

Mikrofalowe solwotermalne syntezy nanocząstek

Microwave Solvothermal Synthesis nanoparticles

Witold Łojkowski, Krzysztof Ejsmont

Politechnika Białostocka, Wydział Zarządzania, Katedra Informatyki Gospodarczej i Logistyki

Abstract

The article presents the method of Microwave Solvothermal Synthesis of nanoparticles (MSS). It facilitates the generation of particles of second generation which are covered with carefully chosen molecules. It gives the possibility to use their specialized properties in various scientific areas and what is more, it takes part in the development of technologies in industry. A Laboratory of Nanostructures for Photonic and Nanomedicine, which is located in the Institute of High Pressure Physics, has also been presented. The Laboratory, has been working on the development and improvement of MSS technology since 2002. Moreover, the article presents the reactors which are owned by the Institute and which enable this synthesis as well as the example of MSS technology which allows to obtain quantum dots of zinc oxide.

Furthermore, main features and advantages of this method, which confirm the belief that it is worth continuing research on its development, have been mentioned. At the end of this article two research projects which relate to the use of the MSS technology on a large scale and which serve a crucial role in amelioration of human life, have been shown.

Keywords: Microwave Solvothermal Synthesis (MSS), nanoparticles, Laboratory of Nanostructures for Photonic and Nanomedicine

Wstęp

Nanocząstki są to uporządkowane zespoły wieloatomowe, odznaczające się bardzo niewielkimi rozmiarami (o średnicy poniżej 100 nm), stanowiące formę pośrednią,

między pojedynczymi atomami, a kryształami o makroskopowych rozmiarach. Układy tego typu nazywane również bywają nanoklastkami¹.

Wśród nanocząstek można wyróżnić:

- cząstki pierwszej generacji, czyli zwykłe cząstki,
- cząstki drugiej generacji: pokryte specjalnie dobranymi molekułami
- (sfunkcjonalizowane),
- cząstki trzeciej generacji: nanoroboty o złożonej nanostrukturze stosowane, np. do celowego dostarczania i uwalniania leków, a także obrazowania².

Celem artykułu jest zaprezentowanie metody mikrofalowej solwotermalnej syntezy nanocząstek, która rozwijana jest w Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny od 2002 roku. Dzięki tej metodzie, możliwe jest uzyskanie cząstek drugiej generacji, a co za tym idzie realizacja wielu złożonych projektów, które mają służyć znacznej poprawie stosowanych technologii. Artykuł dostarcza informacji o Laboratorium, a także opisuje stosowaną metodę i projekty przez nią realizowane.

1. Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny

Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny mieści się w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN, którego siedziba znajduje się w Warszawie. Specjalnością Laboratorium są syntezy nanocząstek (o rozmiarach od 5 do 100 nm) oraz wykorzystywanie ich w praktyce.

Dzięki rozwiniętej przez Laboratorium technologii **mikrofalowo-solvotermalnej syntezy nanocząstek (MSS)**, produkowane są nanocząstki o wysokiej czystości, jednorodnym rozkładzie wielkości oraz pokryte warstwą molekuł nadających im specjalne funkcje. Technologia ta jest bardzo elastyczna, co pozwala dostosować ofertę Laboratorium do potrzeb firm z którymi ono współpracuje.

Laboratorium dysponuje aparaturą, dzięki której może dokonywać analizy morfologicznej nanoproszków, badać ich wielkość, skład fazowy, gęstość, powierzchnię właściwą, czy napięcie powierzchniowe. Laboratorium posiada także

¹ Gniewek A., Trzeciak A. M., 2009. *Nanocząstki metali przejściowych – synteza i aktywność katalizacyjna*. (w:) *Wiadomości chemiczne*. Polskie Towarzystwo Chemiczne, Wydział Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław, s. 5.

