24 Innovations z Wielkiej Brytanii, wykorzystujące w produkcji ogniw różne techniki druku, a także firmę DuPont, oferującą zestaw past i tuszów krzemowych Innovalight do sitodruku.

2. Rodzaje ogniw fotowoltaicznych

Ogniwa fotowoltaiczne są ciekawym rozwiązaniem w zakresie pozyskiwania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego. Ogólna zasada działania polega na przetwarzaniu promieniowania świetlnego docierającego do Ziemi bezpośrednio na prąd elektryczny, przy wykorzystaniu zjawiska fotowoltaicznego zachodzącego w strukturach półprzewodnikowych ogniwa. Panel fotowoltaiczny, zwany również baterią słoneczną, składa się zwykle z wielu ogniw połączonych ze sobą w celu zwiększenia efektywności pozyskiwania energii. Ogniwa mogą być wytwarzane na wiele różnych sposobów, z zastosowaniem szerokiego spektrum materiałów, co pozwala na tworzenie rozwiązań odpowiednich do konkretnych zastosowań. Umożliwia to produkcję zarówno prostych ogniw zasilających drobny sprzęt elektroniczny (kalkulatory, zegarki), jak i bardziej złożonych rozwiązań do zasilania

gospodarstw domowych, aż po masową produkcję energii elektrycznej w zaawansowanych elektrowniach słonecznych. Ogniwa fotowoltaiczne są również atrakcyjne ze względu na długi okres użytkowania i minimalne koszty konserwacji. Niektóre firmy oferują rozwiązania objęte 25-letnią gwarancją producenta na bezawaryjne użytkowanie [19].

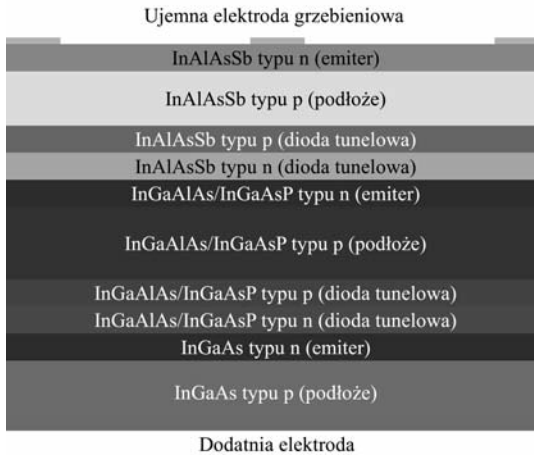
Najstarsza technologia ogniw fotowoltaicznych opiera się na zastosowaniu krzemu w postaci sztywnego podłoża, pokrytego warstwami metalicznymi pełniącymi rolę elektrod (rys. 2.1). Najczęściej stosowanym materiałem jest krzem krystaliczny – zarówno monokrystaliczny jak i polikrystaliczny – pozwalający osiągać sprawności dochodzące do 27% [20]. Szacuje się, że około 80% wszystkich paneli fotowoltaicznych słonecznych wyprodukowanych jest z krzemu krystalicznego. Ogniwa wytworzone z użyciem tego materiału wykazują niezawodność w długim okresie i stabilną wartość sprawności [21]. Dużą zaletą tego rodzaju ogniw jest dostępność materiału. Krzem jest jednym z najczęściej występujących pierwiastków w skorupie ziemskiej. Jednak w większości wypadków występuje on w związkach z innymi pierwiastkami, a to podwyższa koszty produkcji, bowiem wymaga przeprowadzaniem energochłonnych i kosztownych procesów oczyszczania. Krzem jest materiałem, który pozwala wytworzyć ogniwa w najprostszy sposób z wykorzystaniem podstawowych zjawisk fizycznych, jednak ze względu na znaczące koszty pozyskania materiału poszukuje się innych rozwiązań.



Rysunek 2.1.
Budowa krystalicznego
ogniwa fotowoltaicznego
na bazie krzemu

Innym rodzajem ogniw krystalicznych są ogniwa jedno- i wielozłączowe, wykonywane ze związków półprzewodnikowych takich jak InGaP, InGaAs, GaAs itp. [22] (rys. 2.2). Ogniwa tego rodzaju osiągają największe sprawności spośród znanych rodzajów ogniw, ponad 44% [20]. Ich produkcja jest złożonym procesem i wymaga stosowania rzadkich pierwiastków, co wpływa na ich wysoką cenę. Istnieją jednak rozwiązania komercyjne stosujące tę technologię. Na przykład firma Semprius wytwarza panele z koncentratorami optycznymi, gdzie materiał półprzewodnikowy jest nakładany w oparciu o opatentowaną metodę tzw. drukowania selektywnego [23].

