

Możliwości zastosowania ekstraktów roślinnych w procesie otrzymywania srebra nanocząsteczkowego

Jolanta PULIT*, Marcin BANACH – Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2014, 68, 1, 47–52

Wstęp

Istotnym czynnikiem sprzyjającym rozwojowi nanotechnologii jest opracowywanie sposobów otrzymywania nanomateriałów z wykorzystaniem metod biologicznych, do których należą procesy, w których wykorzystuje się bakterie, grzyby i ekstrakty roślinne. Elementy struktur tych czynników charakteryzują się właściwościami umożliwiającymi przeprowadzanie redukcji chemicznej prowadzącej do uzyskiwania nanomateriałów [1–5]. Wraz z rozwojem nanotechnologii, metody ekologiczne stały się alternatywą dla procesów tradycyjnych, które nie zawsze pozostają w zgodności z zasadami zielonej chemii i tym samym nie są obojętne dla środowiska naturalnego. Istotną cechą metod proekologicznych jest możliwość ograniczenia stosowania w procesie substancji mogących stanowić potencjalne zagrożenie dla środowiska naturalnego. Dodatkowo warto odnotować niski koszt prowadzenia przebiegu redukcji jonów srebra, gdyż proces bazujący na tych metodach nie wymaga zaangażowania wyspecjalizowanego sprzętu laboratoryjnego. Nie bez znaczenia jest również prostota sposobu postępowania; w większości przypadków proces opiera się jedynie na połączeniu substratów [6–10]. Biegunem przeciwnym do wymienionych własności procesów wykorzystujących ekstrakty roślinne jest fakt, iż jako źródło jonów srebra wykorzystuje się przeważnie azotan (V) srebra. Substrat ten pozyskiwany jest na drodze syntetycznej [11] i jego używanie nie sprzyja określeniu podobnych metod jako całkowicie przyjazne dla środowiska.

Analizując sposób otrzymywania ekstraktów roślinnych, można przypuszczać, iż proces ten jest kłopotliwy i stanowi wyzwanie w zakresie ekonomii jego realizacji. Istotnie, wybór metody prowadzącej do wyekstrahowania z materiału roślinnego substancji czynnych jest kluczowym czynnikiem decydującym o kosztach procesu, niemniej jednak w większości publikacji sugeruje się sporządzenie naparu roślinnego, czyli takiej formy ekstrakcji, w której związki czynne ekstrahowane są w wyniku zalania materiału roślinnego gorącą wodą. W znaczącej większości publikacji woda jest czynnikiem ekstrahującym; rozpuszczalniki organiczne w tego typu pracach wymieniane są wyjątkowo rzadko.

Jednym z najbardziej pożądanym nanomateriałom jest srebro nanocząsteczkowe [12–17]. Ze względu na swoje biobójcze właściwości, jest to materiał, który znalazł zastosowanie w medycynie, kosmetologii, stomatologii, budownictwie, przemyśle spożywczym i in. Nanosrebro jest stosowane jako dodatek do włókien w szczotkach do zębów [18], czy mydeł antybakteryjnych [19]. W budownictwie srebro nanocząsteczkowe stanowi cenną domieszkę do farb pokrywających zewnętrzne powierzchnie, w celu zabezpieczenia ich przed niepożądanym rozwojem mikroorganizmów [20]. Cenne właściwości nanosrebra znalazły również zastosowanie w przemyśle spożywczym, gdzie dodaje się je do filtrów powietrza pracujących np. w zakładach mięsnych [21].

Dalej opisano wybrane sposoby otrzymywania nanosrebra z uwzględnieniem metod, w których wykorzystuje się ekstrakty roślinne.

Podział metod otrzymywania nanosrebra

Szybki rozwój nanotechnologii i dziedzin z nią związanych pozwolił na opracowanie wielu metod pozyskiwania nanosrebra. Każdy

ze sposobów niesie ze sobą szereg wad i zalet związanych z wydajnością procesu, stopniem trudności jego przeprowadzenia, czy kosztami realizacji. Wybór poszczególnej metody ma bezpośredni wpływ na jakość otrzymywanych wyników, tj. kształt i wielkość nanocząstek srebra, ich stabilność, obecność i orientację czynników stabilizujących na powierzchni nanomolekuł. Do elementów zależnych od wyboru sposobu prowadzenia syntezy można zaliczyć również wydajność reakcji i ilość powstających produktów ubocznych. Generalny podział sposobów pozyskiwania nanosrebra obejmuje dwie grupy metod: fizyczne i chemiczne. Metody chemiczne, w przeciwieństwie do metod fizycznych, opierają się na przeprowadzeniu reakcji chemicznej, a dokładniej, na redukcji jonów Ag^+ do Ag^0 [22].