² Łojkowski W., 2004. *Nano and Micro Technology in Poland*. Country Report, Warszawa.

unikalne reaktory własnej konstrukcji³. Dzięki temu, świadczy ono usługi badawcze w zakresie:

- charakterystyki materiałów, a szczególnie nanostruktur,
- otrzymywania nanoproszków i nanoceramik⁴.

W Instytucie realizowane oraz koordynowane są obecnie następujące projekty wykorzystujące technologię MSS:

1. OXYNANOSEN,
2. Projekt POiG CePT,
3. BIOIMPLANT,
4. NANOFATE,
5. SONOSCA,
6. NANOFORCE,
7. THERMOLAB - ISS⁵.

W dalszej części artykułu zostaną szczegółowiej opisane projekty OXYNANOSEN oraz BIOIMPLANT.

2. Mikrofalowo-Solwotermalna Synteza nanocząstek

Mikrofalowo-Solwotermalna Synteza nanocząstek zapewnia:

- krótkie czasy syntezy (wynoszące do 60 sekund),
- jednorodność rozmiarów,
- czystość składu (nie wprowadzane są zanieczyszczenia),
- funkcjonalizacja powierzchni nanocząstek molekułami organicznymi⁶.

Dzięki tej metodzie możliwe jest uzyskanie gęstości mocy w cieczy reakcyjnej sięgającej 10 W/ml, co odpowiada 10 MW/Litr. W czasie syntezy nie są wprowadzane zanieczyszczenia. Mieszanina reakcyjna jest dobrze wymieszana, a produkt jednorodny i dobrze skryształizowany. Proces jest ekologiczny i energooszczędny⁷.

³ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/>, stan z dn. 12.07.2011 r.

⁴ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=usugi>, stan z dn. 12.07.2011 r.

⁵ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=projekty>, stan z dn. 12.07.2011 r.

⁶ Łojkowski W., Blizzard J. R., Narkiewicz U., Fidelus J. D., 2007. *Doped Nanopowders, Synthesis, Characterisation, Applications, Solid State Phenomena*.

⁷ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z dn. 12.07.2011 r.

Cechami syntezy solwotermalnej są:

- czystość,
- energooszczędność,
- możliwość natychmiastowego obtoczenia cząstki grupami funkcyjnymi,
- bezpieczeństwo, które wynika z otrzymywania nanocząstek w zawiesinie cieczy⁸.

Odnosząc się do chemicznej definicji syntezy solwotermalnej można stwierdzić, że jest to synteza z użyciem rozpuszczalnika pod zwiększonym ciśnieniem (od 1 atm do 10000 atm) w temperaturze pomiędzy 100 a 1000°C. Gdy rozpuszczalnikiem jest woda, wówczas mamy do czynienia z syntezą hydrotermalną⁹. Są to więc syntezy łączące metodę gazową i reakcję w roztworach. Prowadzi się je w cieczach lub cieczach nadkrytycznych (posiadających pośrednie właściwości między cieczą a gazem)¹⁰. W temperaturze 150-400°C i ciśnieniu do 50MPa metody te umożliwiają otrzymanie nanoproszków o wielkości cząstek do 10nm i wysokiej czystości chemicznej. W przypadku syntezy solwotermalnej, podczas procesu można prowadzić domieszkowanie związków podstawowych. Domieszki są wbudowywane w sieć krystaliczną w sposób równomierny, ponieważ w temperaturze procesu dyfuzja praktycznie nie zachodzi i w związku z tym domieszka ani nie aglomeruje, ani nie segreguje¹¹.

Ciekawym przykładem obrazującym syntezę solwotermalną jest otrzymywanie kropek kwantowych tlenku cynku (II) - ZnO¹². Proces ten przebiega w następujący sposób:

1. octan cynku rozpuszcza się w dwupropanolu przy temperaturze 50°C,
2. roztwór ochładza się do 0°C i dodaje wodorotlenek sodu (NaOH), dzięki czemu wytrąca się ZnO,

⁸ Rizzuti A., Corradi A., Leonelli C., Rosa R., Pielaszek R., Łojkowski W., 2010. *Microwave technique applied to the hydrothermal synthesis and sintering of calcia stabilized zirconia nanoparticles*. Journal of Nanoparticle Research 12 (1), 2010, s. 327-335.