Oddzielną grupą ogniw fotowoltaicznych, w których produkcji szeroko stosuje się techniki druku, są ogniwa cienkowarstwowe. Stanowią one bardzo intere-

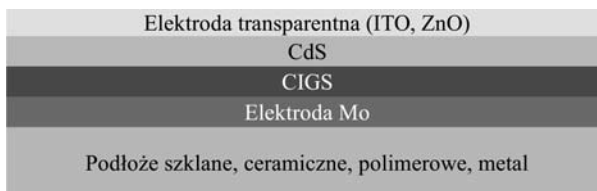


Rysunek 2.2.
Budowa wielozłączonego krystalicznego ogniwa fotowoltaicznego

sującą alternatywę ogniw krystalicznych. Wymagają użycia znacznie mniejszej ilości materiału półprzewodnikowego, co wpływa na obniżenie kosztów produkcji [24]. Szacuje się, że to właśnie wprowadzenie ogniw cienkowarstwowych może znacznie przyspieszyć popularyzację zastosowania tego alternatywnego źródła energii. W kierunku możliwości zastosowania w produkcji takich ogniw jest badanych wiele materiałów. Najczęściej stosowanymi są materiały wymienione w poniższym zestawieniu:

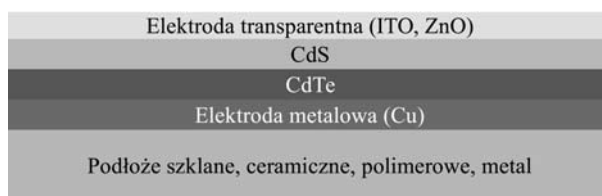
- ogniwa CIGS – związki miedzi, indu, galu i selenu (rys. 2.3),
- ogniwa CdTe/CdS – związki tellurku kadmu i siarczku kadmu (rys. 2.4),
- ogniwa barwnikowe, zwane z angielskiego DSSC (dye sensitized solar cells) (rys. 2.5),
- ogniwa organiczne (rys. 2.6),
- ogniwa z krzemu amorficznego.

Wiele materiałów półprzewodnikowych w połączeniu z przewodzącymi może być wykorzystane do budowy ogniw fotowoltaicznych, jednak najlepsze wyniki jak dotychczas uzyskuje się stosując związki miedzi, indu i selenu CIS, a w nowocześniejszym rozwiązaniu także galu CIGS [25]. Związki tych pierwiastków stosowane są w przemyśle fotowoltaicznym już od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, gdy zaobserwowano ich dużą sprawność i stabilność parametrów w czasie. Sprawilo to że materiały te zostały jako pierwsze zastosowane do produkcji ogniw cienkowarstwowych i otworzyły możliwość do uruchomienia ich masowej produkcji. Ze względu na sprawności – zbliżone do sprawności ogniw krzemowych, wynoszące ponad 20% [20], jest to jeden z najbardziej obiecujących materiałów.



Rysunek 2.3.
Budowa cienkowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego CIGS

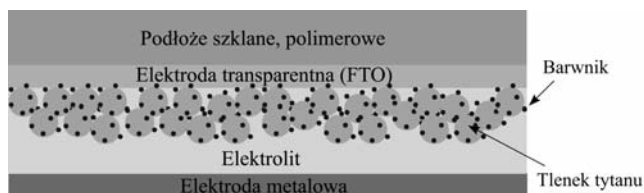
Rysunek 2.4.
Budowa cienkowarstwowego
ogniwa fotowoltaicznego
CdTe/CdS



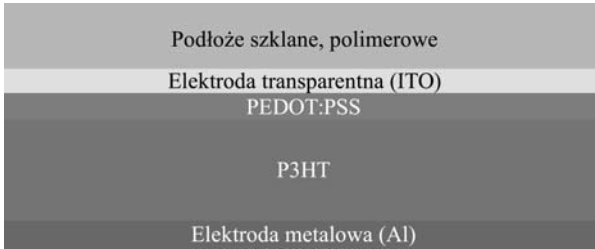
Podobną budową cechują się ogniwa oparte na tellurku kadmu z warstwą buforową siarczku kadmu. Zjawisko fotoelektryczne w strukturach CdTe znane jest już od lat pięćdziesiątych, jednak przełom w ich praktycznym zastosowaniu nastąpił dopiero w latach dziewięćdziesiątych gdy udało się podwyższyć ich sprawność do 15% [26]. Obecnie technologia tych ogniw jest już u kresu możliwości osiągając sprawności bliskie 20% [20].