Do fizycznych sposobów wytwarzania nanosrebra zalicza się ablację laserową i metodę w łuku elektrycznym.

Biologiczne sposoby wytwarzania nanocząstek srebra

Zastosowanie materiałów biologicznych w celu otrzymywania srebra nanocząsteczkowego stanowi interesującą alternatywę dla metod powszechnie stosowanych. Opracowano dwa główne nurty syntez nanosrebra: są to procesy, w których wykorzystuje się naturalne części roślin oraz te, w których materiałem biologicznym są drobnoustroje, tj. bakterie, wirusy i grzyby. Znana jest również metoda, w której kluczową rolę odgrywa miód pszczeli. W porównaniu z tradycyjnymi fizycznymi lub chemicznymi sposobami wytwarzania nanosrebra, zielone metody charakteryzują się znacznie większą liczbą korzyści. Ich podstawową zaletą jest brak negatywnego wpływu na środowisko, dzięki czemu są to metody, których idea jest zgodna z zasadami zielonej chemii. Brak konieczności stosowania syntetycznych odczynników sprawia, że koszt prowadzenia procesu jest mniejszy niż w przypadku realizacji tradycyjnych metod. Zaletą jest również łatwość realizacji procesu w skali przemysłowej. Łagodne warunki pracy, tj. ciśnienie atmosferyczne i temperatura nieprzekraczająca $100^\circ C$, pozwalają na zaklasyfikowanie tych procesów do grupy metod mało energo- i pracochłonnych. Realizacja zielonych syntez w przypadku stosowania roślin jest bardziej korzystna, gdyż nie ma konieczności przechowywania kultur bakterii w wymaganych przez nie warunkach. Otrzymane w wyniku biologicznych metod nanocząstki srebra mogą być z powodzeniem stosowane we wszystkich dziedzinach, które stanowią potencjalny cel aplikacyjny dla tradycyjnie wytwarzanego nanosrebra [23]. Dalej opisano sposoby prowadzenia zielonych syntez przy użyciu wybranych ekstraktów roślinnych.

Gnanadesigan i współpracownicy [24] opisują sposób wykorzystania namorzynowej rośliny, jaką jest *Rizophora mucronata*, czyli korzeniara ostrokończysta. Wcześniejsze badania wykazały, iż roślina ta charakteryzuje się antybakteryjnymi i antywirusowymi właściwościami, co potęguje pożądane właściwości wytwarzanego produktu. Analiza składu ekstraktu z liści korzeniara ostrokończystej potwierdziła, że znajduje się w nim szereg związków organicznych, takich jak alkaloidy, flawonoidy, polifenole, terpenoidy. Po 10 minutach inkubacji mieszaniny wodnego ekstraktu z roztworem azotanu (V) srebra, stwierdzono jej brązowo-żółte zabarwienie, co wskazywało na uformowanie się nanocząstek srebra. Otrzymaną suspensję odwirowano, a uzyskany osad skierowano na dalsze badania. Analiza UV-Vis wykazała, iż zawiesina nanosrebra wykazywała maksimum absorpcji przy długości fali równej 420 nm, co jest charakterystyczne dla srebra nano-

Autor do korespondencji:
Mgr inż. Jolanta PULIT, e-mail: jolantapulit@indy.chemia.pk.edu.pl

cząsteczkowego. Na podstawie badań na mikroskopie sił atomowych (AFM) ustalono, iż większość nanocząstek miała średnicę w zakresie od 60 do 95 nm [24].

W swojej pracy, Dwivedi i współpracownicy [25] użyli ekstraktu z liści komosy białej jako czynnika wywołującego powstawanie nanosrebra. Komosa biała występuje głównie w Azji, Ameryce Północnej i Europie. Obecność w ekstrakcie z komosy białej aldehydów, alkaloidów, karotenoidów, flawonoidów i innych substancji organicznych sprzyja powstawaniu stabilnych układów nanosrebra. Ponadto, w toku pracy zespołu, zostało potwierdzone, że substancje wchodzące w skład ekstraktu z komosy białej wykazują działanie grzybobójcze i antyutleniające. Zespół twierdzi, że czynnikiem odpowiedzialnym za redukcję były grupy karbonylowe, natomiast jony karboksylowe, otaczające powstające nanocząstki srebra, pełniły rolę stabilizatora suspensji.