⁹ Gazda M., 2011. *Dyfuzja i jej zastosowania*. Politechnika Gdańska - Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Gdańsk.

¹⁰ Opalińska A., Leonelli C., Łojkowski W., Pielaszek R., Grzanka E., Chudoba T., Matysiak H., Wejrzanowski T., Kurzydłowski K. J., 2006. *Effect of Pressure on Synthesis of Pr-Doped Zirconia Powders Produced by Microwave-Driven Hydrothermal Reaction*. Journal of Nanomaterials, Volume 2006, Hindawi Publishing Corporation, s. 1-8.

¹¹ Kurzydłowski K. J., Lewandowska M., 2010. *Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

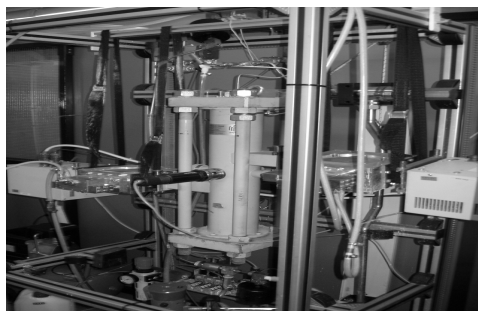
¹² Tomaszewska-Grzeda A., Łojkowski W., Godlewski M., Yatsunenko S., Drozdowicz-Tomsia K., Goldys E., Phillips M. R., 2005. *Growth and characterization of ZnO nanoparticles*. ACTA PHYSICA POLONICA A 108 (5), Wyd. Polska Akademia Nauki, Instytut Fizyki, Warszawa, s. 897-902.

3. ogrzewa się roztwór do 65°C przez pewien czas, aby kryształy ZnO mogły rosnąć, a następnie dodaje się dodecaethiol, aby przerwać wzrost,
4. w efekcie otrzymuje się podłużne nanokryształy ZnO¹³.

Aby uzyskać mikrofalową solwotermalną syntezę nanocząstek należy posiadać wysoce wyspecjalizowaną aparaturę. Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny dysponuje dwoma reaktorami mikrofalowo-przepływowymi. W celu ich rozróżnienia zostały one nazwane MSS-1 oraz MSS-2.

Reaktor mikrofalowy przepływowy MSS-1

Zdobył złoty medal na międzynarodowej wystawie w Sankt Petersburgu w 2010 roku. Pozwala on prowadzić syntezy w cieczy powyżej temperatury jej wrzenia w ciśnieniu atmosferycznym. Dzięki temu, czas procesu może być skrócony co najmniej 10 razy w porównaniu z większością syntez nanocząstek w syntezach chemicznych¹⁴. Reaktor ten został przedstawiony na rysunku 1.



Źródło: Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny. Witryna internetowa: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z 12.07.2011 r.

Rys. 1. Reaktor mikrofalowo-przepływowy MSS-1

¹³ Gazda M., 2011. *Dyfuzja i jej zastosowania*. Politechnika Gdańska - Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Gdańsk.

¹⁴ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=reaktor-mikrofalowy-przeplywowym-mss-1>, stan z dn. 12.07.2011 r.

Reaktor mikrofalowy przepływowy MSS-2

Pochodzi z serii MSS-N, a więc coraz doskonalszych reaktorów. Został wykonany dzięki współpracy trzech polskich jednostek:

- firma zaawansowanych technologii Ertec Poland,
- Instytut Technologii Eksploatacji - PIB,
- Instytut Wysokich Ciśnień - PAN.

Mikrofalowy, ciśnieniowy reaktor chemiczny MSS-2 służy do przeprowadzania procesów solvo i hydrotermalnych syntez mikrofalowych, w których uzyskuje się nanoproszki o założonych rozmiarach ziaren i morfologii.