Kolejną grupę stanowią ogniwa barwnikowe, zwane również ogniwami Grätzela [27]. Składają się z materiału półprzewodnikowego znajdującego się pomiędzy światłoczułą anodą i elektrolitem, tworzącymi układ elektrochemiczny. Do zalet tego rodzaju ogniw można zaliczyć to, że są one częściowo przezroczyste, co pozwala adaptować je jako formę dekoracji, mogą być elastyczne, a dzięki zastosowaniu technik druku ze zwoju na zwój można je wytwarzać małym nakładem kosztów. Większość materiałów stosowanych przy ich produkcji jest relatywnie tania. Prowadzone są prace nad zastąpieniem najbardziej kosztownych składników jakimi są platyna i ruten (w barwniku), tańszymi odpowiednikami. Ogniwa tego rodzaju osiągają sprawności rzędu 11% [20].

Rysunek 2.5.
Budowa barwnikowego
ogniwa fotowoltaicznego



Ostatnią grupą są ogniwa na bazie półprzewodnikowych i przewodzących związków organicznych [28]. Tego rodzaju ogniwa charakteryzują się najmniejszą sprawnością wśród wymienionych – poniżej 11% [20], jednak ich przewagą jest niska cena materiałów i ich nieograniczona dostępność, gdyż nie są one oparte na surowcach kopalnych jak pozostałe ogniwa. Ze względu na niską cenę materiałów, mogą one być konkurencją dla innych ogniw, jeżeli będziemy rozważać stosunek sprawności do ceny ogniwa. Zastosowanie technik druku najlepiej sprawdza się właśnie w produkcji ogniw tego rodzaju. Światowym potentatem produkcji ogniw organicznych jest amerykańska firma Konarka Technologies, wytwarzająca na skalę masową ogniwa z serii „Power Plastic”. Innym przykładem ogniw organicznych są tzw. ogniwa ze złączem objętościowym, gdzie specjalne nanocząstki (np. fulereny) są zatopione w osnowie z polimeru półprzewodnikowego [29]. Oba te rozwiązania mają potencjalnie największe możliwości w zmniejszeniu kosztu produkcji ogniw.

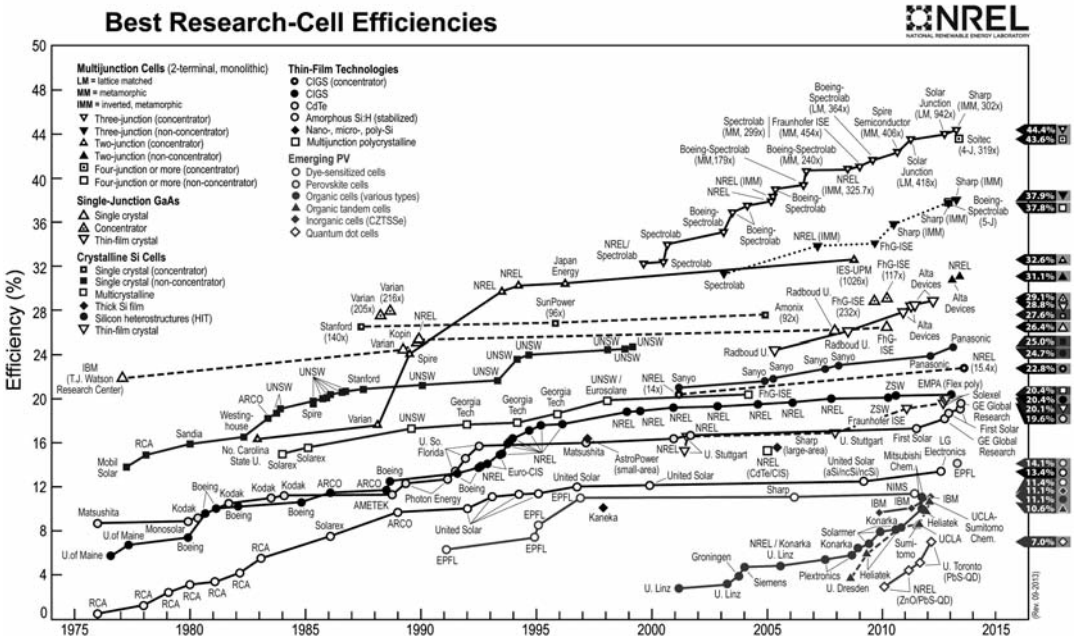


Rysunek 2.6. Budowa organicznego cienkowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego

Przy okazji ogniw cienkowarstwowych należy również wspomnieć o ogniwach z krzemu amorficznego. Budowa złączowa tych ogniw jest podobna do budowy ogniw z krzemu krystalicznego. Przewagą tego rodzaju ogniw jest to, że możliwości produkcyjne w zakresie wytwarzania krzemu w postaci struktury amorficznej są większe aniżeli w zakresie wytwarzania krzemu krystalicznego, przy znacznie niższych kosztach [30]. Dodatkowo możliwe jest uzyskanie bardzo cienkich struktur krzemowych, które wykazują znaczną elastyczność i dużą wytrzymałość mechaniczną. Zasadniczą różnicą w stosunku do krzemu krystalicznego jest występowanie dużej ilości wad i zanieczyszczeń, jednak możliwość wytwarzania dużych powierzchni rekompensuje te niedogodności. Ogniwa tego rodzaju osiągają sprawności rzędu 13% [20], a ze względu na znaczną elastyczność podłoża mogą być stosowane w produkcji z zastosowaniem metody druku ze zwoju na zwój.

Podsumowując to, co zostało powiedziane na temat wymienionych rodzajów ogniw, warto przedstawić w jaki sposób różne rodzaje technologii wpływały na

Rysunek 2.7. Wykres zachodzących na przestrzeni lat zmian sprawności ogniw fotowoltaicznych wytwarzanych przy użyciu różnych technologii



zwiększenie sprawności ogniw i jakie parametry uzyskują obecnie poszczególne rodzaje ogniw. Rysunek 2.7 przedstawia wykres publikowany cyklicznie przez Amerykański Departament Energii (DOE) będący wynikiem badań przeprowadzanych przez Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnych (NREL) [20].

3. Potencjalne korzyści i bariery związane ze stosowaniem technik druku w produkcji ogniw fotowoltaicznych

Stosowanie technik drukarskich w produkcji ogniw fotowoltaicznych musi być ekonomiczne uzasadnione. Kwestia kosztów zakupu i użytkowania panelu jest kluczowym czynnikiem wyboru produktu. Mimo iż najczęściej wymienianym parametrem ogniw jest ich sprawność, z punktu widzenia rynku najważniejsza jest relacja sprawności i kosztów. Ponieważ coraz częściej napotyka się na ograniczenia w podnoszeniu sprawności ogniw, konieczne jest skupienie się na obniżeniu kosztów ich produkcji. W tym przypadku przychodzą z pomocą techniki poligraficzne. Niektóre z nich, jak sitodruk, druk ink-jet, są już dobrze zaadaptowane do tego rodzaju zastosowań i ich udział w rynku produkcji ogniw fotowoltaicznych rośnie.

Drukowanie ogniw, poza tym, że powoduje obniżenie kosztów produkcji, ma jeszcze jedną zaletę – pozwala wytwarzać ogniwa na podłożach elastycznych w tych samych procesach, w których powstają druki reklamowe czy opakowania. To z kolei umożliwia wytwarzanie systemów zintegrowanych. Wartość produktów poligraficznych zwiększa się dzięki dodaniu im dodatkowej funkcji. W ten sposób powstają np. interaktywne reklamy czy „inteligentne” opakowania. Taka modyfikacja produktu umożliwia wejście na zupełnie nowe rynki i budowanie silniejszej pozycji konkurencyjnej.

Za wprowadzeniem produkcji ogniw fotowoltaicznych na masową skalę przemawiają również względy prawne. Obowiązujące unijne regulacje prawne spowodują wzrost zainteresowania odnawialnymi źródłami energii, w tym ogniwami fotowoltaicznymi, co może znacząco wpłynąć na rozwój rynku drukowanych ogniw w Polsce.