Liście komosy białej pozyskano z Indii. W celu otrzymania suspensji nanosrebra, dodano wodny ekstrakt z liści komosy białej do roztworu azotanu srebra, który stanowił źródło jonów srebra. Po upływie ok. 15 min zauważono zmianę barwy układu na żółto-brązową, co świadczyło o pojawieniu się nanocząstek srebra. Zaobserwowano, iż wraz ze wzrostem ilości ekstraktu z liści komosy białej wobec stałej ilości azotanu srebra, barwa powstałej suspensji zmieniała się z czerwono-żółtej na czerwoną. Na podstawie badań UV-Vis stwierdzono, iż ilość powstającego nanosrebra jest silnie zależna od ilości użytego ekstraktu i rośnie wraz z jej wzrostem. Za pomocą mikroskopii TEM, zauważono, iż wielkość powstających nanocząstek srebra również się zmienia wraz ze zmianą ilości ekstraktu użytego do reakcji, mianowicie: im większy jest stosunek ilości substancji czynnych znajdujących się w ekstrakcie do azotanu srebra, tym mniejsze rozmiary mają powstające nanocząstki srebra. Analiza zdjęć TEM potwierdziła, iż w przypadku wyższych stężeń soli, otrzymywane cząstki miały większe rozmiary, które sięgały 90 nm, i ich liczebność również była znacznie wyższa. Zespół zaobserwował również, że czas reakcji skracał się w miarę podwyższania stężenia azotanu srebra. Analiza widm UV-Vis dostarczyła również informacji o postępie reakcji w miarę upływu czasu. Intensywność pików charakterystycznego dla nanosrebra była tym większa im dłużej próbka była inkubowana. Widocznych zmian położenia maksimum pików nie zauważano po czasie inkubacji równym 2 godzin. Badano również wpływ temperatury prowadzenia procesu na jakość uzyskiwanych wyników. Okazało się, że intensywność pików na widmie UV-Vis wzrastała wraz ze wzrostem temperatury otrzymywania nanocząstek srebra. Prawdopodobnie jest to związane z intensyfikacją procesu aglomeracji w podwyższonej temperaturze. Innym czynnikiem oddziałującym na postęp reakcji jest pH. Zespół analizował wpływ pH (od 2 do 10) poprzez pomiar potencjału elektrokinetycznego. Okazało się, iż powstałe suspensje były stabilne w szerokim zakresie pH, o czym świadczyła duża wartość bezwzględna potencjału elektrokinetycznego. Ponadto ustalono, że w przypadku niższych wartości pH, suspensja charakteryzuje się mniejszą stabilnością, co może być wytłumaczone faktem pozyskiwania większych nanocząstek srebra w warunkach niższego pH. Na podstawie technik mikroskopowych zaobserwowano, że zdecydowana większość uzyskanych nanocząstek srebra miała kształt kulisty i otrzymane suspensje można było uznać za jednorodną [25].

Bar i współpracownicy [26] opisali otrzymywanie nanosrebra z wykorzystaniem wodnego ekstraktu z nasion jatrofy przeczyszczającej. Surowiec ten składa się z tłuszczów, białka, węglowodanów i wody. Występujące najliczniej kwasy tłuszczowe, to kwas oleinowy, kwas linolenowy, kwas palmitynowy i kwas stearynowy. Zespół uważa, że biomolekuły, które w swojej strukturze posiadają grupy karbonylowe hydroksylowe i aminowe, są odpowiedzialne za redukcję jonów srebra oraz jednocześnie, jako cząsteczki mające duże masy cząsteczkowe, za stabilizację nowopowstających nanocząstek srebra. Autorzy doprecyzowują, że czynnikiem zabezpieczającym przed aglomeracją nanomolekuł mogą być związki lateksowe obecne w wyciągu z nasion jatrofy przeczyszczającej.