Zastosowane w reaktorze rozwiązania pozwalają na uzyskiwanie ultraczystych nanoproszków w skali produkcyjnej i doświadczalnej. Opracowane wyspecjalizowane wysokotemperaturowe uszczelnienia ciśnieniowe umożliwiają wprowadzanie substratów, a także prowadzenie procesów oraz odprowadzanie produktów w torach wykonanych z materiałów obojętnych chemicznie.

Uzyskana objętość komory procesowej oraz automatyzacja prowadzenia procesów w trybie pracy *stopped flow* zapewniają osiąganie niespotykanej w innych rozwiązaniach wydajności produkcji nanoproszków.

System sterowania urządzeniem jest zgodny z normą PN-EN 61512 (ANSI/ISA-S88.01 *Batch Control*) i umożliwia, m.in.: monitorowanie stanu urządzenia, monitorowanie i zapis parametrów procesów, przeprowadzanie procesów w trybie sterowania ręcznego, półautomatycznego i automatycznego (sterowanie proceduralne)¹⁵. Opisany powyżej reaktor zaprezentowany został na rysunku 2.

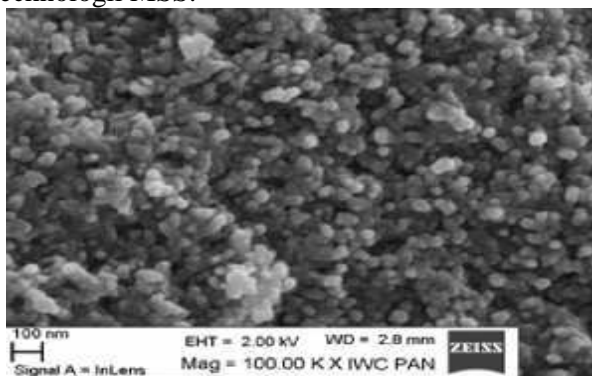


Źródło: Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny. Witryna internetowa: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z 12.07.2011 r.

Rys. 2. Reaktor mikrofalowo-przepływowy MSS-2

¹⁵ Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=reaktor-mikrofalowy-przepywowy-mss-2>, stan z dn. 12.07.2011 r.

Na rysunku 3 zaprezentowany został przykład nanocząstek uzyskanych dzięki wykorzystaniu technologii MSS.



Źródło: Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny. Witryna internetowa: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z 12.07.2011 r.

Rys. 3. Obraz mikroskopowy nano-HAP

Powyżej przedstawiona została synteza nano-HAP jako materiału dla regeneracji tkanki kostnej. HAP to Hydroksyapatyt, materiał z którego są zbudowane kości. W wyniku syntezy metodą MSS otrzymano nano-HAP o rozmiarze cząstek 9 nm, czyli podobny do tego, jaki występuje w tkance kostnej. Nanocząstki zostaną wykorzystane do konstrukcji *Scaffoldu*, czyli rusztowania stosowanego do leczenia pacjentów ze znacznymi ubytkami kości po operacjach onkologicznych lub wypadkach. Komórki kości pacjenta obrastają rusztowanie, zarastają lukę, a następnie rusztowanie po pewnym czasie zostaje zresorbowane. Rusztowanie zawiera czynniki organiczne stymulujące zarastanie luki i działające leczniczo¹⁶.

Projekty badawcze realizowane przez Laboratorium, w których wykorzystuje się metodę MSS zostały wymienione na początku artykułu. Teraz zostaną przedstawione dwa z nich.

OXYNANOSEN

Pełna nazwa projektu brzmi: „Nowy optyczny sensor tlenu na bazie nano-tlenku cyrkonu do ochrony życia i zdrowia oraz ochrony środowiska”. Jest on realizowa-

¹⁶ Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z dn.12.07.2011 r.

ny od dnia 29.04.2009 r., a data jego zakończenia to 28.04.2012 r. Finansowany jest głównie przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW).