Omawiając korzyści i możliwości rozwoju płynące ze stosowania technik druku w produkcji ogniw fotowoltaicznych, należy również wspomnieć o potencjalnych ograniczeniach. Istnieje wiele doniesień literaturowych opisujących procesy druku ogniw i uzyskane parametry. Powstaje też coraz więcej firm wdrażających własne rozwiązania w tej dziedzinie. Należy jednak mieć na uwadze, że wytwarzanie ogniw tymi technikami nie sprowadza się do zakupu materiałów, kilku drukarek przemysłowych i uruchomienia produkcji z dnia na dzień, lub w ciągu tygodnia. Wdrożenie produkcji jest bardziej skomplikowane technicznie, jednak problemy natury technologicznej są możliwe do przezwyciężenia – trzeba tylko mieć świadomość ich istnienia.

Wśród potencjalnych możliwości aplikacji technik druku do produkcji ogniw, w pierwszej kolejności należy wymienić druk elektrod, zarówno na ogniwach krzemowych sztywnych, jak i na amorficznych elastycznych. Jest to obecnie największy rynek produkcji z zastosowaniem technik druku, wykorzystujący grubość warstwowo elektrody srebrne zarówno na froncie ogniwa (elektrody grzebie-

niowe) jak i na spodzie (aple). Jest to potencjalnie duży rynek na którym dostawcy materiałów są dobrze znani (np. DuPont). Jest dobrze rozwinięty w Stanach Zjednoczonych, Chinach czy Niemczech i w Czechach. W Polsce istnieje ciągle potencjał do zagospodarowania, co daje okazje wejścia na rynek lokalny. Wejście na inne rynki jest uwarunkowane konkurencyjnością produktów pod względem ceny i jakości. Kolejne potencjalne rynki można zdobywać produkując ogniwa cienkowarstwowe, zarówno organiczne jak i nieorganiczne. W przypadku ogniw nieorganicznych (CIGS, CdTe, pasty krzemowe) wdrożenie produkcji nie następuje z trudnością, choć może wymagać głębszego poszukiwania źródeł dostawy materiałów, lub wejścia w kooperację z lokalnymi producentami materiałów drukarskich lub past elektronicznych. Materiały do produkcji ogniw organicznych są dostępne komercyjnie (Agfa, Sigma-Aldrich), jednak ze względu na wczesny etap ich wdrażania wchodzenie w rynek ogniw organicznych może być ryzykowne. Podchodząc do zagadnienia z planem długookresowym, można rozważyć możliwość rozwoju nowych technologii z zastosowaniem nanomateriałów. W większości ogniw cienkowarstwowych istotną rolę odgrywa elektroda transparentna, która w obecnej formie jest wytwarzana ze związków tlenkowych indu i cyny (ITO). Tego rodzaju materiały są z reguły nanoszone technikami napyłania próżniowego na podłoże szklane lub polimerowe i istnieje niewiele rozwiązań umożliwiających druk elektrod transparentnych. Mimo iż brak jest gotowych komercyjnych rozwiązań w tym zakresie to prowadzone są badania, zarówno w kraju jak i na świecie, nad zastosowaniem nanorurek węglowych [31–34] czy grafenu [35] w pastach i atramentach przeznaczonych do druku elektrod transparentnych dla elektroniki drukowanej. Tego rodzaju materiały mogą pozwolić na otrzymanie warstw o dobrych właściwościach elektrycznych, optycznych i mechanicznych przy zachowaniu niskich kosztów produkcji.

4. Przykłady zastosowania technik druku w produkcji ogniw fotowoltaicznych

Sitodruk jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych technik drukowania, ponieważ pozwala na zadruk niemal każdego rodzaju podłoża: szkła, papieru, tkanin, tworzyw sztucznych. Warstwy otrzymywane tą techniką mają dużą grubość (do kilkunastu mikrometrów), co przekłada się na lepsze przewodnictwo w przypadku elektrod. Ze względu na możliwość łatwego wdrożenia, sitodruk jest stosowany jako główna technika wytwarzania elektrod na ogniwach krzemowych. Ponad 90% wszystkich paneli krzemowych jest wykonanych za pomocą sitodruku i około 60% elastycznych modułów cienkowarstwowych jest wytwarzane tą metodą [19]. Sitodruk stosowany jest również do wytwarzania warstw aktywnych zawierających proszki krzemowe (DuPont – Innovalights), proszki CdTe lub CIGS, a także do nakładania warstw organicznych z nanocząstkami, które oprócz funkcji ogniwa mogą również pełnić rolę dekoracji [36].