Przygotowanie zawiesiny srebra koloidalnego polegało na zmieszaniu wodnego ekstraktu z roztworem azotanu (V) srebra. Po upływie ok. 15 min układ przybrał barwę czerwoną, co wizualnie świadczy o pojawieniu się nanocząstek srebra. Zostało to również potwierdzone spektroskopią UV-Vis, gdyż maksimum pików na widmie usytuowane było w okolicy $\lambda=425$ nm. Gdy stężenie soli powziętej do reakcji wzrastało, maksima pików przesuwały się ku podczerwieni, a odpowiadająca im wartość absorpcji rosła. Towarzyszyła temu zmiana barwy suspensji z żółto-czerwonej na ciemnoczerwoną. Analizy mikroskopowe (TEM) wykazały, że w przypadku stosowania 0,001M roztworu azotanu srebra utworzone nanocząstki miały kształt sferyczny, a ich średni rozmiar zawarty był w przedziale od 15 do 25 nm. Dla wyższego stężenia użytej soli, wielkość nanocząstek sięgała 50 nm. Zespół twierdzi, że otrzymane tą metodą suspensje nanocząstek srebra są stabilne przez okres dwóch miesięcy, pod warunkiem, że znajdują się w ciemnym pomieszczeniu [26].

Kasthuri i współpracownicy [27] użyli liści lawsonii bezbronnej jako źródło apiny należącej do flawonoidów, która była w stanie zredukować jony srebra, gdyż w swojej strukturze zawiera grupy hydroksylowe i karbonylowe. Zespół twierdzi, że zastosowanie ekstraktu z liści lawsonii bezbronnej niesie ze sobą wiele profitów ekonomicznych, a otrzymywanie suspensji stabilnych przez długi czas jest powtarzalne. Liście lawsonii bezbronnej znane są ze swojej skuteczności w zwalczaniu wrzodów jamy ustnej, żołądka, poparzeń, obrzęków i krost ospy. W kosmetyce zielnej, liście lawsonii mają właściwości wygładzające skórę, poprawiają ukrwienie i koloryt skóry oraz włosów.

Po przygotowaniu ekstraktu w temperaturze pokojowej, połączono go z wodnym roztworem azotanu srebra i mieszano. Ilości ekstraktu i soli były zmieniane w każdej próbie. W miarę upływu czasu zauważano zmianę koloru mieszaniny na ciemnożółtą. Autorzy twierdzą, że tak przygotowane suspensje pozostawały wizualnie stabilne przez następne trzy miesiące. Przeprowadzono badanie UV-Vis układu otrzymanego przez zmieszanie ekstraktu z roztworem azotanu srebra po różnych czasach postępu reakcji. Wraz z upływem czasu, maksima pików na widmie UV-Vis miały coraz większą wartość, a ich położenie znajdowało się przy $\lambda=456$ nm. Mikroskopia TEM wykazała, że otrzymane nanocząstki srebra miały kulisty kształt, ich średni rozmiar wynosił ok. 39 nm, a ich rozmieszczenie było homogeniczne, choć rzadkie [27].

Podsumowanie

Pomimo faktu, iż chemiczne i fizyczne metody wciąż stanowią główny nurt syntezy nanosrebra, to coraz więcej uwagi poświęca się sposobom biologicznym, a zwłaszcza tym, w których wykorzystuje się substancje pochodzenia roślinnego. Podyktowane jest to chęcią pełniejszego poznania cech i właściwości materiałów roślinnych, dzięki którym może on być stosowany w procesach nanotechnologicznych. Kierunkowi temu towarzyszy kilka zalet, do których zalicza się np. możliwość zredukowania ilości stosowanych substratów otrzymywanych na drodze syntetycznej. Atutem metod ekstrakcyjnych jest również ograniczona ilość stosowanych odczynników, gdyż działanie czynników redukującego i stabilizującego, których dodatek wymagany jest w realizacji tradycyjnych metod, jest zapewnione poprzez zastosowanie pojedynczego ekstraktu roślinnego pozyskiwanego na drodze sporządzania wodnego naparu.

Podziękowania

Praca jest częścią projektu „Synteza i zastosowanie innowacyjnych nanomateriałów o właściwościach antybakteryjnych” wspieranego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy nr LIDER/03/146/L-3/11/NCBR/2012 na okres 2012–2015.

Literatura

1. Krishnaraj C., Jagan E.G., Rajasekar S., Selvakumar P., Kalaichelvan P.T., Mohan N.: *Synthesis of silver nanoparticles using *Acalypha indica* leaf extracts and its antibacterial activity against water borne pathogens*. *Colloids and Surfaces B* 2010, **76**, 1, 50.