Partnerzy projektu to:

1. Instytut Wysokich Ciśnień, Polska Akademia Nauk - koordynator,
2. Institute of Solid State Physics, University of Latvia,
3. Bar-Ilan University, Israel,
4. University of Modena and Reggio Emilia.

Kontrola zawartości tlenu w atmosferze jest niezbędna w wielu dziedzinach życia ludzkiego: w medycynie (np. anestezjologia), w przemyśle (np. górnictwym, hutniczym, motoryzacyjnym), podczas procesów spalania, w ciepłarniach oraz w zamkniętych pomieszczeniach. Przedmiotem projektu OXYNANOSSEN jest budowa prototypu zaawansowanego luminescencyjnego sensora tlenu opartego na nanomateriałach ceramicznych.

Genezą projektu było odkrycie zjawiska silnego wpływu stężenia parcjalnego tlenu na właściwości luminescencyjne nanokrystalicznego ZrO_2 , charakteryzującego się dużą powierzchnią właściwą (powyżej $100 \text{ m}^2/\text{g}$). Badania wykazały, że im mniejsza jest koncentracja tlenu, tym większa intensywność luminescencji. Prawdopodobną przyczyną obserwowanego efektu sensorycznego jest zależność gęstości defektów na powierzchni nanocząstek wzmacniających intensywność luminescencji, od stężenia parcjalnego atomów tlenu w otoczeniu. Weryfikacja tego założenia oraz stworzenie modelu zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za efekt sensoryczny jest jednym z głównych zadań projektu.

Oczekiwany rezultat projektu jest więc uzyskanie optycznego sensora tlenu, który służyć będzie ochronie życia i zdrowia oraz ochronie środowiska¹⁷.

BIOIMPLANT

Pełny tytuł projektu to: „Bio-implanty dla potrzeb leczenia ubytków tkanki kostnej u chorych onkologicznych”. Czas realizacji projektu to okres od stycznia 2010 roku do grudnia 2013 roku. Finansowany jest on głównie przez dotacje przeznaczone na realizację Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013. Jako priorytet Program ten zakłada skoncentrowanie się na badaniu i rozwoju nowoczesnych technologii.

Partnerzy projektu to:

1. Politechnika Warszawska,

¹⁷ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=oxynanosen>, stan z dn. 12.07.2011 r.

2. Centrum Onkologii - Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie,
3. Politechnika Wroclawska,
4. Warszawski Uniwersytet Medyczny.

Głównym celem projektu jest opracowanie nowoczesnych technologii w zakresie inżynierii tkankowej, wspomagających leczenie chorób nowotworowych, stanowiących drugą, co do częstości przyczynę zgonów oraz 17% przyczyn utraty zdrowia. Rozwój tych technologii wpłynie na poprawę innowacyjności oraz konkurencyjności polskiej biotechnologii, jak również na wzrost gospodarczy kraju, a także budowę gospodarki opartej na wiedzy.

W szczególności, projekt koncentruje się na opracowaniu i przygotowaniu do wdrożenia nowatorskich produktów inżynierii tkankowej (bioimplantów), wspomagających regenerację i odtworzenie rozległych ubytków tkanek kostnych, które powstają w wyniku usuwania nowotworu.

Jako efekt końcowy projektu, przewiduje się opracowanie metody leczenia onkologicznych ubytków kostnych w okolicy twarzoczaszki człowieka z zastosowaniem innowacyjnych technologii pozwalających wytworzyć produkt inżynierii tkankowej „na miarę” dla pacjenta oraz dokonać jego implantacji stosując komputerowe systemy wspomagania operacji¹⁸.