Druk ink-jet jest obecnie eksperymentalnie stosowany w produkcji ogniw fotowoltaicznych. Tę technikę druku, podobnie jak sitodruk, stosuje się do wytworzenia warstw aktywnych w cienkowarstwowych ogniwach, a także do wykonania

elektrod na sztywnych ogniwach krystalicznych. Druk ink-jet jest techniką bezkontaktową, co pozwala na stosowanie znacznie cieńszych podłoży, dzięki czemu obniżeniu ulegają koszty materiałowe. Potentat w dziedzinie produkcji ogniw organicznych, Konarka, stosuje druk ink-jet. Ogniw takie charakteryzują się jednak niską sprawnością, rzędu 3–5% i krótkim czasem użytkowania (kilka lat) wynikającym z degradacji zastosowanych polimerów przewodzących i półprzewodnikowych.

Zastosowanie drukowania zwojowego do nakładania warstw półprzewodnikowych na podłoża elastyczne, jest wykorzystywane przez kilka firm na świecie. Jedną z takich firm jest Nanosolar produkująca ogniw CIGS w procesie druku offsetowego. Dzięki tej metodzie możliwe jest drukowanie kilkudziesięciu metrów ogniw na minutę, na specjalnie przygotowanym elastycznym podłożu ze stopu metali [37]. Sprawność tych ogniw sięga ponad 15%, co jest porównywalne z wynikiem uzyskiwanym przez gorszej jakości krystaliczne ogniw krzemowe. Firma Konarka, oprócz druku ink-jet, używa także drukowania zwojowego stosując jeden z rodzajów druku szczelinowego, który służy do nakładania warstw polimerowych. Ponieważ jest to technika która, była popularnie stosowana do pokrywania papieru fotograficznego emulsją światłoczułą, Konarka była w stanie uruchomić produkcję w krótkim czasie dzięki nabyciu całej fabryki od Polaroidu w New Bedford. Z technikami druku zwojowego wiąże się największe nadzieje na rozwój masowej produkcji tanich ogniw fotowoltaicznych, ze względu na potencjalnie duży dostęp do poligraficznych linii offsetowych.

Podsumowanie

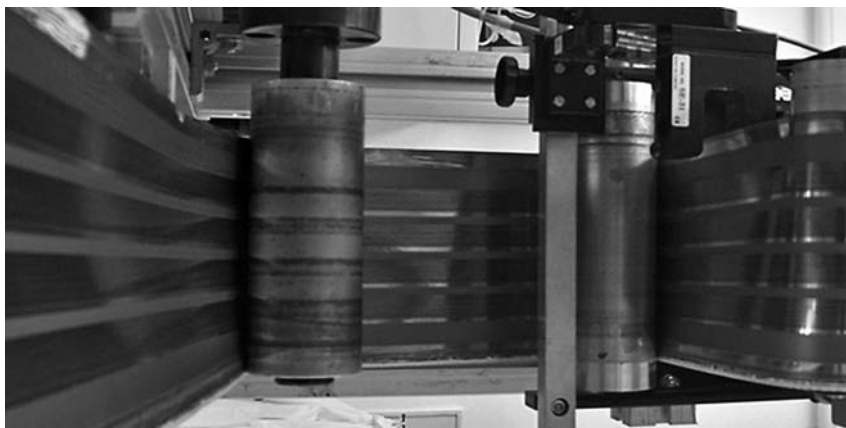
Żyjemy w czasach gdy zapotrzebowanie na energię drastycznie rośnie, co wywiera negatywny wpływ na środowisko naturalne, a także destabilizuje sytuację polityczno-gospodarczą świata. Inwestycje w odna-



Rysunek 4.1.
Elastyczne ogniwo firmy UniSolar wykonane z krzemu amorficznego z elektrodami srebrowymi wykonanymi sitodrukiem.
Zdjęcie: Politechnika Łódzka



Rysunek 4.2.
Elastyczne ogniwo drukowane metodą sublimacji na podłożu papierowym, wykonane w Minnesota Institute of Technology, w Stanach Zjednoczonych.
Zdjęcie: Patrick Gillooly