2. Khalil M.M.H., Ismail E.H., El-Magdoub F.: *Biosynthesis of Au nanoparticles using olive leaf extract*. Arabian Journal of Chemistry 2012, 5, 4, 431.
3. Ghodake G.S., Deshpande N.G., Lee Y.P., Jin E.S.: *Pear fruit extract-assisted room-temperature biosynthesis of gold nanoplates*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2010, 75, 2, 584.
4. Castro L., Blázquez M.L., González F., Munoz J.A., Ballester A.: *Extracellular biosynthesis of gold nanoparticles using sugar beet pulp*. Chemical Engineering Journal 2010, 164, 1, 92.
5. Narayanan K.B., Sakthivel N.: *Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes*. Advances in Colloid and Interface Science 2010, 156, 1–2, 1.
6. Otari S.V., Patil R.M., Nadaf N.H., Ghosh S.J., Pawar S.H.: *Green biosynthesis of silver nanoparticles from an actinobacteria Rhodococcus Sp.* Materials Letters 2012, 72, 1, 92.
7. Krpeti Z., Scar G., Caneva E., Speranza G., Porta F.: *Gold Nanoparticles Prepared Using Aloe Active Components*. Langmuir 2009, 25, 13, 7217.
8. Shankar S.S., Rai A., Ahmad A., Sastry M.: *Rapid synthesis of Au, Ag, and bimetallic Au core Ag shell nanoparticles using Neem (Azadirachta indica) leaf broth*. Journal of Colloid and Interface Science 2004, 275, 2, 496.
9. Mondal A.K., Mondal S., Samanta S., Mallick S.: *Synthesis of Ecofriendly Silver Nanoparticle from Plant Latex used as an Important Taxonomic Tool for Phylogenetic Interrelationship*. Advances in Bioresearch 2011, 2, 1, 122.
10. Li S., Shen Y., Xie A., Yu X., Qiu L., Zhang L., Zhang Q.: *Green synthesis of silver nanoparticles using Capsicum annuum L extract*. Green Chemistry 2007, 9, 852.
11. Patent Application no. 5000928, USA.
12. Ahamed M., AlSalhi M.S., Siddiqui M.K.J.: *Silver nanoparticles applications and human health*. Clinica Chimica Acta 2010, 411, 23–24, 1841.
13. Guzmán M.G., Dille J., Godet S.: *Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and their antibacterial activity*. International Journal of Chemical and Biological Engineering 2008, 2, 3, 104.
14. Nagarajan B., Jaiprakashnarain G.B.: *Design and application of nano silver based POU appliances for disinfection of drinking water*. Indian Journal of Science and Technology 2009, 2, 8, 5.
15. Sotiriou G.A., Teleki A., Camenzind A., Krumeich F., Meyer A., Panke S., Pratsinis S.E.: *Nanosilver on nanostructured silica: Antibacterial activity and Ag surface area*. Chemical Engineering Journal 2011, 170, 2–3, 547.
16. Szczepanowicz K., Stefańska J., Socha R.P., Warszński P.: *Preparation of silver nanoparticles via chemical reduction and their antimicrobial activity*. Physicochemical Problems of Mineral Processing 2010, 45, 85.
17. Patent Application no. 762753 B2, USA.
18. HYPERLINK http://www.alibaba.com/product-gs/255092106/Soft_Mining_Bristles_329A_4_nano.html 10.2012 r.
19. HYPERLINK <http://www.mydelkoznanosrebrem.pl/> 10.2012 r.
20. Patent Application no. 0287112 A1, USA.
21. Kowalski Z., Makara A., Banach M., Kowalski M.: *Zastosowanie preparatów nanosrebra do oczyszczania powietrza z instalacji klimatyzacyjnej zakładów mięsnych*. Przemysł Chemiczny 2010, 89, 4, 434.
22. Chaloupka K., Malam Y., Seifalian A.M.: *Nanosilver as a new generation of nanoparticle in biomedical applications*. Trends in Biotechnology 2010, 28, 11, 580.
23. Kaviya S., Santhanalakshmi J., Viswanathan B.: *Biosynthesis of silver nano-flakes by Crossandra infundibuliformis leaf extract*. Materials Letters 2012, 67, 1, 64.
24. Gnanadesigan M., Anand M., Ravikumar S., Maruthupandy M., Vijayakumar V., Selvam S., Dhineshkumar M., Kumaraguru A.K.: *Biosynthesis of silver nanoparticles by using mangrove plant extract and their potential mosquito larvicidal property*. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine 2011, 4, 10, 799.
25. Dwivedi A.D., Gopal K.: *Biosynthesis of silver and gold nanoparticles using Chenopodium album leaf extract*. Colloids and Surfaces A 2010, 369, 1–3, 27.
26. Bar H., Bhui D.K., Sahoo G.P., Sarkar P., Pyne S., Misra A.: *Green synthesis of silver nanoparticles using seed extract of Jatropha curcas*. Colloids and Surfaces A 2009, 348, 1–3, 212.
27. Kasthuri J., Veerapandian S., Rajendiran N.: *Biological synthesis of silver and gold nanoparticles using apiin as reducing agent*. Colloids and Surfaces B 2009, 68, 1, 55.