Podsumowanie

Metoda solwotermalnej syntezy nanocząstek służy do wytwarzania nano-metali, półprzewodników, ceramik, polimerów. Dzięki jej zastosowaniu można otrzymać każdy materiał. Nanocząstki otrzymuje się w zawiesinie cieczy, co zapewnia bezpieczeństwo, a możliwość natychmiastowego otoczenia ich grupami funkcyjnymi zwiększa ich wykorzystanie oraz funkcjonalność. Przeprowadzany proces jest ponadto ekologiczny i energooszczędny, co pozwala na wykonywanie go bez ryzyka zanieczyszczenia środowiska, czy postępowania wbrew Idei Zrównoważonego Rozwoju.

Metoda MSS stosowana i stale rozwijana w Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny od 2002 roku jest wykorzystywana w wielu ważnych Projektach. Dzięki specjalnym właściwościom uzyskanych nanocząstek, możliwe staje się uzyskiwanie wymiernych korzyści w wielu dziedzinach, szczególnie związanych z inżynierią materiałową oraz medycyną.

¹⁸ *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=bioimplant>, stan z dn. 12.07.2011 r.

Piśmiennictwo

1. Gniewek A., Trzeciak A. M., 2009. *Nanocząstki metali przejściowych – synteza i aktywność katalityczna*. (w:) *Wiadomości chemiczne*. Polskie Towarzystwo Chemiczne, Wydział Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław, s. 5.
2. Łojkowski W., 2004. *Nano and Micro Technology in Poland*. Country Report, Warszawa.
3. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/>, stan z dn. 12.07.2011 r.
4. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=usugi>, stan z dn. 12.07.2011 r.
5. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=projekty>, stan z dn. 12.07.2011 r.
6. Łojkowski W., Blizzard J. R., Narkiewicz U., Fidelus J. D., 2007. *Doped Nanopowders, Synthesis, Characterisation, Applications*, Solid State Phenomena.
7. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z dn. 12.07.2011 r.
8. Rizzuti A., Corradi A., Leonelli C., Rosa R., Pielaszek R., Łojkowski W., 2010. *Microwave technique applied to the hydrothermal synthesis and sintering of calcia stabilized zirconia nanoparticles*. *Journal of Nanoparticle Research* 12 (1), 2010, s. 327-335.
9. Gazda M., 2011. *Dyfuzja i jej zastosowania*. Politechnika Gdańska - Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Gdańsk.
10. Opalińska A., Leonelli C., Łojkowski W., Pielaszek R., Grzanka E., Chudoba T., Matysiak H., Wejrzanowski T., Kurzydłowski K. J., 2006. *Effect of Pressure on Synthesis of Pr-Doped Zirconia Powders Produced by Microwave-Driven Hydrothermal Reaction*. *Journal of Nanomaterials*, Volume 2006, Hindawi Publishing Corporation, s. 1-8.
11. Kurzydłowski K. J., Lewandowska M., 2010. *Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
12. Tomaszewska-Grzeda A., Łojkowski W., Godlewski M., Yatsunenکو S., Drozdowicz-Tomsia K., Goldys E., Phillips M. R., 2005. *Growth and characterization of ZnO nanoparticles*. *ACTA PHYSICA POLONICA A* 108 (5), Wyd. Polska Akademia Nauk, Instytut Fizyki, Warszawa, s. 897-902.
13. Gazda M., 2011. *Dyfuzja i jej zastosowania*. Politechnika Gdańska - Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Gdańsk.
14. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=reaktor-mikrofalowy-przeptywow-y-mss-1>, stan z dn. 12.07.2011 r.

15. Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=reaktor-mikrofalowy-przeplywowo-mss-2>, stan z dn. 12.07.2011 r.
16. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=synteza>, stan z dn.12.07.2011 r.
17. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=oxynanosen>, stan z dn. 12.07.2011 r.
18. *Laboratorium Nanostruktur dla Fotoniki i Nanomedycyny*. Witryna internetowa. Tryb dostępu: <http://w3.unipress.waw.pl/nano/index.php?id=bioimplant>, stan z dn. 12.07.2011 r.