Rysunek 4.3.
Drukowanie
elektroniki
na maszynie
zwojowej

wialne źródła energii, niezależne od posiadanych źródeł paliwowych, cen surowców na rynkach czy wahań kursów walut, stanowią doskonale rozwiązanie wielu problemów gospodarczych, z którymi obecnie się borykamy. Aby ogniwa fotowoltaiczne mogły stać się znaczącym źródłem pozyskiwania energii elektrycznej, konieczne jest spełnienie wielu wymogów rynkowych, wśród których istotny jest łatwy dostęp do produktu, jego akceptowalna, niska cena i wysoka jakość zapewniająca długotrwałe użytkowanie. Dzięki rozwojowi technologii cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, perspektywa dostępności tej technologii dla przeciętnego odbiorcy staje się coraz bardziej realna. Dużą rolę odgrywa w tym zastosowanie technik poligraficznych, które pozwalają na uproszczenie produkcji i zmniejszenie kosztów finalnego wyrobu. Sukcesywny postęp w dopracowaniu technologii druku ogniw cienkowarstwowych, pozwolił już dziś otrzymać wyroby o zadowalających sprawnościach i stale malejącej cenie. Technologia cienkowarstwowych ogniw drukowanych wydaje się być właściwym kierunkiem w dążeniu do pozyskiwania ogólnodostępnych źródeł energii, a wraz ze wzrostem sprawności ogniw nic nie będzie stało na przeszkodzie, aby w najbliższej przyszłości wyeliminowały one tradycyjne ogniwa krystaliczne na bazie krzemu. Z każdym rokiem powstaje coraz więcej udoskonaleń tej technologii i dzięki temu można stwierdzić, że w niedługim czasie ogniwa tego rodzaju mogą stać się znaczącym źródłem energii elektrycznej, z dużym rynkiem odbiorców.

Artykuł powstał w ramach projektu „Naukowcy dla gospodarki Mazowsza” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Bibliografia

1. Tai, Yan-Long, Zhen-Guo Yang, and Zhi-Dong Li, *A promising approach to conductive patterns with high efficiency for flexible electronics*. Applied Surface Science 257.16 (2011), 7096–7100.
2. Nyholm L., Nyström G., Mihranyan A., Strømme, M., *Toward Flexible Polymer and Paper-Based Energy Storage Devices*. Advanced Materials, 23(33) (2011), 3751–3769.

3. Zschieschang U. et al., *Flexible Low-Voltage Organic Transistors and Circuits Based on a High-Mobility Organic Semiconductor with Good Air Stability*. *Advanced Materials* 22.9 (2010), 982–985.
4. Tobjörk D., Österbacka R., *Paper electronics*. *Advanced Materials* 23.17 (2011), 1935–1961.
5. Burnside S. et al., *Deposition and characterization of screen-printed porous multi-layer thick film structures from semiconducting and conducting nanomaterials for use in photovoltaic devices*. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 11.4 (2000), 355–362.
6. Ito S., Chen P., Comte P., Nazeeruddin M.K., Liska P., Péchy P., Grätzel M., *Fabrication of screen-printing pastes from TiO₂ powders for dye-sensitised solar cells*. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 15(7) (2007), 603–612.
7. Teng K.F., Vest R.W. *Application of ink jet technology on photovoltaic metallization*. *Electron Device Letters, IEEE*, 9(11) (1988), 591–593.
8. Aernouts T., Aleksandrov T., Giroto C., Genoe J., Poortmans J., *Polymer based organic solar cells using ink-jet printed active layers*. *Applied Physics Letters*, 92 (2008), 033306.
9. Krebs F.C., Tromholt T., Jørgensen M., *Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing*. *Nanoscale* 2.6 (2010), 873–886.
10. Galagan Y., de Vries I.G., Langen A.P., Andriessen R., Verhees W.J., Veenstra S.C., Kroon J.M., *Technology development for roll-to-roll production of organic photovoltaics*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(5) (2011), 454–461.
11. Zweibel K., *Thin film PV manufacturing: Materials costs and their optimization*. *Solar energy materials and solar cells* 63.4 (2000), 375–386.
12. Winther-Jensen B., Krebs F.C., *High-conductivity large-area semi-transparent electrodes for polymer photovoltaics by silk screen printing and vapour-phase deposition*. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90.2 (2006), 123–132.
13. Aernouts T., Vanlaeke P., Geens W., Poortmans J., Heremans P., Borghs S., Leenders L., *Printable anodes for flexible organic solar cell modules*. *Thin Solid Films*, 451 (2004), 22–25.
14. Wang F., Chen Z., Xiao L., Qu B., Gong Q., *Papery solar cells based on dielectric/metal hybrid transparent cathode*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(7) (2010), 1270–1274.
15. Lamprecht B., Thünauer R., Ostermann M., Jakopic G., Leising G., *Organic photodiodes on newspaper*. *Physica Status Solidi (a)*, 202(5) (2005): R50–R52.
16. Moore A.R., *Optimum shape of the bus bar on solar cells of arbitrary shape*. *RCA Review*, vol. 38 (1977), 486–499.
17. Teng K.F., Vest R.W., *Metallization of solar cells with ink jet printing and silver metallo-organic inks*. *Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, 11(3) (1988), 291–297.
18. Ikegami S., *CdS/CdTe solar cells by the screen-printing-sintering technique: Fabrication, photovoltaic properties and applications*. *Solar Cells* 23.1 (1988), 89–105.
19. Brenner P., *Printing photovoltaics*. *Industrial + Specialty Printing*, 1(01) (2010), 26–33. (<http://www.industrial-printing.net>)
20. *National Center for Photovoltaics NREL – Cell Efficiency Records*, (<http://www.nrel.gov/ncpv>)
21. *Applied Materials, The world's most efficient solar cells*. Retrieved from (<http://www.appliedmaterials.com/technologies/solar/crystalline-silicon>)