* Mgr inż. Jolanta PULIT – ukończyła studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej (2010). Obecnie jest doktorantką w Instytucie Chemii i Technologii Nieorganicznej na Politechnice Krakowskiej. Specjalność – Lekka Technologia Organiczna.
jolantapulit@indy.chemia.pk.edu.pl

Dr hab. inż. Marcin BANACH – ukończył studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej (2006). Jest adiunktem na tej uczelni. Specjalność – technologia chemiczna nieorganiczna.

Z prasy światowej – innowacje: odkrycia, produkty i technologie

From the world press – innovation: discoveries, products and technologies

dokończenie ze strony 38

Reaktor do pirolizy tworzyw sztucznych

Piroliza plastików jest uważana za jedną z najbardziej użytecznych metod regeneracji energii, ponieważ tworzywa sztuczne są cennym źródłem paliw płynnych i gazowych, jak również chemikaliów. Według dotychczasowych badań, proces pirolizy tych materiałów powinien być podzielony na kilka etapów, w tym: topnienie, piroliza z odparowaniem substancji lotnej i tworzenie się koksu. Każdy z tych procesów ma inne wymagania energetyczne, dlatego też zastosowanie reaktorów stopniowych (ang. *stagewise reactors*) jest w tym wypadku niezwykle trafnym wyborem.

Naukowcy z Tongji University w Szanghaju, na łamach Chemical Engineering Journal prezentują innowacyjny reaktor do pirolizy odpadowych tworzyw sztucznych, którego konstrukcja dopasowana została do szeregu procesów zachodzących podczas pirolizy. W konstrukcji tej reaktor z pionowo spływającą warstwą cieczy został przystosowany do pirolizy stopionych tworzyw sztucznych, które charakteryzuje wysoka lepkość. Efektywność pracy reaktora wykazano poprzez symulację procesu pirolizy stopionego polipropylenu w reaktorze rurowym o długości pół metra. (kk)

(L.J. Yin, D.Z. Chen, H. Wang, X.B. Ma, G.M. Zhou, *Simulation of an innovative reactor for waste plastics pyrolysis*, Chemical Engineering Journal 237 (2014) 229–235)

Nowoczesne technologie fotowoltaiczne

W ciągu ostatniej dekady rynek technologii fotowoltaicznych niezwykle się rozwinął. W tym samym czasie ceny modułów fotowoltaicznych spadły o ponad 80%. Zmniejszenie kosztów produkcji może być przede wszystkim przypisane do zwiększenia skali produkcji i postępu technologicznego. W przypadku ogniw z krystalicznego krzemu, postęp ten osiągnięto głównie dzięki poprawie jakości emiterów. Dla dalszego zwiększenia wydajności ogniw krzemowych wymagane są nowe i ulepszone procesy technologiczne. Jednak, ze względu na znacznie zmniejszone koszty produkcji wafli krzemowych, ogniw i modułów, nowe technologie, aby były opłacalne, muszą być bardzo proste i wykazywać znaczną poprawę sprawności. Ukazuje się, iż korzystanie ze zoptymalizowanego emitera i metalizowanych krystalicznych wafli krzemowych zwiększa efektywność ogniw do 19,9%, a po pasywacji nawet do 21,0%. Wymiana kontaktów na zbudowane z niklu i miedzi zwiększa efektywność do 21,3% – jest to jak do tej pory najwyższa odnotowana wartość. (kk)

(A. Metz et al, *Industrial high performance crystalline silicon solar cells and modules based on rear surface passivation technology*, Solar Energy Materials & Solar Cells 120 (2014) 417–425)

dokończenie na stronie 52