22. King R.R., Sherif R.A., Law D.C., Yen J.T., Haddad M., Fetzer C.M., Karam N.H. *New horizons in III–V multijunction terrestrial concentrator cell research*. In 21st European PV Solar Energy Conference (2006, September), Dresden.
23. <http://www.semprius.com/>
24. Zoomer W., *Contemporary thin-film solar cells*. Industrial + Specialty Printing, 1(03) (2010), 18–21.
25. Kaelin M., Rudmann D., Tiwari A.N., *Low cost processing of CIGS thin film solar cells*. Solar Energy 77.6 (2004), 749–756.
26. Zweibel K., *Thin films: past, present, future*. No. NREL/TP-413-7486. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States), (1995).
27. O'Regan B., Grätzel M., *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films*. Nature 353 (6346) (1991), 737–740.
28. Li Gang, Rui Zhu, Yang Yang. *Polymer solar cells*. Nature Photonics 6.3 (2012), 153–161.
29. Thompson B.C., Fréchet J., *Polymer–fullerene composite solar cells*. Angewandte Chemie International Edition 47.1 (2008), 58–77.
30. Vanek F.M., Albright L.D., *Energy systems engineering: Evaluation & Implementation*. New York (2008), McGraw Hill.
31. Sibiński M., Jakubowska M., Znajdek K., Słoma M., Guzowski B., *Carbon nanotube transparent conductive layers for solar cells applications*. Optica Applicata, 41(2) (2011), 375–381,
32. Sibiński M., Znajdek K., Walczak S., Słoma M., Górski M., Cenian A., *Comparison of ZnO: Al, ITO and carbon nanotube transparent conductive layers in flexible solar cells applications*. Materials Science and Engineering: B, 177(15) (2012), 1292–1298.
33. Jakubowska M., Słoma M., Młozniak A., *Printed transparent electrodes containing carbon nanotubes for elastic circuits applications with enhanced electrical durability under severe conditions*. Materials Science and Engineering: B 176.4 (2011): 358–362.
34. Futera K., Sitek J., Słoma M., Jakubowska M., *Organiczna Elektronika-ekonomiczna alternatywa dla elektroniki*. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 50(12) (2009), 95–99.
35. Jakubowska M., Słoma M., Janczak D., Młozniak A., Wróblewski G., *Printed transparent electrodes with graphene nanoplatelets*. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 53(6) (2012), 97–99.
36. *Fraunhofer-Gesellschaft, Screen-printed solar cells in many colors and designs, even used in windows*. ScienceDaily, 2008. <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/01/080130194130.htm>
37. <http://www.nanosolar.com>

Abstract

Printing techniques in production of photovoltaic cells

The purpose of this study is to present potential alternatives for printing techniques in the production of new branch of technology, printed electronics, and especially printed solar cells. Printing industry is facing a reduction of demand for printed content, which is increasingly being distributed in electronic form. Therefore, there is potential capacities in the printing industry that can be utilized in developing the printed electronics industry. Production of printed thin-film photo-

voltaic cells is an excellent alternative for the printing companies that are looking for alternative markets for their products. This article presents the implementation of such solutions on an industrial scale, presents the potential opportunities and threats associated with the production of printed solar cells. Examples are brought to present more closely the issue of printing solar cells along with demonstration that such energy conversion systems, though different from traditional printed products, can be printed on existing lines, using commercially available materials. Printing techniques can have a crucial impact on the development and popularization of the alternative energy sources in the form of thin-film cells, which will advance the availability of these solutions for a wider range of society.

